

Oltre l'elettrico: idrogeno, biocarburanti e il nuovo volto del motore a combustione

Prof. Carlo Andrea Bollino

RELATORE

Luigi Pacilio - Matr. 281231

CANDIDATO

INDICE

INTRODUZIONE.....	2
<i>CAPITOLO 1: Evoluzione del settore automotive e impatto ambientale: dalle origini alla crisi climatica.</i>	4
1.1 Il settore automotive nella transizione energetica	4
1.1.1 Contesto e obiettivi della transizione energetica	4
1.1.2 Evoluzione del mercato	7
1.1.3 Normative europee e internazionali	10
1.2 Sostenibilità reale ed efficienza energetica	16
1.2.1 Analisi <i>Well-to-Wheel</i> : emissioni dirette vs indirette.....	16
1.2.2 Limiti operativi: degradazione batterie e variabili climatiche	19
1.3 L'economia del ciclo di vita e il valore dell'usato.....	26
1.3.1 Il Costo Totale di Possesso (TCO) e impatto sui consumatori	26
1.3.2 Economia del riciclo e gestione del fine vita.	33
1.4 L'evoluzione della fiscalità: dal gettito delle accise al "Pay per Mile"	38
1.5 Verso una nuova strategia industriale.....	42
1.5.1 La crisi del comparto automotive europeo: il caso Volkswagen e i limiti del paradigma Full Electric.....	42
1.5.2 e:HEV – Una Tecnologia Ponte? Il ruolo dell'Ibrido nella transizione	44
<i>CAPITOLO 2: L'idrogeno e i vettori energetici alternativi</i>	49
2.1 Produzione e costi: la sfida della sostenibilità	50
2.2 Tecnologia FCEV e motori a combustione interna (H2 ICE)	56
2.3 Applicazioni strategiche: dai trasporti pesanti al ferroviario	60
2.4 Barriere infrastrutturali e analisi Well-to-Wheel	63
<i>CAPITOLO 3: Combustibili Rinnovabili e Decarbonizzazione: Il Futuro del Motore Endotermico</i>	68
3.1 Classificazione e potenziale dei carburanti rinnovabili	69
3.2 Analisi ambientale: il ciclo del carbonio e l'impatto LCA.....	72
3.3 Compatibilità tecnica e "Drop-in fuels"	74
3.4 Prospettive economiche e sfide della filiera	76
3.5 La Formula 1 come acceleratore tecnologico: dalla pista alla strada.....	79
CONCLUSIONE.....	83
BIBLIOGRAFIA	85

INTRODUZIONE

Il settore dell'automotive ha una storia ultracentenaria e nel corso degli anni è stata caratterizzata da numerosi cambiamenti. Al giorno d'oggi sta attraversando però una delle trasformazioni più radicali e profonde della sua intera storia. Se il Ventesimo Secolo è stato dominato dai derivati del petrolio e dal motore endotermico, il Ventunesimo si apre con un imminente bisogno di decarbonizzazione, imposto da un'emergenza climatica a livello mondiale. Se si guardano le cause principali delle emissioni di gas serra risalta subito all'occhio che i trasporti sono uno dei principali responsabili.

Il successo del motore a benzina non è stato un evento fortuito. Il motore termico è stato il risultato dell'ottimizzazione del Ciclo Otto, che ha permesso di ottenere una densità energetica ed un'affidabilità che ai tempi risultavano insormontabili.

Oggi ci troviamo di fronte a un panorama in cui il dibattito politico si è rivolto verso una direzione univoca, quella dell'elettrificazione totale delle autovetture. Se si va oltre le apparenze, una rigorosa analisi ingegneristica mette in evidenza che la transizione energetica in atto non può essere risolta attraverso un'unica soluzione tecnologica. Infatti, anche se i veicoli elettrici offrono vantaggi innegabili, d'altra parte essi presentano una serie di criticità strutturali. Le principali criticità sono rappresentate dalla densità energetica delle batterie e soprattutto da una crescita esponenziale della dipendenza geopolitica nei confronti dei mercati asiatici per l'approvvigionamento di materie prime. L'obiettivo del seguente lavoro è di analizzare criticamente il ventaglio delle alternative tecnologiche, sostenendo la necessità di una neutralità tecnologica che però sia anche in grado di valorizzare le eccellenze industriali esistenti nel panorama europeo.

