



**OPZIONI E PROSPETTIVE
PER IL TRASPORTO MARITTIMO,
AEREO E STRADALE
AL 2030 E AL 2050**

RAPPORTO RIE PER UNEM





Opzioni e prospettive per il trasporto marittimo, aereo e stradale al 2030 e al 2050

Il presente studio è stato condotto da RIE-Ricerche Industriali ed Energetiche in collaborazione con il Prof. Ing. Bruno dalla Chiara, Professore Ordinario di Sistemi di Trasporto presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino e l'Ing. Andrea Rosa, esperto di modellistica matematica dei trasporti.

Si ringraziano i componenti del Gruppo Strategico "Carburanti ed Energie Alternative" istituito nel 2018 da Unione Petrolifera, ora Unione Energie per la Mobilità – unem, e i partecipanti ai Workshop organizzati dal Gruppo:

Trasporto Marittimo

Gianpiero De Cubellis (Warstilia)
Fabio Faraone (Confitarma)
Franco Porcellacchia (Carnival Corporation)
Giovanni Vallarino (DNV GL)

Trasporto Aereo

Giovanni Barraco (Direzione Nazionale Navigazione ENAC)
Davide Chiamonti (Università di Firenze)
Antonio De Palmas (Presidente BOEING Italia)
Davide Faedo (Innovhub)
Luigi Nunziata (Fuel Management Alitalia)

Trasporto Stradale

Carlo Beatrice (CNR – Istituto Motori – Napoli)
Andrea Bottazzi (TPER Bologna)
Sabrina Caputi (Toyota)
Dario Cingolani (LC3 Trasporti)
Filippo Colzi (RSE)
Giovanni Coppola (Enel X)
Maurizio Delfanti (RSE)
Antonino Genovese (ENEA)
Cristina Maggi (H2IT)
Carlo Mannu (Bosch Italia)
Angelo Moreno (H2IT)
Fernando Ortenzi (ENEA)
Alberto Pisoni (General Motors)
Emanuele Proia (ASSTRA)
Andrea Ricci (SNAM for Mobility)
Ernesto Rossi (Scania)
Massimo Santori (CNH Industrial – IVECO)
Alba Soler (Concawe)
Ezio Spessa (Politecnico di Torino)

ottobre 2020

Il progetto grafico è di RIE-Ricerche Industriali ed Energetiche

Indice

Introduzione

Obiettivi dello studio e metodologia 6

Il trasporto marittimo al 2030 e al 2050, opzioni e prospettive

1. Il trasporto marittimo nel post-2020	8
1.1. I limiti IMO al contenuto di zolfo: si apre una nuova fase	9
1.2. Perseguire l'obiettivo di decarbonizzazione al 2050: verso nuovi fuels	10
2. Alternative a confronto: costruzione del metodo ed esiti	12
2.1. Gli esiti dell'AMC al 2030	14
2.1.1. Analisi di sensitività al 2030	16
2.2. Gli esiti dell'AMC al 2050	17
2.2.1. Analisi di sensitività al 2050	19
Pillole	20
Bibliografia	23

Il trasporto aereo al 2030 e al 2050, opzioni e prospettive

1. Il trasporto aereo tra Covid, ripartenza e obiettivi ambientali	24
1.1. Gli aspirational goals per il clima	25
2. Alternative a confronto: costruzione del metodo ed esiti	27
2.1. Gli esiti dell'AMC al 2030	30
2.1.1. Analisi di sensitività al 2030	31
2.2. Gli esiti dell'AMC al 2050	32
2.2.1. Analisi di sensitività al 2050	33
Pillole	34
Bibliografia	37

Il trasporto stradale al 2030 e al 2050, opzioni e prospettive

1. L'evoluzione del trasporto stradale tra normativa, tecnologia e comportamenti	38
--	----

2. La normativa ambientale e climatica per i trasporti su strada	39
2.1. La normativa europea sugli agenti inquinanti	39
2.2. Non solo inquinanti: le emissioni di CO ₂ del settore	40
2.3. DAFI e RED II: la spinta normativa verso i carburanti alternativi	41
2.4. Il PNIEC italiano e la declinazione degli obiettivi di DAFI e RED II	42
3. Alternative a confronto: costruzione del metodo	43
4. Analisi multi-criteri nel trasporto stradale leggero: metodologia e risultati	46
4.1. Le alternative nel trasporto stradale leggero	47
4.2. Gli esiti dell'AMC al 2030	48
4.2.1. Analisi di sensitività al 2030	50
4.3. Gli esiti dell'AMC al 2050	52
4.3.1. Analisi di sensitività al 2050	52
5. Analisi multi-criteri nel trasporto pesante: metodologia e risultati	55
5.1. Le alternative nel trasporto pesante	56
5.2. Gli esiti dell'AMC al 2030	58
5.2.1. Analisi di sensitività al 2030	59
5.3. Gli esiti dell'AMC al 2050	60
5.3.1. Analisi di sensitività al 2050	61
6. Analisi multi-criteri nel Trasporto Pubblico Locale: metodologia e risultati	63
6.1. Le alternative nel Trasporto Pubblico Locale	64
6.2. Gli esiti dell'AMC al 2030	66
6.2.1. Analisi di sensitività al 2030	68
6.3. Gli esiti dell'AMC al 2050	68
6.3.1. Analisi di sensitività al 2050	69
Pillole	72
Bibliografia	77

Appendice

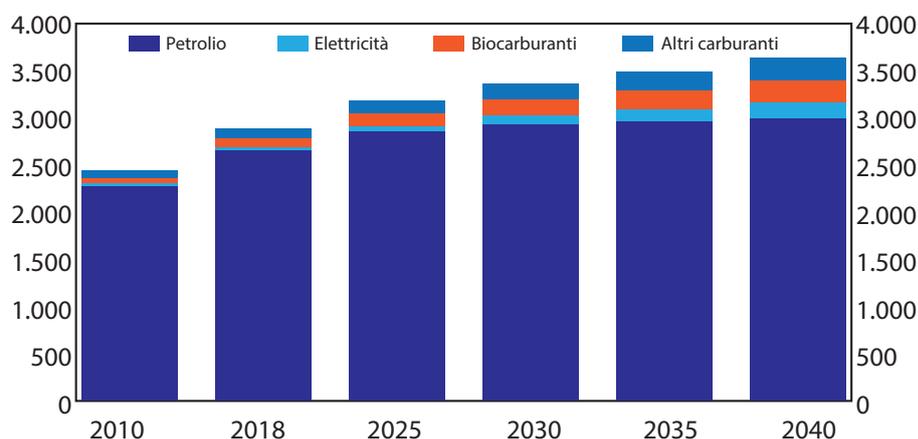
Il metodo AMC	78
La costruzione delle matrici di decisione	79

Introduzione

Il sistema dei trasporti svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo, nella modernizzazione e nella qualità della vita di ogni società; condiziona la competitività delle economie e il loro benessere; consente l'imprescindibile integrazione dei mercati nell'era della globalizzazione, pur salvaguardando e talvolta rendendo prioritarie le logiche "g-local"; da ultimo, ma più che mai importante, mette in gioco valori primari, quali il diritto alla mobilità e alla libertà di circolazione delle persone e dei beni, che nel 2020 hanno assunto un'importanza evidente in conseguenza dell'adozione diffusa di misure di *lockdown* volte a contenere la propagazione dei contagi da Covid-19.

I trasporti, primo settore economico al mondo, sono tipicamente *energy intensive* e caratterizzati da una forte dipendenza dal consumo di petrolio, con riferimento a tutte le differenti modalità: aerea, stradale, marittima. Su scala mondiale, infatti, il peso dei prodotti petroliferi nei consumi finali di energia dei trasporti si attesta al 92% (2018), arrivando ad assorbire poco più della metà della domanda globale di questa fonte primaria e a costituirne il principale *driver* di crescita.

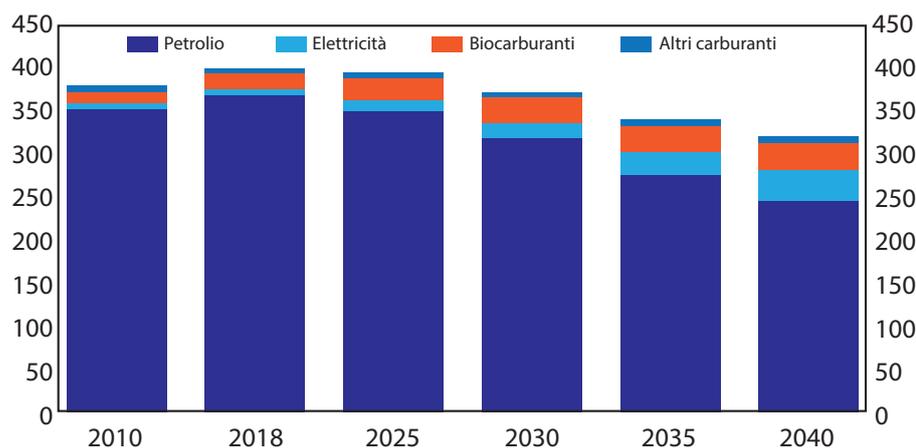
Una correlazione storica, quella tra petrolio e domanda di mobilità che, stando alle previsioni dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (AIE) contenute nel *World Energy Outlook 2019*, non



Fonte: IEA, World Energy Outlook 2019.

Fig. 1 – Consumi finali di energia del settore trasporti nel mondo (mil. tep)

Fig. 2 – Consumi finali di energia del settore trasporti in Europa (mil. tep)



Fonte: IEA, World Energy Outlook 2019.

verrà meno nel medio-lungo periodo. Anche al 2040 i combustibili liquidi saranno la fonte di alimentazione prevalente del sistema, pur con una graduale riduzione dell'incidenza del petrolio che, per quanto in crescita in termini assoluti, è atteso portarsi su scala globale all'82% del consumo finale espresso dal settore.

Restringendo il perimetro di interesse all'Europa, la dinamica differisce in parte. Su scala europea, la mobilità impiega oltre 11 milioni di persone e contribuisce per quasi il 5% alla formazione del Prodotto Interno Lordo. Anche qui, la dipendenza dal petrolio risulta evidente e in linea con il dato mondiale (92% dei consumi finali nel 2018). Tuttavia, le previsioni delineano una traiettoria decrescente dei consumi energetici del settore già a partire dal decennio 2020 (al netto dell'effetto pandemia), caratterizzata da una progressiva contrazione della richiesta di petrolio sia in termini assoluti che relativi: secondo l'AIE, al 2040 il peso del petrolio sarà pari al 76% della domanda di energia proveniente dai trasporti, un calo di 16 punti percentuali rispetto al 2018 ascrivibile alle misure di miglioramento dell'efficienza, all'uso crescente di carburanti gassosi e allo sviluppo della mobilità elettrica oppure elettrificata, specie nei trasporti su gomma.

L'Italia dovrebbe seguire la dinamica attesa per l'Unione Europea, con una dipendenza dal petrolio che resta dominante pur riducendosi, come emerge anche dalla traiettoria delineata nel Piano Integrato Nazionale Energia e Clima (PNIEC) al 2030. Tuttavia, a prescindere dalla riduzione più o meno spinta che si verificherà – resa ancor più incerta dal Covid-19 e dalla conseguente crisi economica mondiale – occorre avere bene a mente la condizione da cui si parte, rappresentata da una quota del petrolio superiore al 90% nel trasporto stradale e

prossima al 100% in quello aereo e marittimo; ciò evidenzia già di per sé le difficoltà connesse a una sensibile evoluzione del sistema trasporti nel suo complesso.

La sfida di questo decennio consiste, dunque, nel creare le basi per una diversificazione delle fonti energetiche rispetto al petrolio, facendo tuttavia attenzione anche al rischio di perdere i benefici connessi alle economie di scala che il quasi-monopolio di questa fonte ha nel tempo (un secolo) generato. Nel Libro bianco dell'Unione Europea, "Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system" (2011) è infatti espressamente indicata la frase «*The challenge is to break the transport system's dependence on oil without sacrificing its efficiency and compromising mobility*».

Tuttavia, il settore conoscerà un'ineludibile trasformazione il cui driver principale è e sarà rappresentato dalla definizione, a livello mondiale, europeo e nazionale, di **obiettivi e normative sempre più ambiziosi e stringenti** volti a favorire la riduzione delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) e la sostanziale eliminazione delle particelle inquinanti (NO_x, PM, CO, HC). La spinta normativa verso una riduzione dell'impatto ambientale del sistema dei trasporti, così come la necessità di limitarne la vulnerabilità rispetto a possibili interruzioni o rischi nella fornitura della materia prima da cui oggi il settore dipende in modo dominante, troveranno supporto anche nei **cambiamenti tecnologici** e, nel caso specifico del segmento stradale, anche in quelli relativi al **comportamento degli utenti**. La sfera tecnologica afferisce: ai progressi nei motori convenzionali, che si prevede siano in grado di conseguire livelli di emissione di agenti inquinanti trascurabili nel prossimo decennio e livelli di efficienza

che si tradurranno in minori consumi; alla penetrazione di combustibili alternativi sempre più sostenibili (biocarburanti, GNL, e-fuels, idrogeno), specie di quelli disponibili a livello locale; a una crescente elettrificazione della mobilità. La sfera comportamentale attiene, invece, alla correzione di dinamiche inerziali sintetizzabili nel prevalere della mobilità individuale su quella collettiva. Per sostenere quella trasformazione verso cui si orientano le politiche climatiche e ambientali, saranno quindi necessari grandi progetti di investimento nella ricerca e sviluppo, nella realizzazione di nuove piattaforme produttive, nella costruzione di nuove infrastrutture lungo l'intera catena del valore delle diverse opzioni tecnologiche.

Obiettivi dello studio e metodologia

Lo studio svolto, e di cui si intende qui riportare una ragionata e ampia sintesi, ambisce a delineare la **possibile evoluzione del mix di carburanti/sistemi di propulsione che caratterizzerà il sistema dei trasporti** nelle sue tre principali declinazioni – marittimo, aereo e stradale – **agli orizzonti 2030 e 2050**, avendo bene a mente lo stato dell'arte e il quadro normativo di riferimento, aspetti in grado di influenzare – seppur in modo differente – i futuri sviluppi del settore: da un lato per l'inerzia dettata dallo *status quo*, tale da rallentare la migrazione verso opzioni alternative specie in un orizzonte ravvicinato quale il 2030; dall'altro, per la necessità di ottemperare alle richieste normative, fortemente improntate alla progressiva decarbonizzazione del sistema.

Per svolgere questo esercizio prospettico, pur nei limiti e incertezze ad esso correlati specie in un momento storico come quello attuale, si è fatto ricorso a un'**analisi multi-criteri (AMC)** – più dettagliatamente descritta in appendice – attraverso la quale sono state comparate, in base ai possibili fattori che influenzano la scelta, diverse opzioni di alimentazione/propulsione che potranno avere un ruolo nei prossimi trent'anni in ciascuno dei diversi segmenti di trasporto considerati. L'analisi multi-criteri permette di confrontare e ordinare, mediante opportuni criteri e relativi pesi, un insieme di alternative, specie quando gli elementi da prendere in considerazione sono molteplici e tra loro molto diversi (ad esempio economici, prestazionali, ambientali). La comparazione tra le opzioni alternative viene quindi effettuata

considerando diversi **criteri di giudizio**, individuati tenendo conto delle particolarità di ciascun segmento e con l'intento di comprendere specifiche **macro-dimensioni di valutazione: sociale-lavorativa** (economie di scala nella produzione del carburante e lato motore, decarbonizzazione della filiera); **economica** (investimento medio per il mezzo, costo di esercizio, costo di produzione e costo finale del carburante, investimenti per la creazione dell'infrastruttura di rete, etc.); **energetica** (rendimento del motore, densità energetica del carburante/vettore, autonomia del mezzo, sviluppo della rete di rifornimento/ricarica, etc.); **ambientale** (emissioni di CO₂ lungo l'intero ciclo di vita, emissioni di inquinanti); **disponibilità e sicurezza** (volumi disponibili della materia prima e del prodotto finale nella catena di approvvigionamento delle diverse tipologie di alimentazione). Per il trasporto su strada è stata anche considerata una dimensione **personale**, relativa al condizionamento della mobilità, e quindi alla libertà di movimento o di programmazione di un servizio legata all'uso di una determinata tecnologia.

L'AMC si sintetizza in una matrice, denominata matrice di decisione, nella quale per ogni opzione carburante/*powertrain* presa in esame (righe della matrice) sono state riportate le stime, quantitative o qualitative, relative a ciascun criterio considerato (colonne della matrice). L'elemento generico della matrice, relativo alla *i*-esima alternativa e al *j*-esimo criterio di giudizio, è costituito dalla misura della rispondenza di quella alternativa a quel criterio: dalla misura, cioè, del contributo che quell'alternativa dà al raggiungimento dell'obiettivo di cui il criterio di valutazione rappresenta lo strumento interpretativo. I criteri possono avere un'importanza diversa che viene espressa attraverso opportuni pesi. Ciò è rilevante perché, specie in presenza di sensibilità politiche o decisionali diverse, si possono costruire "batterie" di pesi volte a valutare gli effetti sui risultati di sensibilità differenti a un certo criterio. Una particolare combinazione dei pesi dei criteri costituisce, in sostanza, un "punto di vista": decisori diversi, infatti, possono avere punti di vista differenti, oppure lo stesso decisore può ritenere opportuno sondare più punti di vista.

Per ciascun segmento di trasporto sono state così costruite **due matrici di decisione – una per l'orizzonte 2030 e una per il 2050** – nelle quali per ogni opzione sono state riportate le stime, quantitative o qualitative, relative a ciascun criterio di giudizio. Le stime sono

l'esito combinato di una **ricerca di tipo desk**, consistente nella disamina della principale letteratura internazionale e delle statistiche/proiezioni più autorevoli, nonché di un **approccio di tipo field**, basato su informazioni desunte da contatti diretti con i principali *stakeholders*, quali esponenti di associazioni di categoria, costruttori di navi, aeromobili e veicoli, esperti accademici e ricercatori in materia di nuovi carburanti/sistemi di propulsione. Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati allo scopo, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato ai Workshop organizzati dal **Gruppo Strategico "Carburanti ed Energie Alternative"** istituito da **Unione Energie per la Mobilità - unem**. Proprio a seguito dei contributi dei diversi partecipanti ai Workshop è stato possibile **assegnare un peso ad ogni criterio** (batteria di pesi), in modo da definirne il livello di importanza (espresso con un voto da

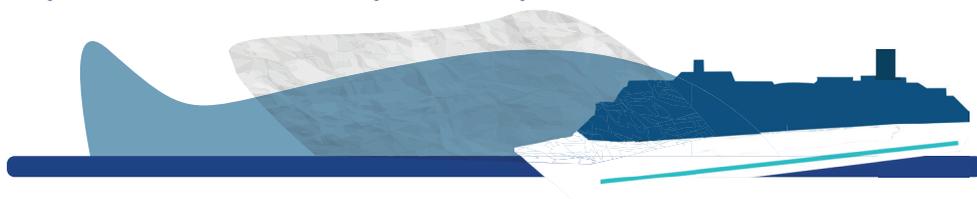
1 a 10) nella valutazione delle alternative, operando le opportune distinzioni tra 2030 e 2050.

Per i segmenti marittimo e aereo – stante la loro natura globale – il perimetro geografico assunto a riferimento nella presente analisi è inevitabilmente quello mondiale; per il segmento stradale invece, a sua volta sotto-segmentato nei tre settori del trasporto leggero, pesante e del trasporto pubblico locale (TPL), lo studio svolto ha riguardato l'Italia.

L'analisi multi-criteri è stata costruita ed elaborata da RIE-Ricerche Industriali ed Energetiche in collaborazione con il Prof. Ing. Bruno dalla Chiara, Professore Ordinario di Sistemi di Trasporto presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino e con l'Ing. Andrea Rosa, esperto di modellistica matematica dei trasporti. La lavorazione delle matrici è stata effettuata attraverso il modello matematico ELECTRE II.

Il trasporto marittimo al 2030 e al 2050

opzioni e prospettive



1. Il trasporto marittimo nel post-2020

8

Nel trasporto intercontinentale e continentale delle persone, il segmento marittimo ha perso da decenni quell'egemonia conservata fino a metà del XX secolo, di fatto soppiantato dallo sviluppo del trasporto aereo; altrettanto, invece, non può dirsi **sul fronte merci**, dove il **trasporto via nave rappresenta il settore a maggior supporto del commercio mondiale**. Con 11 miliardi di tonnellate di merci trasportate (2018), questo segmento assorbe circa l'80% in termini di volume e oltre il 70% in termini di valore dei beni scambiati su scala globale.

È, inoltre, il minor contribuente all'inquinamento globale derivante dai sistemi di trasporto. Per le sue caratteristiche, infatti, **la nave costituisce la modalità di trasporto a minor impatto emissivo** (emissioni per tonnellata di merce trasportata per km percorso) tra quelle dotate di motore a combustione a bordo e, in alcuni casi, l'unica possibile. Lo è per prodotti poco o per nulla compatibili con il trasporto aereo, come ad esempio per il grano destinato alla produzione giornaliera di pane che può essere trasportato esclusivamente via mare.

Tuttavia, il continuo incremento e la **rapida crescita dei volumi scambiati via nave** registrata nell'ultimo ventennio porta a stimare

che le merci trasportate con questa modalità possano raddoppiare nei prossimi due decenni e con esse, in assenza di interventi mirati e significativi, le **esternalità ambientali**. Da qui, l'attenzione sempre più forte ed evidente verso obiettivi improntati a una crescente sostenibilità e decarbonizzazione del settore.

In tal senso, il 2020 rappresenta per l'industria navale un anno di profondo cambiamento. L'entrata in vigore della **nuova normativa IMO** (International Maritime Organization) a partire dal 1° gennaio – con l'introduzione di un **Global Sulphur Cap dello 0,5%** massimo per i bunker marini – segna l'inizio di una trasformazione significativa per il trasporto marittimo, con **significative ripercussioni sia sulle attività di bunkeraggio sia sulle scelte di investimento di breve-medio termine degli armatori**.

Ma il 2020 verrà ricordato anche per l'impatto determinato dalla pandemia da Covid-19 e dalle conseguenti misure di *lockdown* intraprese in diverse aree del mondo, che hanno colpito il settore trasporti più di qualsiasi altro comparto economico. L'interruzione di diverse attività industriali e la limitazione della mobilità delle persone si sono riversate *in primis* sul segmento della crocieristica e dei traghetti, mentre il trasporto merci ha riportato una contrazione più moderata e concentrata sulle attività delle navi container.

Tuttavia, anche se il breve termine sarà inevitabilmente compromesso, è piuttosto probabile

Il 2020 segna l'inizio di una importante trasformazione che porterà, nel lungo periodo, dal predominio di una singola fonte a un futuro multi-fuel

che – a pandemia finita – il trend di crescita atteso in epoca pre-Covid riprenderà la sua corsa, pur con tempi e intensità ad oggi ancora incerti. La congiuntura attuale non costituisce, pertanto, un impedimento all'evoluzione del settore, ma può esercitare su di essa un'importante influenza a un orizzonte ravvicinato quale è il **2030** che, peraltro, risente della **forte inerzia** che contraddistingue questa modalità di trasporto – soprattutto in termini di vita utile del naviglio (30-35 anni), modalità e tipologie di rifornimento, competenze acquisite da decenni lato manutenzione a bordo. Se è quindi logico attendersi che nel decennio in corso gli armatori si adegueranno ai nuovi vincoli normativi compiendo scelte che in larga parte non comportano modifiche tecniche di rilievo rispetto allo *status quo*, **al 2050**, invece, il ragionamento si sposta sulle nuove costruzioni che – in ragione della progressiva **decarbonizzazione del settore dei trasporti**, motivata e regolamentata su scala europea e internazionale – tenderanno a ricorrere in misura crescente a combustibili/vettori energetici *low carbon*, la cui catena di approvvigionamento e le relative economie di scala e di competenze devono essere in parte o interamente costruite.

L'analisi svolta ha come obiettivo principale quello di indicare, nei due orizzonti temporali di riferimento, l'ordine di preferibilità (o di surclassamento) delle alternative di alimentazione/*powertrain* considerate, tenendo conto dei numerosi elementi che incidono sulle dinamiche specifiche del settore. Le analisi di sensitività condotte hanno lo scopo precipuo di individuare potenziali leve in grado di orientare la scelta tra le diverse opzioni percorribili.

1.1. I limiti IMO al contenuto di zolfo: si apre una nuova fase

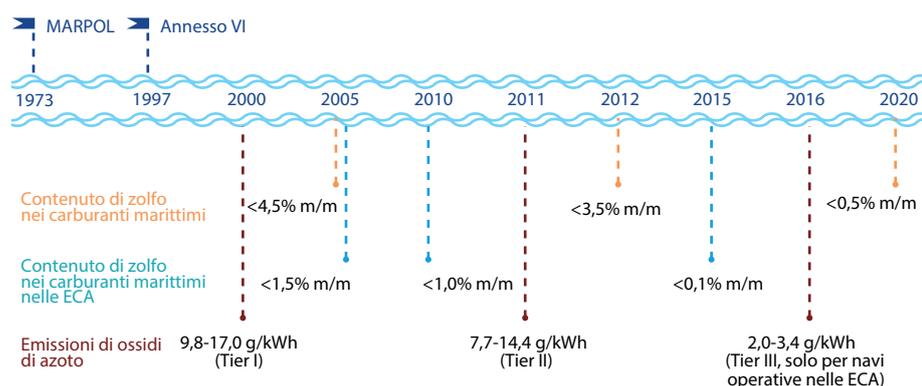
L'IMO ha iniziato ad occuparsi del contenimento dell'impatto ambientale del settore marittimo negli anni '60 del secolo scorso. La principale regolamentazione di riferimento per la prevenzione dell'inquinamento causato dalle navi è contenuta nella Convenzione MARPOL del 1973 e nelle sue successive modifiche (Fig. 1). Con l'adozione dell'Annex VI nel 1997, la Convenzione ha fornito una base internazionale giuridicamente accettata per la tutela dell'inquinamento dell'aria.

Il focus primario della regolamentazione IMO riguarda lo zolfo, un elemento naturale presente in tutti i combustibili fossili. Nel 2005 è entrato in vigore il primo limite globale per il contenuto di zolfo nei carburanti marini, pari al 4,5% m/m (massa per massa); a partire dal 2012, la soglia è stata ridotta al 3,5%, rimanendo il riferimento vigente sino al 1° gennaio 2020. Da quella data, l'entrata in vigore di un nuovo *cap* massimo dello 0,5%¹ ha segnato l'avvio di **una fase "a basso contenuto di zolfo"** per la flotta navale mondiale.

Il passaggio a combustibili a basso tenore di zolfo rappresenta indubbiamente una sfida, non solo in mare ma anche nella catena di approvvigionamento dei *fuels* richiesti dalle navi. Due le conseguenze dirette e tra loro correlate del cambiamento in atto:

- **La domanda di carburanti navali si modificherà significativamente dal 2020 in poi, con impatto sui prezzi relativi dei diversi tipi di bunker.** Da un lato, si assisterà alla forte contrazione del consumo di prodotti

Fig. 1 – Le tappe dell'IMO in materia energetica e ambientale



con tenore di zolfo al 3,5%, tipicamente olio combustibile pesante noto come *Heavy Fuel Oil* (HFO), sinora il più utilizzato; dall'altro, si modificheranno le dinamiche produttive delle raffinerie in ragione di un significativo aumento della domanda di combustibili *IMO-compliant*. Lo *spread* di prezzo tra le diverse tipologie di combustibile – determinato dalle differenti dinamiche di domanda e offerta – potrebbe essere una variabile importante per gli armatori e tale da condizionare, almeno in parte, le loro scelte di breve-medio periodo.

- **Gli armatori si troveranno comunque di fronte a un incremento dei costi, di investimento e/o operativi**, in ragione delle scelte che la regolamentazione impone loro di fare. Nelle aree di controllo delle emissioni (ECAs - *Emission Control Areas*), le navi

ne cui si aggiungono i relativi costi di manutenzione e gestione. Optare per tecnologie “nuove”, che impiegano *fuels* non tradizionalmente petroliferi, rappresenta ad oggi una scelta praticabile ma più onerosa; scelta che, sul lungo periodo, potrà invece risultare determinante nel conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione proposti dall'IMO.

1.2. Perseguire l'obiettivo di decarbonizzazione al 2050: verso nuovi fuels

In un orizzonte di più lungo respiro quale il 2050, il focus si sposta verso la progressiva riduzione dell'intensità carbonica del trasporto marittimo. Nell'aprile 2018, l'IMO ha lanciato la **GHG Emission Initiative** che declina in ambito

Il Global Sulphur Cap dello 0,5% è una sfida sia per le raffinerie sia per gli armatori che vedranno aumentare i costi di investimento e operativi

sono già obbligate a utilizzare bunker a bassissimo tenore di zolfo (0,1%); tuttavia, la definizione di un *cap* dello 0,5% su scala globale determina giocoforza un aumento dei costi, seppur differenziato a seconda dell'opzione di alimentazione considerata. Utilizzare prodotti petroliferi *sulphur compliant* implica maggiori costi del combustibile ma nessun investimento in conto capitale (CAPEX) per l'armatore, mentre la scelta di continuare a utilizzare HFO richiede una spesa iniziale legata all'installazione di appositi impianti depuratori (*scrubber*) dei fumi di combustio-

marittimo gli impegni internazionali di decarbonizzazione assunti con l'Accordo di Parigi, in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (13° e 14°) dell'ONU. L'iniziativa, assumendo come riferimento il 2008, mira a ridurre l'intensità carbonica delle flotte navali internazionali di almeno il 40% entro il 2030 e del 70% entro il 2050. Inoltre, entro il secolo corrente, il settore dovrà tendere all'obiettivo **Zero GHG emissions**, con la tappa intermedia al 2050 di dimezzamento delle emissioni complessive di gas serra del settore marittimo, sempre rispetto all'anno base 2008 (Fig. 2). In questa fase, gli Stati partecipa-

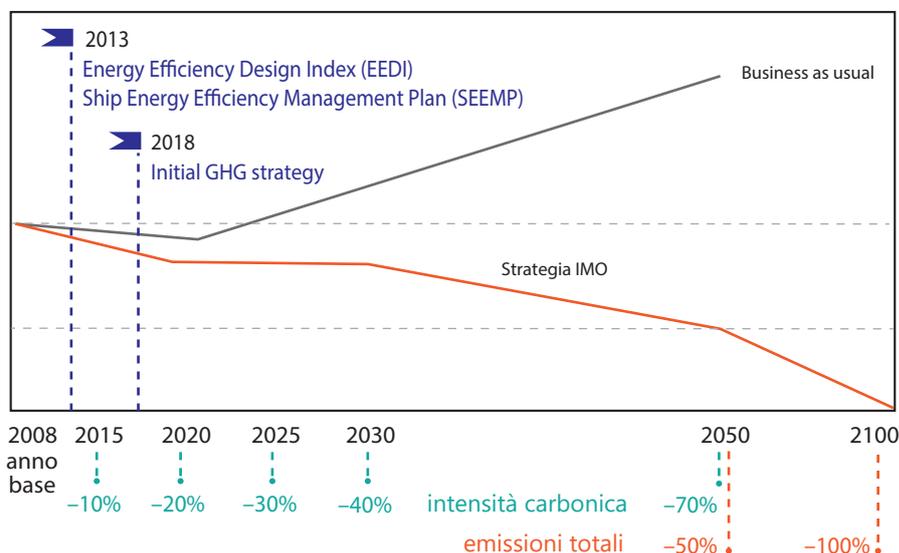


Fig. 2 – Strategia IMO per la riduzione delle emissioni di gas serra

Al 2030 la decarbonizzazione del trasporto marittimo muoverà in buona parte dal ripensamento dell'ecosistema di navigazione nel suo complesso

no alla definizione della strategia inviando proposte concrete per il raggiungimento dell'ambizioso target, non ancora vincolante.

A prescindere dall'effettiva modalità di implementazione di un così ambizioso obiettivo, occorre riflettere sulle **principali leve** che orienteranno l'industria navale lungo la traiettoria di decarbonizzazione delineata dall'IMO.

Nel breve-medio termine, la riduzione delle emissioni climalteranti potrà solo in parte derivare da **maggiori sforzi in termini di efficienza energetica**. I motori navali, infatti, sono già oggi molto efficienti, con rendimenti anche prossimi al 50%, ben superiori a quelli dell'industria automobilistica.

Ulteriori sforzi in tal senso, considerato l'attuale preponderante impiego di bunker marini derivati dal petrolio, possono certamente contribuire a ridurre le emissioni ma non nella misura richiesta dall'IMO. Pertanto, risulterà fondamentale lavorare contemporaneamente su più fronti:

- *in primis* sulla **velocità di navigazione**, considerando che in condizioni di funzionamento a regime costante la potenza richiesta dall'elica è all'incirca proporzionale al cubo della velocità;
- sulla **gestione delle spedizioni**, in termini di frequenza, di livello di riempimento dei nautanti e di ottimizzazione dei carichi (es. deposito in porto e successivo prelievo in virtù di logiche di smistamento definite in base alle rotte e alla saturazione della stiva);
- sull'**aerodinamica** dello scafo e dell'opera morta (parte emersa della nave);
- sull'**integrazione di vele e rotor** affinché contribuiscano attivamente alla parte propulsiva;
- sull'adozione di **sistemi di rotta intelligenti** con i quali si tiene conto anche del livello di congestione del porto per programmare l'arrivo in banchina, azzerando attese non operative;

- sull'**interruzione dell'uso dei motori termici** durante la fase di fermo in banchina, in virtù della dotazione della stessa di sistemi di alimentazione elettrica per i sotto-servizi di bordo durante le fasi di carico/scarico e, in genere, di ormeggio (*cold ironing* o *hore connection*, *shore-to-ship power-SSP*, *alternative maritime power-AMP*);
- sull'**ibridizzazione del powertrain** per le imbarcazioni nelle quali predominano i servizi (trasporto pubblico su vie d'acqua, traghetti, navi da crociera, nautica da diporto e applicazioni similari), mediante l'affiancamento di un motore elettrico con batteria al motore termico, da impiegare anche come ausilio nelle fasi di accelerazione.

In sostanza, al di là degli interventi sull'impianto motoristico e sui relativi carburanti, occorre **rivedere l'ecosistema della navigazione** al fine di ridurre i tempi di utilizzo del motore stesso o migliorarne l'efficienza.

Al 2050, invece, il contributo più rilevante al processo di decarbonizzazione del trasporto marittimo proverrà dalla **diversificazione delle alimentazioni/powertrain per la propulsione delle navi**, tenendo conto delle emissioni di CO₂ legate all'intero ciclo di vita dei *fuels*². Le tecnologie alternative a minori emissioni di ossidi di carbonio sono oggi significativamente più costose di quelle *oil-fuelled*. Tuttavia, è ragionevole attendersi che **i costi relativi seguiranno un trend decrescente all'aumentare delle economie di scala** e, quindi, con il consolidamento di filiere di approvvigionamento ad oggi pressoché inesistenti o circoscritte a specifiche regioni. Di certo, per rendere queste opzioni tecnicamente fattibili ed economicamente sostenibili **saranno determinanti misure regolatorie conservative nel tempo e opportuni meccanismi di incentivazione**, quali ad esempio la definizione di uno standard qualitativo per i carburanti *low carbon* che consenta di ridurre l'intensità carbonica in modo graduale.

Al 2050 un contributo rilevante proverrà dalla diversificazione delle alimentazioni/powertrain verso soluzioni low carbon

2. Alternative a confronto: costruzione del metodo ed esiti

In considerazione del contesto e dello scenario regolamentare delineato, la presente analisi si focalizza su **sei soluzioni tecnologiche alternative** (e loro possibili evoluzioni) che potranno avere un ruolo nel trasporto marittimo al 2030 e al 2050 (Tab. 1).

La comparazione tra le sei opzioni considerate è stata effettuata attraverso un'analisi multi-criteri che ha portato all'elaborazione di due matrici di decisione (2030 e 2050). Le matrici

sono state strutturate in base a **15 criteri** (Tab. 2), individuati tenendo conto delle particolarità del settore e con l'intento di comprendere i fattori più importanti afferenti a cinque macro-dimensioni: sociale-lavorativa; economica; energetica; ambientale; di sicurezza e disponibilità energetica. Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato al Workshop sul trasporto marittimo del 3 aprile 2019, organizzato dal **Gruppo Strategico "Carburanti ed Energie Alternative" istituito da unem**.