Nel corso del lavoro l'attenzione sarà posta su tre percorsi d'indagine principali:

- In primis, il confronto tra motorizzazioni termiche (ICE) ed elettriche (BEV), con particolare attenzione nei confronti dell'Ibrido inteso come ponte fondamentale per il raggiungimento della sostenibilità ambientale;
- Successivamente al confronto tra elettrico e termico, l'attenzione si sposterà sull'Idrogeno, in particolare la molecola d'Idrogeno. Questo rappresenta un vettore energetico adatto alle lunghe percorrenze. L'analisi approfondirà le sfide legate all'efficienza Well to Wheel.

- Infine, il lavoro si concentrerà sul ruolo dei biocarburanti. I biocarburanti di nuova generazione e gli e-fuels verranno analizzati anche attraverso il laboratorio d'avanguardia del motorsport. La Formula 1 rappresenta infatti, uno strumento fondamentale per rendere il motore a combustione interna un protagonista della transizione ecologica.

Fine ultimo di questa ricerca è dimostrare che il futuro della mobilità, più che nell'abbandono forzato del motore termico, sta in una sua evoluzione. Sfruttando la sinergia tra sistemi ibridi avanzati e fonti energetiche di nuova generazione, è possibile costruire una mobilità che sia sostenibile non solo sotto il profilo ambientale, ma anche economico ed industriale per il mondo e per il continente europeo.

CAPITOLO 1: *Evoluzione del settore automotive e impatto ambientale: dalle origini alla crisi climatica.*

1.1 Il settore automotive nella transizione energetica

1.1.1 Contesto e obiettivi della transizione energetica

La “storia dell’automobile”, , inizia verso la fine del XIX secolo; le prime automobili di questo tipo, si basano su modelli di vari veicoli concepiti in precedenza, a due o più ruote e di diverse forme, ed è per questo che la data di invenzione dell'auto non può essere stabilita con assoluta ed obiettiva esattezza.

Una cosa è certa però, già nel corso del XIII secolo, l’automotive è un argomento che inizia a creare scalpore grazie a figure illustri come Bacone:

“Un giorno si sarà in grado di costruire carri in grado di muoversi e di conservare il loro movimento senza essere spinti o tirati da alcun animale¹”.

L'automobile, nata per sostituire la trazione animale, si servirà di motori di volta in volta diversi a seconda dei sistemi di alimentazione adottati. Ma soltanto dopo la Prima guerra mondiale, l'introduzione del motore endotermico e della benzina si impose su una moltitudine di altri sistemi. Ciò nonostante, verranno sempre proposte, nei vari periodi storici, forme di alimentazione alternative alla benzina.

Il XX secolo si apriva con una ricerca volta nelle direzioni più disparate. Da carburante fungevano anche sostanze come il petrolio e l'alcool. Infatti, l'automobile a benzina finì, come preannunciato, per diventare il modello più affermato solo a partire dal periodo intorno alla Prima guerra mondiale.

Il successo del motore a benzina non fu un evento fortuito, ma il risultato dell'ottimizzazione del Ciclo Otto, che permise di convertire l'energia chimica dei derivati

¹ Ruggero Bacone, XIII secolo

del petrolio in lavoro meccanico con un'affidabilità e una densità energetica che le batterie dell'epoca (e in parte quelle odierne) faticavano a pareggiare².