Tab. 1 – Alternative considerate nell'AMC applicata al trasporto marittimo

Alternative	Descrizione
Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ – Motori a combustione interna (MCI) tradizionali	Comprendono prodotti di diversa natura quali: (a) gasolio marino: distillato a bassissimo contenuto di zolfo attualmente impiegato in ambito ECA e negli stazionamenti in porto; non presenta problemi di disponibilità ma è più costoso dell'olio combustibile tradizionale; (b) distillati pesanti: componenti per <i>blend</i> alternativi più difficilmente destinabili alla produzione di gasolio; costo inferiore rispetto al gasolio marino ma disponibile solo presso le raffinerie con grado di conversione medio-alto; (c) <i>Ultra Low Sulphur Fuel Oil</i> : opzione meno costosa rispetto alle altre ma con potenziali criticità circa i volumi disponibili
Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% e <i>scrubber</i> – MCI tradizionali	Bunker marino tradizionale con formulazione simile a quella degli oli combustibili; noto anche come <i>Heavy Fuel Oil</i> (HFO)
GNL – MCI con alimentazione per GNL	Si ottiene sottoponendo il gas naturale, dopo opportuni trattamenti di depurazione e disidratazione, a successive fasi di raffreddamento e condensazione. Il prodotto che ne deriva si presenta come un liquido inodore e trasparente costituito da una miscela composta prevalentemente da metano e avente una temperatura di ebollizione di circa $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pressione atmosferica
Metanolo – MCI con alimentazione per metanolo	È il più semplice degli alcoli, è liquido a temperatura e pressioni normali, ed è quindi facile da stoccare e da trasportare, ma è tossico. Il metanolo può essere prodotto a partire da differenti <i>feedstock</i> , principalmente gas naturale e carbone, ma anche da fonti rinnovabili o direttamente dalla CO_2 catturata dalle centrali elettriche (idrogenazione dell'anidride carbonica)
<i>Powertrain</i> ibridi – Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ con motore elettrico e batteria accoppiati a un MCI (ambiti specifici)	Questa opzione si differenzia dalla prima in relazione al <i>powertrain</i> e non alla fonte di alimentazione
Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniaca, tradizionale ed e-ammoniaca) – MCI o <i>fuel cell</i> con ibridizzazione elettrica dove utile	Gli e-fuels sono combustibili di sintesi ottenuti dall'idrogeno ("verde" e "blu"), a sua volta prodotto tramite elettrolisi dell'acqua, utilizzando elettricità da fonti rinnovabili e anidride carbonica catturata da impianti industriali o direttamente dall'aria. L'ammoniaca è un composto di azoto con formula chimica NH_3 , caratterizzato da un'alta concentrazione di idrogeno e quindi di energia. Si presenta come un gas incolore, tossico, in grado di diventare liquido a una temperatura di circa $-77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e gassoso a $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e può essere sintetizzato da due degli elementi più comuni sulla Terra: l'azoto dell'aria e l'idrogeno dell'acqua (o del metano). È ricompresa tra gli e-fuels quando prodotta per sintesi da idrogeno e da azoto ottenuto dall'atmosfera

La caratterizzazione delle alternative considerate in termini di proprietà fisiche, variabili economiche e impatto ambientale ha permesso di attribuire un giudizio ai criteri della matrice di decisione nei due orizzonti di riferimento e di formulare considerazioni relative all'evoluzione attesa del *fuel mix* del settore, avendo bene a mente la situazione da cui si parte.

Qualsiasi analisi di tipo prospettico deve infatti tener conto della condizione di partenza: nella fattispecie, risulta determinante conoscere **l'attuale incidenza delle diverse alternative rispetto alla configurazione standard**

(MCI) alimentata da bunker marini a basso tenore di zolfo. Al 2019, su un totale di circa 70.000 imbarcazioni soggette alla regolamentazione IMO, circa 60.000 sono in grado di utilizzare combustibili petroliferi conformi al *Global Sulphur Cap*; circa 3.800 sono equipaggiate con *scrubber* e quindi continuano a impiegare il bunker marino tradizionale (HFO); circa 500 sono le navi alimentate a GNL, considerando sia quelle già operative sia quelle in procinto di esserlo; indicativamente 400 presentano *powertrain* ibridi, mentre solo qualche decina impiega metanolo o nuovi combustibili/vettori

Tab. 2 – Dimensioni e criteri dell'AMC

Dimensione	Criterio	Descrizione
Dimensione socio-economico-lavorativa	1. Economia di scala	Si riferisce all'esistenza di un consolidato sistema di produzione del carburante/vettore energetico e di manutenzione del tipo di motore: esperienza, personale e capacità, impianti e loro diffusione
	2. Decarbonizzazione filiera	Si riferisce a quanto è possibile che venga decarbonizzata la filiera per effetto della decarbonizzazione della produzione
Dimensione economica	3. Quantità motori attuale	Dato numerico di riferimento che intende misurare il punto di "ancoraggio" dato dalla flotta attuale, cioè l'inerzia di trasformazione delle flotte
	4. Tasso di sostituzione navi	Indicatore del tempo necessario alla sostituzione delle flotte con un determinato tipo di propulsore
	5. CAPEX armatori	Indicatore dell'ordine di grandezza dell'investimento necessario per costruire una nave con un dato tipo di alimentazione/motore (situazioni confrontabili)
	6. OPEX armatori	Indicatore del costo operativo dovuto all'uso di un dato tipo di alimentazione/motore in situazioni confrontabili
	7. CAPEX produttori	Investimenti per la produzione di un dato tipo di carburante/vettore energetico
	8. OPEX produttori	Costi operativi per la produzione di un dato tipo di carburante/vettore energetico
Dimensione Energetica	9. Rendimento del motore (<i>tank to propeller</i>)	Rendimento energetico della trasformazione da combustibile/vettore energetico a energia alle eliche
	10. Rendimento del processo <i>well to tank</i>	Rendimento energetico dal processo produttivo del combustibile/vettore energetico al serbatoio
Dimensione ambientale	11. CO ₂ locale (<i>tank to propeller</i>)	Emissioni di CO ₂ riferite a <i>tank to propeller</i>
	12. CO ₂ <i>well to tank</i>	Emissioni di CO ₂ riferite alla fase <i>well to tank</i> o <i>production to tank</i> quando il vettore energetico venga prodotto e non estratto
	13. Potenzialità di rispetto delle norme su inquinamento locale	Indicazione della possibilità che il combustibile/vettore energetico soddisfi eventuali future norme più stringenti su inquinanti come NO _x , SO ₂ , particolati
Dimensione sicurezza e disponibilità energetica	14. Disponibilità in natura	Rappresenta la disponibilità in natura a costi accettabili della materia prima da cui si ottiene il carburante/vettore energetico
	15. Disponibilità nel processo produttivo (incluso approvvigionamento navi)	Rappresenta la disponibilità del carburante/vettore energetico nei porti e in generale nelle filiere produttive industriali

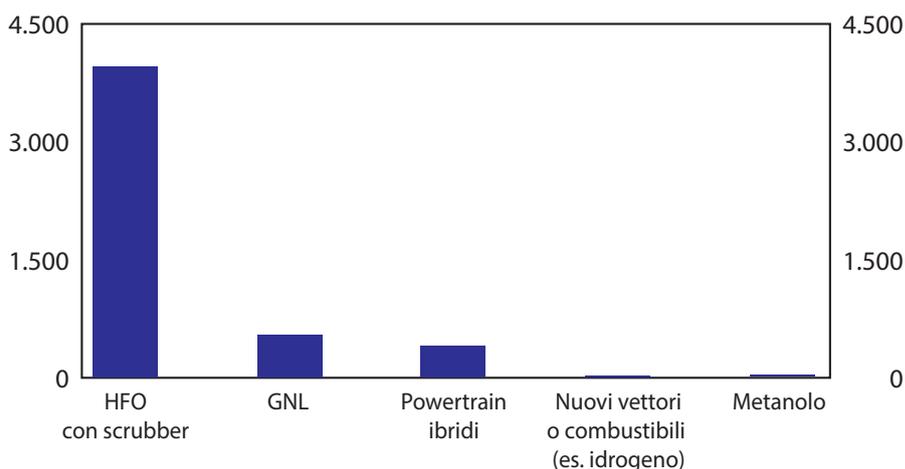


Fig. 3 – Naviglio attuale: le alimentazioni alternative al fuel a basso tenore di zolfo (unità)

Nota: la figura riporta il dimensionamento della flotta esistente in base al combustibile, al vettore energetico impiegati e dotazione di sistema post-combustione di controllo dei fumi.

Fonte: DNV GL AFI 2020.

energetici quali l'idrogeno (in quest'ultimo caso si tratta di prototipi). Dato il punto di partenza, i giudizi contenuti nella matrice di decisione considerano spesso il *fuel* a basso tenore di zolfo e quello tradizionale (3,5%) come le tipologie di alimentazione di riferimento rispetto a cui valutare le altre (Fig. 3).

2.1. Gli esiti dell'AMC al 2030

In base ai pesi assegnati ai diversi criteri all'orizzonte 2030, l'AMC restituisce un **ordine di surclassamento in cui prevale nettamente l'opzione "Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ "**, seguita da "Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% e *scrubber*" (Tab. 3). Nei prossimi dieci anni, una variabilità sostanzialmente limitata nel rendimento dei motori termici, l'attuale ripartizione del naviglio – in termini di tipologie di motorizzazione e alimentazione – e la presenza di economie di scala consolidate nella produzione di un determinato combustibile/vettore energetico sono fattori che continueranno ad avere un'elevata incidenza sulle scelte degli armatori e condizionano l'esito dell'AMC.

La maggior parte delle navi può, già oggi, impiegare **combustibili a basso tenore di zolfo (IMO 2020-compliant)**: per gli armatori/compagnie di navigazione il loro utilizzo non comporta nuovi investimenti in conto capitale in quanto non sono necessari adattamenti motoristici particolari. È tuttavia necessaria una certa attenzione per evitare fenomeni di incompatibilità, instabilità e contaminazione in ragione della diversa natura dei prodotti che rientrano in tale categoria (gasolio marino, distillati pesanti,

Ultra Low Sulphur Fuel Oil). Il maggior costo per l'armatore o la compagnia di navigazione è, quindi, principalmente di tipo operativo in relazione alla maggiore onerosità di questi prodotti rispetto all'olio combustibile a medio o alto tenore di zolfo. Lato produzione, l'industria della raffinazione mondiale si è da tempo strutturata per soddisfare la richiesta di tali bunker e continua ad orientarsi in tale direzione attraverso investimenti in impianti di conversione e desolforazione; le fasi di stoccaggio e distribuzione possono invece contare su un sistema infrastrutturale ampio e diffuso su scala globale. A fronte degli indiscutibili vantaggi in termini economici, prestazionali e infrastrutturali, i combustibili a basso tenore di zolfo non rappresentano l'opzione ottimale sul versante delle emissioni climalteranti. Se gli ossidi di zolfo vengono automaticamente ridotti di oltre l'85% renden-

Tab. 3 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030 con la batteria di pesi base

1	Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ – MCI tradizionali
2	Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% e <i>scrubber</i> – MCI tradizionali
3	GNL – MCI con alimentazione per GNL
4	<i>Powertrain</i> ibridi – Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ con motore elettrico e batteria accoppiati a un MCI (ambiti specifici)
5	Metanolo – MCI con alimentazione per metanolo
6	Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniaca tradizionale ed e-ammoniaca) – MCI o <i>fuel cell</i> con ibridizzazione elettrica dove utile

do più agevole controllare anche le emissioni di NO_x e di particolato, per quanto attiene alla CO_2 non ci saranno sostanziali cambiamenti rispetto all'impiego di HFO tradizionale, a parte una modesta riduzione associata a una più facile ottimizzazione della combustione. Tuttavia, in un orizzonte di medio periodo quale il 2030, questo aspetto non incide sull'ordinamento restituito dall'AMC in quanto più che compensato dai numerosi aspetti premianti sopra riportati. Nel decennio in corso, inoltre, la riduzione delle emissioni di gas serra potrà essere parzialmente conseguita attraverso il miglioramento delle tecniche di navigazione operative e gestionali.

Gran parte delle considerazioni espresse per i combustibili petroliferi *IMO 2020-compliant* valgono anche per l'opzione "**Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% più scrubber**" che, infatti, si posiziona al secondo posto nell'ordine di surclassamento risultante dall'AMC. In questo caso, occorre precisare come il maggior costo per l'armatore o compagnia di navigazione sia legato essenzialmente all'installazione dello *scrubber*, necessaria per rispettare il *Global Sulphur Cap* dello 0,5%. Il tempo di ritorno dell'investimento è in genere contenuto (1-2 anni) ma la relativa economicità di questa scelta si scontra con restrizioni ambientali che vietano, in alcune zone, l'uso di determinate tipologie di *scrubber* e con la tendenziale incapacità dell'offerta di simili impianti di far fronte a una domanda supposta in continua crescita. In termini di future disponibilità, al tema relativo allo *scrubber* si affianca quello della produzione di olio combustibile a medio-alto tenore di zolfo, attesa ridursi fortemente in ragione del ri-orientamento delle raffinerie verso prodotti *IMO 2020-compliant*.

L'alternativa "GNL" – un combustibile di per sé privo di emissioni di zolfo e quindi *IMO 2020-compliant* – poggia su una tecnologia ormai consolidata in termini di produzione e di applicazione al settore navale. Tuttavia, la sua diffusione è ad oggi molto limitata (circa 500 navi al 2019, considerando anche quelle ancora non operative), a sottolineare la forte inerzia del comparto rispetto a nuovi tipi di alimentazione che richiedono appositi impianti di stoccaggio e/o rifornimento. La terza posizione assegnatagli dall'AMC all'orizzonte 2030 è principalmente ascrivibile agli elevati costi che questa scelta comporta sia per gli armatori/compagnie di navigazione (una nave a GNL costa circa il 15-20% in più rispetto a una nave gemella alimentata con bunker petroliferi) sia per i produttori a monte. Dipende, inoltre, dal fatto che la sua

penetrazione su più ampia scala è fortemente collegata alla diffusione territoriale di depositi e impianti di rifornimento. Ad oggi, solo in alcune parti del mondo sussiste questa disponibilità e si ritiene che anche tra dieci anni – considerati i tempi di autorizzazione e costruzione di terminali e depositi nonché il loro elevato costo di investimento – la situazione non sarà molto diversa da quella attuale. Peraltro, anche ipotizzando un aumento della disponibilità di GNL nei porti all'orizzonte 2030 il risultato non cambia. In conclusione, nonostante il GNL sia un'alternativa a minori emissioni di gas serra rispetto ai combustibili *oil-based* – specie se si eliminano i rilasci di metano sia a monte che durante la fase di combustione – lo scenario delineato dall'AMC non gli assegna il ruolo di soluzione tecnologica dominante al 2030, anche se il numero di navi che vi faranno ricorso è previsto crescere.

L'alternativa "**Powertrain ibridi**" – motore termico alimentato da combustibile petrolifero con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$, accoppiato a un motore elettrico – merita una precisazione ai fini della corretta lettura dell'ordinamento delle preferenze restituito dall'AMC. Adottata su meno dell'1% del naviglio esistente, questa soluzione tecnologica mista di trazione e propulsione è più adatta per navi che svolgono servizi brevi (es. traghetti, trasporto locale), eventualmente per la nautica da diporto, o laddove il consumo di elettricità a bordo diviene importante rispetto al consumo energetico complessivo (es. navi per crociere o navi con impianti di refrigerazione). Pertanto, questa alternativa – che presenta indubbi vantaggi dal punto di vista del rendimento solo dove dominano accelerazioni frequenti, con evidenti benefici in termini di impatto ambientale – può essere vista come una sottoclasse particolare della tipologia "Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ " e "Olio combustibile pesante e *scrubber*" perché, di fatto, per la motorizzazione termica si usano gli stessi motori e gli stessi combustibili. Anche in prospettiva, la sua penetrazione rimarrà contenuta e vincolata al tipo di servizio che effettua la nave. In questa sede viene comunque considerata come alternativa distinta perché l'analisi è stata impostata per tipo di motorizzazione e di combustibile/vettore energetico, tralasciando – per ragioni di semplificazione – l'ambito di lavoro dei diversi tipi di naviglio. Ad ogni modo, l'ibridizzazione va vista come benvenuta, anche nel breve-medio termine: nel trasporto marittimo, il ricorso a questa tipologia di alimentazione aumenterà sino a coprire, secondo fonti informali, il 10% del naviglio al 2030.

In ultima posizione figurano le alternative “**Metanolo**” e “**Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniacca)**” in quanto rappresentano soluzioni ad oggi molto limitate o del tutto assenti. Considerata la forte inerzia del settore legata ai tempi di ricambio del naviglio (30-35 anni), sono tecnologie che al 2030 non riusciranno a conoscere una diffusione di rilievo. Il decennio in corso dovrà o potrà semmai servire per testare attentamente un interesse che, specie per nuovi vettori energetici come l'**ammoniaca (tradizionale ed**

Al 2030 il fuel mix del settore è in larga parte predeterminato dall'attuale consistenza del naviglio e dalla possibilità di sfruttare impianti, dotazioni tecnologiche e competenze consolidate

e-ammoniaca) sembra essere alto. L'impiego di un nuovo combustibile di sintesi, dato il necessario allungamento della catena energetica che questo comporta, richiede una valutazione ampia e non limitata al solo rendimento della combustione a bordo natante; occorre considerare anche la possibilità di produrlo partendo da fonti rinnovabili, i suoi costi, la sua densità energetica, la relativa massa e l'autonomia raggiungibile con i serbatoi (nel caso dell'ammoniaca), onde impattare il meno possibile sulla programmazione delle navigazioni, degli ormeggi, nonché sulla dotazione di impianti per il rifornimento presso le banchine. Occorre poi tenere conto del fatto che, negli ultimi 50 anni, il motore delle navi è stato ottimizzato per lavorare con combustibili a base carboniosa con caratteristiche di lubrificazione, densità, viscosità e con effetti di corrosione a caldo e a freddo ormai noti. Gli interrogativi da porsi circa gli effetti associati a un radicale cambiamento del combustibile/vettore energetico sono quindi molteplici e la mancanza di esperienza e competenze consolidate pone la loro concorrenzialità su orizzonti temporali maggiori di dieci anni.

2.1.1. Analisi di sensitività al 2030

Nella lettura dei risultati dell'AMC è opportuno ricordare che l'ordinamento proposto è quello che meglio soddisfa i criteri individuati con i pesi base ad essi attribuiti. Nella maggioranza dei casi, detto ordinamento permane anche operando variazioni dei pesi³, effettuate per testare la sensitività dei risultati: un'invarianza

degli esiti significa una relazione di surclassamento forte, quindi robusta al variare della sensitività che un valutatore può avere nei confronti di un determinato peso (percezione ambientale, finanziaria, etc.). Anche l'impiego di pesi uguali per tutti i criteri restituisce l'ordine di preferenza delineato nel caso base. Questo insieme di risultanze sottende una distinzione sufficientemente netta delle prestazioni delle diverse alternative.

Più in dettaglio, si espongono le analisi di sensitività effettuate. Diminuendo l'importanza dell'effetto dell'**economia di scala** e della **com-**

posizione attuale del naviglio, il GNL sale al primo posto mentre le rimanenti alternative non variano il loro posizionamento rispetto al caso base (Tab. 4). Un simile esito sta ad indicare **come l'attuale consistenza della flotta e i lunghi tempi di sostituzione delle navi siano criteri in grado di incidere sullo scenario delineabile per il 2030 in ragione della forte inerzia del settore**. Contemporaneamente, l'esistenza di competenze e conoscenze consolidate, spesso legata a una filiera di approvvigionamento diffusa su scala mondiale, si tradurrebbe in una significativa crescita del naviglio alimentato a GNL, rendendolo una valida soluzione ponte per la transizione del trasporto marittimo verso gli obiettivi di decarbonizzazione proposti dall'IMO.

Tab. 4 – Ordine di surclassamento al 2030 con riduzione del 50% dei pesi relativi a effetto scala e motori attuali

1	GNL – MCI con alimentazione per GNL
2	Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ – MCI tradizionali
3	Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% e <i>scrubber</i> – MCI tradizionali
4	<i>Powertrain</i> ibridi – Combustibili petroliferi con tenore di zolfo $\leq 0,5\%$ con motore elettrico e batteria accoppiati a un MCI (ambiti specifici)
5	Metanolo – MCI con alimentazione per metanolo
6	Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniacca, tradizionale ed e-ammoniaca) – MCI o <i>fuel cell</i> con ibridizzazione elettrica dove utile

La posizione del GNL rispetto al caso base migliora anche se si aumenta del 50% il peso del criterio relativo alle emissioni locali. In tale evenienza, il GNL si posiziona al secondo posto perché la sua combustione presenta minori emissioni di CO₂ *tank to propeller* (Tab. 5).

Tab. 5 – Ordine di surclassamento al 2030 con aumento del 50% del peso assegnato a CO₂ locale

1	Combustibili petroliferi con tenore di zolfo ≤0,5% – MCI tradizionali
2	GNL – MCI con alimentazione per GNL
3	Olio combustibile pesante (HFO) con tenore di zolfo 3,5% e <i>scrubber</i> – MCI tradizionali
4	<i>Powertrain</i> ibridi – Combustibili petroliferi con tenore di zolfo ≤0,5% con motore elettrico e batteria accoppiati a un MCI (ambiti specifici)
5	Metanolo – MCI con alimentazione per metanolo
6	Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniacca, tradizionale ed e-ammoniacca) – MCI o <i>fuel cell</i> con ibridizzazione elettrica dove utile

Non si assiste a nessuna variazione rispetto all'ordinamento base variando – sia in aumento sia in diminuzione – il peso dei criteri legati ai costi per gli armatori o a quelli per i produttori a monte (**CAPEX e OPEX**). Analogamente, modificando i pesi legati a **sicurezza e disponibilità** o raddoppiando il peso del criterio “**potenzialità di rispetto delle norme su inquinamento locale**” – quindi portandolo allo stesso livello dei criteri più importanti – il risultato non cambia. Sono state eseguite analisi di sensitività anche variando le stime dei valori attribuiti alle alternative su alcuni criteri (disponibilità in natura e nel processo produttivo, economie di scala, CAPEX produttori di carburanti/vettori energetici) senza conseguire esiti significativamente differenti da quello base che può, pertanto, considerarsi robusto.

2.2. Gli esiti dell'AMC al 2050

In un orizzonte temporale di trent'anni, è ragionevole attendersi modifiche di rilievo rispetto al *fuel mix* attuale e a quello ipotizzato per il breve-medio termine, in risposta a possibili e attesi inasprimenti della regolamentazione internazionale sulle emissioni e a interventi normativi su scala continentale; questi potranno riguardare sia gli inquinanti locali sia i gas

serra, tanto da favorire l'emergere e la progressiva diffusione di nuovi combustibili o di vettori energetici atti ad assecondare sia il contenimento delle immissioni locali in atmosfera, sia delle emissioni a dispersione estesa su scala planetaria. Tre decenni sono infatti un arco di tempo durante il quale anche soluzioni ad oggi scarsamente sperimentate o del tutto inesplorate nella navigazione possono ritagliarsi un ruolo di rilievo, conseguendo gradualmente quelle economie di scala (di produzione e manutenzione) e di apprendimento che permetterebbero un progressivo contenimento dei costi relativi all'intera catena del valore.

Pertanto, le alternative prese in considerazione al 2050 si differenziano in parte da quelle analizzate al 2030. Nella fattispecie, anche sulla scorta delle indicazioni del gruppo di lavoro, è stata eliminata l'opzione “Olio combustibile con tenore di zolfo al 3,5% e *scrubber*”, ipotizzando che a quell'orizzonte non venga più prodotto in conseguenza del completo ri-orientamento delle raffinerie verso soluzioni a minor impatto ambientale. Si è ritenuto, inoltre, ragionevole inserire l'eventuale installazione di *scrubber*, presumibilmente anche più avanzati rispetto a quelli in produzione oggi, su quelle navi che saranno ancora alimentate con combustibili petroliferi a basso tenore di zolfo, assumendo la possibile richiesta di azzeramento delle emissioni solforose (e quindi l'inasprimento della regolamentazione *IMO-2020*).

L'analisi multi-criteri restituisce un ordine di surclassamento in cui i combustibili petroliferi con contenuto di zolfo ≤0,5% e i nuovi combustibili (e-fuels)/vettori energetici (prevalentemente ammoniacca, tradizionale ed e-ammoniacca) vengono ordinati *ex aequo* (Tab. 6).

Tab. 6 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 con la batteria di pesi base

1	Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniacca, tradizionale ed e-ammoniacca) – MCI o <i>fuel cell</i> con ibridizzazione elettrica dove utile	Combustibili petroliferi con tenore di zolfo ≤0,5% – MCI tradizionali eventualmente con <i>scrubber</i>
2	<i>Powertrain</i> ibridi – Combustibili petroliferi con tenore di zolfo ≤0,5% con motore elettrico e batteria accoppiati a un MCI (ambiti specifici)	
3	GNL – MCI con alimentazione per GNL	
4	Metanolo – MCI con alimentazione per metanolo	

La decarbonizzazione impone un radicale ripensamento della flotta, in cui potranno avere un ruolo di rilievo combustibili/vettori energetici del tutto nuovi per lo shipping

È significativo confrontare **le due opzioni indicate come preferibili perché lo sono per ragioni molto diverse che l'AMC contemporanea**. Dalle stime raccolte si evince come il ricorso a nuovi combustibili/vettori energetici sia particolarmente interessante in relazione ai criteri CO₂ TTP, CO₂ WTT, rendimento del motore e del processo di produzione. Invece, l'alternativa combustibili petroliferi a basso tenore di zolfo (con *scrubber*) è vantaggiosa in termini di economie di scala e costi, soprattutto in relazione al criterio CAPEX di armatori e produttori di combustibili. Questo risultato, insieme al ricambio completo delle flotte che verosimilmente si verificherà lungo un trentennio, suggerisce che **le azioni che verranno intraprese nei prossimi anni potranno orientare le scelte nell'una o nell'altra direzione** e, in particolare, potranno condurre alla diffusione di nuovi vettori energetici promettenti e ad oggi esplorati solo in via sperimentale, come l'ammoniaca.

Per l'alternativa **"Powertrain ibridi"** vale quanto già annotato per l'analisi al 2030; è una soluzione tecnologica con interessanti potenzialità rispetto ai criteri di ordinamento utilizzati ma limitata ad applicazioni specifiche, dal momento che i motori termici navali sono già normalmente impiegati nella zona prossima al

massimo rendimento per la grande maggioranza del tempo.

Rispetto al 2030, scende invece significativamente la posizione del GNL, essendo strettamente legata a una diffusione territoriale degli stock difficilmente realizzabile e a un processo produttivo oneroso; la sua forza relativa dipenderà dagli investimenti che verranno realizzati in terminali di impianti di liquefazione, depositi e servizi di bunkeraggio. Se la regolamentazione o la normativa stessa andrà nella direzione di ridurre le emissioni climalteranti del 50% al 2050 rispetto al livello del 2008, quale è la proposta IMO, **il mercato sarà indotto a spingere verso altri tipi di alimentazione che presentano un vantaggio superiore in termini emissivi**, oltre che a intervenire sia sulle tecnologie di bordo/banchina sia sugli aspetti organizzativi e gestionali delle spedizioni. In ambito navale, il GNL potrebbe quindi rappresentare una soluzione tecnologica di transizione: in aumento nel breve-medio termine ma limitata a specifiche aree geografiche sul più lungo periodo⁴.

Rimane in coda il **metanolo** tradizionale, che sembra essere un combustibile complessivamente poco adatto per conseguire gli obiettivi indicati dai criteri considerati nell'AMC.

Perché l'ammoniaca?

L'opzione di un *powertrain* navale che utilizza un motore a combustione per ammoniaca – eventualmente ma non necessariamente abbinato a un motore elettrico equipaggiato di batteria – riguarderà verosimilmente il lungo periodo (2030-2050) ma sembra rappresentare un'alternativa interessante per il naviglio che opera su lunghe distanze; tale soluzione è tuttavia ad oggi inesplorata in termini applicativi.

La spinta verso l'ammoniaca (tradizionale ed e-ammoniaca) invece che verso l'idrogeno – che potrebbe apparire un'opzione da soppesare dati i possibili sviluppi che a tendere riguarderanno il trasporto stradale, già sperimentati anche per mezzi pesanti e treni su linee prive di elettrificazione – è data principalmente dal fatto che il settore marittimo necessita di combustibili facilmente trasportabili e facilmente mantenibili allo stato liquido per lunghi periodi di tempo (40-45 giorni di navigazione). L'ammoniaca non contiene carbonio, è stabile a temperatura ambiente e può essere stoccata in forma liquida in condizioni normali di pressione con la sola azione termica; quando serve è ritrasformabile in nuova elettricità, attraverso la sua combustione in motori, turbine o celle a combustibile. Per contro, l'idrogeno, se impiegato allo stato gassoso, richiederebbe una disponibilità di spazio da destinare ai serbatoi di contenimento quasi superiore rispetto a quella necessaria per il carico della nave stessa, a parità di autonomia richiesta; questo per evitare continui fermi e rifornimenti. Se lo si utilizza allo stato liquido, va mantenuto a una temperatura di -250° C, condizione molto difficile da realizzare dal punto di vista tecnico, oltre che energeticamente dispendiosa: ancor di più per un mezzo di trasporto che non può evidentemente beneficiare di una connessione diretta a una rete elettrica. Per queste ragioni, nel trasporto marittimo, l'ammoniaca sembra un'opzione preferibile rispetto all'idrogeno. Può anche essere vista come combustibile da porre in alternativa al metano, eventualmente in motori termici tradizionali *dual-fuel*.

2.2.1. Analisi di sensitività al 2050

Come per il 2030, sono state eseguite anche per il 2050 analisi di sensitività, sia modificando i pesi attribuiti ad alcuni criteri sia variando le stime dei valori assegnati alle alternative relativamente ad alcuni criteri. Occorre precisare che variando i pesi si ha spesso **difficoltà a stabilire il surclassamento delle alternative, segno che la distinzione tra le stesse non è netta come visto per il 2030**. Tuttavia, i risultati ottenuti confermano **l'esistenza di leve che consentono di orientare le scelte** verso un'alternativa rispetto a un'altra.

In particolare, si nota che l'opzione **nuovi vettori energetici surclassa i combustibili a basso tenore di zolfo (con scrubber) aumentando il peso dei criteri ambientali**⁵: variando al rialzo del 50% il peso dei criteri relativi alla CO₂ locale e *well to tank*, oppure operando un'analogia variazione sul peso del criterio "potenzialità di rispetto di nuove norme di inquinamento locale", il modello restituisce l'ordinamento mostrato in Tab. 7. Allo stesso esito si perviene intervenendo sui criteri "economia di scala" e "disponibilità nel processo produttivo", sia riducendone i pesi sia aumentandone le stime rispetto al caso base.

Pertanto, le analisi di sensitività svolte suggeriscono che **la spinta normativa** verso am-

biziosi obiettivi di riduzione delle emissioni climateranti può incidere in misura importante sull'orientamento dell'industria navale verso combustibili a basse o nulle emissioni, quali **l'ammoniaca e gli e-fuels**. Se la direzione sarà questa, sarà necessario intraprendere già nel breve-medio termine investimenti volti a consentire la messa in campo di **economie di scala** attraverso le quali i nuovi prodotti potranno essere disponibili in quantità adeguate. Il tutto tenendo sempre presente la catena energetica complessiva e il necessario ricorso a capacità di generazione elettrica da rinnovabili e a sistemi di controllo delle emissioni presso gli impianti di conversione/produzione. In sostanza, **la decarbonizzazione del trasporto marittimo è in buona parte legata alla decarbonizzazione della produzione di energia elettrica** – e quindi dei vettori energetici – **e dei sistemi di conversione** – con relativa disponibilità di combustibili di sintesi privi di carbonio.

Agendo sulla disponibilità di materia prima, e in particolare riducendo la valutazione assegnata ai combustibili petroliferi a basso tenore di zolfo, l'opzione nuovi combustibili/vettori energetici si posiziona prima. Rispetto alla condizione prospettata per il 2030, **l'ipotesi di una minore disponibilità di bunker oil-based a prezzi accessibili all'orizzonte 2050**, in ragione del progressivo esaurimento dei giacimenti a più bassi costi di estrazione del greggio, **rende ancora più importante la realizzazione di investimenti che consentano di rispondere alla futura domanda di nuovi combustibili low carbon** in sostituzione o in affiancamento a quelli tradizionali (*dual-fuel*).

È stata condotta **un'analisi di sensitività anche in relazione all'ipotesi di diffusione su larga scala di sistemi di Carbon Capture and Storage**, ad oggi ancora a livelli dimostrativi e/o molto costosi. Dietro tale assunzione, l'esercizio svolto ha ridotto del 20% e del 50% le emissioni di CO₂ *well to tank* per i combustibili a basso tenore di zolfo (anche in relazione ai *powertrain* ibridi). In questo caso, **i combustibili oil-based surclassano i nuovi combustibili/vettori energetici**, a patto che non si verifichino significativi aumenti dei costi di produzione a monte (CAPEX produttori).

Tab. 7 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 aumentando del 50% il peso dei criteri ambientali

1	Nuovi combustibili (e-fuels) o vettori energetici (prevalentemente ammoniacca, tradizionale ed e-ammoniaca) – MCI o <i>fuel cell</i> con ibridizzazione elettrica dove utile
2	Combustibili petroliferi con tenore di zolfo ≤0,5% – MCI tradizionali eventualmente con <i>scrubber</i>
3	GNL – MCI con alimentazione per GNL
4	<i>Powertrain</i> ibridi – Combustibili petroliferi con tenore di zolfo ≤0,5% con motore elettrico e batteria accoppiati ad un MCI (ambiti specifici)
5	Metanolo – MCI con alimentazione per metanolo

Pillole

- Il 2020 segna l'inizio di una importante trasformazione per il settore marittimo che porterà, nel medio-lungo periodo, al **passaggio da una condizione di netto predominio di una singola fonte di alimentazione** (stato dell'arte) a un futuro *multi-fuels*.
- Il passaggio a combustibili a basso tenore di zolfo rappresenta indubbiamente una sfida, non solo in mare ma anche nella catena di approvvigionamento dei *fuels* richiesti dalle navi.
- **Gli armatori si troveranno di fronte a un incremento dei costi, di investimento e/o operativi**, in ragione delle scelte che la regolamentazione impone loro di fare.
- Optare per tecnologie e combustibili "nuovi", che impiegano *fuels* non petroliferi, rappresenta ad oggi una scelta praticabile benché ostacolata da una forte inerzia e dai maggiori costi di sostituzione del naviglio; sul lungo periodo, potrà invece risultare determinante nel conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione proposti dall'IMO.
- Nel breve e medio termine (2030), la decarbonizzazione del trasporto marittimo richiederà un ripensamento dell'ecosistema di navigazione nel suo complesso, attraverso **maggiori sforzi in termini di efficienza energetica** e l'adozione di **specifiche misure operative e gestionali**.
- Nel lungo periodo (2050), un contributo rilevante muoverà dalla **diversificazione delle alimentazioni/powertrain per la propulsione delle navi**, tenendo conto delle emissioni di CO₂ legate all'intero ciclo di vita dei *fuels*.

Esiti dell'AMC al 2030

- **Il fuel mix del settore risulta sostanzialmente predeterminato**, in quanto strettamente connesso all'attuale consistenza del naviglio, alla possibilità di sfruttare impianti, dotazioni tecnologiche e competenze consolidate, nonché all'esistenza di una rete infrastrutturale di produzione e distribuzione ampia e commisurata alla domanda.
- Per tali ragioni, il ricorso a **combustibili petroliferi a basso tenore di zolfo** risulta predominante, seguito dall'olio combustibile ad alto tenore di zolfo abbinato all'impiego di appositi e necessari *scrubber*.
- Il **GNL** rappresenterà una soluzione ponte, più sviluppata in aree specifiche, che tuttavia non emergerà come opzione tecnologica dominante, anche se il numero di navi che vi faranno ricorso è atteso in crescita.
- Rispetto ai bunker petroliferi, il GNL risente dei maggiori costi, sia per gli armatori/companie di navigazione sia per la catena del valore dall'estrazione al bunkeraggio, e della limitata diffusione di impianti di liquefazione, stoccaggio e rifornimento, ad oggi presenti solo in alcune parti del mondo.
- Un'azione mirata e importante su queste due leve potrebbe migliorare il suo posizionamento nel prossimo decennio, tenendo presente che il contenimento dell'anidride carbonica nei fumi di combustione del gas naturale può essere compromesso dall'elevatissimo effetto serra che l'eventuale dispersione di metano in atmosfera comporterebbe.
- La migrazione verso **powertrain ibridi**, dotati di motori elettrici con batteria in assistenza a quelli termici, risulta già attuabile nel decennio in corso, ma è relegata ai soli ambiti del trasporto marittimo nei quali dominano i servizi di trasporto brevi e frequenti (traghetti, vaporette, nautica da diporto) o i consumi elettrici di bordo (crociere).
- L'inerzia inevitabile del settore in termini di cambiamenti al *fuel mix* e l'assenza di un sistema infrastrutturale consolidato e commisurato alla domanda portano ad escludere che si possa assistere alla penetrazione di combustibili o vettori energetici nuovi per l'industria navale nell'arco di un decennio – quali metanolo, e-fuels o ammoniacca, ancor meno l'idrogeno – se non a fini sperimentali o di nicchia.
- Il decennio in corso dovrà o potrà servire per testare attentamente un interesse che, specie per l'ammoniacca, risulta essere alto.