Il settore dei trasporti ha emesso direttamente circa 8,9 Gtonne (Gt) di anidride carbonica equivalente (CO₂-eq) nel 2019, rispetto a 5,1 GtCO₂-eq nel 1990 (Figura 1). Il trasporto globale è stato la quarta più grande fonte di emissioni di gas serra nel 2019 dopo i settori dell'energia, dell'industria e dell'agricoltura, della silvicoltura e dell'uso del suolo (AFOLU). In termini assoluti, il settore dei trasporti rappresenta circa il 15% delle emissioni totali di gas serra e circa il 23% delle emissioni globali di CO₂ legate all'energia. Le emissioni di gas serra legate ai trasporti sono aumentate rapidamente negli ultimi due decenni e dal 2010 le emissioni del settore sono aumentate più velocemente che per qualsiasi altro settore di uso finale, con una crescita annua media del +1,8%. Affrontare le emissioni dei trasporti è fondamentale per le strategie di mitigazione dei gas serra in molti paesi, poiché rappresenta il settore che consuma più energia nel 40% dei paesi di tutto il mondo. Nella maggior parte dei paesi rimanenti, i trasporti sono il secondo settore che consuma energia, che riflette diversi livelli di urbanizzazione e modelli di utilizzo del suolo, la velocità dei cambiamenti demografici e lo sviluppo socioeconomico.

Questo contesto, ha reso estremamente importante la ricerca di un nuovo tipo di alimentazione per i nostri amati, ma inquinanti, autoveicoli³.

² Storia dell'automobile. (9 dicembre 2025). In Wikipedia. Consultato in data 29 gennaio 2026, da https://it.wikipedia.org/wiki/Storia_dell%27automobile.

³ IPCC, 2022: Transport. In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Capitolo 10.



Figura 1: Global and regional transport greenhouse gas emissions trends⁴.

Fonte: Adattato da IPCC, 2022

Nel corso dei decenni l'automotive ha conosciuto innovazioni costanti, ma la trasformazione a cui assistiamo oggi è senza dubbio la più radicale dalla sua nascita. Tuttavia, interpretare questa fase come una semplice "evoluzione tecnologica" sarebbe, dal punto di vista economico, fuorviante. Il motore del cambiamento arriva dai piani alti: il Green Deal Europeo ha infatti imposto tappe serrate — con l'obiettivo di tagliare le emissioni del 50% entro il 2030 — rendendo giuridicamente vincolante il traguardo della neutralità climatica per il 2050.

Quella che ci troviamo ad affrontare è una transizione top down. La transizione è infatti guidata da obiettivi politici condensati all'interno del Green Deal Europeo.

⁴ Adattato da IPCC, 2022

L'opinione corrente presenta il veicolo elettrico a batteria (BEV) come unica via per la neutralità climatica. L'analisi economica invece, ci rivela una realtà ben più complessa. Da un lato, l'efficienza energetica del motore elettrico è superiore a quella termica. Dall'altro invece, emergono criticità che non possono essere ignorate. Queste criticità vanno dalla dipendenza strategica dalle forniture asiatiche per quanto riguarda le materie prime critiche, alla fragilità della rete elettrica odierna, non pronta a gestire carichi di massa.

Nel corso del capitolo metteremo a confronto il paradigma termico e quello elettrico. Partendo dal piano delle emissioni allo scarico (approccio spesso fuorviante), ed arrivando fino alla lente rigorosa del Total Cost of Ownership (TCO).

L'obiettivo di questa analisi è capire se l'elettrico rappresenti effettivamente la soluzione definitiva. O se in alternativa, in un'ottica di pragmatismo economico, non convenga perseguire gli obiettivi di neutralità tecnologica che includa anche tecnologie come ibridi evoluti, idrogeno e biocarburanti. Quest'ultima strada infatti potrebbe evitare di scommettere l'intera competitività industriale europea su un'unica e ancora non interamente conosciuta tecnologia.