Esiti dell'AMC al 2050

- La proposta dell'IMO di definire, per il 2050, un target di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra del 50% rispetto al dato 2008 mette l'industria navale di fronte alla necessità di decidere, già nel decennio in corso, su cosa investire nel più lungo termine.
- L'attuale netta predominanza dei combustibili petroliferi, ravvisabile anche al 2030, non trova più supporto in un orizzonte di lungo periodo, caratterizzato dalla necessaria coesistenza di più soluzioni tecnologiche.
- Mentre i **powertrain ibridi** rafforzano un ruolo specifico legato al tipo di servizio effettuato dalla nave e il metanolo sembra non arrivare a quote di mercato rilevanti, i **nuovi combustibili/vettori energetici** appaiono come preferibili al 2050 alternandosi con i combustibili petroliferi a basso tenore di zolfo.
- Una spinta normativa forte e stabile verso ambiziosi obiettivi di riduzione delle emissioni, sia locali sia climalteranti, può incidere in misura importante sull'orientamento dell'industria navale verso soluzioni *low carbon*, quali **l'ammoniaca, l'e-ammoniaca e gli e-fuels**.
- Se la direzione sarà questa, sarà necessario intraprendere entro la fine del decennio in corso ingenti investimenti volti a consentire la messa in campo di una rete infrastrutturale che consenta di ottenere e distribuire una quantità adeguata di prodotti a ridotta impronta carbonica.
- La decarbonizzazione del trasporto marittimo è in sostanza in buona parte legata alla decarbonizzazione della produzione di energia elettrica e dei sistemi di conversione.
- Per contro, i **combustibili petroliferi a basso tenore di zolfo** (con eventuale *scrubber*) surclassano i nuovi combustibili/vettori se i criteri economici hanno un peso maggiore di quelli ambientali, oppure nel caso in cui si assista alla diffusione su larga scala di sistemi di *Carbon Capture and Storage*, a patto che questo non comporti un significativo aggravio dei costi di investimento e operativi. Gioca invece nettamente a sfavore l'eventuale minore disponibilità di materia prima (greggio) a prezzi accessibili rispetto alla situazione attuale e a quella prospettata al 2030.
- Quanto al **GNL**, potrebbe rimanere una soluzione tecnologica di transizione: in aumento nel breve-medio termine ma non al punto tale da diventare dominante nel più lungo periodo.

Il futuro dell'industria navale, in termini di tecnologie di propulsione, sarà un futuro in cui **la flessibilità e l'accompagnamento contestuale verso una o poche nuove soluzioni stabili** – così come lo è stato il petrolio per oltre un secolo – **sarà premiante**.

Puntare subito su un'unica tecnologia alternativa ai derivati del petrolio non è sostenibile dal punto di vista economico ed energetico (disponibilità).

Accompagnare la transizione verso nuovi vettori iniziando a investire sin dal decennio in corso nella produzione di nuovi combustibili/vettori energetici (specie utilizzando elettricità da fonti rinnovabili) sembra invece essere la scelta preferibile. Sicuramente, la netta predominanza dei combustibili petroliferi ravvisabile oggi e confermata dall'AMC anche all'orizzonte 2030 non trova supporto in un orizzonte di più lungo periodo, caratterizzato dalla necessaria **coesistenza di più soluzioni tecnologiche, per lo più rivolte a rispondere a vincoli ambientali sempre più stringenti**.

Note

- (¹) Salvo limiti più bassi (0,1%) per le *Emission Control Areas* (ECAs).
- (²) Si considerano sia le emissioni *Tank to Propeller* (TTP), legate al processo di combustione sulla nave, sia quelle *Well to Tank* (WTT), associate alle fasi di produzione, stoccaggio e distribuzione dei combustibili impiegati.
- (³) I pesi sono normalizzati alla loro somma. Per cui se il valore del peso di un criterio è 10 e la somma è 200 il peso del criterio varrà $10/200$. Se si passa a 15, il peso del criterio varrà $15/205$ e gli altri si riproporzionano. Per fare analisi di sensitività, il metodo impiegato consente anche di “forzare” la scala di valutazione oltre 10.
- (⁴) La sua diffusione dipende principalmente dallo sviluppo delle infrastrutture di produzione e rifornimento.
- (⁵) Il resto dell'ordinamento rimane immutato.

Bibliografia

Alfa Laval, *Marine Fuel in the low sulphur era*

Concawe, *Role of e-fuels in the European transport system - Literature review*, 2019

DNV GL, *Maritime Forecast to 2050, Energy Transition Outlook 2019*

DNV GL, Piattaforma AFI

DNV GL, *Assesement of selected alternative fuels and technologies*, giugno 2019

EIA-DOE, *The effect of Changes to Marine Fuel Sulfur Limits in 2020 on Energy Markets*, marzo 2019

IMO, *The 2020 global sulphur limit*, 2019

IMO, *Use of scrubber to comply with 0,5% S*, ottobre 2019

International Transport Forum, *On Course Towards Carbon-neutral Shipping?*, OECD, 2018

Thinkstep, *Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel*

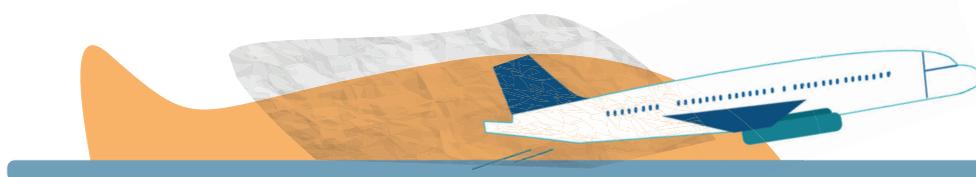
United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), *2019 Review of maritime transport*, 2019

Università di Genova, *Riduzione delle emissioni degli impianti navali*, Prof. Ugo Campora, 2018/2019

Warstila, *Shipping in the 2020-era – selection of fuel and propulsion machinery*, 2018

Il trasporto aereo al 2030 e al 2050

opzioni e prospettive



1. Il trasporto aereo tra Covid, ripartenza e obiettivi ambientali

24

L'aereo è la modalità di trasporto che ha esibito la crescita più sostenuta nell'ultimo decennio: il traffico passeggeri è triplicato rispetto a vent'anni fa e quello cargo è arrivato a rappresentare in termini di valore il 35% del commercio mondiale. Questa dinamica è stata inevitabilmente accompagnata da una sempre maggiore richiesta di jet fuel, data la pressoché totale assenza di alimentazioni alternative competitive sinora impiegate su scala commerciale.

Conseguentemente, sono aumentate anche le emissioni di anidride carbonica generate dal settore, seppure con un'intensità nettamente inferiore a quella registrata dal traffico aereo: a fronte del suo aumento del 75%, la crescita delle emissioni si è fermata al 30% sul periodo 2008-2018, grazie ai miglioramenti di efficienza e all'ottimizzazione delle operazioni a terra e in volo.

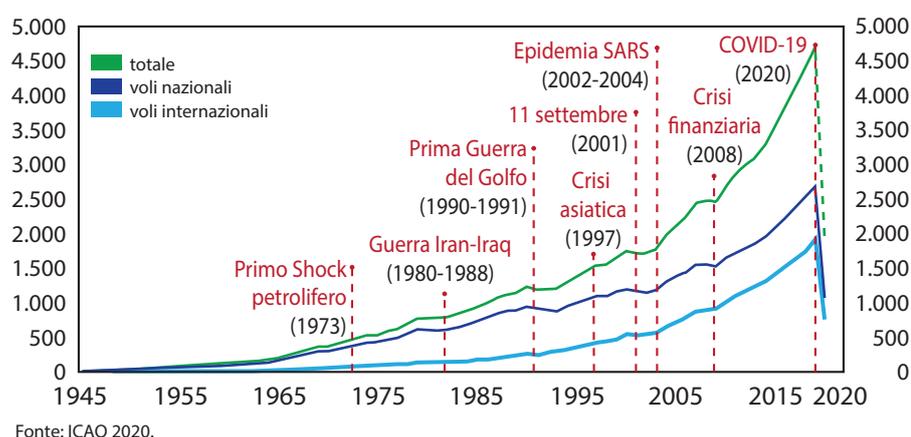
Proprio in tema di decarbonizzazione, il 2020 doveva essere un anno chiave per l'aviazione civile: l'anno a partire dal quale il settore si sarebbe impegnato a indirizzarsi, per la prima volta, verso l'**azzeramento delle sue emissioni nette di CO₂**, avviandosi lungo un percorso di crescita *carbon-neutral*. Il 2020 verrà invece ricordato come l'*annus horribilis*, il peggiore che

questo comparto abbia mai vissuto in termini economici. **La diffusione su scala mondiale del Covid-19** ha portato a un'estesa adozione di misure di *lockdown* che hanno fortemente limitato la circolazione delle persone, decretato la chiusura dei confini e **paralizzato il trasporto aereo internazionale**, ivi incluse le industrie produttive ad esso associate.

Con 4,5 milioni di voli cancellati nel primo semestre 2020, le stime fornite dall'Organizzazione Internazionale per l'Aviazione Civile (ICAO)¹ prospettano una **riduzione del numero di passeggeri** compresa tra i 2,3 e i 3 miliardi sull'intero anno (oltre la metà del totale) e un **crollo delle entrate per le compagnie aeree** tra i 300 e i 400 miliardi di dollari rispetto al 2019².

Data la natura dell'impatto pandemico e le caratteristiche delle merci generalmente trasportate per via aerea (prodotti *time sensitive*, come i farmaci, e ad alto valore aggiunto), il segmento cargo ha invece mostrato una buona tenuta, con un incremento significativo dei voli a partire da marzo, alimentato anche dai maggiori traffici di tipo *belly* che utilizzano le stive dei velivoli adibiti al trasporto passeggeri. Tuttavia, dato il peso contenuto del mercato cargo sul totale dei traffici aerei, **il quadro complessivo del settore rimane molto critico**, con perdite occupazionali³ che potrebbero interessare fino a 25 milioni di persone: un numero equivalente all'intera forza lavorativa italiana.

**Fig. 1 –
Evoluzione
del traffico
pasgergeri
(mil. persone)**



Prima di questo shock sanitario, economico e sociale di natura globale, il settore non aveva mai subito chiusure così estese e si era mostrato resiliente a tutte le passate crisi. Quella che attraversa oggi risulta, invece, completamente diversa, estesa su scala mondiale e di durata

in materia concordavano nel delineare, entro il 2040, il raddoppio di questo mercato, sia in termini di numero di aerei operativi, sia di passeggeri/merci trasportati.

Pertanto, al netto delle criticità della ripartenza, il trasporto aereo dovrà continuare a per-

Il 2020 doveva essere il punto di partenza di un percorso di crescita carbon-neutral per l'aviazione civile, verrà invece ricordato come l'anno peggiore di sempre in termini economici

non prevedibile, seppur con segnali in leggera ripresa a partire da maggio-giugno. Tuttavia, anche nello scenario più ottimista di imminente fine della pandemia, il ritorno ai normali livelli di traffico aereo richiederà tempo e non sarà privo di costi.

In un simile contesto, risulta evidente come le dinamiche di breve-medio periodo siano caratterizzate da un elevato grado di incertezza. Le risposte alla crisi da parte dei soggetti più direttamente coinvolti sono tutt'altro che univoche e definitive: da chi cancella programmi di ricerca già avviati – è il caso, ad esempio, di Airbus e Rolls Royce con il progetto *E-fan-X* di aereo ibrido-elettrico – a chi intravede nella congiuntura attuale l'opportunità per accelerare la transizione verso soluzioni a minori emissioni. Ad oggi, non è possibile sapere se il Covid-19 determinerà uno slancio evolutivo forte da parte del settore o se, al contrario, ne rafforzerà l'inerzia.

Il diffondersi del virus e la forte crisi che ne è conseguita determineranno ovvie revisioni degli indici di crescita attesi, almeno per il breve periodo, ma sul più lungo termine è molto probabile che il settore si riporti lungo una traiettoria ascendente⁴. Prima della pandemia, infatti, non vi erano elementi che facessero pensare a un'interruzione del trend di crescita del traffico aereo; al contrario, le principali previsioni

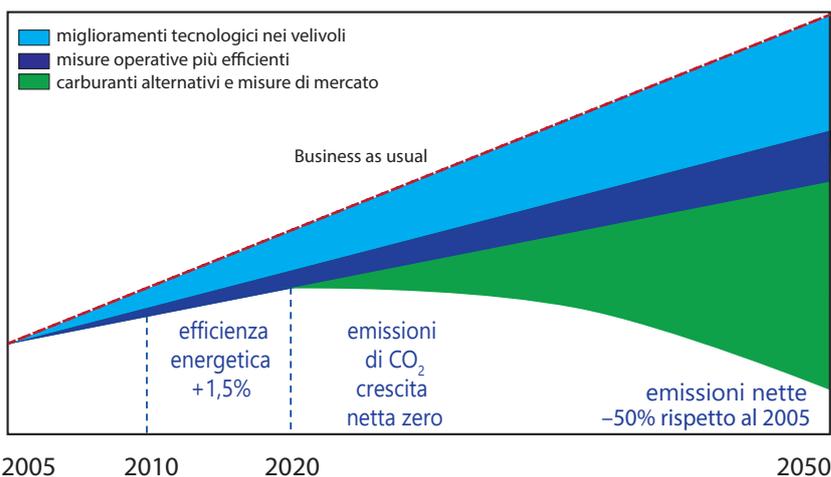
seguire gli obiettivi che lo dovrebbero accompagnare lungo un percorso sempre più spinto di decarbonizzazione, in un orizzonte – quale il 2050 – che non dovrebbe più avere alcuna memoria della pandemia.

1.1. Gli aspirational goals per il clima

Nel 2009, l'intera industria dell'aviazione – ivi inclusi costruttori di aeromobili, compagnie aeree, aeroporti, fornitori di servizi di navigazione aerea – si è impegnata a perseguire tre importanti obiettivi climatici:

- **migliorare l'efficienza energetica** dell'1,5% l'anno tra 2009 e 2020, obiettivo rafforzato da una Risoluzione ICAO del 2013 che definisce un target volontario del 2% l'anno tra il 2013 e il 2050;
- **porre un cap alle emissioni nette di CO₂ a partire dal 2020** (puntando quindi a una crescita *carbon-neutral*);
- **ridurre le emissioni nette del settore del 50% entro il 2050** rispetto al livello del 2005.

Il conseguimento di questi sfidanti obiettivi poggia sull'implementazione di una strategia multidimensionale, che si sostanzia in quattro nuclei fondanti: sviluppi tecnologici che interessano il design dei velivoli e i motori; ottimizza-



Fonte: IATA.

Fig. 2 – Gli obiettivi climatici del settore (emissioni di CO₂)

zione delle operazioni sia a terra che in volo; meccanismi di mercato, come il sistema di compensazione delle emissioni definito da ICAO, e certificati di emissione; crescente ricorso a carburanti sostenibili (SAF - *Sustainable Aviation Fuels*).

Lo sviluppo tecnologico del design e dei motori rappresenta una leva cruciale per il settore, funzionale al perseguimento di tutti gli obiettivi climatici citati. Il consumo di carburante per passeggero-chilometro di un nuovo velivolo è in genere inferiore del 15-20% rispetto a quello che va a sostituire, con un impatto evidente anche in termini di emissioni. In considerazione dei tempi di ricambio degli aerei – che di norma si aggirano sui 20 anni – e in base ai dati forniti dalla principale letteratura in materia, è plausibile ritenere che per tutto il decennio in corso – e ragionevolmente fino al 2035 – i nuovi velivoli siano in prevalenza rappresentati da sviluppi evolutivi di quelli esistenti, con una configurazione tradizionale di tipo *tube and wing* e con sistemi di propulsione turbofan (tipici delle tratte a lungo raggio).

Tra i cambiamenti possibili rientrano l'uso di materiali più leggeri, migliorie all'aerodinamica del velivolo (profilo alare a flusso laminare), l'impiego di motori più avanzati ad elevato rapporto di diluizione (UBHR - *ultra high bypass ratio*), il ricorso a sistemi di azionamento elettrico del carrello di atterraggio, l'uso di *fuel cell*

per la generazione elettrica a bordo. Una combinazione di queste tecnologie può consentire aumenti di efficienza superiori del 25-30% rispetto ai modelli attualmente in servizio. In parallelo, **l'ottimizzazione del traffico aereo e dell'uso delle infrastrutture a terra**, attraverso interventi quali la riduzione del carico a bordo, la selezione di rotte o profili di volo più efficienti, un'attenta gestione dei *turnaround* con connessi minori tempi di carico e scarico o il miglioramento delle piste sono azioni fondamentali che permettono di migliorare l'efficienza complessiva del sistema allineando le innovazioni tecnologiche presenti sugli aerei con quelle disponibili nelle infrastrutture a terra.

Le azioni descritte – tecnologiche e operative – sono funzionali anche al perseguimento dell'obiettivo **“zero emissioni nette a partire dal 2020”**, adottato dal settore nel 2009 e recepito da ICAO nel 2010, in linea con i principi sanciti dal Protocollo di Kyoto e, successivamente, dall'Accordo di Parigi. L'evoluzione del design e dei motori a cui assisteremo nel decennio in corso sarà in parte anche stimolata dalla necessità di rispettare gli **standard emissivi** definiti da ICAO nel 2017 e applicabili – in funzione di massa e dimensione – agli aerei di nuova costruzione a partire dal 2020 e a quelli già in esercizio o in fase di realizzazione a partire dal 2023, con la data limite del 2028 dopo la quale ogni aereo autorizzato al volo dovrà

Nel medio termine, lo sviluppo tecnologico del design e dei motori, l'ottimizzazione del traffico aereo e dell'uso delle infrastrutture a terra saranno leve fondamentali per migliorare l'efficienza del sistema

rispettare le norme, pena la messa a terra. L'agenzia dell'ONU ha anche definito un **meccanismo di mercato** idoneo al perseguimento di una crescita *carbon neutral*: il **Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation**, altrimenti noto come **CORSIA**.

Nel lungo termine, forti miglioramenti in termini di efficienza energetica e riduzioni significative delle emissioni sono principalmente conseguibili aumentando il ricorso a **nuovi combustibili low carbon** e attraverso la diffusione di **velivoli innovativi** e completamen-

che impiegano questo sistema di propulsione che, tuttavia, solo nel lungo termine potrà essere utilizzato su jet regionali (50-100 posti). Velivoli completamente elettrici – dove l'elettricità è prodotta a partire da fonti rinnovabili – o a idrogeno sono attualmente allo studio ma potenzialmente non appaiono in grado di penetrare il mercato in modo rilevante al 2050.

Riduzioni importanti delle emissioni muoveranno anche dalla sostituzione via via crescente del jet fuel fossile con **combustibili alternativi a basso o nullo contenuto di carbonio (SAF)**.

Nel lungo termine, una spinta maggiore verso la decarbonizzazione potrà avvenire aumentando la quota di carburanti low carbon e carbon free e attraverso la diffusione di velivoli fortemente innovativi

te diversi da quelli attuali in termini di design (ali e carlinga) e/o di propulsione. Questi ultimi, tipicamente *capital-intensive* e con lunghi tempi di realizzazione, impiegano diversi anni dopo la loro entrata in servizio prima di raggiungere un livello di penetrazione del mercato tale da consentire rilevanti benefici ambientali per il sistema. Rientrano in questa categoria le fusoliere *double bubble*, i velivoli *box wing* (dove le punte delle ali sono collegate tra di loro da alette verticali), o ancora i *Blended Wing Bodies* (BWB), in cui l'ala si fonde con una fusoliera appiattita e senza coda: questi ultimi sono molto silenziosi in quanto i motori sono posizionati sul dorso del velivolo e, grazie alla loro maggior portanza e minore resistenza rispetto agli aerei con la tradizionale fusoliera a sezione circolare, consumano meno carburante alla velocità di crociera. In termini di propulsione, una delle tecnologie più promettenti sembra essere quella dei **powertrain ibridi**, in cui i motori a turbina sono accoppiati a un motore elettrico che viene utilizzato come propulsione addizionale per soddisfare la domanda di picco. Nella categoria 15-20 posti, vi sono già aeromobili

Questi *fuels* – in alcuni casi già maturi dal punto di vista tecnologico – sono tuttavia ancora molto costosi (da 2 a 8 volte il prezzo del jet fossile), sia per la limitatezza di materie prime idonee sia per le tecniche di produzione molto complesse. In un arco trentennale, quale quello in esame, e potendo contare su un quadro normativo chiaro e stabile nel tempo, è tuttavia possibile che processi produttivi ad oggi solo sperimentali possano raggiungere un significativo livello di commercializzazione, consentendo riduzioni delle emissioni climalteranti dirette e indirette lungo l'intero ciclo di vita comprese tra il 50% e il 95% rispetto al jet fuel fossile, a seconda del *feedstock* impiegato.

2. Alternative a confronto: costruzione del metodo ed esiti

In considerazione del contesto e dello scenario di decarbonizzazione delineato, la presente analisi – il cui perimetro geografico di riferimento è giocoforza quello mondiale stante la natura

Lo schema CORSIA

Approvato nel 2018 ed entrato in vigore il 1° gennaio 2019, è uno schema di compensazione e riduzione del carbonio attraverso il quale le compagnie aeree possono acquistare crediti compensativi, pagando altri settori affinché mettano in campo azioni per ridurre le emissioni. Per quanto la validità di questo strumento sia spesso stata messa in discussione, CORSIA è stato istituito con l'obiettivo di affiancare, per il breve e medio termine, le iniziative di decarbonizzazione del settore aereo internazionale per il lungo periodo, che puntano a ridurre le emissioni del 50% rispetto ai livelli 2005 entro il 2050: un target ambizioso promosso dall'Associazione Internazionale per il Trasporto Aereo (*International Air Transport Association - IATA*), per conseguire il quale sarà necessario implementare misure tecnologiche e operative sempre più incisive.

globale del settore – si focalizza su **cinque soluzioni tecnologiche alternative** (Tab. 1).

La comparazione tra le cinque opzioni considerate è stata effettuata attraverso un'analisi

multi-criteri che ha portato all'elaborazione di due matrici di decisione (2030 e 2050), strutturate in base a **20 criteri** (Tab. 2), individuati tenendo conto delle particolarità del settore e

Tab. 1 – Alternative considerate nell'AMC applicata al trasporto aereo

Alternative	Descrizione
Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio e per piccoli velivoli)	(a) Jet cherosene: si fa tipicamente riferimento al JET A-1, carburante per aviazione derivato dai processi di raffinazione del greggio, a seguito dei quali viene miscelato con piccolissime quantità di additivi che, tra le altre cose, svolgono una funzione antidetonante, evitano la formazione di depositi nella turbina o ancora prevengono il suo congelamento; (b) Benzina avio: altrimenti nota come Avgas (<i>Aviation gasoline</i>), viene utilizzata solo negli aerei equipaggiati con motori a pistoni: prevalentemente piccoli velivoli destinati ad attività per cui siano sufficienti piccole potenze
Sustainable Aviation Fuel (SAF) di tipo HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)	Carburanti liquidi alternativi <i>drop-in</i> , a basso o nullo contenuto di carbonio di origine biologica. In questa categoria rientrano i SAF di tipo HVO/HEFA, caratterizzati da processi di produzione più maturi e pronti o prossimi alla commercializzazione. I SAF di tipo HEFA (esteri idroprocessati di acidi grassi) impiegano come <i>feedstock</i> oli vegetali e grassi di scarto che, dopo una prima fase di deossigenazione, vengono sottoposti a idrogenazione. L'output finale è costituito da idrocarburi paraffinici a catena dritta privi di composti aromatici, ossigeno e zolfo, con tassi di miscelazione con i combustibili fossili che possono arrivare al 50%. Il processo di conversione oleochimica che porta alla produzione di <i>fuels</i> di tipo HEFA è simile a quello da cui si ottiene l'olio vegetale idrotrattato (<i>Hydrotreated Vegetable Oil - HVO</i>), meglio noto come diesel rinnovabile, con l'aggiunta di ulteriori processi di <i>hydrocracking</i> per ottenere prodotti compatibili con il jet fuel
Sustainable Aviation Fuel (SAF) diversi da HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)	Carburanti liquidi alternativi <i>drop-in</i> , a basso o nullo contenuto di carbonio. I processi produttivi (termochimici) da cui si ottengono i SAF diversi da HVO/HEFA sono ancora, perlopiù, in fase dimostrativa, sono molto costosi e ancora lontani dalla fase di commercializzazione. Rientrano in tale categoria: (a) Cherosene paraffinico sintetico - Fischer-Tropsch, fino al 50% in miscela con il jet fossile: i <i>feedstock</i> utilizzati sono residui agricoli, colture energetiche e rifiuti solidi urbani; (b) Cherosene paraffinico sintetico - <i>Power to Liquids</i> (PTL o e-fuels) fino al 50% in miscela con il jet fossile: rispetto al precedente, i gas di sintesi possono essere prodotti a partire da idrogeno ottenuto da elettrolisi dell'acqua (usando elettricità rinnovabile) combinato con anidride carbonica catturata; (c) Cherosene paraffinico sintetico - <i>Alcohol to Jet</i> (ATJ), fino al 50% in miscela con il jet fossile: attraverso un processo di fermentazione, zuccheri, amidi o cellulosa idrolizzata vengono convertiti in alcool che viene poi ulteriormente processato; (d) Isoparaffine sintetiche (SIP): processo di conversione diretta degli zuccheri che impiega la fermentazione per ottenere farnesene che, dopo opportuno <i>upgrading</i> , può essere usato come carburante <i>drop-in</i> , ma con un tasso di miscelazione più basso dei precedenti e fino al 10%
Powertrain ibridi – Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) – con motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina	I motori a turbina vengono utilizzati per la produzione di energia elettrica e per ricaricare le batterie, le quali possono fornire la propulsione necessaria durante diverse fasi di volo (ritiro dei carrelli, luci, aria condizionata). I carburanti impiegati nel motore a turbina sono liquidi (jet fuel, eventualmente in miscela con SAF)
Idrogeno – <i>fuel cell</i> (eventualmente motore a turbina) che alimentano motore elettrico	Aerei <i>full electric</i> a idrogeno: ad oggi esistono solo alcuni prototipi, tipicamente di piccole dimensioni, che funzionano attraverso la combinazione di celle a combustibile a idrogeno con un sistema a propulsione distribuita per aerei elettrici, quel che di fatto supera le prestazioni offerte dalle batterie al litio, sia in termini di sicurezza che di autonomia energetica del velivolo

Tab. 2 – Dimensioni e criteri dell'AMC

Dimensione	Criterio	Descrizione
Dimensione socio-economico-lavorativa	1. Economia di scala lato carburante	Si riferisce all'esistenza di un consolidato sistema di produzione del carburante/vettore e di manutenzione del tipo di motore: esperienza, personale e capacità, impianti e loro diffusione
	2. Economia di scala lato motore	Si riferisce all'esistenza di un consolidato sistema di progettazione, produzione e manutenzione del tipo di motore e di aereo
	3. Decarbonizzazione della filiera	Si riferisce a quanto è possibile che venga decarbonizzata la filiera per effetto della decarbonizzazione della produzione
Dimensione economica	4. Quantità di velivoli attuale per fonte di alimentazione/powertrain	Dato numerico di riferimento che intende misurare il punto di "ancoraggio" dato dalla flotta attuale e quindi l'inerzia di trasformazione delle flotte. È espresso come numero di velivoli di ciascun tipo nel mondo
	5. CAPEX della linea aerea	Indica l'ordine di grandezza dell'investimento necessario per costruire un aereo con un dato tipo di motori/alimentazione (valutato per confronto rispetto alla configurazione standard attuale)
	6. OPEX della linea aerea	Indica l'ordine di grandezza dei costi operativi necessari per costruire un aereo con un dato tipo di motori/alimentazione (valutato per confronto rispetto alla configurazione standard attuale)
	7. CAPEX produttori di combustibili/vettori energetici	Investimenti per la produzione dei carburanti/vettori energetici (valutato per confronto con la situazione per jet fuel e benzina avio)
	8. OPEX produttori di combustibili/vettori energetici	Costi operativi per la produzione dei carburanti/vettori energetici (valutato per confronto con la situazione per jet fuel e benzina avio)
	9. Tassazione/incentivi	Possibile soggezione a tassazione (il jet fuel ora non è tassato) o a incentivi (es. riduzione costo aeroportuale)
Dimensione energetica	10. Rendimento del sistema motore a bordo (a valle del serbatoio)	Rendimento energetico della trasformazione da combustibile/vettore energetico a propulsione al jet/alle eliche
	11. Rendimento da pozzo (fonte) a serbatoio	Rendimento energetico dal processo produttivo del combustibile/vettore energetico al serbatoio
	12. Autonomia energetica (adattabilità di motore e carburante)	Indicatore della possibilità di utilizzare un dato tipo di motore e combustibile su diversi raggi di impiego
	13. Incidenza massa/vettore energetico	Incidenza della massa di motore/vettore energetico rispetto a quello di un jet commerciale a pieno carico valutato in rapporto alla configurazione standard attuale
	14. Densità energetica	Valore proprio del combustibile/vettore energetico espresso in Wh/kg
Dimensione ambientale	15. CO ₂ locale (da motori a bordo)	Emissioni di CO ₂ dovute ai motori di bordo
	16. CO ₂ da pozzo/fonte a serbatoio	Emissioni di CO ₂ riferite alla filiera
	17. Potenzialità di riduzione NO _x rispetto al jet fuel	Indica la possibilità che il combustibile/vettore energetico soddisfi eventuali future norme più stringenti su inquinanti (NO _x)
	18. Potenzialità di riduzione emissione rumori rispetto al jet fuel	Indica la possibilità che il combustibile/vettore energetico soddisfi eventuali future norme più stringenti su vibrazioni e rumori

Dimensione sicurezza e disponibilità energetica	19. Disponibilità della materia prima a prezzi ragionevoli	Rappresenta la disponibilità in natura a costi accettabili della materia prima da cui si ottiene il carburante/vettore energetico
	20. Disponibilità nel processo produttivo e nella catena di approvvigionamento	Rappresenta la disponibilità del combustibile/vettore energetico negli aeroporti e, in generale, nelle filiere produttive industriali

con l'intento di comprendere i fattori più importanti afferenti a cinque macro-dimensioni: sociale-lavorativa; economica; energetica; ambientale; di sicurezza e disponibilità energetica. Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato al Workshop sul trasporto aereo dell'11 luglio 2019, organizzato dal **Gruppo Strategico "Carburanti ed Energie Alternative" istituito da unem**. La caratterizzazione delle alternative considerate ha permesso di attribuire un giudizio ai criteri della matrice di decisione nei due orizzonti di riferimento e di formulare considerazioni relative all'evoluzione attesa del *fuel mix* del settore, avendo bene a mente la situazione da cui si parte, rappresentata dall'**assoluto predominio di propulsori a turbina (turbofan o turboelica) alimentati da jet cherosene**, eventualmente miscelati con SAF già maturi.

2.1. Gli esiti dell'AMC al 2030

In base ai pesi assegnati ai diversi criteri all'orizzonte 2030, l'AMC restituisce un **ordine di surclassamento in cui prevale nettamente l'opzione "Jet cherosene/benzina avio"**, seguita da "SAF di tipo HVO/HEFA" (Tab. 3). Un esito sostanzialmente predeterminato dalla forte inerzia che caratterizza questa modalità di trasporto e che in un orizzonte di dieci anni non conoscerà stravolgimenti di rilievo rispetto al suo profilo attuale.

Al 2030, il **jet fuel** tradizionale rimane l'opzione preferibile, premiata dalla possibilità di sfruttare tecnologie e competenze consolidate da decenni, dalla presenza di un'infrastruttura di approvvigionamento e distribuzione diffusa su scala mondiale (che poggia su investimenti perlopiù interamente ammortizzati), dal lento ricambio – specie in termini progettuali – della flotta aerea. Tutti elementi che, rispetto alle alternative esaminate, conferiscono a questa opzione vantaggi di costo, di disponibilità, di affi-

dabilità e di sicurezza che si manterranno lungo il decennio in corso. L'impatto emissivo non trascurabile può essere, nel medio termine, ragionevolmente attenuato da miglioramenti di efficienza connessi allo sviluppo tecnologico del design e dei motori, nonché dall'ottimizzazione del traffico aereo e dell'uso delle infrastrutture a terra.

L'AMC evidenzia anche il possibile ruolo dei **Sustainable Aviation Fuels (SAF)**, l'alternativa più immediata per migliorare le performance ambientali del settore, in quanto combustibili *drop-in* che consentono il *blending* con il carburante fossile senza limitare le prestazioni dell'aeromobile e senza dover apportare modifiche agli impianti di bordo e alle infrastrutture logistiche e distributive di terra. A fronte di una minore impronta carbonica – che è comunque funzione del processo produttivo e del *feedstock* impiegato – sono soluzioni con costi di produzione (CAPEX e OPEX) significativamente superiori rispetto a quelli del jet fuel fossile. Negli anni a venire, attenuare o rimuovere la barriera economica rappresenterà quindi una leva chiave per consentirne lo sviluppo su scala globale.

Tab. 3 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030 con la batteria di pesi base

1	Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio e per piccoli velivoli)
2	SAF di tipo HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
3	<i>Powertrain</i> ibridi – Jet fuel (jet cherosene/ benzina avio) con motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina
4	SAF diversi da HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
5	Idrogeno – <i>fuel cell</i> (o eventualmente motore a turbina) che alimentano motore elettrico

Al 2030, non sembrano emergere leve attivabili per modificare sensibilmente il ruolo del jet fuel fossile, sostenuto da una combinazione di criteri che lo rendono nettamente preferibile alle altre opzioni

Tra i carburanti sostenibili, l'ordinamento base al 2030 pone in evidenza il possibile maggior ruolo dei **SAF di tipo HVO/HEFA**, processi produttivi tendenzialmente già maturi e quindi in grado di surclassare le alternative più sperimentali e rivoluzionarie prese in considerazione. Tra i diversi percorsi che portano alla produzione di SAF, gli HVO/HEFA sono quelli caratterizzati da maggiori economie di scala, con diversi impianti già realizzati e operativi e minori costi di investimento (CAPEX). Per questi prodotti, la principale sfida – su cui si gioca anche la possibilità di mantenere un ruolo di rilievo nel più lungo termine – riguarda la disponibilità di *feedstock* sostenibili ed economicamente accessibili, in grado di alimentare impianti industriali di grandi dimensioni. L'impiego di materie prime lignocellulosiche potrebbe rappresentare una soluzione interessante ma ad oggi non esiste ancora una catena di fornitura ottimizzata e adeguata allo scopo.

Rimangono relegate nella parte finale dell'ordinamento le tecnologie più innovative sia lato propulsione che lato carburanti. L'esito dell'AMC al 2030 porta a ritenere che i **power-train ibridi** e i **SAF di tipo non HVO/HEFA** non avranno ancora raggiunto un livello di sviluppo tale da consentirne una penetrazione rilevante. Si ricorda che, ad oggi, i velivoli ibridi – opzione esplorata dai costruttori per i voli regionali – sono ancora a uno stadio dimostrativo e l'attuale congiuntura negativa per il settore aereo potrebbe rallentarne ulteriormente lo sviluppo, rimandandolo a orizzonti più lontani. Analogamente, i SAF ottenuti da processi produttivi più sperimentali difficilmente raggiungeranno nell'arco di un decennio la scala commerciale necessaria ad abbattere gli elevati costi che li caratterizzano.

Coerentemente con queste considerazioni, e ribadendo la forte inerzia del settore, si comprende il posizionamento finale di velivoli rivoluzionari come quelli alimentati a **idrogeno**, ad oggi in via di sperimentazione. Sono tecnologie con tempi di penetrazione del mercato molto lunghi in quanto richiedono valutazioni ampie di natura economica, energetica e ambientale. La possibilità che l'idrogeno sia prodotto con elettricità rinnovabile, la sua densità energetica, la

relativa massa e l'autonomia raggiungibile con i serbatoi, nonché la dotazione di impianti per il rifornimento presso gli aeroporti sono elementi che pongono la concorrenzialità di queste opzioni su orizzonti temporali maggiori di dieci anni.

2.1.1. Analisi di sensitività al 2030

Nella lettura degli esiti dell'AMC è opportuno ricordare che l'ordinamento proposto è quello che meglio soddisfa i criteri individuati con i pesi base ad essi attribuiti. Nel caso in esame, operando variazioni dei pesi⁵ per testare la sensitività dei risultati, l'ordine di preferenza espresso dall'esito base trova sempre conferma: la sua invarianza significa una relazione di surclassamento forte, quindi robusta al variare della sensibilità che un valutatore può avere nei confronti di un determinato peso (percezione ambientale, finanziaria, etc.). Anche l'impiego di pesi uguali per tutti i criteri restituisce l'ordine di preferenza delineato nel caso base. Infine, sono state eseguite analisi di sensitività anche variando le stime dei valori attribuiti alle alternative su alcuni criteri.

Si espongono più in dettaglio le analisi effettuate, tenendo conto delle caratteristiche proprie di questo settore e della sua ragionevole evoluzione. Considerando il vantaggio di costo associato al jet fuel fossile rispetto ai carburanti alternativi, si è proceduto ad aumentare, fino a raddoppiarlo, il valore assegnato al criterio **OPEX delle compagnie aeree** per questa opzione, al fine di considerare l'eventuale introduzione di una componente fiscale (oggi assente). Pur con questa modifica, l'ordinamento finale non cambia. Allo stesso esito si perviene assegnando il peso massimo (10) al criterio che descrive il possibile assoggettamento a tassazione del prodotto e a quello relativo alla decarbonizzazione della filiera.

Si è anche cercato di comprendere se i SAF diversi da HVO/HEFA potessero conseguire un posizionamento migliore di quello base nell'arco del decennio considerato; in ragione degli alti costi di investimento che caratterizzano

Le opzioni più sperimentali e rivoluzionarie rimangono in coda: in un settore caratterizzato da una forte inerzia è necessario più di un decennio per testarne l'applicazione su scala commerciale

questi processi produttivi, si è intervenuti sul criterio **CAPEX dei produttori** che è stato significativamente ridotto equiparandolo a quello dei SAF più maturi di tipo HVO/HEFA. Pur con questa modifica, si conferma l'ordinamento base che non cambia nemmeno se si riduce la disponibilità di *feedstock* impiegati nei processi HVO/HEFA.

Questo insieme di risultanze sottende una distinzione sufficientemente netta delle prestazioni delle diverse alternative all'orizzonte considerato, specie per quel che riguarda il carburante tradizionale e i SAF più maturi.

2.2. Gli esiti dell'AMC al 2050

In un orizzonte temporale di trent'anni, è ragionevole attendersi modifiche rispetto al mix di alimentazioni/propulsioni ipotizzato per il breve-medio termine; in risposta all'obiettivo di decarbonizzazione al 2050, potranno infatti essere adottate misure per facilitare e sostenere la diffusione delle opzioni a minore impronta carbonica. Tre decenni sono inoltre un arco di tempo in cui anche soluzioni ad oggi poco sperimentate o del tutto inesplorate possono ritagliarsi un ruolo di rilievo o affacciarsi sul mercato, conseguendo gradualmente quelle economie di scala (in termini sia di produzione sia di utilizzo/manutenzione del sistema di propulsione) e di apprendimento che permetterebbero di ridurre – financo ad azzerare – il gap di costo rispetto all'opzione tradizionale.

Tuttavia, anche a quell'orizzonte, l'**esito base dell'AMC** (Tab. 4) – che comunque sconta una riduzione di CAPEX e OPEX rispetto al 2030 per le tecnologie più *disruptive* – suggerisce il permanere della dipendenza del settore dal jet fuel tradizionale. I **powertrain ibridi** risultano l'opzione preferibile in un orizzonte di lungo periodo, ma saranno tendenzialmente concentrati

nel **segmento regionale dei voli a corto-medio raggio**; aspetto, quest'ultimo, che l'analisi non cattura ma che è necessario considerare per una corretta lettura degli esiti. Si tratterebbe di un surclassamento relativo rispetto al sistema di propulsione tradizionale e, peraltro, ancora legato al consumo di carburanti liquidi per l'alimentazione dei motori a turbina (necessari per la produzione di energia elettrica a bordo).

Sul lungo periodo si assiste, inoltre, a un cambio di posizione nell'ambito dei SAF, con la categoria **HVO/HEFA** che perde posizione a favore delle **tipologie più sperimentali**, la cui produzione risulta preferibile sia in termini di emissioni sull'intero ciclo di vita sia per la maggiore disponibilità dei *feedstock* impiegati. Tecnologie *disruptive* come i **velivoli a idrogeno** non vengono invece ritenute ottimali in base al set di obiettivi considerati dall'AMC, nemmeno in un orizzonte quale il 2050. In sintesi, l'esito restituito dall'analisi AMC porta a evidenziare

Tab. 4 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 con la batteria di pesi base

1	Powertrain ibridi – Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) con motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina
2	Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio e per piccoli velivoli)
3	SAF diversi da HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
4	SAF di tipo HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
5	Idrogeno – <i>fuel cell</i> (eventualmente motore a turbina) che alimentano motore elettrico

Al 2050, l'analisi evidenzia un mix di soluzioni preferibili: i powertrain ibridi (per il mercato regionale), i SAF oggi più sperimentali (ad esempio gli e-fuels) e il jet fuel fossile

le difficoltà connesse a una netta sostituzione del jet fuel nel trasporto aereo globale. Tuttavia, al 2050, **il fuel mix del settore risulterà più diversificato rispetto al 2030**, con opzioni alternative – specialmente *powertrain* ibridi e SAF – potenzialmente in grado di conquistare rilevanti quote di mercato.

2.2.1. Analisi di sensitività al 2050

Anche per il 2050 sono state eseguite analisi di sensitività, sia modificando i pesi attribuiti ad alcuni criteri sia variando le stime dei valori assegnati alle alternative riguardo alcuni criteri.

È interessante notare a quali condizioni i **SAF diversi da HVO/HEFA**, carburanti sintetici ad oggi solo sperimentali tra cui rientrano a pieno titolo soluzioni *drop-in* quali gli e-fuels, surclassano tutte le alternative considerate (Tab. 5). Sono principalmente due le leve in grado di modificare l'esito base: una di matrice ambientale, l'altra di tipo economico.

Una maggiore rilevanza dell'obiettivo di decarbonizzazione dell'intera filiera che gravita attorno al trasporto aereo – ad esempio attraverso l'inasprimento della normativa ambientale che ad oggi regola il settore in tema di utilizzo di carburanti sostenibili – può favorire (anche attraverso opportuni incentivi) la penetrazione di soluzioni come i SAF diversi da HVO/HEFA caratterizzati da una migliore impronta carbonica rispetto ai combustibili avio tradizionali lungo l'intero ciclo di vita.

I SAF di sintesi surclassano tutte le alternative considerate in presenza di una spinta normativa volta ad accelerare la decarbonizzazione della filiera e di un forte abbattimento dei loro costi di investimento e operativi

In assenza di una spinta normativa, l'avanzamento dei SAF può essere sostenuto anche da una sensibile riduzione dei relativi costi di produzione (CAPEX e OPEX dei produttori) tale da allinearli a quelli del jet fuel di origine fossile, ad esempio attraverso forme di incentivazione che consentano ai produttori di assumersi il rischio di investimenti ad alta intensità di capitale.

Allo stesso esito si perviene anche in presenza di mutate condizioni economiche per il jet fuel tradizionale, ad esempio ipotizzando un aumento di prezzo di matrice politica (assog-

Tab. 5 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 agendo, anche alternativamente, sul criterio di decarbonizzazione della filiera, sui costi di produzione dei SAF diversi da HVO/HEFA e sull'OPEX per le compagnie aeree relativamente al jet fuel fossile

1	SAF diversi da HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
2	<i>Powertrain</i> ibridi – jet fuel (jet cherosene/ benzina avio) con motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina
3	Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio e per piccoli velivoli)
4	Idrogeno – <i>fuel cell</i> (eventualmente motore a turbina) che alimentano motore elettrico
5	SAF di tipo HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)

gettamento a tassazione) e/o di mercato (mutamento delle condizioni di offerta legato alla minor capacità di raffinazione su scala mondiale). Una simile evenienza – che interesserebbe sia i sistemi di propulsione tradizionali sia quelli ibridi – si rifletterebbe sul valore assegnato al criterio **OPEX delle compagnie aeree**: indicatore particolarmente sensibile a variazioni dei prezzi dei carburanti. Se l'aumento è consistente e tale da rendere la stima per il jet fuel fossile superiore a quella dei SAF diversi da HVO/HEFA,

questi ultimi risultano preferibili rispetto a tutte le altre opzioni.

Nella verosimile ipotesi in cui i SAF vengano prevalentemente utilizzati in miscela con il jet fuel, si tratterebbe di un surclassamento relativo; l'esito ottenuto permette però di comprendere che una riduzione della dipendenza dal combustibile fossile è ottenibile attraverso un significativo aumento del suo prezzo per ragioni politiche (tassazione) o di mercato (contrazione della capacità di raffinazione); una forte riduzione dei costi di produzione dei

combustibili sintetici alternativi oppure con l'imposizione di norme più stringenti che favoriscano una maggiore decarbonizzazione della filiera.

Relativamente ai **powertrain ibridi** (Tab. 6), che nell'ordinamento base risultano l'alternativa preferibile (pur con i *caveat* già espressi),

Tab. 6 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 aumentando il valore assegnato a CAPEX e OPEX dei produttori nei powertrain ibridi, allineandolo a quello dei SAF diversi da HVO/HEFA

1	Jet fuel (jet cherosene/benzina avio) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio e per piccoli velivoli)
2	SAF diversi da HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
3	Powertrain ibridi – SAF diversi da HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) con motore elettrico e batteria accoppiati a motori a turbina
4	SAF di tipo HVO/HEFA (in miscela con jet fuel) – motori a reazione o a getto (tipicamente a turbina: turbofan e turboeliche) o motori a pistoni (nel caso di benzina avio)
5	Idrogeno – <i>fuel cell</i> (eventualmente motore a turbina) che alimentano motore elettrico

si nota un posizionamento meno favorevole nel caso in cui vengano aumentati i valori assegnati a CAPEX e OPEX produttori – e conseguentemente anche ai costi operativi delle compagnie aeree – al fine di considerare l'uso di SAF nel motore a turbina. Un esito che sottolinea la sensibilità dell'opzione ibrida ai costi del carburante quando si consideri l'intera filiera di produzione.

Guardando ai **velivoli a idrogeno**, si è cercato di valutare se un aumento sensibile delle economie di scala legate sia alla produzione che al sistema motore/aereo potesse migliorarne il posizionamento. Affinché questo avvenga è tuttavia necessario agire sul peso assegnato al criterio di decarbonizzazione della filiera attribuendovi il valore massimo di 10. Combinando tali variazioni, questa tipologia di velivoli surclassa sempre quelli alimentati dai SAF di tipo HVO/HEFA.

Infine, con riferimento ai processi HEFA, si è cercato di comprendere se il loro posizionamento di lungo periodo potesse migliorare, ipotizzando lo sviluppo di una filiera produttiva sostenibile che impiega *feedstock* lignocellulosici. Sotto tale ipotesi sono stati migliorati i valori assegnati alla disponibilità della materia prima e alla decarbonizzazione della filiera. Pur surclassando l'idrogeno, non sembrano emergere rispetto alle altre opzioni considerate.

Pillole

- Per il settore dell'aviazione civile, il 2020 verrà ricordato come l'anno peggiore di sempre in termini economici: l'adozione a livello mondiale di misure di *lockdown* conseguenti alla diffusione del Covid-19 hanno completamente paralizzato il trasporto aereo, compromettendo nel breve periodo la dinamica di crescita precedentemente attesa.
- Pur nell'incertezza del contesto attuale, è ragionevole attendersi che il settore recuperi gradualmente una traiettoria di crescita e, al netto delle criticità della ripartenza, dovrà continuare a perseguire gli obiettivi che lo dovrebbero accompagnare lungo un percorso sempre più spinto di decarbonizzazione, a un orizzonte – quale il 2050 – che non dovrebbe più avere alcuna memoria della pandemia.
- Gli obiettivi riguardano il miglioramento dell'efficienza energetica, l'imposizione di un *cap* alle emissioni nette di CO₂ a partire dal 2020, la riduzione delle emissioni nette del settore del 50% entro il 2050 rispetto al livello del 2005.
- Nel breve-medio termine, lo sviluppo tecnologico del design e dei motori consentirà importanti miglioramenti di efficienza e si concentrerà su evoluzioni non radicali dei modelli oggi esistenti (uso di materiali più leggeri, migliorie all'aerodinamica del velivolo, impiego di motori più avanzati e così via). In parallelo, l'ottimizzazione del traffico aereo e dell'uso delle infrastrutture a terra sono leve fondamentali che permettono di migliorare l'efficienza complessiva del sistema.

- L'introduzione da parte di ICAO dello schema CORSIA – attraverso il quale le compagnie aeree possono acquistare crediti compensativi pagando altri settori affinché mettano in campo azioni per ridurre le emissioni – è un'altra misura idonea al conseguimento di una crescita *carbon neutral*.
- Nel lungo termine, una spinta maggiore verso la decarbonizzazione del settore potrà avvenire aumentando il ricorso a carburanti sostenibili (*Sustainable Aviation Fuel - SAF*) e attraverso la diffusione di velivoli fortemente innovativi in termini di design e/o di propulsione.

Esiti dell'AMC al 2030

- Il **jet fuel** tradizionale rimane l'opzione preferibile, premiata dalla possibilità di sfruttare tecnologie e competenze consolidate da decenni, dalla presenza di un'infrastruttura di approvvigionamento e distribuzione diffusa su scala mondiale, dal lento ricambio – specie in termini progettuali – della flotta aerea. Tutti elementi che, rispetto alle alternative esaminate, conferiscono a questa opzione vantaggi di costo, di disponibilità, di affidabilità e di sicurezza che si manterranno lungo il decennio in corso.
- Tra i carburanti sostenibili, l'ordinamento base al 2030 pone in evidenza il possibile maggior ruolo dei **SAF di tipo HVO/HEFA**, processi produttivi tendenzialmente maturi e con costi di investimento minori rispetto alle alternative più sperimentali e rivoluzionarie prese in considerazione.
- Rimangono relegate nella parte finale dell'ordinamento le tecnologie più innovative sia lato propulsione che lato carburanti. È ragionevole attendersi che i **powertrain ibridi** – opzione esplorata dai costruttori per i voli regionali – e i **SAF di tipo non HVO/HEFA** non avranno ancora raggiunto un livello di maturità tecnologica tale da consentirne una penetrazione rilevante.
- Queste considerazioni valgono con maggior forza per un'opzione rivoluzionaria come i **velivoli a idrogeno** la cui concorrenzialità rispetto alle altre opzioni si potrà dispiegare lungo orizzonti di tempo dell'ordine di decenni.
- Le analisi di sensitività svolte non evidenziano cambiamenti rispetto all'ordinamento base restituito dall'AMC; pertanto, in un orizzonte quale il 2030, **non sembrano emergere leve attivabili per modificare sensibilmente il ruolo del jet fuel nel trasporto aereo**, sostenute da una combinazione di criteri che lo rendono preferibile alle altre opzioni.

Esiti dell'AMC al 2050

- **Al 2050**, il settore potrebbe essere pronto ad accogliere tecnologie “rivoluzionarie” in termini di propulsione/alimentazione dei velivoli, profondamente diverse da quelle esistenti. L'AMC evidenzia infatti un possibile mix di soluzioni e la presenza di diverse leve attivabili per orientare la scelta tra le stesse.
- *Powertrain* ibridi, SAF diversi da HVO/HEFA e jet fuel fossile (solo motori a turbina) si propongono come le alternative migliori alternando la loro preferibilità dietro assunzioni specifiche.
- I **powertrain ibridi**, che nell'ordinamento base surclassano le altre alternative, saranno tendenzialmente concentrati nel segmento di mercato regionale (voli a corto-medio raggio). Si tratterebbe, pertanto, di un surclassamento relativo rispetto a sistemi di propulsione tradizionali e, peraltro, ancora legato al consumo di carburanti liquidi per l'alimentazione dei motori a turbina (necessari per la produzione di energia elettrica a bordo).
- All'orizzonte considerato emergono le tipologie di **SAF più sperimentali, quali gli e-fuels**, la cui produzione – oggi limitata a casi dimostrativi – è preferibile sia in termini

di emissioni sull'intero ciclo di vita rispetto ai carburanti alternativi di tipo HVO/HEFA, sia – in alcuni casi – per la maggiore disponibilità dei *feedstock* impiegati.

- Infine, in base al set di obiettivi considerati dall'AMC, tecnologie *disruptive* come i **veicoli a idrogeno** non emergono nemmeno in un orizzonte quale il 2050.
- In questo quadro, **la dipendenza dal jet fuel tradizionale non viene meno ma una sua riduzione è prevedibile**, soprattutto dietro il verificarsi di determinate condizioni considerate nelle analisi di sensitività.
- In particolare, un consistente aumento del prezzo del carburante petrolifero, sia di matrice politica (assoggettamento a tassazione) sia di mercato (mutamento delle condizioni di offerta), rende l'opzione più tradizionale meno preferibile rispetto a un crescente impiego di SAF diversi da HVO/HEFA e ai sistemi di propulsione ibridi (che subiscono questo maggior costo ma lo compensano con altri criteri).
- Un'altra leva che potrebbe agire in questa direzione è quella legata all'obiettivo di decarbonizzazione dell'intera filiera che gravita attorno al trasporto aereo. Una sua maggiore rilevanza nel tempo – ad esempio attraverso l'inasprimento della normativa ambientale che ad oggi regola il settore in tema di utilizzo di carburanti sostenibili – può favorire (anche attraverso opportuni incentivi) **la penetrazione di soluzioni come i SAF diversi da HVO/HEFA** che, nonostante *economics* peggiori del fuel tradizionale, sono caratterizzati da una migliore impronta carbonica lungo l'intero ciclo di vita.
- In assenza di una spinta normativa, l'avanzamento di questi ultimi può essere sostenuto anche da un sensibile abbattimento dei relativi costi di produzione (CAPEX e OPEX), ad esempio attraverso forme di incentivazione che consentano ai produttori di assumersi il rischio di investimenti ad alta intensità di capitale.

Guardando al 2030, non sembrano emergere leve attivabili per modificare sensibilmente il ruolo del jet fuel nel trasporto aereo, sostenuto da una combinazione di criteri che lo rendono nettamente preferibile alle altre opzioni.

Tra le opzioni alternative, potrà crescere il ruolo dei SAF con processi produttivi più maturi (HVO/HEFA) mentre le opzioni più sperimentali e rivoluzionarie – a minor impatto ambientale – rimangono in coda, a indicare che in un settore caratterizzato da una forte inerzia è necessario più di un decennio per costruire le relative economie di scala e testarne l'applicazione su scala commerciale.

Al 2050, invece, pur con le rigidità che caratterizzano il segmento aereo – l'analisi evidenzia un possibile mix di soluzioni e la presenza di diverse leve attivabili per orientare la scelta tra le stesse.

I SAF oggi più sperimentali (ad esempio gli e-fuels), il jet fuel fossile (solo motori a turbina) e i *powertrain* ibridi (per il mercato regionale) si propongono come le opzioni migliori alternando la loro preferibilità dietro assunzioni specifiche.

In questo quadro, la dipendenza dal jet fuel tradizionale non viene meno ma una sua riduzione è prevedibile, soprattutto dietro il verificarsi di determinate condizioni.

In particolare, i SAF sintetici diversi da HVO/HEFA surclassano tutte le alternative considerate in caso di massima rilevanza dell'obiettivo di decarbonizzazione della filiera, in presenza di un sensibile abbattimento dei relativi costi di produzione o in caso di forte aumento di prezzo del jet fuel fossile per ragioni politiche o di mercato.

La leva ambientale e quella legata ai costi di produzione dei carburanti risultano quindi di particolare importanza nella valutazione del set di alternative che caratterizzeranno il settore nel lungo periodo.

Note

- (¹) ICAO, *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*, 8 giugno 2020.
- (²) Espresso in passeggeri paganti per totale dei chilometri volati.
- (³) Stime elaborate dall'Associazione Internazionale per il Trasporto Aereo (*International Air Transport Association - IATA*), associazione internazionale delle compagnie aeree che rappresenta il 93% del traffico aereo mondiale.
- (⁴) Pur dovendo, da ora in avanti, fare i conti con un impulso prima impensabile alle attività svolte a distanza (comunicazioni senza spostamento).
- (⁵) I pesi sono normalizzati alla loro somma. Per cui se il valore del peso di un criterio è 10 e la somma è 200, il peso del criterio varrà 10/200. Se viene portato a 15, il peso del criterio varrà 15/205 e gli altri si riproporzionano. Per fare analisi di sensitività, il metodo impiegato consente anche di "forzare" la scala di valutazione oltre 10.

Bibliografia

Boeing, *World Air Cargo Forecast 2018-2037*

Boeing, *Commercial Market Outlook, 2019*

Ching-Cheng C., *Assessment of carbon emission costs for air cargo transportation*, Transportation Research Part D, Transport and Environment n. 33, 2014, pp. 186-195

Concawe, *Role of e-fuels in the European transport system. Literature review*, 2019

CTTC, *The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union*, 2019

Dalla Chiara B. et al., *Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment*, Transportation Research Part D, Transport and Environment n. 52, 2017, pp. 227-243

EASA, *Aviation Environmental Report*, 2019

Federici M., Ulgiati S., Basosi R., *Air versus terrestrial transport modalities: An energy and environmental comparison*, Energy 34.10, 2009, pp. 1493-1503

IEA, *Are aviation biofuels ready for take off?*, 18 marzo 2019

IEA, *Aviation – Tracking Transport – Analysis*, 2019

IATA, *Annual Review*, 2019

IATA, *Technology Roadmap 2050*

ICAO, *Environmental Report 2019. Destination Green, The next chapter*

ICAO, *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*, giugno 2020

ICAO, *Sustainable Aviation Fuels Guide*, 2018

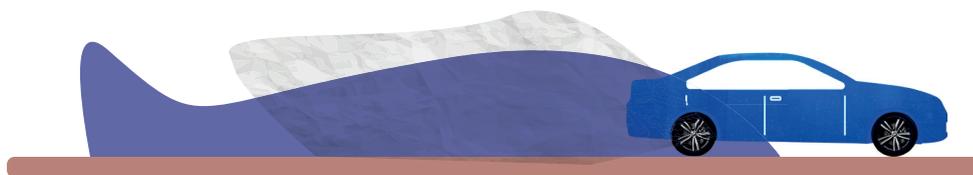
Macário R., Van de Voorde E. (eds.), *Critical issues in air transport economics and business*, Routledge, 2010

Romeo G. et al., *ENFICA-FC: Design of Transport Aircraft Powered by Fuel Cell and Flight Test of Zero Emission*, 2012

World Bank, *Air Transport and Energy Efficiency*, 2012

Il trasporto stradale al 2030 e al 2050

opzioni e prospettive



1. L'evoluzione del trasporto stradale tra normativa, tecnologia e comportamenti

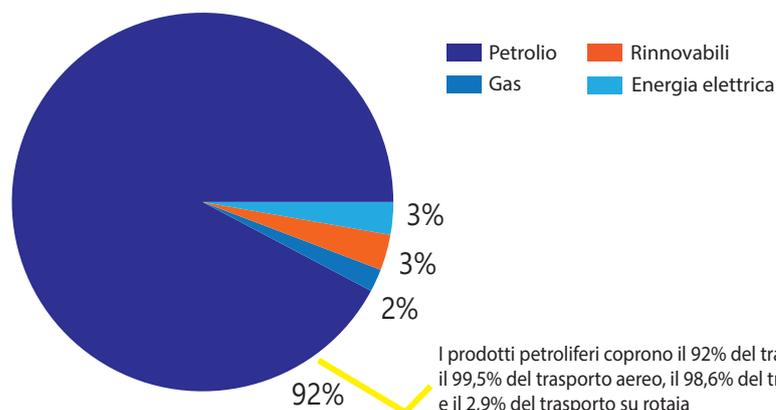
38

Dopo aver riportato gli esiti dell'analisi multi-criteri in relazione ai settori marittimo e aereo, il cui perimetro di riferimento è giocoforza quello mondiale, la presente sezione si concentra sul segmento del **trasporto su gomma** e sulla sua possibile evoluzione **in ambito nazionale** agli orizzonti 2030 e 2050.

Come anticipato, in Italia, la domanda di energia del settore trasporti dovrebbe seguire la dinamica attesa per l'Unione Europea: vale a dire una dipendenza dal petrolio che resta dominan-

te pur riducendosi, in linea con la traiettoria delineata nel Piano Integrato Nazionale Energia e Clima al 2030. A prescindere dalla riduzione più o meno spinta che si verificherà – resa ancor più incerta dalla crisi economica innescata dalla pandemia di Covid-19 – occorre avere bene a mente la condizione da cui si parte, rappresentata da una quota del petrolio superiore al 90% nel trasporto stradale e prossima al 100% in quello aereo e marittimo (Fig. 1). Ciò premesso, è piuttosto evidente come una trasformazione decisa del settore non possa essere né immediata né semplice, per quanto ineludibile.

Tuttavia, le politiche elaborate in sede europea e, a cascata, nazionale – con la definizione di obiettivi ambientali sempre più stringenti –



Fonte: UP 2019.

Fig. 1 – Domanda di energia nei trasporti stradali per fonte in Italia (%)

Il trasporto su gomma è quello potenzialmente più interessato dalla riduzione del peso del petrolio, anche per la presenza di soluzioni alternative

delineano una traiettoria ben precisa dell'evoluzione del sistema trasporti che punta a una riduzione del peso della fonte petrolifera sulla mobilità nel suo complesso. Il segmento stradale sembra essere quello maggiormente interessato da tali sforzi per due principali ragioni: da una parte, per la presenza di alternative concrete al petrolio, in parte già percorribili; dall'altra, per l'impegno delle politiche pubbliche nel ridurre drasticamente l'impatto ambientale.

La spinta normativa verso una riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti nonché verso un miglioramento della sicurezza del sistema, oggi vulnerabile rispetto a possibili interruzioni o rischi nella fornitura della materia prima dominante (greggio), può trovare supporto anche in altre trasformazioni che accompagneranno **l'evoluzione del trasporto su strada** nei decenni a venire, quali: i **cambiamenti tecnologici** e quelli relativi al **comportamento degli utenti**. La sfera tecnologica afferrisce ai progressi nei motori convenzionali, che si prevede siano in grado di conseguire livelli di emissione di agenti inquinanti trascurabili nel prossimo decennio ed elevati livelli di efficienza; alla penetrazione di combustibili alternativi (biocarburanti, e-fuels, GNL, idrogeno); a una crescente elettrificazione dei veicoli (tutto elettrico, ibrido plug-in, ibrido). La sfera relativa al comportamento degli utenti attiene, invece, alla correzione di dinamiche inerziali sintetizzabili nel continuo prevalere della mobilità individuale su quella collettiva. Per sostenere questa trasformazione saranno necessari grandi progetti di investimento nella ricerca e sviluppo, nella realizzazione di nuove piattaforme produttive, nella costruzione di nuove infrastrutture lungo l'intera catena del valore delle diverse opzioni tecnologiche. Una trasformazione che oltre a coinvolgere due intere filiere produttive – quella energetica e quella *automotive* – assegna un ruolo di primaria importanza alle scelte e ai comportamenti del consumatore finale.

Con la necessaria cautela che il momento storico impone, l'analisi svolta punta a descrivere lo stato dell'arte del settore e il quadro normativo che ne condizionerà i futuri sviluppi, nonché a delineare la **possibile evoluzione del mix di carburanti/powertrain che carat-**

terizzerà il trasporto su gomma lungo il trentennio da qui al 2050. In analogia a quanto visto per i segmenti marittimo e aereo, il futuro mix è stato esaminato ricorrendo a un'analisi multi-criteri attraverso la quale sono state comparate, in base ai possibili fattori che influenzano la scelta, diverse opzioni di alimentazione/motorizzazione che potranno avere un ruolo nel **settore stradale**, declinato nelle sue tre principali articolazioni: **trasporto leggero** (autovetture e veicoli per il trasporto passeggeri e merci fino a 3,5 tonnellate di peso totale a terra - p.t.t.), **trasporto pesante** (veicoli commerciali per il trasporto merci con p.t.t. >3,5 tonnellate), **trasporto pubblico locale** (autobus).

2. La normativa ambientale e climatica per i trasporti su strada

In Italia, il percorso di riduzione dell'impatto ambientale del trasporto stradale si sviluppa nel quadro della normativa europea, che ha condotto una decennale attività di regolazione con la definizione di obiettivi sempre più ambiziosi sugli **agenti inquinanti e climalteranti**, cui si è affiancata negli ultimi anni l'attenzione per i **carburanti alternativi**. L'intensa attività di pianificazione conseguente al recepimento della normativa comunitaria si è concretizzata nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), nel Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica (PNIRE), nel Piano Strategico Nazionale della Mobilità Sostenibile (PNSMS) e, a livello locale, i Piani regionali e urbani per la Mobilità Sostenibile (PUMS).

2.1. La normativa europea sugli agenti inquinanti

Il processo normativo relativo al contenimento delle immissioni nell'aria si è inizialmente focalizzato sugli agenti inquinanti (ossidi di azoto, particolati, idrocarburi incombusti¹), i cui valori limite sono stati stabiliti per la prima volta con la Direttiva 70/220/CEE per i veicoli leggeri e

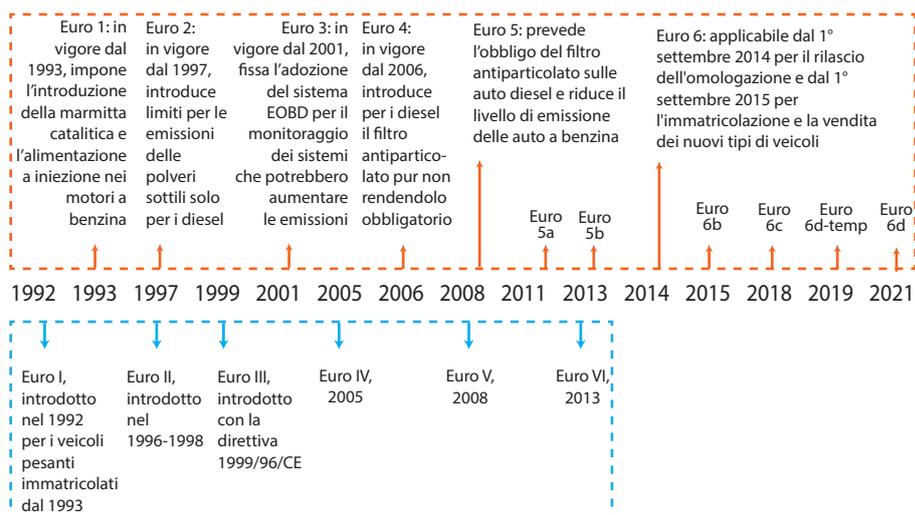


Fig. 2 – Evoluzione degli standard europei per veicoli leggeri (Euro 1-6) e pesanti (Euro I-VI)

con la Direttiva 88/77/CEE per quelli pesanti, cui ha fatto seguito negli anni '90 l'introduzione degli **standard di emissione Euro** per tutti i mezzi immatricolati². Attualmente, l'esecutivo europeo ha avviato i lavori di preparazione dello standard Euro 7 per introdurre un'ulteriore stretta ai limiti previsti.

Un'altra importante tappa nella riduzione delle emissioni di inquinanti è rappresentata dal pacchetto **Real Drive Emissions (RDE) introdotto con il Regolamento UE 427/2016**, che affianca ai test in laboratorio la rilevazione delle emissioni in condizioni reali di guida dei **nuovi veicoli leggeri**. L'ultimo atto del pacchetto RDE ha introdotto dal 1° gennaio 2019 una metodologia unica, trasparente e semplice per la valutazione delle emissioni reali alla guida anche dei veicoli già in circolazione. Dopo un periodo transitorio in cui è stato concesso ai costruttori di adeguarsi gradualmente alle nuove norme, prevedendo un margine di scostamento tra i risultati di laboratorio e le prove su strada, a partire dal 2020 per i nuovi modelli e dal 2021 per tutti i nuovi veicoli la prova su strada dovrà convalidare i risultati di laboratorio (la normativa ammette un margine di errore che riflette le incertezze statistiche e tecniche delle prove)³.

L'inquinamento dell'aria, tuttavia, non è imputabile esclusivamente ai trasporti ma proviene da diverse fonti: effetto camino in città, inversione termica, riscaldamento, pulizia e manutenzione delle strade, rotolamento, freni, motori, etc. Per tale ragione, l'UE ha adottato nel 2016 la **Direttiva National Emissions Ceilings (NEC)** che impone l'elaborazione di programmi nazionali di controllo dell'inquinamento atmosferico da parte di tutti i settori. In questo

contesto, l'Italia ha stabilito di mantenere tra il 2020 e il 2030 le emissioni di NO_x e di $\text{PM}_{2.5}$ rispettivamente inferiori del 40% e 10% rispetto al 2005, con target che divengono più rigorosi per gli anni successivi al 2030 (-65%; -40%)⁴.

L'introduzione degli standard Euro, il miglioramento continuo della qualità dei carburanti e lo sviluppo di soluzioni tecnologiche sempre più avanzate – come catalizzatori e filtri per particolato fine – hanno migliorato notevolmente le performance ambientali dei veicoli su gomma e contribuito a una forte riduzione delle emissioni di agenti inquinanti. Attraverso la combinazione di più sistemi di abbattimento (ricircolo dei gas di scarico - EGR, catalizzatori ossidanti e riduzione catalitica degli NO_x con urea - SCR), **diversi modelli diesel Euro 6d oggi mostrano emissioni allo scarico di NO_x in condizioni reali di guida pari o prossime a zero mg/m^3** . Anche nel caso delle polveri sottili (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$) l'evoluzione tecnologica dei motori diesel di ultima generazione ha consentito di ridurre le emissioni a valori trascurabili. Questa tendenza è prevista continuare nei prossimi anni, specie se sostenuta dal progressivo rinnovo del parco circolante e da continui avanzamenti tecnologici.

2.2. Non solo inquinanti: le emissioni di CO_2 del settore

Gli obblighi in materia di emissioni di gas serra sono oggetto di una legislazione a parte rispetto a quella degli agenti inquinanti. Considerando che il segmento stradale assorbe la quasi totalità delle emissioni di CO_2 di cui è responsabile il settore trasporti, non stupisce che

sia oggetto di grande attenzione da parte del legislatore.

Nel 2009, viene elaborato il **pacchetto 20-20-20** che prevedeva il taglio vincolante delle emissioni di CO₂ del 20% entro il 2020 rispetto ai livelli del 1990, seguito nel 2014 dal **Quadro per il clima e l'energia 2030** che stabilisce nuovi obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂ ripartiti tra settori ETS (Emission Trading System) e non-ETS. Nel caso dei trasporti, che rientrano nei settori non-ETS, si punta a una riduzione del 30% rispetto ai livelli del 2005, con obiettivi differenziati tra Stati membri: per l'Italia, il contributo minimo è fissato in un taglio del 33% per il 2030 rispetto al 2005. Gli obiettivi al 2030, già di per sé ambiziosi, si configurano poi come tappa intermedia di un percorso di decarbonizzazione che si estende sul lungo periodo, come delineato dalla **Roadmap 2050** (-60% entro il 2050 rispetto ai livelli del 1990 per il settore trasporti) e più di recente dal **Green Deal** (-90% sui livelli del 1990).

Negli ultimi due anni, sono state inoltre avanzate nuove proposte legislative e conseguenti nuovi obblighi per il trasporto stradale che riguardano tanto i veicoli leggeri quanto quelli pesanti ma che al momento si concentrano sulle sole emissioni di CO₂ allo scarico, poiché a livello europeo non è stato ancora adottato un approccio *Well-to-Wheel* (WTW). In particolare, **per i veicoli leggeri** il regolamento **UE 2019/631** ha fissato:

- A decorrere dal 1° gennaio 2020, il limite di **95 g CO₂/km** per le emissioni medie delle

nuove autovetture e di **147 g CO₂/km** per le emissioni medie dei nuovi veicoli commerciali leggeri (misurato sul 95% del venduto per il 2020 e sul 100% dal 1° gennaio 2021)⁵.

- Una riduzione delle emissioni medie di CO₂ delle nuove **autovetture** immatricolate pari al 15% nel 2025 e al 37,5% nel 2030 rispetto ai limiti di emissione validi nel 2021; le emissioni di CO₂ dei nuovi **veicoli commerciali leggeri** dovranno essere ridotte del 15% nel 2025 e del 31% nel 2030.

Per gli automezzi pesanti, invece, è stato approvato il **primo regolamento europeo sull'abbattimento delle emissioni di CO₂** (Regolamento UE 2019/1242), che stabilisce una riduzione del 30% entro il 2030, con un obiettivo intermedio del 15% entro il 2025, rispetto ai valori del 2019.

2.3. DAFI e RED II: la spinta normativa verso i carburanti alternativi

Il progressivo inasprimento degli standard (lato inquinanti) e dei target emissivi (lato CO₂) ha determinato una spinta verso miglioramenti sia dell'efficienza del veicolo sia della **qualità dei carburanti**. In questa direzione va l'emanazione nel 2009 della Direttiva 2009/33/CE relativa alla promozione di veicoli puliti e a basso consumo energetico e, successivamente, della Direttiva 2014/94/UE nota anche

Fig. 3 – Le tappe della decarbonizzazione dei trasporti su strada

Limiti specifici sulla CO ₂ per il trasporto su strada				Obiettivi di decarbonizzazione dei trasporti	
2020	2021	2025	2030	2030	2050
limite 95 g CO ₂ /km emissioni medie sul 95% delle auto vendute nell'anno	limite 95 g CO ₂ /km emissioni medie sul 100% delle auto vendute nell'anno	-15% limiti del 2021 per autovetture e veicoli commerciali leggeri	-37,5% limiti del 2021 per le autovetture -30% limiti del 2021 per i veicoli commerciali leggeri	Quadro Clima Energia (2014) -30% emissioni rispetto al 2005 dai settori non-ETS	Roadmap (2011) -60% emissioni settore trasporti rispetto al 1990
limite 147 g CO ₂ /km emissioni medie sul 95% dei veicoli commerciali leggeri venduti nell'anno	limite 147 g CO ₂ /km emissioni medie sul 100% dei veicoli commerciali leggeri venduti nell'anno	-15% emissioni per camion e autocarri rispetto al 2019	-30% emissioni per camion e autocarri rispetto al 2019	PNIEC (2019) -33% emissioni dai settori non-ETS rispetto al 2005	Green Deal (2019) -90% emissioni settore trasporti rispetto al 1990

come DAFI. La **DAFI** è indirizzata allo sviluppo di un mercato ampio di combustibili o vettori energetici alternativi – individuati in elettricità, idrogeno, biocarburanti, gas naturale, gas di petrolio liquefatto (GPL) – finalizzati a ridurre al minimo la dipendenza del settore trasporti dal petrolio e ad attenuarne l'impatto ambientale.

In Italia, la DAFI è stata recepita con il decreto legislativo n. 257 del 16 dicembre 2016 che, tra le altre norme, prevede:

- entro il 2020 la realizzazione di un numero adeguato di punti di rifornimento per il **veicolo elettrico**; entro il 2025 per l'**idrogeno** così come per **GNL e GNC**;
- l'obbligo per i nuovi punti vendita di carburante di **installare distributori di gas metano compresso o liquefatto**;
- l'obbligo per le aziende di **trasporto pubblico locale di acquistare nuovi mezzi a GNC, GNL e veicoli elettrici**;
- la possibilità per le Regioni di **esentare dal bollo auto i veicoli a GNC e GNL**;
- l'obbligo per le nuove costruzioni di predisporre **l'allaccio per la ricarica delle vetture elettriche**.

L'UE ha rivolto anche grande **attenzione ai biocarburanti**, con obiettivi che negli anni sono diventati via via più ambiziosi e vincolanti. Attualmente, il punto di riferimento è la **Renewable Energy Directive 2018/2001/EU (RED II)** dell'11 dicembre 2018 che stabilisce per il settore dei trasporti il raggiungimento di una quota minima dei consumi coperta da rinnovabili pari al 14%, di cui almeno un 3,5% derivante da **biocarburanti avanzati** (prodotti ottenuti a partire da materie prime specificate in un apposito elenco).

2.4. Il PNIEC italiano e la declinazione degli obiettivi di DAFI e RED II

In linea con la DAFI, il **Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima** prevede politiche di contenimento del fabbisogno di mobilità, di incremento della mobilità collettiva e

promuove l'uso di carburanti alternativi, in particolare del vettore elettrico.

In merito alla **mobilità elettrica**, il PNIEC fissa al 2030 un target del 6% per il trasporto stradale e un obiettivo cumulato di circa **4 milioni di auto elettriche pure (BEV)** che, se sommate alle auto **ibride plug-in**, consentirebbero di arrivare a un valore complessivo di circa **6 milioni di unità** a fine periodo. Anche per il **trasporto pubblico** vi è l'impegno a introdurre quote obbligatorie di veicoli elettrici o ibridi con ricarica esterna, a metano e a idrogeno, nonché elettrici o a metano nel caso degli autobus⁶. In riferimento all'**idrogeno**, il PNIEC prevede un contributo dell'1% al target 2030 per le rinnovabili nei trasporti, da impiegare soprattutto per il trasporto pesante o per il trasporto passeggeri, autobus e treni. Il PNIEC include anche misure **per lo sviluppo del GNL nel trasporto pesante**. In particolare, manifesta l'intenzione di rimuovere le barriere, anche autorizzative, all'installazione di infrastrutture per l'erogazione del GNL sulla rete viaria e all'interno dei porti e lascia stabile sul valore attuale le accise sul gas naturale. Inoltre, ribadisce l'importanza della realizzazione entro il 2025 di un numero adeguato di punti di rifornimento GNL, anche abbinati a punti GNC.

Il **PNIEC** incorpora e in parte innalza anche gli obiettivi della RED II in materia di biocarburanti, ponendo un **target specifico per i trasporti del 22%** da soddisfare:

- per un 8% circa attraverso il ricorso a biocarburanti avanzati (di cui un 75% è coperto da biometano avanzato);
- per un 7% da biocarburanti di prima generazione e biocarburanti non avanzati ma *double counting* (grassi animali e oli esausti);
- 8% da elettrico (di cui 2% per ferrovia e 6% per trasporto stradale).

Obiettivi che potrebbero essere rivisti, in termini ancora più ambiziosi, in relazione ai **nuovi target di taglio della CO₂ del 55% al 2030** anticipato dalla Commissione UE con la Comunicazione del 17 settembre scorso⁷, recante la nuova traiettoria al 2030 e al 2050 di decarbonizzazione dell'economia in Europa.

Il forte impegno politico e normativo verso la riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti sarà il principale driver della futura evoluzione del trasporto stradale

3. Alternative a confronto: costruzione del metodo

In considerazione del contesto e dello scenario di graduale decarbonizzazione delineato, la presente analisi – il cui perimetro geografico di riferimento è quello italiano – si focalizza su **molteplici soluzioni alternative per l'alimentazione/propulsione dei veicoli su gomma** al fine di valutarne in modo comparato potenzialità e limiti, attraverso un **approccio multi-criteri**. Si è fatto riferimento a tre principali gruppi di alternative (Tab. 1).

Il primo gruppo si riferisce ai veicoli che impiegano i motori a combustione interna con ibridizzazione leggera (*mild hybrid*)⁸ e alle diverse alimentazioni utilizzate con questa tipologia motoristica: carburanti petroliferi tradizionali, combustibili gassosi, biocarburanti e, nel lungo periodo, e-fuels. A soluzioni il cui impiego è ormai consolidato e globalmente diffuso (benzina e gasolio fossile, GPL, GNC, biocarburanti), si affiancano opzioni che hanno da alcuni anni iniziato ad affacciarsi sul mercato dell'autotrazione (GNL) o che versano ancora in uno stadio dimostrativo e quindi lontane da applicazioni su vasta scala (e-fuels). Alcune di queste rappresenteranno la naturale evoluzione di quelle oggi considerate tradizionali: è infatti ragionevole attendersi che, nel breve-medio termine, la benzina e il gasolio fossile così come le alimentazioni a metano integrino una quota crescente di biocarbu-

ranti (anch'essi non esenti da cambiamenti in termini di materie prime e processi produttivi impiegati), mentre a un orizzonte quale il 2050 potrebbe svolgere un ruolo cruciale il ricorso agli e-fuels, soprattutto liquidi, qualora adeguatamente sviluppati.

La seconda categoria riguarda invece i powertrain a trazione mista (veicoli ibridi e ibridi plug-in) oppure solo elettrica. Si tratta di veicoli ad oggi associati a quote molto contenute del parco circolante complessivo ma fortemente caldeggiati – specie nella declinazione *full electric* – dalla normativa europea in materia di trasporti così come dal PNIEC. I veicoli a trazione mista, essendo dotati di motore a combustione interna in affiancamento a quello elettrico, sono in parte legati al consumo di carburanti liquidi e, come sopra anticipato, delle loro future evoluzioni (al 2050 si potrebbe, ad esempio, avere un veicolo ibrido plug-in in cui il MCI è alimentato da e-fuels).

La terza e ultima categoria considera, invece, sistemi di alimentazione/motorizzazione innovativi in cui l'**idrogeno** viene fatto reagire con l'ossigeno in una pila a combustibile, producendo elettricità da utilizzare con un motore di trazione elettrico.

La caratterizzazione e analisi delle alternative considerate – in termini di proprietà fisiche ed energetiche, variabili economiche e socio-lavorative, impatto ambientale, disponibilità nel processo di approvvigionamento e semplicità d'uso/condizionamento della circolazione – ha permesso di attribuire un giudizio ai criteri del-

Tab. 1 – Alternative considerate nel trasporto stradale su gomma

Motore a combustione interna (MCI) e <i>mild hybrid</i>	Benzina/Gasolio di origine fossile con quota crescente della componente biologica (biocarburanti, soprattutto avanzati) e, nel lungo periodo, potenzialmente sostituibili con i loro equivalenti sintetici (e-fuels)
	Gas di petrolio liquefatto (GPL), spesso in modalità bi-fuel con carburanti tradizionali e loro evoluzione bio e rinnovabile
	Metano: in forma compressa (GNC) e con quota crescente di biometano; in forma liquefatta (GNL), con apporto crescente di componenti bio (bio-GNL)
Powertrain a trazione ibrida o solo elettrica	<i>Hybrid Electric Vehicles</i> (HEV) - Batteria elettrica ricaricata dal motore a combustione interna (alimentato con i carburanti petroliferi tradizionali e loro evoluzione bio e rinnovabile)
	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i> (PHEV) - Batteria ricaricata dalla rete elettrica o dal motore a combustione interna (alimentato con carburanti petroliferi tradizionali e loro evoluzione bio e rinnovabile)
	<i>Battery Electric Vehicles</i> (BEV) - Batteria ricaricata dalla rete elettrica (in modalità plug-in, <i>Charge While Driving</i> , biberonaggio etc.) e, nel trasporto pubblico e merci pesante, anche mediante contatto diretto alla linea di alimentazione (cavo sospeso o rotaia protetta)
Motore elettrico con celle a combustibile	<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i> (FCEV) - Celle a combustibile alimentate a idrogeno

Tab. 2 – Dimensioni e criteri dell'AMC

Dimensione	Criterio	Descrizione
Dimensione socio-economico-lavorativa	1. Economie di scala associate alla produzione del combustibile/vettore energetico	Si riferisce all'esistenza di un consolidato sistema di produzione del carburante: esperienza, personale e capacità, impianti e loro diffusione
	2. Economie di scala associate al tipo di veicolo con relativo <i>powertrain</i>	Si riferisce all'esistenza di un consolidato sistema di progettazione, produzione e manutenzione del tipo di motore e veicolo: esperienza, personale e capacità, impianti e loro diffusione
	3. Indipendenza energetica e produttiva	Indipendenza energetica e produttiva riferita alla filiera delle componenti (batterie, altro) per combustibile o vettore energetico
	4. Ammortamento degli impianti di produzione del combustibile/vettore energetico	È indicativo del fatto che, per un determinato carburante/vettore energetico, la capacità produttiva sia adeguata o ancora in costruzione
	5. Decarbonizzazione della filiera e compatibilità con la logica del Libro bianco UE (de-carbonizzazione dei trasporti, ZTL, co-modalità)	Si riferisce a quanto è possibile che venga decarbonizzata la filiera per effetto della decarbonizzazione della produzione
Dimensione economica	6. CAPEX per i produttori di combustibili/vettori energetici	Indicazione dell'investimento necessario per la produzione di un dato combustibile/vettore energetico per confronto con i carburanti petroliferi tradizionali (gasolio/benzina)
	7. Quantità veicoli attuale in Italia	Dato numerico di riferimento che intende misurare il punto di "ancoraggio" dato dal parco attuale, e quindi l'inerzia per la sua trasformazione. È espresso come numero di veicoli di ciascun tipo in Italia
	8. Investimento medio veicolo	Indica l'ordine di grandezza del prezzo di acquisto di un veicolo con un dato tipo di alimentazione/motore (valutato per confronto con l'investimento relativo a un veicolo di pari dimensioni con configurazione standard MCI e alimentato a gasolio/benzina)
	9. Costo di esercizio veicoli	Indicazione dell'insieme dei costi di esercizio di un veicolo con un dato tipo di alimentazione/motore (valutato per confronto con il costo di esercizio di un veicolo di pari dimensioni con configurazione standard MCI e alimentato a gasolio/benzina)
	10. Investimenti di rete per dotazione rifornimento o ricarica	Valutato per confronto con gli investimenti di rete per i carburanti petroliferi tradizionali (gasolio/benzina), per i quali la rete è già esistente
	11. Contratti per impianti elettrici	Considera il costo aggiuntivo per la fornitura di energia elettrica associato all'impiego di un dato veicolo
	12. Costo operativo del carburante/vettore energetico	Valutato per confronto con il costo del carburante petrolifero tradizionale (gasolio/benzina)
Dimensione energetica	13. Rendimento del sistema motore a bordo (a valle del serbatoio)	Rendimento energetico della trasformazione da combustibile/vettore energetico alle ruote
	14. Rendimento da pozzo (fonte) a serbatoio	Rendimento energetico dal processo produttivo del combustibile/vettore energetico al serbatoio
	15. Autonomia energetica	Criterio che tiene conto del raggio utile di impiego di un dato tipo di veicoli con un rifornimento/ricarica completi (in km)
	16. Incidenza massa/vettore energetico	Indicazione della massa di motore/vettore energetico

Dimensione energetica	17. Semplicità di rifornimento/ soccorso/ricarica/dotazione impiantistica depositi anche in presenza di flotte	Tiene conto della complessità di rifornimento/ricarica e delle complessità di soccorso. Valutato per confronto con il caso dei carburanti petroliferi tradizionali (gasolio/benzina)
	18. Densità energetica	Valore proprio del combustibile/vettore energetico (in Wh/kg)
	19. Energia necessaria per l'utilizzo veicolo nel suo complesso	Tiene conto dell'energia che è necessario sottrarre alla propulsione per alimentare impianti ausiliari come il riscaldamento o il condizionamento, valutato per confronto con un veicolo MCI
	20. Impegno energetico per dotazione infrastrutturale totale	Rappresenta il maggior impegno della rete elettrica dovuto alla produzione o all'impiego del combustibile/vettore energetico nella dotazione di infrastrutture di ricarica (punti o corsie nel <i>Charge While Driving</i>). Valutato per confronto con il caso dei carburanti petroliferi tradizionali (gasolio/benzina)
	21. Disponibilità esistente di rete estesa di rifornimento o ricarica (extra-urbana)	Si assume come riferimento la capillarità della rete distribuzione carburanti relativa ai prodotti petroliferi tradizionali
	22. Disponibilità esistente di rete estesa di rifornimento o ricarica (urbana)	Si assume come riferimento la capillarità della rete distribuzione carburanti relativa ai prodotti petroliferi tradizionali
	23. Impatto energetico sulla rete elettrica	Tiene conto della capacità della rete elettrica di fornire l'energia richiesta rispetto alla generazione nelle centrali e all'infrastruttura. L'impatto dipende dal tipo di ricarica, dalla contestualità delle ricariche, dalla richiesta delle batterie in base alla loro dimensione, dal tipo di impiego del veicolo
Dimensione ambientale*	24. CO ₂ <i>tank to wheel</i>	Emissioni di CO ₂ dovute ai motori di bordo
	25. CO ₂ <i>well to tank</i>	Emissioni di CO ₂ riferite alla filiera
Dimensione personale	26. Veicoli leggeri: Comodità di impiego del mezzo negli spostamenti abituali	Valutazione della versatilità di impiego del veicolo per confronto con il caso di un autoveicolo MCI tradizionale
	26. Veicoli pesanti/bus: Impiego tipico condizionato	Valutato per confronto con l'assenza di condizionamenti all'esercizio di un autocarro/bus MCI diesel
	27. Veicoli leggeri: Libertà di movimento e non necessaria programmazione quotidiana (libertà di spostamento nel territorio e nel tempo)	Valutato per confronto con la non necessità di programmare gli spostamenti in funzione delle ricariche/rifornimenti e dei tempi ad essi connessi, tipica dei veicoli tradizionali con MCI
	27. Veicoli pesanti/bus: Necessità ritorno sistematico in deposito	Valutato per confronto con l'assenza di necessità di rientrare in deposito (es. per ricarica notturna) di un autocarro/bus con MCI alimentato a gasolio
	28. Veicoli pesanti/bus: Libertà programmazione servizio	Valutato per confronto con l'ampia possibilità di programmazione del servizio resa possibile dalla flessibilità di un autocarro/bus con MCI alimentato a diesel
Dimensione sicurezza e disp. energetica	29. Disponibilità nel processo produttivo e nell'approvvigionamento	Rappresenta la disponibilità del combustibile/vettore energetico in natura (con riferimento alla materia prima ottenuta a costi accettabili), nelle filiere produttive industriali e ai punti di rifornimento/ricarica

* Non è stato considerato l'impatto degli agenti inquinanti in quanto si considerano MCI evoluti (da Euro 6d in avanti) che presentano emissioni trascurabili, come testimoniato da diversi e autorevoli studi (CNR, ACI).

le matrici di decisione messe a punto per i tre diversi segmenti del trasporto su gomma analizzati (leggero, pesante, TPL) nei due orizzon-

ti di riferimento (2030 e 2050) e di formulare, per ciascuno di questi, considerazioni relative all'evoluzione attesa del mix fuel/powertrain.

Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati allo scopo, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato ai Workshop dedicati al trasporto su gomma e organizzati dal **Gruppo Strategico “Carburanti ed Energie Alternative”** istituito da unem. Proprio a seguito dei contributi dei diversi partecipanti ai Workshop è stato possibile **assegnare un peso a ogni criterio** (batteria di pesi), in modo da definirne il livello di importanza (espresso con un voto da 1 a 10) nella valutazione delle alternative, operando le opportune distinzioni tra 2030 e 2050. In generale, i criteri ritenuti più importanti sono quelli afferenti alle economie di scala legate alla produzione del carburante e al *powertrain*/veicolo esaminato; i tre criteri ambientali, vale a dire la decarbonizzazione della filiera, la CO₂ TTW (locale) e quella WTT; i criteri che considerano l’investimento medio per il veicolo, il relativo costo di esercizio e i vincoli alla libertà di spostamento e alla programmazione del servizio.

4. Analisi multi-criteri nel trasporto stradale leggero: metodologia e risultati

Il segmento del trasporto stradale leggero include le autovetture e i veicoli commerciali leggeri, vale a dire i mezzi adibiti al trasporto merci aventi un peso totale a terra inferiore o uguale alle 3,5 tonnellate. A fronte di circa 40 milioni di automobili circolanti in Italia al 2019, i veicoli commerciali leggeri – prevalentemente impiegati nella distribuzione di ultimo miglio in ambito urbano – sono circa 3,6 milioni. L’analisi

condotta fa quindi **principale riferimento alle autovetture per il trasporto passeggeri** ma le considerazioni e assunzioni formulate si prestano ad essere estese al segmento commerciale, anch’esso oggetto del *corpus* di normative e politiche locali sulla qualità dell’aria sviluppate negli ultimi anni.

L’evoluzione del parco circolante dei veicoli leggeri – che giocoforza si riflette sui consumi di carburante e quindi sull’impatto emissivo del settore – è influenzata da una molteplicità di fattori: economici, normativi, industriali e tecnologici ai quali si aggiunge – come peculiarità di questo segmento rispetto a quello del trasporto pesante e del TPL analizzati nel prosieguo dello studio – la dimensione *individuale*. Se si considera il numero di autovetture circolanti oggi in Italia – circa 40 milioni su 60 milioni di abitanti – si può facilmente comprendere come i comportamenti dei singoli, le preferenze, le necessità – anche in relazione all’offerta di mobilità che caratterizza la realtà in cui si vive – e le capacità di spesa abbiano significativamente influenzato le attuali caratteristiche della mobilità individuale:

- l’automobile è la modalità di trasporto prescelta per gli spostamenti sul territorio nazionale (tra tutte le modalità di trasporto conta per il 60%)⁹;
- tra il 2000 e il 2018 gli autoveicoli in circolazione sono aumentati del 21%;
- l’età mediana delle autovetture supera gli 11 anni (per le auto a benzina più di 14 anni; per le auto a gasolio quasi 10 anni; per le auto bi-fuel GPL e metano quasi 9 anni)¹⁰;
- sebbene sia cresciuta la quota delle auto di categoria Euro 5 e 6 (oggi complessivamente pari al 40% del circolante), ancora un

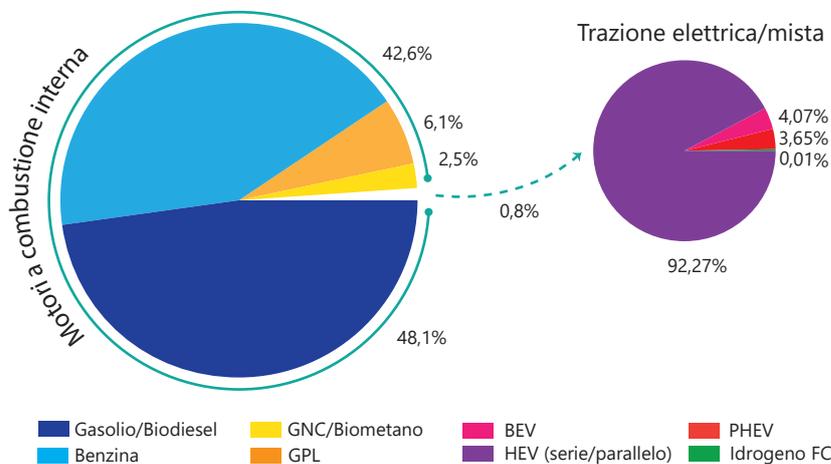


Fig. 4 – Italia: parco circolante veicoli leggeri (%)

Fonte: elaborazione RIE dati ACI al 31 dicembre 2019.

quinto dei mezzi in circolazione appartiene alle classi Euro 0-2;

- esiste, inoltre, una differente distribuzione geografica dei veicoli più vetusti e inquinanti, fortemente condizionata dal reddito pro-capite regionale.

A queste caratteristiche, legate – come anticipato – alla sfera privata, si aggiungono quelle proprie della filiera *automotive* che, negli anni, ha saputo rispondere alle sempre più stringenti normative ambientali attraverso l'innovazione tecnologica e i miglioramenti di efficienza conseguiti. In un'analisi che cerca di delineare il mix *fuel*/motore preferibile per questo segmento di mercato al 2030 e al 2050, è opportuno avere bene a mente la condizione da cui si parte:

- i veicoli alimentati a combustibili fossili rappresentano il 99% del parco circolante leggero, un dato sostanzialmente in linea con quello medio europeo, anche se l'Italia si distingue per un maggior peso dei veicoli a GPL e metano (9% circa del totale circolante);
- nonostante il progressivo aumento – nel periodo 2000-2018 – delle autovetture in circolazione (+21%) che rappresentano l'80% del circolante su gomma, il trasporto leggero ha registrato una riduzione delle emissioni di NO_x del 57% e di PM₁₀ del 77%¹¹;
- grazie ai miglioramenti conseguiti in termini di efficienza energetica, anche le emissioni di CO₂ del settore stradale leggero si sono ridotte tra il 2000 e il 2018 dell'8% circa.

4.1. Le alternative nel trasporto stradale leggero

La comparazione tra le diverse opzioni che potranno avere un ruolo nel trasporto stradale leggero nel prossimo trentennio è stata effettuata considerando **10 alternative e 28 criteri**, individuati tenendo conto delle particolarità del settore e con l'intento di comprendere sei macro-dimensioni di valutazione: sociale-lavorativa (economie di scala, decarbonizzazione della filiera); economica (investimento medio per il veicolo, costo di esercizio, CAPEX dei produttori di carburanti/vettori energetici, costi relativi all'infrastruttura di rete, etc.); energetica (rendimento del motore, densità energetica del carburante/vettore, autonomia del veicolo, sviluppo della rete di rifornimento/ricarica, etc.); ambientale (emissioni di CO₂ lungo l'intero ciclo di vita); personale (relativa al condizionamento della mobilità, e quindi alla libertà di movimento legata all'uso di una determinata tecnologia); di disponibilità nella catena di approvvigionamento delle diverse tipologie di alimentazione.

Per quanto concerne le alimentazioni dei motori a combustione interna, il riferimento varia a seconda che si consideri l'orizzonte 2030 e il 2050 e le opzioni che si ipotizzano assenti nell'uno o nell'altro caso sono state indicate tra parentesi quadra. In particolare, **per il 2030** sono state considerate sia le fonti di alimenta-

Tab. 3 – Alternative considerate nell'AMC al 2030 e al 2050 applicata allo stradale leggero

Alternative 2030		Alternative 2050
1	MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)	[MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)]
2	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
3	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
4	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
5	MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)	[MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)]
6	[MCI – e-fuels]	MCI – e-fuels
7	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>
8	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>
9	<i>Battery Electric Vehicles</i> (BEV)	<i>Battery Electric Vehicles</i> (BEV)
10	<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i> (FCEV)	<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i> (FCEV)

zione di origine fossile – benzina/gasolio, GNC e GPL, in miscela con quote crescenti di componenti bio – sia le opzioni di origine biologica – biodiesel (incluso HVO) e biometano. Queste ultime, seppur già presenti in miscela con i combustibili tradizionali, sono state considerate anche come opzioni a sé stanti in quanto afferenti a filiere produttive molto diverse da quelle fossili. Al 2030, carburanti fossili con miscele bio si confrontano quindi con carburanti prevalentemente o interamente bio, che potrebbero rappresentarne la naturale evoluzione laddove adeguatamente sviluppati. Gli e-fuels, di origine rinnovabile, sono stati inseriti in parentesi quadra in quanto si assume che non avranno ancora uno sviluppo commerciale adeguato a quell'orizzonte temporale. **Per il 2050**, si fa riferimento a fonti di alimentazione prevalentemente o interamente di origine biologica (biodiesel, biometano) e rinnovabile (e-fuels).

Sono state così costruite **due matrici di decisione – una per l'orizzonte 2030 e una per il 2050** – nelle quali per ogni alternativa in esame sono state riportate le stime, quantitative o qualitative, relativamente a ciascun criterio considerato. Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato ai Workshop sul Trasporto Leggero del 15 ottobre e del 12 novembre 2019, organizzati dal **Gruppo Strategico “Carburanti ed Energie Alternative”** istituito da unem.

Sono state definite due batterie di pesi, al 2030 e al 2050, la cui unica differenza riguarda la non considerazione, nel lungo periodo, dei criteri relativi alla composizione attuale del parco circolante e al tasso di ammortamento degli impianti di produzione dei carburanti esistenti, assegnando un valore nullo ai corrispondenti pesi.

4.2. Gli esiti dell'AMC al 2030

In base ai pesi assegnati ai diversi criteri all'orizzonte 2030, l'AMC restituisce l'**ordine di surclassamento** riportato in Tab. 4.

L'esito ottenuto porta a individuare tre gruppi di alternative con diverso grado di preferibilità. Il primo raggruppamento include **veicoli elettrificati di tipo HEV e PHEV, così come i veicoli con solo motore endotermico alimentato da carburanti fossili e dalla loro declinazione biologica**. Nella seconda categoria (escludendo gli e-fuels nell'orizzonte conside-

rato) si collocano due tipologie di veicoli con MCI che in Italia sono più diffuse che altrove ma che rimangono tendenzialmente di nicchia (**GNC e GPL**). In coda, si posizionano i veicoli con trazione elettrica pura dove il motore elettrico viene alimentato da batterie (**BEV**) o da cella a combustibile a idrogeno (**FCEV**).

Tab. 4 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030 con le valutazioni base

1	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)
2	MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)
3	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
4	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
5	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)
6	[MCI – e-fuels]
7	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)
8	MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)
9	BEV
10	FCEV

L'opzione preferibile è rappresentata dai veicoli ibridi (HEV) in serie/parallelo. A premiare questa tipologia, nonostante un prezzo del veicolo presumibilmente più elevato anche al 2030 rispetto ai veicoli benzina/gasolio con MCI *mild hybrid*, concorrono più fattori tra cui: economie di scala sviluppate, un elevato rendimento del motore (il motore termico può funzionare a punto fisso nelle sue condizioni ottimali di efficienza), un'evidente flessibilità di impiego, la riduzione delle emissioni allo scarico (sia di inquinanti sia climalteranti), minori consumi di carburante e minori costi di esercizio rispetto ai veicoli tradizionali di ultima generazione dotati solo di MCI. Il tutto senza necessitare di un'infrastruttura dedicata per la ricarica del motore elettrico.

Agli HEV in serie **seguono i veicoli con motori a combustione interna *mild hybrid* alimentati con diversi carburanti, di origine fossile e biologica**. Tra questi **svettano quelli alimentati a benzina e gasolio fossile** (in miscela con quote bio) che ad oggi costituiscono complessivamente il 90% circa del parco circolante leggero. Il fatto di risultare ancora preferibili da qui a dieci anni è motivabile su più

fronti: hanno costi limitati; sono caratterizzati da un elevato rendimento del motore, sempre più evoluto e quindi caratterizzato da maggiore efficienza e migliori prestazioni ambientali (da Euro 6d in avanti); presentano consolidate economie di scala lato produzione del carburante e lato veicolo; possono contare su un sistema di approvvigionamento, raffinazione e distribuzione consolidato e diffuso a livello mondiale tale da garantire una massima flessibilità nell'impiego. A questi vantaggi si aggiungono i tipici punti di forza dei prodotti petroliferi: elevata densità energetica, facilità e sicurezza di movimentazione e d'uso finale, ampia disponibilità (almeno a un orizzonte quale il 2030), rapidità e semplicità di rifornimento. Rimane, tuttavia, il problema legato alle emissioni climalteranti, con quelle allo scarico che negli anni a venire costituiranno il riferimento normativo principale da rispettare. Da qui la **necessità di un'evoluzione in chiave sempre più biologica (biocarburanti) e, nel lungo periodo, rinnovabile (e-fuels)**.

In coerenza con quanto appena affermato, **l'ordinamento premia, in posizione adiacente ai MCI alimentati a benzina e gasolio fossile, l'opzione biodiesel/bioetanolo**. I biocarburanti, a fronte di una densità energetica inferiore a quella dei carburanti tradizionali con cui vengono miscelati, di minori economie di scala e di maggiori costi lato produzione (specie se non vengono prodotti in raffineria), offrono le stesse prestazioni e libertà di impiego del loro corrispondente fossile, utilizzano sistemi logistici del tutto simili a quelli dei prodotti petroliferi, consentono un significativo abbattimento delle emissioni di CO₂ rispetto al prodotto fossile (benché funzione del *feedstock* e del processo produttivo impiegato).

Segue un'altra fonte di alimentazione biologica, il **biometano**: un prodotto perfettamente in linea con il metano fossile, potendo così beneficiare delle economie di scala proprie dei carburanti gassosi applicati ai MCI. Ai vantaggi correlati a una combustione più efficiente rispetto ai carburanti petroliferi, a minori costi di esercizio e a un significativo abbattimento delle emissioni (che tendono ad azzerarsi nel lungo periodo anche a livello WTW se viene applicato il modello produttivo del "biogas fatto bene") si contrappongono gli svantaggi propri di un carburante gassoso: limiti di spazio per la presenza delle bombole, rete di erogazione non capillare sul territorio nazionale, autonomia più limitata rispetto ai veicoli a benzina/gasolio. Al 2030, anche in relazione alle favorevoli indi-

cazioni della normativa europea e del PNIEC, si ipotizza una quota crescente di biometano in miscela con il GNC.

Il primo gruppo di alternative maggiormente rispondenti agli obiettivi espressi dall'AMC si chiude con i **PHEV**. In questo caso l'elettrificazione è decisamente maggiore rispetto agli HEV, così come sono maggiori i costi di acquisto. Un veicolo ibrido plug-in consente però di superare – almeno in parte – i condizionamenti propri della trazione elettrica pura in termini di *range anxiety* e *recharge anxiety*. Particolarmente idoneo il loro impiego in città – dove si può beneficiare di una rete di ricarica in parte già disponibile e, a tendere, potenzialmente più capillare – mentre il motore endotermico può essere utilizzato in contesti diversi da quello urbano. **Al 2030, la barriera economica rappresenterà ancora uno dei principali deterrenti alla diffusione dei PHEV**, anche se a livello nazionale e locale si sta cercando di attenuare questa criticità attraverso l'elargizione di diversi incentivi sia indiretti sia diretti.

Il secondo gruppo di alternative riguarda i veicoli a **GNC** e a **GPL**, due alimentazioni considerate di nicchia, quel che sembra trovare conferma anche nell'ordinamento risultante dall'AMC. Seppur non ai livelli conseguiti nel tempo da benzina e gasolio, si tratta di tecnologie sviluppate e consolidate sia lato produzione del carburante sia in termini di applicazione motoristica, peculiarità – quest'ultima – di pochi paesi europei tra cui sicuramente l'Italia. A fronte di un costo medio dei veicoli allineato a quello di autovetture a benzina/gasolio con caratteristiche simili, GNC e GPL presentano importanti vantaggi in termini di costi del carburante, costi di esercizio del mezzo ed emissioni di inquinanti. Per contro, risentono di una rete di distribuzione non capillare (specie GNC), di evidenti difficoltà nel fare rifornimento in condizioni di emergenza, di problemi legati all'ingombro del serbatoio (bombole).

Chiudono l'ordine di preferibilità espresso dal modello i veicoli a trazione elettrica pura, sia che si tratti di BEV sia di FCEV. In entrambi i casi, al 2030, gli elementi che penalizzano queste due opzioni, particolarmente interessanti sotto il profilo ambientale, sono ancora numerosi.

I **BEV** sono caratterizzati da alti costi d'acquisto (nonostante gli incentivi) cui si aggiunge l'ancora ridotta autonomia, l'inadeguatezza della rete di ricarica (praticamente da costruire in ambito extra-urbano) e la necessità di programmare la ricarica, aspetti che condizionano

Al 2030 gli HEV risultano l'alternativa preferibile, seguiti dai veicoli con motori a combustione interna alimentati da carburanti fossili anche in miscela con componenti bio

in modo diretto la libertà di circolazione dell'utente finale e che difficilmente potranno essere risolti in un decennio, non essendovi evidenze di *breakthrough* tecnologici a breve o medio termine. Anche le economie di scala legate alla produzione di batterie sono molto ridotte (l'Italia è fortemente dipendente dall'estero), quel che a sua volta penalizza lo sviluppo di tutte quelle competenze necessarie che gravitano attorno alla fase progettuale-produttiva-manutentiva.

Quanto ai **FCEV**, a frenarne la diffusione sono *in primis* fattori legati alla produzione di idrogeno, la cui tecnologia è ancora immatura e molto costosa, oltre a richiedere ulteriori sforzi e consistenti investimenti per l'implementazione di processi produttivi del vettore energetico completamente decarbonizzati¹². A ciò si aggiunge la totale assenza della rete di distribuzione. La penetrazione di questa opzione sembra quindi più verosimile in un orizzonte di lungo periodo (2050), benché condizionata dal verificarsi di determinate condizioni.

4.2.1. Analisi di sensitività al 2030

Per enfatizzare la necessità di rispondere alle esigenze di sostenibilità ambientale dei trasporti, oggetto di grande attenzione politica e normativa, è **stato considerato un criterio aggiuntivo**, a cui è stato assegnato un peso massimo, **che premia i veicoli del tutto privi di emissioni allo scarico**: aspetto che potrebbe condizionare l'accesso nei centri storici o nelle ZTL. **Il risultato ottenuto riflette quello base**, a indicare che questo criterio non risulta determinante per definire la preferibilità delle diverse opzioni.

Sono state poi eseguite sensitività mirate su alcune opzioni, al fine di individuare la presenza di leve che possono condizionarne la preferibilità rispetto al caso base. In particolare, relativamente ai **PHEV** (Tab. 5), i criteri economici e infrastrutturali si sono rivelati centrali nel modificarne il posizionamento. Assumendo una riduzione del prezzo del veicolo – tale da allinearlo a quello di un'equiparabile autovettura tradizionale (ad esempio per la presenza di incentivi), l'invarianza dei contratti (inclusa la

potenza installata) per la fornitura elettrica domestica rispetto a quelli preesistenti all'acquisto del veicolo e la realizzazione di investimenti in impianti di ricarica (principalmente in ambito urbano dove sono in parte già presenti) tali da rendere la rete adeguata, i **PHEV** – alimentati da carburanti petroliferi (con quote bio) per la parte endotermica – si posizionano subito sotto agli **HEV** e alle vetture con **MCI mild hybrid**, rafforzando la loro preferibilità rispetto al caso base.

Tab. 5 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030, sensitività PHEV

1	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)
2	MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)
3	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)
4	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
5	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
6	[MCI – e-fuels]
7	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)
8	MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)
9	BEV
10	FCEV

Si è altresì cercato di comprendere quali fattori condizionano la preferibilità dei **BEV**, nonostante questi veicoli siano generalmente posti al centro di strategie e programmi di decarbonizzazione dei trasporti su gomma a livello europeo e nazionale. In un orizzonte di dieci anni, quale il 2030, sono diverse le valutazioni che li penalizzano, rendendoli poco rispondenti al set completo di obiettivi espressi dalle matrici di lavoro. In particolare, emergono vincoli importanti relativi: **alla dimensione socio-economico-lavorativa**: scarse economie di scala relative alla produzione delle batterie (per le quali non esiste ancora una filiera nazionale dedicata), quel che a sua volta compromette lo sviluppo di tutte quelle competenze che gravitano attorno alla fase progettuale-produttiva

va-manutentiva; elevata dipendenza energetica e produttiva dall'estero (per una parte dell'energia elettrica rinnovabile e per le batterie); **alla dimensione economica:** costo elevato del veicolo, necessità di importanti investimenti di rete per le stazioni di ricarica; **alla dimensione energetica/infrastrutturale:** necessità di modificare – con aggravio di costi – il contratto per la fornitura elettrica nell'eventualità di ricarica in posto auto privato; scarso rendimento energetico *well to tank*; limitata autonomia energetica (la più bassa tra tutte le alternative considerate); elevata incidenza massa/vettore energetico; elevata energia necessaria per l'utilizzo del veicolo (energia che è necessario sottrarre alla propulsione per alimentare impianti ausiliari come riscaldamento e condizionamento); elevato impegno energetico (della rete elettrica) per la produzione/impiego del vettore energetico; limitata disponibilità della rete di ricarica; **alla dimensione personale:** minore comodità e libertà di impiego rispetto alle alternative a trazione mista o con solo MCI.

Si è quindi cercato di variare le stime relative ai criteri economici e infrastrutturali esaminando uno scenario in cui i **BEV risultano fortemente sussidiati** (ponendo il prezzo di acquisto del veicolo pari alla metà di quello di un equivalente veicolo tradizionale a benzina/gasolio) e **possono contare su stazioni di ricarica diffuse** sia a livello urbano che extra-urbano, quel che attenuerebbe la *range anxiety* e la *recharge anxiety*. È stato anche ipotizzato **l'avvio di una filiera italiana di produzione delle batterie** (che si consolida al 2050 e viene quindi ripresa per l'analisi di sensitività condotta a quell'orizzonte), considerando valutazioni migliorative rispetto al caso base per le economie di scala associate alla produzione di batterie, per la dipendenza dall'estero e per il costo delle batterie stesse (CAPEX produttori). L'analisi è stata inoltre svincolata dai criteri relativi all'attuale composizione del parco circolante e al tasso di ammortamento degli impianti di produzione; pur con queste esplorazioni, al 2030 non si assiste a un miglioramento dei BEV in termini di preferibilità rispetto alle alternative qui considerate.

Infine, si è cercato di comprendere se l'opzione **idrogeno**, anch'essa in fondo all'ordinamento insieme ai BEV, potesse migliorare il suo posizionamento, integrando valutazioni migliorative su alcuni parametri che riflettono le aspettative al 2030 di importanti operatori/esperti del settore. Gli interventi hanno riguardato le leve economiche legate alla produzione del vettore (economie di scala maggiori e forte riduzione del costo del vettore energetico – allineato a quello dei carburanti petroliferi) e il rendimento del processo produttivo (*well to tank*). Anche con queste variazioni, la posizione dei FCEV non muta in modo rilevante (Tab. 6).

Tab. 6 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030, sensitività idrogeno

1	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)
2	MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)
3	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
4	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
5	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – benzina/gasolio (miscele con quote bio)
6	[MCI – e-fuels]
7	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)
8	MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)
9	FCEV
10	BEV

In sintesi, la situazione descritta riflette **l'inerzia relativa all'introduzione di un sistema nuovo** (economie di scala, competenze, costi) che ha anche limiti fisici (autonomia energetica, incidenza massa/vettore energetico, impegno energetico per dotazione infrastrutturale, disponibilità di rete di ricarica) e funzionali (libertà di impiego), pur presentando vantaggi evidenti in termini di decarbonizzazione, laddove l'elettricità venga prodotta a partire da energie rinnovabili.

La leva economica (prezzo del veicolo) e quella infrastrutturale (investimenti in impianti di ricarica) risultano cruciali nel migliorare il posizionamento dei PHEV

4.3. Gli esiti dell'AMC al 2050

Nel comparare le alternative al 2050, si nota come gli e-fuels rappresentino un'alternativa a tutti gli effetti, mentre si è ipotizzata l'eventuale assenza di motori a combustione interna alimentati esclusivamente con carburanti di origine fossile (benzina/gasolio, GNC, GPL). Rispetto al 2030 sono stati inoltre considerati due criteri in meno (26 invece di 28), in quanto la composizione del parco circolante attuale e il tasso di ammortamento degli impianti di produzione esistenti non sono più ritenuti rilevanti in un orizzonte di lungo periodo.

L'AMC al 2050, basata su valutazioni migliorative per diverse alternative – miglioramento delle economie di scala delle opzioni oggi più sperimentali, riduzione conseguente dei relativi *economics*, ampliamento della rete di rifornimento/ricarica laddove la dotazione infrastrutturale al 2030 era stata indicata come poco sviluppata rispetto a quella dei veicoli a gasolio/benzina tradizionali (opzione di riferimento), maggiore abbattimento delle emissioni di anidride carbonica per tener conto di processi produttivi sempre più sostenibili (fino all'azzeramento dell'impatto emissivo nel caso degli e-fuels, del biometano e di veicoli BEV o a idrogeno) – **restituisce un esito base in cui la trazione mista – HEV e PHEV – surclassa le altre** (Tab. 7). Emerge, in particolare, come la preferibilità dei PHEV sia molto più evidente in un orizzonte di lungo periodo rispetto al 2030,

dove comunque si profilava già come opzione interessante.

Seguono i **MCI alimentati dalle diverse fonti low carbon**, il cui ordinamento non è indicativo di una preferibilità marcata tra le alternative ma sconta il fatto che per i biocarburanti (quali biodiesel e biometano) le economie di scala di tipo produttivo potranno essere maggiori rispetto agli e-fuels e, di conseguenza, gli investimenti associati alla costruzione di capacità produttiva sono stimati inferiori.

Escludendo le opzioni più tradizionali probabilmente non più presenti al 2050, l'analisi considera i **BEV e FCEV come i meno preferibili** in base al set di criteri espressi dalla matrice. Attraverso opportune analisi di sensitività, si è quindi cercato di capire su quali leve agire per rendere questa categoria di veicoli più interessante rispetto al caso base.

4.3.1. Analisi di sensitività al 2050

Nella lettura dei risultati dell'AMC è opportuno ricordare che l'ordinamento proposto è quello che meglio soddisfa i criteri individuati con i pesi base ad essi attribuiti. Anche l'impiego di *pesi uguali per tutti i criteri* restituisce l'ordine di preferenza delineato nel caso base, il che sottende una distinzione sufficientemente netta delle prestazioni delle diverse alternative.

Si è poi inteso procedere con la variazione migliorativa di alcuni parametri relativi a spe-

Tab. 7 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 con le valutazioni base

1	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>
2	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>
3	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%) [MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
4	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
5	MCI – e-fuels
6	[MCI (motori evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)]
7	[MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)]
8	BEV
9	FCEV

Al 2050 la trazione mista (HEV e PHEV) surclassa le altre, seguita dai motori a combustione interna alimentati da fonti low carbon quali gli e-fuels

Tab. 8 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050, sensitività BEV

1	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>	
2	BEV	
3	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>	
4	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	
5	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
6	MCI – e-fuels	
7	[MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)]	
8	[MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)]	
9	FCEV	

cifiche fonti, principalmente su quelle che, nel caso base, risultano meno preferibili. **Relativamente ai BEV**, si è cercato di definire uno scenario con valutazioni ulteriormente migliorative su diversi criteri (in numerosi casi le stime riportate nella matrice base al 2050 sono già migliorative rispetto a quelle espresse al 2030). **Le leve su cui si è inteso agire sono ancora una volta quelle economiche, infrastrutturali e legate al consolidamento di una filiera nazionale di produzione delle batterie.** Si è quindi ipotizzato uno scenario con BEV fortemente sussidiati e in grado di contare su stazioni di ricarica diffuse, sull'invarianza dei contratti per la fornitura di energia elettrica domestica necessaria per la ricarica e su una elevata comodità e libertà di impiego del mezzo. Sono state altresì migliorate le economie di scala relative alla produzione del vettore energetico, abbassati i relativi costi e ridotta la dipendenza dall'estero (oggi molto elevata), equiparandole a quelle dei veicoli tradizionali a combustione interna. Agendo in modo congiunto su questi diversi criteri (12 sui 26 totali considerati al 2050), **i BEV surclassano tutte le alternati-**

ve ad eccezione dei PHEV, in quanto buona parte delle assunzioni migliorative applicate si riflettono anche nei veicoli a trazione mista, che confermano quindi la loro preferibilità rispetto ai veicoli puramente elettrici.

Come per il 2030, si è cercato di comprendere se l'opzione **FCEV** potesse migliorare il suo posizionamento, integrando valutazioni ulteriormente migliorative su alcuni parametri. Rispetto al caso base sono state migliorate sensibilmente le valutazioni relative a **criteri economici, prestazionali e infrastrutturali**, tra cui le economie di scala legate alla produzione del vettore energetico e del *powertrain*, il costo del vettore energetico e del veicolo (allineati a quello dei MCI alimentati a gasolio/benzina assunti come riferimento), il rendimento del processo di produzione (*well to tank*), la disponibilità della rete di rifornimento e la conseguente comodità e libertà di impiego del veicolo¹³. Ne è derivata una maggiore preferibilità rispetto al caso base (Tab. 9) ma questa opzione rimane surclassata dai veicoli a trazione mista e dai motori a combustione interna alimentati da fonti *low carbon*.

Tab. 9 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050, sensitività idrogeno

1	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>	
2	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>	
3	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
4	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	MCI – e-fuels
5	FCEV	
6	[MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)]	
7	[MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)]	
8	BEV	

Un intervento congiunto su quasi la metà dei criteri colloca i BEV in seconda posizione

Infine, è stata ipotizzata la produzione su larga scala di **e-fuels**, assumendo un forte ampliamento delle economie di scala della produzione e un conseguente abbattimento dei costi rispetto a quanto ipotizzato al 2030, quando questa opzione era considerata (in termini di CAPEX

relative agli impianti di produzione) la più costosa. È sufficiente agire sulla **leva economica** per rendere questa opzione preferibile rispetto alle altre subito dopo gli HEV (Tab. 10), considerati nell'ipotesi in cui il cui motore endotermico sia alimentato, per l'appunto, da carburanti sintetici.

Tab. 10 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050, sensitività e-fuels

1	HEV serie/parallelo (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i> (e-fuels)	
2	MCI – e-fuels	
3	PHEV (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i> (e-fuels)	
4	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
5	MCI – Biodiesel (incluso HVO) / bioetanolo (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	
6	[MCI (motore evoluti, da Euro 6 in avanti) – benzina/gasolio (miscela con quote bio)]	
7	[MCI – GPL (eventuale miscela con bio-GPL)]	
8	BEV	
9	FCEV	

In conclusione, gli esiti al 2030 e al 2050 portano a evidenziare:

- **la preferibilità per un'elettrificazione diffusa** – rappresentata dai veicoli ibridi e plug-in – rispetto alla trazione elettrica pura;
- **il ruolo ancora centrale dei motori a combustioni interna**, progressivamente alimentati da fonti sempre meno fossili e potenzialmente a zero emissioni (e-fuels, bio-carburanti avanzati, tra cui biometano);
- **l'importanza di un intervento deciso e congiunto su diverse leve** – economiche, infrastrutturali, di filiera – **per posizionare i BEV tra le opzioni preferibili.**

La situazione descritta, e verificata con diverse analisi di sensitività, riflette **l'inerzia relativa all'introduzione di un sistema nuovo** (economie di scala, competenze, costi) che ha anche limiti fisici (autonomia energetica, incidenza massa/vettore energetico, impegno energetico per dotazione infrastrutturale, disponibilità di rete di ricarica) e funzionali (libertà di impiego), pur presentando vantaggi evidenti in termini di decarbonizzazione, laddove l'elettricità venga prodotta a partire da energie rinnovabili.

5. Analisi multi-criteri nel trasporto pesante: metodologia e risultati

Il trasporto commerciale su strada svolge un ruolo fondamentale per il sistema economico nazionale, rappresentandone un importante indicatore dello stato di salute. L'Italia è la sesta industria europea del trasporto merci su gomma, assorbendo l'85% circa del traffico merci complessivo del paese. La grande maggioranza dei volumi viene movimentata entro i confini nazionali (89%) e per il 40% riguarda percorrenze superiori ai 300 km. La merce trasportata oltre confine (che rappresenta l'11% del totale) si muove, invece, prevalentemente lungo distanze superiori a 500 km (77%)¹⁴. La rilevanza delle lunghe percorrenze – nonostante una riduzione associata al calo della produzione industriale – ha comportato negli ultimi anni un aumento del traffico di autotreni e autoarticolati, o veicoli industriali in genere, sulle autostrade, dato in controtendenza rispetto alla dinamica complessiva del settore.

A parte una lieve ripresa nel 2018, infatti, le tonnellate per chilometro movimentate nell'ultimo decennio da vettori nazionali ed esteri hanno segnato un tendenziale calo, risultando inferiori del 26% rispetto al 2009 e non recuperando più i volumi antecedenti la recessione globale del 2008-2009. Il 2020, con l'irrompere della crisi economico-sanitaria innescata dal Covid-19, si configura come un altro anno critico e non privo di conseguenze, almeno sul breve periodo. Ad esserne colpito è stato soprattutto il settore produttivo dei veicoli industriali che, nei primi sei mesi dell'anno, si è trovato ad affrontare le gravi ripercussioni derivanti dalla gestione dell'emergenza, tra rallentamenti della produzione, chiusura di alcuni stabilimenti e blocco dell'iter di immatricolazione derivante dalla sospensione delle attività del personale delle motorizzazioni provinciali.

Al netto delle criticità economiche, è ragionevole attendersi nel medio-lungo periodo un'evoluzione importante del segmento del tra-

sporto pesante in virtù del **graduale rinnovo del parco circolante e dell'introduzione sul mercato di nuovi veicoli** in grado di percorrere maggiori distanze a parità di consumo di carburante. Da sempre, infatti, le case costruttrici sono orientate alla massima resa per chilometro percorso, considerando che la spesa del carburante è una voce che incide fortemente sul bilancio delle aziende coinvolte: rappresenta un terzo dei costi operativi ed è seconda solo ai costi del lavoro. Da qui, gli sforzi compiuti per migliorare l'efficienza dei motori e, più in generale, dei mezzi (miglioramenti aerodinamici, contenimento della massa, pneumatici con minore resistenza al rotolamento, sviluppo della guida autonoma e dei sistemi di guida semi-autonomi etc.), riducendo al contempo i consumi.

Con il progredire degli standard Euro, inoltre, è migliorato significativamente anche l'**impatto emissivo** dei veicoli industriali, con i modelli di ultima generazione che presentano **emissioni di inquinanti prossime allo zero**. Il problema delle emissioni di inquinanti da parte dei veicoli pesanti è diventato, pertanto, un tema legato al ricambio dei mezzi più che alle tecnologie: infatti, circa il 63% del parco circolante è ante Euro IV.

Pertanto, **la futura sfida ambientale sarà principalmente legata all'abbattimento delle emissioni di CO₂**, considerando che ad oggi il loro apporto è pari al 17,4% delle emissioni complessive del trasporto stradale¹⁵. Il tema è al centro dell'azione delle istituzioni comunitarie e nazionali nell'ambito della lotta ai cambiamenti climatici e, in tale direzione, l'Unione Europea ha approvato una nuova regolamentazione sui mezzi pesanti che, prendendo a riferimento i dati di monitoraggio delle emissioni di CO₂ del 2019, prevede un target di riduzione del 15% dal 2025 e del 30% dal 2030.

Dati i limiti alle emissioni dei veicoli, un ruolo importante per la decarbonizzazione del settore muoverà dall'ottimizzazione dei flussi di traffico, dall'introduzione di sistemi di trasporto intelligenti e soprattutto dal **crescente impiego di carburanti alternativi al gasolio tradizio-**

Il prevalere del gasolio di origine fossile, per quanto con quote bio crescenti, implica che la penetrazione di qualsiasi nuovo carburante o vettore energetico sia supportata dalla realizzazione di un sistema infrastrutturale dedicato (in taluni casi ex novo)

nale, anche ricorrendo a **powertrain** diversi da quelli che hanno sinora caratterizzato la composizione del parco veicolare.

In questa sezione, l'analisi riguarda il **segmento dei veicoli industriali con peso totale a terra (p.t.t.) superiore alle 3,5 tonnellate** (autotreni e autoarticolati fino a 44 t, autocarri rigidi e trattori stradali) e cerca di delineare la possibile evoluzione al 2030 e al 2050 del mix di carburanti/sistemi di propulsione che conoterà il settore, avendo bene a mente alcune considerazioni di contesto:

- l'età media del parco veicoli industriali (2019) è di 13,6 anni, al di sopra della media europea, pari a circa 12,4 anni;
- il 99,3% dell'attuale parco circolante è composto da motori diesel: un dominio quasi assoluto, per quanto in prevedibile riduzione, che sottolinea l'importanza degli sforzi volti a ridurre le emissioni di carbonio, con i costanti miglioramenti di efficienza dei motori a combustione interna e dei veicoli e con il progressivo sviluppo di biocarburanti e carburanti sintetici (biodiesel avanzati, HVO, e-fuels);
- l'età mediana del parco e la sua attuale composizione in termini di alimentazione/**powertrain** sono condizioni che inducono a ritenere poco probabile uno stravolgimento dello *status quo* nei prossimi dieci anni;
- come alimentazione alternativa al gasolio, va affermandosi sempre più il gas naturale, in forma compressa e, in misura crescente, liquefatta, particolarmente idonea alle lunghe percorrenze che caratterizzano una parte preponderante di questo segmento di mercato;
- trascurabile ad oggi la quota dei **powertrain**

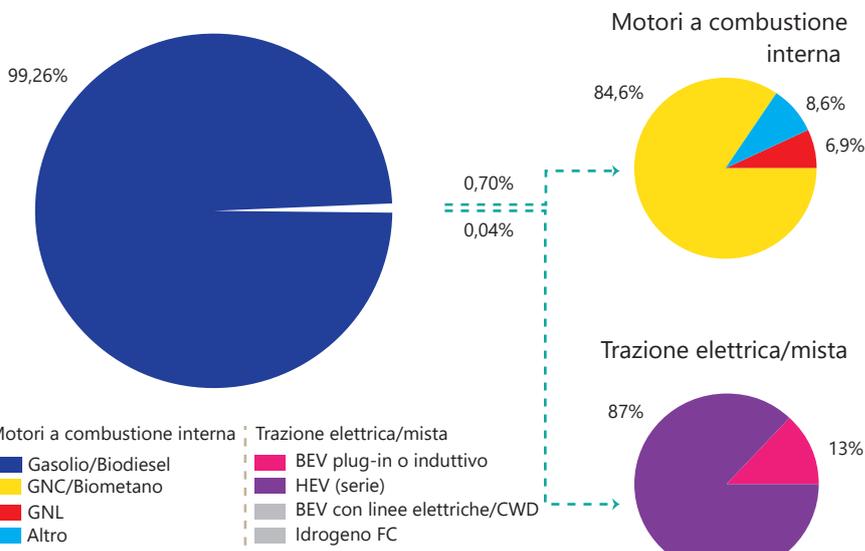
elettrici: le poche unità in circolazione (310) sono perlopiù rappresentate da veicoli ibridi in serie (HEV). Del tutto assenti, fatta eccezione per prime sperimentazioni, i motori elettrici alimentati da *fuel cell* a idrogeno;

- la prevalenza nelle nuove immatricolazioni di mezzi pesanti con p.t.t. superiore a 16 tonnellate e che si muovono su lunghe percorrenze è un elemento che penalizza una penetrazione diffusa di sistemi di trazione *full-electric* in questo segmento di mercato.

5.1. Le alternative nel trasporto pesante

Per comparare le diverse opzioni fuel/motore che potranno avere un ruolo nel trasporto pesante nel prossimo trentennio, è stata utilizzata un'analisi multi-criteri. La comparazione è stata effettuata considerando **10 alternative e 29 criteri**¹⁶ individuati tenendo conto delle particolarità del settore e con l'intento di comprendere sei macro-dimensioni di valutazione: sociale-lavorativa; economica; energetica; ambientale; di impiego tipico condizionato e libertà di programmazione del servizio; di sicurezza e disponibilità energetica.

Per quanto concerne le alimentazioni dei motori a combustione interna, il riferimento varia a seconda che si consideri l'orizzonte 2030 e il 2050 e le opzioni che si ipotizzano assenti nell'uno o nell'altro caso sono state indicate tra parentesi quadra. In particolare, **per il 2030** sono state considerate sia le fonti di alimentazione di origine fossile – **gasolio, GNC e GNL**, in miscela con quote crescenti di componenti



Fonte: elaborazione RIE dati UNRAE al 31 dicembre 2019.

Tab. 11 – Alternative considerate nell’AMC al 2030 e al 2050 applicata allo stradale pesante

Alternative 2030		Alternative 2050
1	MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)	[MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)]
2	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
3	MCI – GNL (con quota bio contenuta)	MCI – GNL (con quota bio preponderante)
4	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
5	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
6	[MCI – e-fuels]	MCI – e-fuels
7	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – gasolio (miscela con quote bio)	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>
8	BEV con ricarica plug-in o induttiva	BEV con ricarica plug-in o induttiva
9	BEV con linee elettriche su autostrade/ <i>Charge While Driving</i> (CWD)	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD
10	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno

bio – sia le opzioni di origine prevalentemente o totalmente biologica – **biodiesel e biometano**. Queste ultime, seppur già presenti in miscela con i combustibili tradizionali, sono state considerate anche come opzioni a sé stanti in quanto afferenti a filiere produttive diverse da quelle fossili. Al 2030, carburanti fossili con miscela bio si confrontano, quindi, con carburanti prevalentemente o interamente bio, che potrebbero rappresentarne la naturale evoluzione laddove adeguatamente sviluppati. Gli **e-fuels**, di origine rinnovabile, sono stati inseriti in parentesi quadra in quanto si assume che non avranno ancora uno sviluppo commerciale adeguato a quell’orizzonte temporale. **Per il 2050**, invece, si fa riferimento a fonti di alimentazione prevalentemente o interamente di origine biologica (biodiesel, biometano) e rinnovabile (e-fuels).

Relativamente alla trazione elettrica pura, sono stati considerati i **BEV alimentati da linee elettriche autostradali o con modalità *Charge While Driving* (CWD)** e i **veicoli elettrici con ricarica induttiva o plug-in**. Questi ultimi sono autocarri elettrici alimentati da batterie ricaricate in rimessa oppure durante soste lunghe ai magazzini di carico o consegna. Ad oggi, il loro ambito di applicazione ottimale è la distribuzione su corto raggio o la movimentazione delle merci in ambito urbano, dove – al pari dei furgoni elettrici – anche i mezzi di stazza maggiore a zero emissioni possono muoversi più liberamente anche nelle aree con restrizioni. Per le lunghe percorrenze e per i camion di grandi dimensioni, l’elettrificazione risulta molto

più complessa, richiedendo una rete di ricarica diffusa ad alta e altissima potenza, nonché lunghi tempi di ricarica anche laddove la rete è presente. Non mancano prototipi e annunci in tale direzione, ma una penetrazione rilevante richiede il superamento congiunto di vincoli di natura economica, tecnologica e infrastrutturale. **I BEV con linee elettriche su autostrade** sono invece camion, ad oggi solo sperimentali, dotati di pantografi per captare direttamente elettricità da una catenaria aerea su autostrada, conservando intatta l’autonomia delle batterie per coprire i percorsi tra i tratti infrastrutturati e i punti di partenza o di arrivo. Il ***Charge While Driving*** è una soluzione tecnologica anch’essa sperimentale che prevede la ricarica per induzione dei veicoli mentre questi percorrono apposite corsie attrezzate. Da ultimo, sono stati considerati veicoli **alimentati da celle a combustibile a idrogeno**. L’energia per i motori elettrici non viene accumulata in una batteria, ma prodotta nella cella a combustibile mentre l’autocarro è in moto, grazie alla reazione elettrochimica tra l’idrogeno e l’ossigeno dell’aria circostante. Tale reazione comporta unicamente la produzione di vapore e calore.

Sono state così costruite le **due matrici di decisione, una per l’orizzonte 2030 e una per il 2050**. Le stime inserite cercano di comparare soluzioni diverse su piede di parità: nel caso specifico **sono stati presi a riferimento veicoli industriali con p.t.t. superiore a 12 tonnellate (N3)** – autocarri di grande taglia e impiegati su lunghe distanze – in quanto ritenuti rappresentativi del segmento in esame.

Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato al Workshop sul Trasporto pesante e Trasporto Pubblico Locale del 9 maggio 2019, organizzato dal **Gruppo Strategico “Carburanti ed Energie Alternative”** istituito da unem.

Come già visto per gli altri segmenti, sono state altresì definite due batterie di pesi, al 2030 e al 2050, la cui unica differenza riguarda la non considerazione, nel lungo periodo, dei criteri relativi alla composizione attuale del parco circolante e al tasso di ammortamento degli impianti di produzione dei carburanti esistenti, assegnando un valore nullo ai corrispondenti pesi.

5.2. Gli esiti dell'AMC al 2030

In base ai pesi assegnati ai diversi criteri all'orizzonte 2030, l'AMC restituisce l'**ordine di surclassamento** riportato in Tab. 12.

Al 2030 l'**opzione preferibile è rappresentata dai veicoli ibridi in serie (HEV)** premiati da economie di scala sviluppate, un elevato rendimento del motore (il motore termico è meccanicamente disaccoppiato dalle ruote per cui può funzionare a punto fisso nelle sue condizioni ottimali di efficienza), un'evidente flessibilità di impiego, una riduzione delle emissioni allo scarico (specie climalteranti), minori consumi di carburante e minori costi di esercizio rispetto ai veicoli diesel di ultima generazione dotati solo di MCI.

Tra i veicoli con solo MCI, sveltano i **motori diesel di ultima generazione** (da Euro VI in avanti) che hanno prezzi di acquisto inferiori rispetto a gran parte delle opzioni alternative e sono avvantaggiati da consolidate economie di scala lato produzione del carburante e lato veicolo, da un'infrastruttura di approvvigionamento, logistica e di distribuzione completamente sviluppata, da una massima flessibilità di impiego e da elevati rendimenti energetici del motore. Tuttavia, non si può ignorare il vincolo delle emissioni di carbonio, sensibilmente più elevate rispetto alle alternative considerate: aspetto che rende imprescindibile la graduale sostituzione del gasolio fossile con biocarburanti e carburanti sintetici (biodiesel, HVO ed e-fuels) che rappresenteranno nel tempo la sua naturale evoluzione.

Rispetto all'attuale composizione del parco circolante dei veicoli industriali, **l'ordinamento base al 2030 restituisce una posizione di rilievo a un combustibile relativamente nuovo, ma particolarmente idoneo in questo ambito di applicazione.** Il **GNL**, nonostante un prezzo di acquisto del mezzo superiore rispetto a quello di un equiparabile veicolo diesel (al netto degli incentivi) e la necessità di importanti investimenti per realizzare un'adeguata infrastruttura logistica (depositi *small scale*) e di rifornimento, risulta un'opzione di grande interesse: il suo posizionamento adiacente ai veicoli diesel si spiega grazie a prestazioni motoristiche simili, più bassi costi di esercizio (equiparando veicoli di dimensioni analoghe, un mezzo pesante a GNL consuma meno a parità di percorrenza), minor costo del carburante, elevata autonomia (paragonabile a quella dei diesel evoluti) e miglior

Tab. 12 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030 con la batteria di pesi base

1	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – gasolio (miscele con quote bio)		
2	MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)		
3	MCI – GNL (con quota bio contenuta)		
4	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)		
5	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)		
6	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)		
7	[MCI – e-fuels]		
8	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD	BEV con ricarica plug-in o induttiva	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno

Emerge l'interesse per l'opzione GNL, il cui successo dipenderà anche dall'estensione della rete di distribuzione e dal crescente contributo della componente bio

impatto in termini di emissioni climalteranti. Per il successo della tecnologia GNL nel trasporto pesante risulterà essenziale il mantenimento degli attuali vantaggi fiscali, la **progressiva e capillare estensione della rete di distribuzione**, l'ulteriore miglioramento delle sue prestazioni ambientali attraverso l'introduzione di quote crescenti di bio-GNL.

In posizione intermedia, si trovano i biocarburanti e i combustibili gassosi di origine fossile e biologica. Il **biodiesel**, a prescindere dalla componente obbligatoria in miscela con il prodotto fossile e nonostante un potenziale emissivo inferiore, non riesce a surclassare al 2030 la fonte petrolifera; a penalizzarlo potranno ancora essere le minori economie di scala sia nella produzione del combustibile (avanzato) sia nella sua applicazione a livello di motore (eventuali problemi di contaminazione nell'ipotesi di miscele con quote bio significativamente superiori a quelle obbligatorie), nonché i maggiori investimenti in capacità produttiva per conseguire volumi adeguati.

Il **GNC**, invece, non risulta particolarmente idoneo per veicoli industriali di grande taglia che operano su lunghe distanze, mentre potrebbe risultare interessante per determinate nicchie di mercato, come la distribuzione di corto raggio. Nei prossimi anni, per i veicoli alimentati a GNC si prospetta un utilizzo del **biometano** in percentuali crescenti, quel che l'analisi conferma ordinando queste due opzioni di alimentazione in posizioni adiacenti.

In coda all'ordinamento, escludendo gli e-fuels che al 2030 non saranno ancora disponibili su scala commerciale, figurano i **motori elettrici alimentati da batterie**. La penalizzazione rispetto alle alternative considerate dipende in parte dal fatto che i parametri inseriti nell'analisi fanno riferimento a veicoli industriali di grande taglia e impiegati su lunghe distanze, per i quali la completa elettrificazione risulta molto complessa. **Vincoli economici** (prezzo medio di acquisto del veicolo molto elevato, scarse economie di scala sia nella produzione che nella relativa gestione/manutenzione delle batterie), **tecnici** (accumuli elettrochimici con densità energetica e autonomia limitate, ampio differenziale tra il peso totale a terra e il carico utile del veicolo anche in presenza di pacchi batteria di modesta entità) e **infrastrutturali** (assenza di un'adeguata e costosa rete di ricarica elettrica ad alta e altissima potenza, i lunghi tempi di ricarica richiesti anche laddove la rete è presente, con conseguente scarsa flessibilità di programmazione del servizio) sono i

principali deterrenti alla penetrazione di questi *powertrain* nel segmento di mercato considerato, nonostante diversi progetti annunciati e la sperimentazione condotta sull'Autostrada BreBeMi che, in linea con le analoghe iniziative in altri paesi europei come Svezia e Germania, punta a realizzare la prima autostrada elettrificata in Italia. Nonostante queste iniziative e l'elevato potenziale di abbattimento delle emissioni che potrebbe derivare dalla trazione elettrica – specie se l'elettricità viene prodotta a partire da fonti rinnovabili – un veicolo industriale elettrico di grande taglia presenta ancora molti limiti rispetto a un equivalente veicolo diesel, difficilmente superabili in un orizzonte di dieci anni.

Analogamente ai BEV, anche i *powertrain* in cui l'energia elettrica viene prodotta a partire dall'**idrogeno all'interno di una cella a combustibile** vengono surclassati, nel segmento e nell'orizzonte esaminato, dagli ibridi in serie e da tutti i veicoli con motore a combustione interna. Nonostante tempi di rifornimento paragonabili a quelli di un carburante liquido, la tecnologia in questione risulta ad oggi immatura per un impiego di massa¹⁷ e particolarmente costosa, oltre a richiedere ulteriori sforzi e consistenti investimenti per l'implementazione di processi produttivi del vettore energetico completamente decarbonizzati (da idrogeno grigio a verde). A ciò si aggiunge un'autonomia inferiore a quella di un equiparabile veicolo diesel e la totale assenza della rete di distribuzione: nonostante l'impegno dell'Italia a dotarsi di un numero adeguato di stazioni di rifornimento entro il 2025, ad oggi si conta solo un distributore pubblico di idrogeno a Bolzano. Nel medio termine, quale il 2030, sembra quindi poco probabile l'emergere di questa tecnologia, specie in relazione al comparto dei veicoli industriali. Più verosimile nel lungo periodo (2050), benché condizionata dal verificarsi di determinate condizioni che verranno esaminate attraverso opportune analisi di sensitività.

5.2.1. Analisi di sensitività al 2030

L'ordinamento base restituito dall'AMC permane anche operando variazioni dei pesi, effettuate per testare la sensitività dei risultati: un'invarianza dei risultati significa una relazione di surclassamento forte, quindi robusta al variare della sensibilità che un valutatore può avere nei confronti di un determinato peso. Anche l'im-

Per i veicoli industriali di grande taglia impiegati su lunghe distanze la completa elettrificazione risulta complessa, specie in un orizzonte di dieci anni

piego di pesi uguali per tutti i criteri restituisce l'ordine di preferenza delineato nel caso base. Questo insieme di risultanze sottende una distinzione sufficientemente netta delle prestazioni delle diverse alternative.

Tuttavia, si è ritenuto di procedere a un'analisi di sensitività in relazione all'opzione **idrogeno** (Tab. 13), in coda all'ordinamento base insieme alle altre modalità di trazione elettrica, riflettendo nelle valutazioni le aspettative di esperti e operatori del settore. In particolare, sono state migliorate le valutazioni relative alle economie di scala sia lato combustibile che in relazione alla sua applicazione motoristica; sono stati anche ipotizzati una maggiore indipendenza lungo la filiera delle componenti, un minor costo del veicolo (posto superiore del 50% rispetto a quello di un autocarro con motore diesel di dimensioni paragonabili) e del vettore energetico (allineato a quello del gasolio tradizionale), il miglior rendimento del processo di produzione ipotizzando che sia accoppiato a sistemi di cattura e stoccaggio del carbonio. Pur con questi cambiamenti, i veicoli a idrogeno rimangono penalizzati rispetto agli HEV in serie e a tutte le alimentazioni relative a MCI.

Relativamente ai **BEV con ricarica plug-in o induttiva**, si è cercato di migliorare numerose valutazioni senza conseguire un miglioramento sostanziale dell'ordine di preferibilità restituito dall'AMC. In particolare, inserendo valutazioni in linea con i diesel evoluti in relazione ai criteri che descrivono la libertà di programmazione dell'impiego (assumendo quindi il caso di massima flessibilità), aumentando le valutazioni delle economie di scala dei *powertrain* e riducendo il costo del mezzo (allineandolo a quello degli HEV) e il costo di produzione del vettore energetico, rimangono posizionati in coda.

Gli autocarri elettrici potrebbero ritagliarsi un ruolo di maggior rilievo per usi in ambito urbano, dove l'assenza di emissioni allo scarico e la silenziosità di marcia risultano elementi centrali e dove i limiti di portata e di autonomia non costituiscono un ostacolo insormontabile. Si tratterebbe di veicoli di minor taglia rispetto a quelli generalmente considerati in quest'analisi e la cui diffusione potrebbe essere favorita da

minori costi di investimento del veicolo e miglioramenti prestazionali (maggiore autonomia, minore tara imposta dal peso della batteria).

Tab. 13 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030, sensitività idrogeno¹⁸

1	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – gasolio (miscele con quote bio)
2	MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)
3	MCI – GNL (con quota bio contenuta)
4	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
5	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)
6	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
7	[MCI – e-fuels]
8	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno
9	BEV con ricarica plug-in o induttiva
10	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD

5.3. Gli esiti dell'AMC al 2050

L'AMC al 2050, basata su valutazioni migliorative per diverse alternative, restituisce un **esito base con due raggruppamenti**, all'interno dei quali il modello considera le diverse opzioni ugualmente preferibili rispetto al set di obiettivi espressi dall'AMC¹⁹.

In testa, figurano gli **HEV in serie e i MCI alimentati da fonti low carbon (e-fuels e/o biocarburanti)**. In coda, escludendo la combinazione *fuel*/motore tradizionale – ovvero basata sull'impiego di combustibili con preponderante componente fossile (diesel e GNC) – **si posizionano i sistemi a trazione elettrica (a batterie o a idrogeno)** ancora penalizzati da caratteristiche di natura economica, tecnica e infrastrutturale che non li rendono preferibili rispetto a un veicolo elettrificato (HEV in serie) o con motore endotermico alimentato da fonti a basse (se non nulle) emissioni di carbonio.

Tab. 14 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 per il trasporto pesante con le valutazioni base

1	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>	MCI – e-fuels	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	MCI – GNL/bio-GNL (con quota bio preponderante)	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
2	[MCI – GNC (con quota bio contenuta)]				
3	[MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)]				
4	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD	BEV con ricarica plug-in o induttiva		Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	

L'analisi al 2050 conferma quanto emerso al 2030, ma si assiste al surclassamento di un gruppo di alternative (tra loro complanari) rispetto a un altro

5.3.1. Analisi di sensitività al 2050

Sul lungo periodo, si è cercato di capire quali elementi possono determinare la preferibilità di un'alternativa specie in relazione a quelle opzioni che nell'ordinamento base risultano maggiormente penalizzate.

In primo luogo, si è inteso verificare la preferibilità dell'opzione **HEV in serie** anche nel caso in cui l'alimentazione della componente endotermica non sia più il diesel fossile ma un suo equivalente *low carbon* come **l'e-diesel** (e-fuel): condizione del tutto ragionevole da qui a 30 anni. In questo caso, la variazione operata ha riguardato solo i criteri (e non i pesi) relativi al carburante impiegato, sostituendo i parametri riferiti al diesel con quelli indicati per gli e-fuels. In particolare, a fronte di maggiori investimenti per la produzione del combustibile e di un suo più elevato costo finale, sono state considerate valutazioni migliori in termini di capacità di decarbonizzazione della filiera e di abbattimento delle emissioni di carbonio lungo l'intero ciclo di vita. Anche con questa modifica, gli **HEV in serie si confermano tra le opzioni più interessanti**

sebbene in posizione di *ex aequo* con i veicoli dotati unicamente di MCI (*mild hybrid*) alimentati da fonti liquide o gassose a basse emissioni.

Relativamente al **GNL, considerato al 2050 con una preponderante quota bio**, è stata effettuata una sensitività che tenga conto della completa sostituzione della componente fossile con quella di origine biologica, quel che si ritiene possa essere plausibile sul lungo periodo. Per considerare **l'opzione 100% bio-GNL**, si è ipotizzata la creazione di una filiera nazionale di produzione che al 2050 risulti già ben sviluppata dal punto di vista tecnologico (elevate economie di scala) e che quindi consenta adeguati volumi di prodotto (elevata disponibilità), un rilevante contributo in termini di decarbonizzazione (modello di produzione in linea con il principio del "biogas fatto bene", con conseguente azzeramento delle emissioni di anidride carbonica), una maggiore indipendenza e quindi sicurezza energetica rispetto alle importazioni di carburante tradizionale. Il tutto a fronte di maggiori investimenti in impianti produttivi e di un costo potenzialmente maggiore del prodotto finale rispetto al suo equivalente fossile. **A queste condizioni, l'opzione bio-GNL surclasserebbe le altre qui considerate** (Tab. 15).

Tab. 15 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050, sensitività bio-GNL

1	MCI – bio-GNL				
2	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>				
3	MCI – e-fuels	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)		MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	
4	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]				
5	[MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)]				
6	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD	BEV con ricarica plug-in o induttiva		Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	

Pertanto, in base all'analisi svolta, il GNL – sia nella sua declinazione fossile (con quota bio contenuta) all'orizzonte 2030 sia nella sua accezione biologica (prevalente o totale) al 2050 – sembra avere caratteristiche idonee a soddisfare il set di obiettivi economici, energetici, ambientali e di flessibilità di impiego espressi nelle matrici. L'elevata autonomia consentita dalle sue caratteristiche composizionali, unita a un crescente abbattimento delle emissioni di carbonio (specie in presenza di quote sempre maggiori di bio-GNL in miscela), lo rendono un'opzione particolarmente interessante per il segmento del trasporto stradale pesante su lunghe distanze.

Come per il 2030, anche per il 2050 sono state considerate valutazioni migliorative per **l'idrogeno**. Oltre a ulteriori miglioramenti rispetto a quelli indicati per il 2030 in relazione a economie di scala e indipendenza energetica, si è agito sul costo del veicolo allineandolo a quello di un diesel tradizionale, si è assunta una forte riduzione del costo del vettore energetico – posto in linea a quello dei combustibili gassosi e inferiore al gasolio – e si è ipotizzata la costruzione di una rete di distribuzione diffusa

(seppur non ai livelli dei *fuel* tradizionali). Con questi mutamenti, che in parte hanno coinvolto anche l'opzione e-fuels, si individuano **due gruppi di interesse, tra loro poco distanti** (Tab. 16): gli HEV in serie alimentati con combustibili *low carbon* rimangono in cima all'ordine di preferibilità insieme ai MCI alimentati da GNL/Bio-GNL ed e-fuels. Segue l'idrogeno, allineato ai MCI alimentati da biocarburanti sia liquidi che gassosi.

Sono state svolte analisi di sensitività anche in relazione ai **BEV**, con valutazioni migliorative che coinvolgono diversi aspetti: maggiore libertà di programmazione dell'impiego; più elevate economie di scala dei *powertrain*; una riduzione dell'investimento per l'acquisto dei mezzi, ponendolo al livello degli HEV, e del costo di produzione del vettore energetico; una forte contrazione dell'impegno energetico necessario per la dotazione infrastrutturale (che tuttavia rimane superiore a quello richiesto dalle opzioni tradizionali). Anche in questo caso, sia i BEV con ricarica plug-in sia quelli con linee elettriche su autostrade non emergono come opzioni preferibili, rimanendo surclassati dai MCI con alimentazioni *low carbon* e dagli HEV.

Tab. 16 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050, sensitività idrogeno

1	MCI – GNL/bio-GNL (con quota bio preponderante)	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>	MCI – e-fuels
2	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
3	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]		
4	[MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)]		
5	BEV con ricarica plug-in o induttiva		
6	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD		

Sotto determinate condizioni economiche, tecniche e infrastrutturali, al 2050 il bio-GNL e l'idrogeno possono emergere come opzioni di interesse

In conclusione, gli esiti al 2030 e al 2050 portano a confermare i risultati dell'analisi condotta sul segmento del trasporto leggero, con qualche elemento di novità specifico di questo comparto:

- **la preferibilità per un'elettrificazione diffusa** – qui rappresentata dagli HEV in serie – rispetto alla trazione elettrica pura, avendo come riferimento principale i servizi di lunga percorrenza;
- **la centralità persistente dei veicoli diesel a un orizzonte ravvicinato quale è il 2030**, avvantaggiati da consolidate economie di scala, da un'infrastruttura di approvvigionamento, logistica e distribuzione già completamente sviluppata, da una massima flessibilità di impiego e da elevati rendimenti energetici del motore;
- **l'interesse per l'opzione GNL, sia nella sua declinazione fossile** (con quota bio contenuta) **all'orizzonte 2030 sia nella sua accezione biologica** (prevalente o totale) **al 2050**, un combustibile relativamente nuovo in questo ambito di applicazione, il cui successo – specie per le lunghe distanze – dipenderà anche dalla progressiva estensione della rete di distribuzione e dall'introduzione di crescenti quote bio che ne migliorano sensibilmente l'impatto ambientale;
- **il ruolo centrale dei motori a combustione interna in entrambi gli orizzonti**, alimentati da fonti sempre meno fossili e potenzialmente a zero emissioni (e-fuels, biocarburanti avanzati);
- **la necessità di attivare diverse leve per far emergere le potenzialità dell'idrogeno**: la creazione di adeguate economie di scala, la riduzione dei costi sia dei mezzi sia del vettore energetico, il miglioramento del rendimento del processo di produzione *well to tank*, la costruzione di una rete di distribuzione diffusa sono alcune delle pre-condizioni che possono contribuire a ritagliare uno spazio per questa fonte di alimentazione nel lungo periodo.

6. Analisi multi-criteri nel Trasporto Pubblico Locale: metodologia e risultati

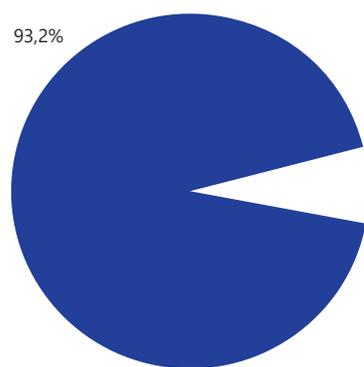
Il trasporto pubblico locale (TPL) è un comparto strettamente legato alle economie urbane; contribuisce in maniera determinante a migliorare la qualità della vita dei cittadini, considerando che circa il 78% della popolazione europea abita nelle città e l'Italia è nella media.

A livello nazionale, il servizio di TPL tradizionale viene svolto per oltre il 90% delle percorrenze su modalità autolinee, seguito dalle metropolitane (6,4%). La presenza ormai diffusissima di un bene sostitutivo, l'automobile, è una delle peculiarità del TPL rispetto agli altri servizi pubblici locali, privi di una concorrenza privata così forte. Tale circostanza implica che, fatta salva una quota di domanda che per livelli di reddito o altri vincoli non ha la possibilità di orientare la propria scelta tra mezzo pubblico e privato, l'utenza del TPL deve essere "conquistata" e poi fidelizzata.

La presente sezione, che si concentra sul **segmento autolinee (sia in ambito urbano che extra-urbano)**, non può prescindere da

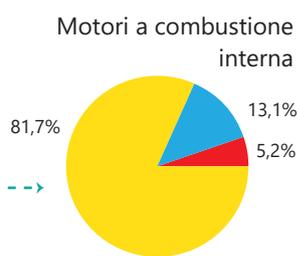
alcune considerazioni di contesto che giocoforza condizionano l'esito – almeno nel medio termine – dell'analisi svolta:

- l'età media del parco autobus nazionale nel 2018 è di 12,3 anni, ampiamente al di sopra della media europea, pari a circa 7 anni;
- una buona parte della flotta autobus risulta ancora appartenente alle categorie pre-Euro III (21% in ambito urbano e 30% in ambito extra-urbano), ma al tempo stesso – nota positiva – cresce l'incidenza dei veicoli Euro VI (11% nel 2018);
- il parco autobus circolante è prevalentemente ad alimentazione diesel, seguito dal GNC in ambito urbano – negli ultimi anni è cresciuta la sostituzione dei mezzi diesel rotamati con autobus alimentati a gas naturale compresso (18% nel 2012, 27% nel 2018) – ma con un dominio pressoché assoluto del diesel in ambito extra-urbano;
- ancora molto esiguo il numero di mezzi a trazione mista o elettrica, che nel 2019 rappresentano in tutto l'1% circa del circolante. Ciò premesso, risulta evidente come le esigenze di riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti, unitamente a quelle di abbassamento dell'età media del parco mezzi italiano,

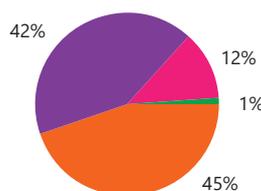


Fonte: elaborazione dati ANFIA e RIE al 31 dicembre 2018.

Fig. 6 – Italia: parco circolante autobus (%)



Trazione elettrica/mista



rappresentino le principali sfide che attendono il settore. La migrazione verso alimentazioni e *powertrain* diversi dai tradizionali motori diesel richiederà azioni incisive a livello di sistema e consistenti investimenti, sia in termini di risorse umane che finanziarie. Oltre alla dimensione economica, anche quella territoriale condizionerà l'evoluzione del comparto nei decenni a venire; le scelte strategiche condotte dagli operatori in ambito TPL potranno infatti derivare, oltre che dalla necessità di rispondere a una domanda di mobilità sempre più sostenibile, anche dall'infrastruttura disponibile – quale ad esempio una rete filoviaria già sviluppata o una rete di aree di interscambio per favorire la multi-modalità – nonché dalle caratteristiche specifiche del territorio e delle linee servite (a bassa o alta domanda).

6.1. Le alternative nel Trasporto Pubblico Locale

Attraverso l'analisi multi-criteri si è cercato di comparare le diverse opzioni di alimentazione che potranno avere un ruolo nel TPL al 2030 e al 2050. Il confronto è stato effettuato considerando **10 alternative e 29 criteri** individuati tenendo conto delle particolarità

del settore e con l'intento di comprendere sei macro-dimensioni di valutazione: sociale-lavorativa; economica; energetica; ambientale; di impiego tipico condizionato e libertà di programmazione del servizio; di sicurezza e disponibilità energetica.

Come già visto per gli altri segmenti del trasporto stradale, per le alimentazioni dei **motori a combustione interna** il riferimento varia a seconda che si consideri l'orizzonte 2030 e il 2050 e le opzioni che si ipotizzano assenti nell'uno o nell'altro caso sono state indicate tra parentesi quadra. In particolare, **per il 2030** sono state considerate sia le fonti di alimentazione di origine fossile – gasolio, GNC e GNL, in miscela con quote crescenti di componenti bio – sia le opzioni di origine biologica – biodiesel (incluso HVO) e biometano. Queste ultime, seppur già presenti in miscela con i combustibili tradizionali, sono state considerate anche come opzioni a sé stanti in quanto afferenti a filiere produttive molto diverse da quelle fossili. Al 2030, carburanti fossili con miscele bio si confrontano quindi con carburanti prevalentemente o interamente bio, che potrebbero rappresentarne la naturale evoluzione laddove adeguatamente sviluppati. Gli e-fuels, di origine rinnovabile, sono stati inseriti in parentesi quadra in quanto si assume che non avranno

Dato il pressoché assoluto dominio dei motori diesel, la migrazione verso alimentazioni e powertrain diversi richiederà azioni incisive a livello di sistema e consistenti investimenti

ancora uno sviluppo commerciale adeguato a quell'orizzonte temporale. **Per il 2050**, si fa riferimento a fonti di alimentazione prevalentemente o interamente di origine biologica (bio-diesel, biometano) e rinnovabile (e-fuels).

Relativamente ai **sistemi a trazione elettrica**, sono state considerate tre tipologie:

(1) i **BEV con ricarica plug-in o induttiva**, ovvero bus elettrici alimentati da batterie ricaricate in deposito oppure con soste ai capolinea. La ricarica *overnight* (notturna in deposito tramite connettore plug-in) è al momento la più diffusa ma richiede pacchi batteria di grandi dimensioni e può essere adottata solo per piccole flotte²⁰. È ipotizzabile anche il ricorso a un **sistema di biberonaggio**, vale a dire la ricarica parziale delle batterie che equipaggiano un mezzo elettrico autonomo effettuata o durante le fermate oppure durante le soste prolungate del mezzo in aree appositamente attrezzate (ad esempio, il capolinea delle linee urbane ed extra-urbane). Lo stato dell'arte della tecnologia ha come prerogativa un prolungamento dell'autonomia giornaliera dei veicoli elettrici, i quali richiedono comunque una ricarica lenta notturna prima di potere riprendere servizio.

(2) **Filobus/BEV con opportunity charge (BEVoc)**: questa alternativa comprende, per impiego in ambito urbano e suburbano, i filobus e gli e-bus con ricariche rapide (BEVoc) effettuate in più punti lungo le linee. Grazie a questa modalità di ricarica, i veicoli possono essere equipaggiati con batterie più piccole, ri-

sparmiando anche in termini di spazio. Tuttavia, la ricarica rapida al capolinea o presso determinate fermate può essere solo parziale e richiede comunque che l'autobus inizi il servizio mattutino uscendo dal deposito con la carica utile delle batterie completamente disponibile. Si può quindi dedurre che *l'opportunity charge* sia fondamentale per assicurare una durata di servizio accettabile, ma non elimina la necessità che anche il deposito sia dotato di stazioni di ricarica *overnight*.

(3) Per l'ambito extra-urbano sono stati considerati **BEV con linee elettriche su autostrade o Charge While Driving (CWD)** che si ricaricano in movimento (ad oggi non esistenti se non in via sperimentale).

Come per gli altri segmenti, sono state costruite **due matrici di decisione per il 2030 e il 2050**. Per individuare la documentazione più significativa e gli interlocutori più adeguati, si è fatto primario riferimento agli attori istituzionali e aziendali che hanno partecipato al Workshop sul Trasporto pesante e Trasporto Pubblico Locale del 9 maggio 2019, organizzato dal **Gruppo Strategico "Carburanti ed Energie Alternative" istituito da unem**. Rispetto agli altri segmenti esaminati, sono state definite **quattro batterie di pesi**, due al 2030 e due al 2050, **per distinguere tra l'impiego urbano ed extra-urbano dei bus**. Le differenze riguardano i criteri dell'autonomia energetica e della semplicità di rifornimento/ricarica, ritenuti più importanti per le percorrenze extra-urbane

Tab. 17 – Alternative considerate nell'AMC al 2030 e al 2050 applicata al trasporto pubblico locale

Alternative 2030		Alternative 2050
1	MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)	[MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)]
2	MCI – GNC (miscela con quote di biometano)	[MCI – GNC (miscela con quote di biometano)]
3	MCI – GNL (con quota bio contenuta)	MCI – GNL (con quota bio preponderante sino al 100%)
4	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
5	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
6	[MCI – e-fuels]	MCI – e-fuels
7	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – gasolio (miscela con quote bio)	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – carburanti <i>low carbon</i>
8	Filobus/BEV <i>opportunity charge</i> (urbano)/ BEV con linee elettriche su autostrade/ <i>Charge While Driving</i> (extra-urbano)	Filobus/BEV <i>opportunity charge</i> (urbano)/ BEV con linee elettriche su autostrade/ <i>Charge While Driving</i> (extra-urbano)
9	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)
10	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno

anche in conseguenza di possibili mancati rientri in deposito; il criterio dell'energia necessaria per il veicolo nel suo complesso, di maggiore peso nel caso urbano; la disponibilità di rete estesa urbana ed extra-urbana, considerate solo nel caso specifico rilevante (si veda Tab. 2 riepilogativa dei criteri impiegati per l'AMC del segmento stradale).

6.2. Gli esiti dell'AMC al 2030

In base ai pesi assegnati ai diversi criteri all'orizzonte 2030, l'AMC restituisce un **ordine di surclassamento** simile²¹ per l'ambito urbano ed extra-urbano (Tab. 18).

In ambito urbano, l'opzione preferibile ai fini del raggiungimento degli obiettivi espressi dai criteri individuati e dai relativi pesi è rappresentata dai **veicoli ibridi in serie (HEV)** in cui il motore elettrico è, appunto, messo in serie a un motore endotermico che viene impiegato come generatore per alimentare il motore elettrico o per ricaricare le batterie/supercapacitori²². A premiare questa tipologia, nonostante un prezzo del veicolo presumibilmente più elevato anche al 2030 rispetto ai tradizionali MCI *mild hybrid*, concorrono più fattori tra cui: economie di scala ben sviluppate, un elevato rendimento del motore, un'evidente flessibilità di impiego, una riduzione delle emissioni allo scarico, minori consumi di carburante e minori costi di esercizio rispetto ai bus a gasolio dotati solo di MCI. Quando è richiesta molta potenza, si sfruttano i cavalli dell'endotermico e nella successiva fre-

nata si attiva il motore elettrico che interviene recuperando energia. Questi veicoli svolgono tutte le operazioni di fermata e ripartenza affidandosi al solo motore elettrico con significativa riduzione anche di rumorosità e vibrazioni, risultando particolarmente idonei alla circolazione in ambito urbano anche nottetempo.

A seguire, l'AMC conferma la preferibilità per l'opzione più vicina a quella che oggi caratterizza la gran parte del parco circolante, vale a dire gli **autobus con motori diesel di nuova generazione e con propulsione ibrida leggera (*mild hybrid*)**. Costi limitati, ampie economie di scala, nessuna criticità in termini di impiego condizionato, investimenti lato produzione del carburante interamente ammortizzati, un buon rendimento del motore (con miglioramenti di efficienza continui) sono elementi a supporto di questa opzione, nonostante una valutazione peggiore delle alternative con cui si confronta rispetto ai parametri ambientali.

Anche il gas compresso, con quote crescenti di biometano, risulta interessante in ambito urbano/suburbano, dove l'autonomia consentita – inferiore rispetto a quella del diesel – non è condizionante per il profilo di missione. Al netto di rilasci fuggitivi di metano, presentano inoltre una migliore sostenibilità ambientale sia allo scarico che sul ciclo di vita. Rimane importante il vincolo infrastrutturale: non tutti i depositi possono ospitare impianti per l'erogazione del GNC per un problema di pressione della rete. Molti di essi, infatti, sorgono in prossimità delle aree urbane, dove il metano, per essere distribuito, deve essere necessaria-

Tab. 18 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2030 con la batteria di pesi base

Batteria di pesi base, caso urbano		Batteria di pesi base, caso extra-urbano	
1	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – gasolio (miscele con quote bio)	1	HEV serie (trazione mista con motore elettrico e MCI) – gasolio (miscele con quote bio)
2	MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)	2	MCI (motore diesel di ultima generazione, da Euro VI in avanti) – gasolio (miscela con quote bio)
3	MCI – GNC (miscela con quote biometano)	3	MCI – GNC (miscela con quote biometano)
4	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	4	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
5	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	5	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
6	Filobus/BEVoc	6	MCI – GNL (con quota bio ridotta)
7	MCI – GNL (con quota bio ridotta)	7	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD
8	[MCI – e-fuels]	8	[MCI – e-fuels]
9	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)	9	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)
10	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	10	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno

mente decompresso; nel caso di veicoli pesanti come gli autobus, la riduzione della pressione rappresenta un limite importante anche in relazione ai tempi di rifornimento. Pertanto, per le caratteristiche suesposte, questa tipologia di autobus risulta **particolarmente adatta agli ambiti suburbani**, seppur con considerazioni relative alla disponibilità di un'infrastruttura di erogazione adeguata presso il deposito.

Le alimentazioni a gasolio e a GNC vengono poi seguite in posizioni adiacenti dalla loro declinazione biologica: **biodiesel e biometano**. Diversamente, il **GNL** – con componente biologica ancora ridotta all'orizzonte 2030 – **risulta più idoneo per lunghe percorrenze**, qualificandosi come maggiormente preferibile in ambito extra-urbano, in parte come effetto della crescente penetrazione attesa nel trasporto merci pesante.

Pur non occupando la parte alta dell'ordinamento di preferibilità espresso dall'AMC, i **filobus** – solitamente bi-modali – e gli **e-bus con ricariche sia overnight che rapide (opportunity charge)** emergono come opzioni interessanti. A fronte di indubbi vantaggi ambientali e di elevati rendimenti del motore, questa tipologia di *powertrain* risulta penalizzata rispetto alle alternative che la precedono soprattutto in relazione ai costi di investimento, non solo a livello di veicolo ma anche di infrastruttura (linea elettrica bifilare o sistema di ricarica rapida diffuso), con conseguente condizionamento dell'impiego.

In coda, si posizionano opzioni meno idonee all'ambito urbano come il GNL e i **veicoli a trazione elettrica, siano essi alimentati da batterie di grandi dimensioni o da celle a combustibile a idrogeno**. Queste due soluzioni, per quanto di estremo interesse in ottica ambientale locale, versano ancora in uno stadio di sviluppo iniziale – se non embrionale nel caso dell'idrogeno – e necessitano quindi di superare quell'insieme di barriere economiche, tecnologiche, manutentive e infrastrutturali che oggi ne rappresentano il principale deterrente e che probabilmente non saranno risolte in un orizzonte quale il 2030. La loro diffusione richiederebbe, in sostanza, di mettere in piedi un sistema fortemente innovativo, composto da veicoli e infrastruttura, e quindi molto meno

flessibile rispetto a quello consentito dalle tradizionali propulsioni a diesel a fronte, però, di un contributo rilevante nell'abbattimento delle emissioni climalteranti.

Gli autobus a idrogeno, in particolare, emergono come soluzione ancora non matura in un orizzonte quale il 2030. Le limitazioni principali sono i costi ancora elevati della componentistica di terra e di bordo (cella a combustibile) e quelli per la produzione dell'idrogeno stesso che, prima di tutto, deve essere puro, pena il degrado repentino delle membrane presenti nella cella. Ne consegue che i processi industriali per la sua produzione devono essere particolarmente accurati andando ad incidere sul costo totale del prodotto. Dal punto di vista ambientale, poi, il focus si sposta sulle energie rinnovabili, le uniche in grado di garantire impatto zero anche alla fonte e non solo localmente dove circola il veicolo. Anche gli impianti di rifornimento devono essere sviluppati, tenendo conto del fatto che, nonostante l'idrogeno possa essere immagazzinato come gas compresso, occupa un volume molto grande, circa tre volte quello del metano. Pertanto, si ripropone il problema di un'autonomia limitata, adatta principalmente **a cicli urbani e suburbani**.

In ambito extra-urbano, come anticipato, i risultati sono stati ottenuti operando alcune distinzioni sui pesi di specifici criteri. Si nota come le soluzioni preferibili siano le stesse che emergono in ambito urbano, e quindi **HEV in serie seguiti da propulsioni diesel** di ultima generazione. Se si esclude la componente GNC/biometano, particolarmente idonea in ambiti urbani e suburbani, **emergono le opzioni biodiesel e GNL**, quest'ultima più adatta alle lunghe percorrenze rispetto al gas in forma compressa. Le opzioni elettriche pure – inclusi i veicoli, attualmente in fase di studio, che si ricaricano in movimento (*Charge While Driving* - CWD), particolarmente costosi benché potenzialmente idonei per le linee extra-urbane – sono surclassate da quelle con MCI, ad eccezione del caso in cui siano accoppiate con esse (HEV di serie). A penalizzarle è, tra le altre cose, la limitata autonomia consentita dalla tecnologia attuale e dalle sue possibili evoluzioni di breve termine.

In linea con gli esiti dei segmenti leggero e pesante (merci), anche nel TPL gli HEV in serie e i veicoli diesel si confermano le opzioni preferibili in un orizzonte di dieci anni

6.2.1. Analisi di sensitività al 2030

Esiti interessanti emergono dalle analisi di sensitività, che si sono concentrate sui **powertrain elettrici**. Relativamente **all'ambito urbano**, si è cercato di valutare quali leve potrebbero migliorare la preferibilità dell'opzione **filobus/BEVoc**. Emerge chiaramente come il **fattore economico** – costo dei veicoli ridotto (eventualmente supportato dalle politiche nazionali e posto in linea con quello dei veicoli diesel tradizionali) e aumento delle economie di scala lato veicolo (consolidamento del know-how di gestione e manutenzione dei sistemi) – accoppiato allo **sviluppo di tecnologie/infrastrutture** in grado di consentire una maggiore libertà d'impiego (migliorando sensibilmente la semplicità di ricarica e la flessibilità di impiego, anche se non a livello del diesel tradizionale) possono **supportare la diffusione di questi sistemi che, a queste condizioni, surclassano le alternative comparate attraverso l'AMC**. Un simile esito è ovviamente favorito in aree in cui parte dell'infrastruttura è già esistente, come nei capoluoghi che già ricorrono in misura importante alla trazione elettrica via filobus.

Si è cercato anche di comprendere quali leve potrebbero rendere più interessante l'opzione dei **BEV plug-in**. Nonostante numerose valutazioni positive (tra cui quelle riferite alla decarbonizzazione della filiera e alle emissioni di carbonio), questi veicoli sono penalizzati da valutazioni inferiori a gran parte delle alternative in relazione alle economie di scala, ai costi di produzione del vettore energetico, ai costi di investimento connessi al veicolo, al raggio d'azione limitato e al basso contenuto energetico delle batterie. Migliorando congiuntamente diversi criteri quali la flessibilità di esercizio (anche portandola al livello dei bus con MCI), le economie di scala legate al tipo di *powertrain*, l'indipendenza energetica della filiera, il costo di produzione del vettore energetico e ponendo l'investimento medio del veicolo pari a quello degli HEV in serie, il loro posizionamento migliora ma rimane surclassato da tutti i veicoli con MCI.

A seguito di importanti confronti con operatori del settore, si è cercato di esplorare ulteriormente la trazione elettrica alimentata con **fuel cell a idrogeno**, migliorando – rispetto al caso base – le valutazioni relative a numerosi criteri: economie di scala, indipendenza lungo la filiera delle componenti, investimenti necessari per la realizzazione delle reti di rifornimento, costo di acquisto e di esercizio dei veicoli, rendimento del processo di produzione dell'idrogeno e CO₂ emessa nella fase di produzione. Analogamente sono state apportate valutazioni migliori anche in relazione ai criteri relativi all'impiego condizionato dei veicoli. Tuttavia, **all'orizzonte 2030, la sua posizione non migliora in modo rilevante**.

6.3. Gli esiti dell'AMC al 2050

L'AMC al 2050²³, basata su valutazioni migliorative per diverse alternative considerate – miglioramento delle economie di scala delle opzioni oggi più sperimentali, riduzione conseguente dei relativi *economics*, ampliamento della rete di rifornimento/ricarica, maggiore abbattimento delle emissioni di anidride carbonica per tener conto di processi produttivi sempre più sostenibili (fino a casi di azzeramento dell'impatto emissivo) – restituisce un **esito base che non stravolge quello delineato per il 2030 pur presentando qualche elemento di novità** (Tab. 19).

In ambito urbano, gli HEV in serie si confermano l'opzione preferibile in termini di *powertrain*, mentre a livello di alimentazione emergono in modo evidente i **combustibili low carbon** siano essi di natura biologica o rinnovabile (biocarburanti o e-fuels). **Gli e-fuels**, in particolare, si configurano come tecnologia di interesse per gli obiettivi espressi dai criteri e dai pesi al 2050.

Il **GNL** – idoneo per l'ambito extra-urbano per le maggiori percorrenze consentite – si posiziona in modo interessante anche in ambito urbano grazie all'ipotesi di **elevata (se non totale) componente bio** e al conseguente impatto positivo sulle emissioni. In fondo all'ordinamento si collocano le **alternative a trazione elettrica**, ancora penalizzate da caratteristiche di natura

Tra i sistemi a trazione elettrica, solo i filobus e gli e-bus con ricarica rapida hanno il potenziale per emergere in ambito urbano, specie laddove l'infrastruttura è in parte già disponibile

Tab. 19 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 con la batteria di pesi base

Batteria di pesi base, caso urbano		Batteria di pesi base, caso extra-urbano	
1	HEV serie – trazione mista con motore elettrico e MCI alimentato con carburanti <i>low carbon</i>	1	HEV serie – trazione mista con motore elettrico e MCI alimentato con carburanti <i>low carbon</i>
2	[MCI – GNC]	2	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%) [MCI GNC]
3	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)		
4	MCI – e-fuels	3	MCI – e-fuels
5	MCI – GNL (con quota bio preponderante sino al 100%)	4	MCI – GNL (con quota bio preponderante sino al 100%)
6	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	5	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
7	[MCI motore diesel di ultima generazione – gasolio (miscela con quote bio)]	6	[MCI motore diesel di ultima generazione – gasolio (miscela con quote bio)]
8	Filobus/BEVoc	7	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD
9	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)	8	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)
10	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno	9	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno

economica, tecnica e infrastrutturale che non le rendono preferibili rispetto a un veicolo elettrico alimentato, per la parte endotermica, da fonti a basse (se non nulle) emissioni.

L'ordine esposto trova conferma anche in ambito **extra-urbano** dove però si nota una posizione più netta del GNL/bio-GNL che potrebbe beneficiare di un'eventuale crescente penetrazione nel trasporto pesante, tale da favorire maggiori economie di scala e di gamma.

In generale, i **veicoli diesel di ultima generazione**, che ad oggi costituiscono la grande maggioranza del parco circolante e che al 2030 sono una delle opzioni maggiormente preferibili in base ai criteri espressi dall'AMC, al 2050 – anche assumendo che siano ancora una soluzione percorribile – vengono **surclassati da fonti di alimentazione a bassa impronta carbonica**.

6.3.1. Analisi di sensitività al 2050

Sul lungo periodo, si è cercato di capire quali elementi potranno determinare la preferibilità di un'alternativa sulle altre. In primo luogo, per conferire robustezza all'esito base, è stata

effettuata una sensitività volta a verificare la preferibilità dell'opzione **HEV in serie**, qualora l'alimentazione della componente endotermica non sia più il diesel fossile ma un suo equivalente *low carbon* come **l'e-diesel (e-fuel)**. In questo caso, la variazione operata ha riguardato solo i criteri (e non i pesi) relativi al carburante impiegato, sostituendo i parametri riferiti al diesel con quelli indicati per gli e-fuels. Sia in ambito urbano che extra-urbano, **si conferma quindi come l'opzione più interessante** per soddisfare i requisiti espressi dai pesi e dai criteri base considerati nella valutazione.

Si è cercato poi di migliorare alcune valutazioni per quelle opzioni che nell'ordinamento base risultano maggiormente penalizzate, con l'intento di indicarne potenziali *driver* di sviluppo qualora gli obiettivi – soprattutto di matrice politica e normativa – vadano in quella direzione.

Come visto per il 2030, in relazione ai **filobus/BEVoc**, le analisi di sensitività condotte per l'ambito urbano ne evidenziano i punti di debolezza o, al contrario, le leve su cui agire per migliorarne il posizionamento. **Questa tipologia di veicoli surclassa, infatti, tutte le altre opzioni solo se si verificano congiuntamente determinate e interdipendenti condizioni:**

Il motore a combustione interna conferma la sua posizione di rilievo sia quando impiegato in modo esclusivo sia, preferibilmente, in coppia con un motore elettrico (HEV in serie)

Tab. 20 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 con la batteria di pesi base, sensitività idrogeno

Batteria di pesi per il TPL urbano, sens. H ₂		Batteria di pesi per il TPL extra-urbano, sens. H ₂	
1	HEV serie – trazione mista con motore elettrico e MCI alimentato con carburanti <i>low carbon</i>	1	HEV serie – trazione mista con motore elettrico e MCI alimentato con carburanti <i>low carbon</i>
2	[MCI – GNC]	2	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%) [MCI – GNC]
3	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)	3	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno MCI – e-fuels
4	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno MCI – e-fuels	4	MCI – GNL (con quota bio preponderante sino al 100%)
5	MCI – GNL (con quota bio preponderante sino al 100%)	5	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
6	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)	6	[MCI motore diesel di ultima generazione – gasolio (miscela con quote bio)]
7	[MCI motore diesel di ultima generazione – gasolio (miscela con quote bio)]	7	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD
8	Filobus/BEVoc	8	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)
9	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)		

(1) un forte abbattimento dei costi del veicolo e delle batterie e (2) investimenti di rete adeguati e tali da garantire la massima libertà di programmazione del servizio sono pre-condizioni necessarie per il successo di questa opzione. Ipotesi di maggiore condizionamento rispetto a quelle (di massima flessibilità) qui inserite non portano all'esito di preferibilità descritto.

Relativamente ai **BEV con ricarica plug-in o induttiva**, è stato operato un miglioramento di alcuni dei parametri più penalizzanti tralasciando quelli che sono dovuti a limiti fisici, ovviamente al netto di *breakthrough* tecnologici oggi non prevedibili (relativamente ad autonomia energetica, incidenza massa/vettore energetico, densità energetica). Un risultato migliore di quello base lo si ottiene solo equiparando la flessibilità di esercizio a quella dei MCI, considerando un miglioramento dell'indipendenza energetica con l'avvio di una filiera nazionale di produzione delle batterie, riducendo il costo dei veicoli e ponendolo pari a quello degli HEV in serie. Con queste variazioni, risultano preferibili rispetto agli altri *powertrain* elettrici ma continuano ad essere surclassati dagli HEV e dai MCI.

Un'analisi specifica è stata poi dedicata all'**idrogeno**. Ipotizzando il conseguimento di importanti economie di scala (seppur non al livello

dei MCI), una maggiore indipendenza lungo la filiera delle componenti, la realizzazione degli investimenti necessari per la costruzione di una diffusa rete di rifornimento, il livellamento del costo del mezzo e del vettore energetico a quelli, rispettivamente, di un veicolo e di un carburante tradizionali (diesel) e un miglioramento nel rendimento del processo di produzione dell'idrogeno (con l'impiego di fonti prevalentemente rinnovabili), si nota un **forte miglioramento della sua posizione nell'ordine di preferenze espresso dal modello** (Tab. 20). Sia in ambito urbano che extra-urbano, viene surclassato solo da HEV in serie e alimentazioni a biometano mentre risulta allineato con gli e-fuels (i cui criteri sono in parte correlati a quelli dell'idrogeno, elemento centrale per la loro produzione).

Infine, **per l'ambito extra-urbano** e in coerenza con quanto svolto nel segmento del trasporto stradale pesante, è stata considerata l'opzione **gas naturale liquefatto interamente di origine biologica (bio-GNL)** prodotto in Italia. Rispetto al suo equivalente fossile sono stati assunti maggiori oneri di produzione del combustibile a fronte, però, di un tendenziale azzeramento delle emissioni di carbonio sull'intero ciclo di vita (in linea con quanto ipotizzato

Al 2050, gli autobus a idrogeno e a bio-GNL possono risultare opzioni di rilievo sia in ambito urbano che extra-urbano, dietro il verificarsi di determinate condizioni

per il biometano) e di una maggior sicurezza energetica nazionale, non dovendo dipendere da prodotti di importazione. Con queste ipotesi,

unite alle caratteristiche di autonomia elevata proprie del GNL, l'opzione bio risulta preferibile rispetto alle alternative considerate (Tab. 21).

Tab. 21 – Ordine di surclassamento delle alternative al 2050 con la batteria di pesi base per il TPL extra-urbano, sensitività bio-GNL

1	MCI – bio-GNL
2	HEV serie – trazione mista con motore elettrico e MCI alimentato con carburanti <i>low carbon</i>
3	[MCI – GNC]
4	MCI – Biometano (preponderante la quota bio sino al 100%)
5	MCI – e-fuels
6	MCI – Biodiesel/HVO (preponderante la quota bio sino al 100% dove possibile)
7	[MCI – motore diesel di ultima generazione – gasolio (miscela con quote bio)]
8	BEV con linee elettriche su autostrade/CWD
9	BEV con ricarica plug-in o induttiva (eventuale biberonaggio)
10	Trazione elettrica con <i>fuel cell</i> a idrogeno

In conclusione, **gli esiti al 2030 e al 2050** confermano alcune risultanze già evidenziate per il trasporto leggero e pesante, al contempo facendo emergere specificità settoriali. Si nota, in particolare:

- **la preferibilità per l'elettrificazione diffusa**, qui rappresentata da *powertrain* ibridi in serie (HEV) – in cui il motore endotermico alimentato a diesel funge da generatore per il motore elettrico – **sia in ambito urbano che extra-urbano**;
- **la centralità dei MCI**, sia quando impiegato in modo esclusivo sia – preferibilmente – in coppia con un motore elettrico (HEV in serie);
- **la rilevanza della leva economica e di quella infrastrutturale** – e con essa gli aspetti legati a una crescente libertà di programmazione del servizio – **per far emergere come preferibile l'opzione filobus/e-bus con possibilità di *opportunity charge***: gli unici sistemi a trazione elettrica pura che riescono a surclassare le altre opzioni sotto determinate e interdipendenti condizioni sia al 2030 che al 2050.

Per il 2030, si evidenzia anche:

- **il ruolo ancora centrale dei veicoli diesel di ultima generazione, sia in ambito urbano che extra-urbano**, grazie a una flessibilità di impiego che non ha eguali, a costi logistici e di impianto contenuti e interamente ammortizzati, a economie di scala e di competenza fortemente sviluppate;
- **l'importanza del gas compresso**, con quote crescenti di biometano, **nei cicli urbani e suburbani**, dove l'autonomia non è condizionante per il profilo di missione.

Per il 2050:

- **l'importanza delle fonti a bassa impronta carbonica (di origine biologica o rinnovabile) che surclassano il gasolio fossile, assumendo che sia una soluzione ancora percorribile**;
- **l'emergere degli e-fuels come tecnologia di interesse**, che accoppiati agli HEV in serie si qualificano come l'opzione nettamente preferibile;
- **il ruolo potenziale del GNL**, con crescenti quote bio, in ambito extra-urbano e l'attrattiva che potrebbe presentare **l'opzione 100% bio-GNL**, in grado di surclassare tutte le alternative – anche nei cicli urbani – dietro l'assunto di adeguate disponibilità;
- **la rilevanza delle leve economiche, infrastrutturali e di processo per favorire la penetrazione dell'idrogeno**, sia in ambito urbano che extra-urbano.

Pillole

- Il trasporto stradale sembra essere quello maggiormente interessato dagli sforzi di riduzione della dipendenza dal petrolio, per la presenza di alternative in parte già percorribili e per l'impegno delle politiche pubbliche nel ridurre drasticamente l'impatto ambientale.
- La forte spinta normativa verso la riduzione delle emissioni del settore si accompagna al miglioramento continuo della qualità dei carburanti, allo sviluppo di soluzioni tecnologiche sempre più avanzate, alle modifiche nel comportamento degli utenti.
- Tuttavia, il percorso verso la diversificazione dei *fuel/powertrain* non sarà né immediato né semplice, dato il forte sbilanciamento dell'attuale parco circolante verso veicoli con motore a combustione interna alimentati da carburanti petroliferi tradizionali.
- Elevati rendimenti dei motori, sempre più evoluti, consolidate economie di scala nella produzione del carburante, un sistema di approvvigionamento, raffinazione e distribuzione strutturato e diffuso su scala mondiale tale da consentire la massima flessibilità nell'impiego del mezzo sono caratteristiche che, in un orizzonte quale il 2030, pongono ancora la configurazione standard con MCI alimentati da prodotti petroliferi tra le soluzioni preferibili.
- In un orizzonte di più lungo periodo, invece, i carburanti *low carbon* – di origine sia biologica che rinnovabile – surclassano le alimentazioni tradizionali (nell'eventualità che siano ancora opzioni percorribili).
- In generale, sia al 2030 che al 2050, lo studio evidenzia una serie di tendenze valide per tutti i segmenti del trasporto stradale, in particolare:
 - (a) **la preferibilità per un'elettrificazione diffusa** – rappresentata dai veicoli ibridi e plug-in – rispetto alla trazione elettrica pura;
 - (b) **il ruolo ancora centrale dei motori a combustione interna**, progressivamente alimentati da fonti sempre meno fossili e potenzialmente a zero emissioni (e-fuels, biocarburanti avanzati, tra cui biometano);
 - (c) **l'inerzia relativa all'introduzione di sistemi nuovi** che presentano limiti fisici e funzionali, pur avendo vantaggi evidenti in termini di decarbonizzazione, laddove l'elettricità venga prodotta a partire da energie rinnovabili.

Trasporto leggero

- **Al 2030** l'esito ottenuto porta a individuare tre gruppi di alternative con diverso grado di preferibilità:
 - (a) il primo include veicoli elettrificati di tipo HEV e PHEV, così come i veicoli con solo motore endotermico alimentati da carburanti fossili e dalla loro declinazione biologica;
 - (b) nel secondo si collocano due tipologie di veicoli con MCI che nel nostro paese sono più diffuse che altrove ma che rimangono tendenzialmente di nicchia (GNC e GPL);
 - (c) in coda, si posizionano i veicoli a trazione elettrica pura dove il motore elettrico viene alimentato da batterie (BEV) o da cella a combustibile a idrogeno (FCEV);
- A questo orizzonte, vincoli di natura tecnica, infrastrutturale ed economica penalizzano i *powertrain* elettrici (BEV, FCEV) rispetto a sistemi elettrificati (HEV e PHEV) e ai MCI tradizionali, alimentati da carburanti di natura fossile e biologica.
- I veicoli ibridi plug-in emergono come opzione di grande interesse, specie in presenza di una significativa riduzione del costo dei veicoli e di una sostenuta diffusione della rete di ricarica, come evidenziato da opportune analisi di sensitività.

- **Al 2050**, la comparazione delle alternative conferma la preferibilità per soluzioni elettrificate, con i PHEV che già nell'esito base si collocano al secondo posto subito dopo gli HEV.
- Seguono i MCI alimentati dalle diverse fonti *low carbon*, mentre le auto elettriche e con celle a combustibile a idrogeno risultano le opzioni meno preferibili in base al set di criteri espressi dalla matrice.
- Le analisi di sensitività hanno tuttavia evidenziato come intervenendo su circa la metà dei criteri considerati – economici, infrastrutturali e legati al consolidamento di una filiera nazionale di produzione delle batterie – i BEV si collocano in seconda posizione, subito dopo i PHEV.
- Nel caso delle auto a idrogeno, invece, pur integrando valutazioni migliorative su criteri economici, energetici e infrastrutturali, non si nota un miglioramento sostanziale nell'ordinamento restituito dall'AMC.
- Infine, ipotizzando la produzione su larga scala di e-fuels, è sufficiente agire sulla leva economica per rendere questa opzione preferibile rispetto alle altre subito dopo gli HEV, considerati anche nell'ipotesi in cui il motore endotermico sia alimentato da carburanti sintetici.

Trasporto pesante (merci)

- L'attuale netta prevalenza dell'opzione diesel, unita alla vetustà della flotta, sono condizioni che inducono a ritenere poco probabile uno stravolgimento dello *status quo* da qui a dieci anni, specie nel segmento dei veicoli industriali di grande taglia su cui si concentra l'analisi.
- **Al 2030**, l'opzione preferibile è rappresentata dai veicoli ibridi in serie (HEV) premiati da economie di scala sviluppate, un elevato rendimento del motore, un'evidente flessibilità di impiego, una riduzione delle emissioni allo scarico, minori consumi di carburante e minori costi di esercizio rispetto ai veicoli diesel di ultima generazione dotati solo di MCI.
- Persiste, poi, la centralità dei veicoli diesel anche se non si può ignorare il vincolo delle emissioni di carbonio che rende indispensabile la graduale sostituzione del gasolio fossile con biocarburanti e carburanti sintetici.
- Si rafforza l'interesse per l'opzione GNL, il cui successo – specie per le lunghe distanze – dipenderà in parte dalla progressiva estensione della rete di distribuzione e dall'introduzione di crescenti quote bio che ne migliorano sensibilmente l'impatto ambientale.
- Per i veicoli industriali di grande taglia e impiegati su lunghe distanze la completa elettrificazione risulta invece complessa, specie in un orizzonte di dieci anni.
- Gli autocarri elettrici potrebbero ritagliarsi un ruolo di maggior rilievo per usi in ambito urbano, dove l'assenza di emissioni allo scarico e la silenziosità di marcia risultano elementi centrali e dove i limiti di portata e di autonomia non costituiscono un ostacolo insormontabile.
- **Al 2050** l'AMC restituisce un esito base con due raggruppamenti di alternative, all'interno dei quali il modello considera le diverse opzioni ugualmente preferibili rispetto al set di obiettivi espressi dall'AMC.
- In testa, figurano gli HEV in serie e i MCI alimentati da fonti *low carbon* (e-fuels e biocarburanti). In coda, si posizionano i sistemi a trazione elettrica (a batterie o a idrogeno).

- Si conferma l'interesse per l'opzione GNL, specie nella sua accezione biologica: in presenza di volumi e impianti di rifornimento adeguati, il bio-GNL sarebbe in grado di fornire un contributo importante alla decarbonizzazione del segmento.
- Nonostante valutazioni migliorative in relazione a diversi parametri, i *powertrain* elettrici risultano ancora potenzialmente penalizzati da caratteristiche di natura economica, tecnica e infrastrutturale che – nel segmento dei veicoli industriali di grande taglia – non li rendono preferibili rispetto a un mezzo elettrificato (HEV in serie).
- Al 2050, per far emergere le potenzialità dell'idrogeno, occorrono una serie di pre-condizioni quali: la creazione di adeguate economie di scala, la riduzione dei costi sia dei mezzi sia del vettore energetico, il miglioramento del rendimento del processo di produzione *well to tank*, l'impiego di fonti rinnovabili nei processi produttivi, la costruzione di una rete di distribuzione diffusa.

Trasporto Pubblico Locale (TPL)

- I risultati restituiti dall'AMC sono coerenti con quanto emerso nei segmenti leggero e pesante (merci), pur con alcune specificità settoriali.
- **Al 2030**, sia in ambito urbano che extra-urbano, risulta preferibile l'opzione HEV in serie in cui il motore endotermico alimentato a diesel funge da generatore per il motore elettrico.
- A seguire, si trovano le opzioni più tradizionali caratterizzate dalla presenza del solo motore endotermico e da una componente crescente di biocarburanti come i diesel di ultima generazione, in miscela con biodiesel.
- Si evidenzia l'importanza del gas compresso, con quote crescenti di biometano, nei cicli urbani e suburbani, dove l'autonomia non è condizionante per il profilo di missione.
- Diversamente, il GNL – con componente biologica ancora ridotta all'orizzonte 2030 – risulta più idoneo per lunghe percorrenze, qualificandosi come maggiormente preferibile in ambito extra-urbano, in parte come effetto della crescente penetrazione attesa nel trasporto merci pesante.
- Tra i sistemi a trazione elettrica, l'unica opzione che può risultare preferibile sotto determinate e stringenti condizioni è quella rappresentata dai filobus e dagli e-bus con possibilità di *opportunity charge* (pacco batterie di piccole dimensioni).
- **Al 2050**, i veicoli diesel di ultima generazione, che ad oggi costituiscono la grande maggioranza del parco circolante, vengono surclassati da fonti di alimentazione a bassa impronta carbonica.
- Il motore a combustione interna, invece, conferma la sua posizione di rilievo sia quando impiegato in modo esclusivo sia – preferibilmente – in coppia con un motore elettrico (HEV in serie).
- Gli e-fuels emergono come tecnologia di interesse per gli obiettivi espressi dai pesi al 2050. Accoppiati agli HEV in serie si qualificano come l'opzione nettamente preferibile.
- Il GNL con crescenti quote di bio-GNL occupa una posizione di interesse soprattutto in ambito extra-urbano, posizionandosi nella parte alta dell'ordinamento. Emerge l'attrattiva dell'opzione 100% bio-GNL, in grado di surclassare tutte le alternative – anche nei cicli urbani – dietro l'assunto di adeguate disponibilità.
- Anche al 2050, la trazione elettrica pura risulta ancora penalizzata da caratteristiche di natura economica, tecnica e infrastrutturale che non la rendono preferibile rispetto a soluzioni elettrificate alimentate, per la parte endotermica, da fonti a basse o nulle emissioni.

- I filobus e i BEV con ricarica rapida si confermano la modalità preferibile tra quelle a trazione elettrica in presenza di una riduzione dei relativi costi e della realizzazione di adeguati investimenti nella rete (filoviaria e di ricarica).
- Si conferma, come per il 2030, la rilevanza delle leve economiche, infrastrutturali e di processo per favorire la penetrazione dell'idrogeno, sia in ambito urbano che extra-urbano.

Note

- (¹) Ovvero quelli emessi allo scarico (*exhaust*) dai motori a combustione in tutte le modalità di trasporto, ossia ossidi di azoto (NO_x), materiale particolato, composti organici volatili (VOC), ossidi di zolfo (SO_x) e monossido di carbonio (CO), e il materiale particolato *non-exhaust*, ossia quello prodotto dall'usura di freni e pneumatici, dall'abrasione meccanica della superficie stradale, e quello dovuto al risollevarimento della polvere stradale (ISPRA, *Trasporti: strumenti europei e nazionali per il risanamento della qualità dell'aria*, 191/2014, pp. 4-5).
- (²) Tali standard sono definiti con numeri arabi (es. Euro 3) se riguardano le autovetture e i veicoli commerciali leggeri, con numeri romani (es. Euro III) se applicati ai veicoli commerciali pesanti e industriali.
- (³) *Prima fase RDE*. Da settembre 2017 per i nuovi modelli (fino a fine 2019) e da settembre 2019 per i nuovi veicoli (fino a fine 2020): durante questo primo periodo sarà ammesso un fattore di conformità massimo pari a 2,1, vale a dire che la differenza tra le emissioni di NO_x dei veicoli Euro 6d- temp misurate nel ciclo in laboratorio e in quello su strada potrà arrivare massimo al 110%, valore entro cui la prova si ritiene superata. *Seconda fase RDE*. A partire dal gennaio 2020 per i nuovi modelli e dal gennaio 2021 per i nuovi veicoli, ci sarà ancora la possibilità di applicare un fattore di conformità che sarà tuttavia pari a 1 più il margine di errore di 0,5 (con un fattore di conformità di 1,5).
- (⁴) L'anno di riferimento per gli impegni di riduzione delle emissioni è il 2005 e, per il trasporto su strada, questi si applicano alle emissioni calcolate in base ai combustibili venduti.
- (⁵) Il 27 marzo 2020 i costruttori di auto europei hanno chiesto una proroga sulle nuove norme a seguito dell'importante riduzione del venduto per il lockdown (-79% di aprile 2020 su aprile 2019).
- (⁶) Il PNIEC propone di accelerare quanto previsto al comma 10 dell'articolo 18 del D.Lgs. 257/2016 (recepimento della Direttiva DAFI) prevedendo che le pubbliche amministrazioni, gli enti e le istituzioni da esse dipendenti o controllate, le Regioni, gli enti locali e i gestori di servizi di pubblica utilità per le attività svolte nelle province ad alto inquinamento di particolato PM₁₀, al momento della sostituzione del rispettivo parco autovetture, autobus e mezzi di servizio di pubblica utilità, ivi compresi quelli per la raccolta dei rifiuti urbani, siano obbligati all'acquisto di almeno il 30% entro il 2022, il 50% entro il 2025 e l'85% entro il 2030 di veicoli elettrici e veicoli ibridi con ricarica esterna, a metano e a idrogeno, nonché elettrici o metano nel caso degli autobus.
- (⁷) Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato Delle Regioni "Un traguardo climatico 2030 più ambizioso per l'Europa. Investire in un futuro a impatto climatico zero nell'interesse dei cittadini", COM(2020) 562 final.
- (⁸) Si suppone che dal 2025 tutti i nuovi veicoli MCI presentino ibridazioni leggere di serie, maggiore efficienza e migliori prestazioni ambientali rispetto a quelli oggi in commercio, coerentemente con i progressi motoristici in corso.
- (⁹) Dato 2018 (16° Rapporto sulla mobilità degli italiani "Audimob" – ISFORT).
- (¹⁰) Dato 2018 (Fondazione Caracciolo).

- (¹¹) Per il PM₁₀ sono state considerate le sole emissioni prodotte da autovetture e veicoli commerciali. Non si considerano le emissioni da usura di gomme e freni dei veicoli e quelle derivanti da abrasione stradale. Le ultime due categorie infatti non sono facilmente scorporabili in quanto stimate per tutto il trasporto su strada e non per singola categoria veicolare.
- (¹²) L'idrogeno può essere prodotto in diversi modi che si differenziano per impatto emissivo, costi, intensità energetica richiesta. Può infatti avvenire: (1) in impianti centralizzati mediante SMR (H₂ da SMR C) e trasporto gassoso su camion fino alla stazione di rifornimento; (2) in impianti centralizzati mediante elettrolisi da rinnovabili (H₂ da ELR C) e trasporto gassoso su camion fino alla stazione di rifornimento; (3) On-site nella stazione di rifornimento mediante elettrolisi con energia elettrica da rete (H₂ da ELG OS); (4) On-site nella stazione di rifornimento mediante elettrolisi con energia elettrica rinnovabile con impianto dedicato (H₂ da ELR OS).
- (¹³) Essendo l'idrogeno parte importante del processo di produzione degli e-fuels, sono state operate le opportune variazioni anche in relazione a questa opzione laddove correlate al processo produttivo.
- (¹⁴) ANFIA, *Dossier trasporto merci su strada*, aprile 2020.
- (¹⁵) Il dato si riferisce ai veicoli industriali e autobus ed è relativo al 2018, ultimo anno disponibile.
- (¹⁶) Un criterio in più rispetto al segmento leggero, relativo alla libertà di programmazione del servizio (vedi tabella delle alternative nel settore stradale).
- (¹⁷) Ne esistono applicazioni onorevoli nei trattori agricoli con vettore energetico prodotto, localmente, da biomasse, di fatto abbattendo il WTT e non inquinando le aree agricole dove sono impiegati; si tratta però di un'applicazione di nicchia.
- (¹⁸) Poiché la produzione di e-fuels dipende in modo diretto dall'idrogeno, si è ritenuto opportuno uniformare e quindi migliorare alcune valutazioni anche per questa opzione. In particolare, rispetto al caso base, sono state considerate maggiori economie di scala nella produzione, minori costi del combustibile e un miglior rendimento del processo di produzione. Con queste variazioni, la situazione non cambia per gli e-fuels (comunque considerati in parentesi quadra al 2030), mentre i veicoli a idrogeno surclassano quelli elettrici a batteria a cui si allineavano nell'ordinamento base, rimanendo tuttavia sempre penalizzati rispetto agli HEV in serie e a tutte le alimentazioni relative a MCI.
- (¹⁹) Come già precisato per il segmento del trasporto leggero, nel comparare le alternative al 2050, gli e-fuels rappresentano un'alternativa a tutti gli effetti, mentre si è ipotizzata l'eventuale assenza di motori a combustione interna alimentati esclusivamente con carburanti di origine fossile (gasolio, GNC). Rispetto al 2030 sono stati inoltre considerati due criteri in meno (27 invece di 29), in quanto la composizione del parco circolante attuale e il tasso di ammortamento degli impianti di produzione esistenti non sono più ritenuti rilevanti in un orizzonte di lungo periodo.
- (²⁰) Infatti, per flotte superiori ai 100 autobus elettrici, questo sistema richiederebbe delle potenze installate maggiori di 10 megawatt e questo costituirebbe un vincolo tecnico ed economico importante (che si aggiunge alla necessità di avere 100 piazzole dedicate in deposito tutte alimentate).
- (²¹) Le differenze tra le tabelle sono necessariamente limitate perché limitata è la differenza tra le due batterie di pesi che vengono applicate alle stesse valutazioni dei criteri.
- (²²) Sono particolari condensatori dotati di una capacità di accumulo grandissima, dell'ordine di migliaia di Farad rispetto ai mFarad dei condensatori tradizionali; vengono utilizzati come accumulatori di energia elettrica in alternativa (o in associazione) agli accumulatori chimici tradizionali rispetto ai quali presentano un'elevatissima potenza specifica e un numero di cicli di carica scarica elevatissimo, superiore a quello degli accumulatori chimici. Hanno, però, una bassissima energia specifica rispetto agli accumulatori chimici che impedisce di utilizzarli in loro sostituzione nella trazione dei veicoli elettrici e presentano ancora costi piuttosto elevati.
- (²³) Come già precisato per il segmento del trasporto leggero e pesante, nel comparare le alternative al 2050, gli e-fuels rappresentano un'alternativa a tutti gli effetti, mentre si è ipotizzata l'eventuale assenza di motori a combustione interna alimentati esclusivamente con carburanti di origine fossile (gasolio, GNC e GNL con quota bio limitata). Rispetto al 2030 sono stati inoltre considerati due criteri in meno (27 invece di 29), in quanto la composizione del parco circolante attuale e il tasso di ammortamento degli impianti di produzione esistenti non sono più ritenuti rilevanti in un orizzonte di lungo periodo.

Bibliografia

ANFIA, *Dossier trasporto merci su strada*, aprile 2020

ASSTRA, *Investire nel trasporto pubblico. Mezzi e reti per la mobilità*, 2017

«Autobus», n. 6, giugno; n. 7, luglio, 2020

Commissione “Trasporti, Mobilità, Infrastrutture e Sistemi” dell’Ordine degli ingegneri della provincia di Torino e del Politecnico di Torino (gruppo di Trasporti delegato), *Considerazioni ed azioni in merito alle ricadute del covid-19 sul sistema dei trasporti*, 2020

Dalla Chiara B., *Elettrificazione dei trasporti terrestri*, paragrafo in “Innovazioni tecnologiche e governo della mobilità”, Società Italiana di Politica dei Trasporti, Maggioli Editore, 2018

Dalla Chiara B., Pedè G. (a cura di), AA.VV., *Trasporti terrestri ed energia. Tecnologie, metodi ed applicazioni*, di Coviello N., Dalla Chiara B., Deflorio F.P., Pedè G., Valentini M.P., EGAF, 2017

EEA, *Explaining road transport emissions A non-technical guide*, 2016

ERTRAC, *Enabling technologies, European roadmap - hybridisation of road transport* (2011), *European roadmap - climate resilient road transport* (2011), *European technology and production, concept for electric vehicles* (2011)

Fondazione Caracciolo, *Il TPL nelle grandi città italiane: quali vie per una mobilità urbana a misura di cittadino*, 2019

Fondazione Caracciolo, *Per una transizione energetica eco-razionale della mobilità automobilistica Valutazione del caso italiano*, 2019

Fusco G., *Alcune riflessioni sulle prospettive della mobilità*, in “Energia”, n. 2, pp. 32-36, 2020

H2IT, *Piano nazionale di sviluppo “Mobilità Idrogeno Italia”*, 2019

Politecnico di Milano, *E-mobility Report 2018*

RIE per Unrae, *le prospettive del settore dei veicoli industriali in Italia*, 2018

RSE, *Mobilità sostenibile nel TPL. Valutazione economica e prospettive dagli orientamenti istituzionali in tema di energia*, Mobility Innovation Tour, 11 giugno 2020

SIDT (Società italiana docenti di trasporti), *Position paper, Cambiamenti climatici e futuro del trasporto urbano*, Roma, 2014

Promos Ricerche, *La normazione dei combustibili per autotrazione: oltre cento anni di storia*, a cura di Davide Faedo - Innovhub - Divisione Stazione Sperimentale per i Combustibili - CT “Prodotti petroliferi e lubrificanti” UNICHIM - Ente Federato all’UNIRIE per Unrae, le prospettive del settore dei veicoli industriali in Italia, 2018

Appendice

Il metodo AMC

L'analisi multi-criteri (AMC) è un metodo di comparazione tra alternative finalizzato a rendere per quanto possibile obiettivo, esaustivo e razionale un processo di scelta o d'ausilio alle decisioni, pur tenendo conto di punti di vista e sensibilità differenti nei criteri di giudizio inerenti alle alternative da valutare.

L'AMC è, quindi, una metodologia, con diverse varianti, che consente di valutare i diversi aspetti – economici, sociali, ambientali e territoriali – di più alternative, utilizzando per ognuno di essi un appropriato sistema di misura, che può essere sia qualitativo sia quantitativo. Di fatto essa permette di aggregare, quantificare e comparare i pareri di vari attori esperti per fornire una valutazione di sintesi a supporto delle decisioni.

È quindi particolarmente adatta quando si debbano considerare più giudizi incentrati su una molteplicità di criteri (ad esempio economici, prestazionali, etc.): la tecnica permette di razionalizzare e rendere trasparente il processo decisionale. Essa non è, ovviamente, sostitutiva della decisione, ma permette d'istruirla.

Secondo l'AMC, la valutazione consiste nel confrontare e nell'ordinare, mediante opportuni criteri e relativi pesi, un insieme di alternative. Infatti, per una buona valutazione, l'insieme dei criteri deve essere completo e significativo rispetto alle alternative da valutare. Inoltre,

si pone il problema di tradurre in una qualche grandezza misurabile i criteri, concetti a volte astratti, e di misurare le alternative, cioè di assegnare un valore qualitativo o quantitativo alle stesse secondo i diversi criteri.

Un'analisi multi-criteri si sintetizza in una matrice (matrice di decisione) le cui righe sono relative alle diverse alternative in esame e le cui colonne sono riferite ai diversi criteri di giudizio definiti in relazione ai diversi obiettivi (sistema degli obiettivi) fissati dal decisore.

L'elemento generico della matrice, relativo alla i -esima alternativa e al j -esimo criterio di giudizio, è costituito dalla misura della rispondenza di quella alternativa a quel criterio, dalla misura, cioè, del contributo che quell'alternativa dà al raggiungimento dell'obiettivo di cui il criterio di valutazione rappresenta lo strumento interpretativo. I criteri possono avere un'importanza diversa espressa attraverso pesi. Questo è rilevante perché, specie in presenza di sensibilità politiche o decisionali diverse, si possono costruire delle batterie di pesi per valutare gli effetti sui risultati di sensibilità differenti a un certo criterio.

Una particolare combinazione dei pesi dei criteri costituisce un "punto di vista": decisori diversi, infatti, possono avere punti di vista differenti, oppure lo stesso decisore può ritenere opportuno sondare più punti di vista. Per quanto appena detto, l'AMC consente quindi di sondare come varia l'ordinamento finale delle alternative in funzione di diversi punti di vista.

L'ordinamento delle alternative rispetto ai criteri si ottiene verificando, per ciascuna coppia di alternative (a, a'), se la prima surclassa la seconda, cioè se ci sono sufficienti ragioni per ritenere che la prima sia valida almeno quanto la seconda e se non ci sono sufficienti ragioni per affermare il contrario. La prima condizione si verifica con un test di concordanza, la seconda con un test di discordanza. Se le verifiche non indicano un surclassamento, le alternative sono incomparabili o non vicendevolmente prevalenti, cioè il metodo non può indicare che una è preferibile all'altra.

Il test di concordanza consiste nel calcolare per ogni coppia di alternative (a, a') quanti sono i criteri concordi nell'indicare che un'alternativa non è peggiore dell'altra (per i quali la valutazione di a è maggiore o uguale a quella di a'). Il rapporto tra il numero di criteri concordi e il numero totale di criteri viene confrontato con la soglia di concordanza. La "soglia di concordanza" (c) deve rimanere la stessa per ogni coppia di alternative a confronto; normalmente essa è definita a priori (dal/i decisore/i): $c = 1$ rappresenta l'unanimità (massima severità, "rischio" nullo, tutti i criteri indicano l'alternativa a della coppia (a, a') come non peggiore di a'); in casi normali, di non alta conflittualità o di non "accessibilità" al decisore, si possono scegliere soglie dette naturali: la soglia "forte" con valore $3/4$ e quella "debole" di $2/3$, da cui i concetti di surclassamento "forte" e "debole". Il test di discordanza verifica la seconda condizione di surclassamento, ossia che non ci sono ragioni per affermare che a non è buona almeno quanto a' . Il test si verifica considerando eventuali situazioni di "veto" (al disotto di un determinato livello assoluto o distacco relativo in un determinato criterio di giudizio, non si può accettare l'alternativa con il più basso livello, seppure valida o accettabile su altri criteri).

L'esito di una AMC è, quindi, in sostanza, una relazione di surclassamento. Una volta costruite le relazioni di surclassamento è possibile procedere all'ordinamento delle azioni: tale ordinamento viene effettuato tramite una procedura detta di "preordine". È necessario, però,

stabilire due relazioni di surclassamento: una detta "forte" e una "debole". La differenza risiede solo nei diversi valori della suindicata soglia di concordanza (il surclassamento forte ha una soglia più alta) e nelle classi di discordanza (il surclassamento forte ha più veti). Risulta chiaro, quindi, che è possibile che una alternativa surclassi un'altra debolmente, ma non fortemente, mentre è impossibile il viceversa. Passare dal surclassamento forte a quello debole significa aumentare il numero di surclassamenti, ma ciascuno di essi è meno significativo.

In questa sede, l'AMC è stata condotta con il metodo ELECTRE II (dove l'acronimo sta per *ELimination Et Choix Traduisant la REalité* che in italiano significa "eliminazione e scelta che esprimono la realtà").

La costruzione delle matrici di decisione: le alternative, i criteri, le batterie di pesi

Selezionando le alternative e i criteri più opportuni per ogni segmento analizzato, è stata costruita una matrice di decisione per due orizzonti temporali – 2030 e 2050 – in cui le righe rappresentano le alternative e le colonne raccolgono i criteri, raggruppati secondo determinate macro-dimensioni di valutazione. I criteri sono stati selezionati tenendo conto delle particolarità di ciascun segmento analizzato con l'intento di comprendere le seguenti dimensioni di valutazione:

- Dimensione socio-economico-lavorativa
- Dimensione economica
- Dimensione energetica
- Dimensione ambientale
- Dimensione di sicurezza e disponibilità energetica
- Dimensione personale (utilizzata solo nell'analisi del trasporto stradale e afferente ai vincoli che possono condizionare la libertà di movimento se il riferimento è alle autovetture o la programmazione del servizio se ci si riferisce al trasporto merci e al TPL).

	Pesi	1-10	1-10	1-10
Alternative (righe)	Criteri (colonne)	"X"	"Y"	"Z"
"A"	
"B"	
"C"	

Per attribuire diversi livelli di importanza ai criteri considerati, sono stati definiti dei pesi espressi con un voto da 1 (rilevanza molto bassa) a 10 (rilevanza molto alta).

I pesi assegnati a ciascun criterio possono variare tra il 2030 e il 2050 così come può variare il numero di criteri considerati. A titolo di esempio, al 2050 non ha senso considerare l'attuale composizione della flotta (navale/aerea/stradale) in quanto si ritiene che non possa condizionare gli esiti dell'AMC in un orizzonte di lungo periodo, sufficientemente ampio da poter consentire il ricambio delle flotte l'emergere e l'affermazione di nuovi sistemi di propulsione.

Un pregio dell'AMC è che consente di utilizzare scale diverse di valori per diversi criteri riflettendo così il modo di valutare dei decisori o la disponibilità di dati. Ciò che conta nel determinare quanti sono i criteri concordi nell'indicare un'alternativa preferibile a un'altra è la differenza delle valutazioni. Possono quindi essere impiegati direttamente dati numerici, come le emissioni di CO₂ espresse in g/km per un ciclo standard di impiego, la densità energetica espressa in Wh/kg o ancora il rendimento energetico di un processo. Nei casi in cui chi esprime la valutazione prenda come base un'opzione ed esprima per confronto le altre, si può porre a 1 oppure a 100 il valore della valutazione per l'opzione base e indicare rispettivamente come 1,2 o 120 il caso in cui la valutazione di una seconda opzione sia stimata il 20% in più di quella base, come ad esempio è stato fatto per le valutazioni di CAPEX e OPEX.

È inoltre possibile ricorrere a scale qualitative: questo aspetto è particolarmente importante in ambito previsionale, ad esempio per stimare le economie di scala o le potenzialità di indipendenza energetica o la libertà di movimento permessa dai veicoli con un dato tipo di propulsione, specie se l'orizzonte temporale è di lunghissimo periodo come il 2050. Risulterebbe, infatti, piuttosto azzardato assegnare una stima numerica precisa a un momento così distante nel tempo; sovente, si ritiene quindi più ragionevole elaborare un giudizio. Le valutazioni espresse come giudizi qualitativi vengono

Giudizio qualitativo	Trasposizione numerica
Nullo/a	0
	1
Molto scarso/a	2
	3
Scarso/a	4
	5
Medio/a	6
	7
Alto/a	8
	9
Molto alto/a	10

trasposte in valutazioni numeriche utilizzando le corrispondenze riportate in tabella (valori intermedi a quelli tra i giudizi riportati in tabella sono stati usati per permettere di rappresentare valutazioni incerte o intermedie).