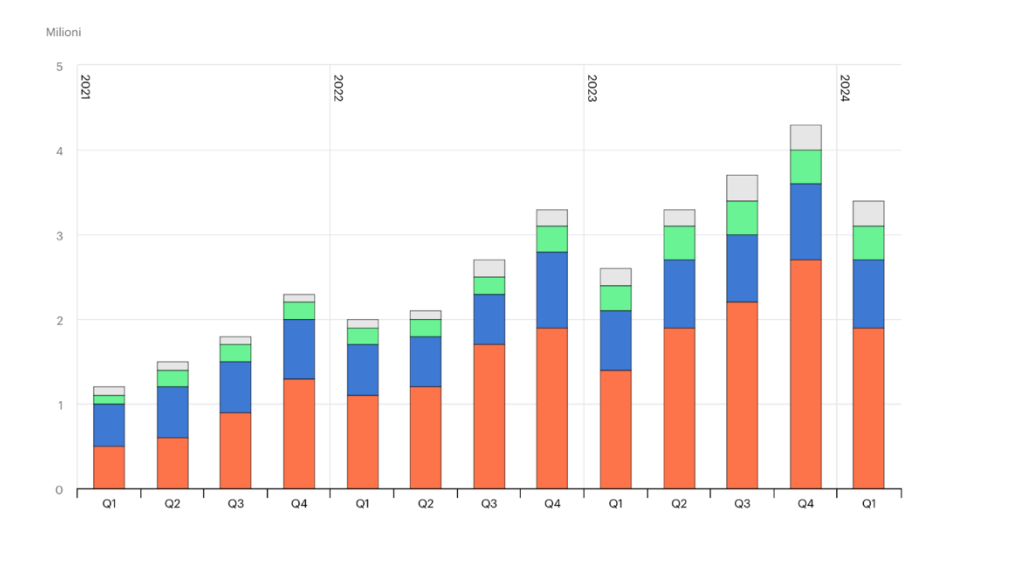
1.1.2 Evoluzione del mercato

Le vendite di auto elettriche continuano ad aumentare e potrebbero raggiungere circa 17 milioni nel 2024, rappresentando più di un'auto su cinque vendute in tutto il mondo. Margini ristretti, prezzi volatili dei metalli delle batterie, alta inflazione e l'eliminazione graduale degli incentivi all'acquisto in alcuni paesi hanno suscitato preoccupazioni sul ritmo di crescita del settore, ma i dati di vendita globali rimangono forti. Nel primo trimestre del 2024, le vendite di auto elettriche sono cresciute di circa il 25% rispetto al primo trimestre del 2023, simile alla crescita anno su anno osservata nello stesso periodo del 2022. Nel 2024, la quota di mercato delle auto elettriche potrebbe raggiungere fino al 45% in Cina, al 25% in Europa e oltre l'11% negli Stati Uniti, sostenuta dalla concorrenza tra i produttori, dal calo dei prezzi delle batterie e delle auto e dal sostegno politico in corso.

Le aspettative di crescita per il 2024 si basano su un anno record: nel 2023, le vendite globali di auto elettriche si sono avvicinate a 14 milioni, raggiungendo il 18% di tutte le

auto vendute. Questo è in aumento rispetto al 14% nel 2022. Le vendite di auto elettriche nel 2023 sono state superiori di 3,5 milioni rispetto al 2022, con un aumento del 35% anno su anno. Le case automobilistiche cinesi hanno prodotto più della metà di tutte le auto elettriche vendute in tutto il mondo nel 2023, nonostante rappresenti solo il 10% delle vendite globali di auto con motori a combustione interna. La stragrande maggioranza delle vendite di auto elettriche nel 2023 è stata in Cina (60%), in Europa (25%) e negli Stati Uniti (10%)⁵.

Troviamo di seguito un grafico pubblicato dall'IEA che illustra le vendite trimestrali di auto elettriche per regione 2021-2024 (ultimo aggiornamento 12 aprile 2024):



Rosso→Cina Blu→Europa Verde→Stati Uniti Grigio→Resto del mondo

Figura 2: Evoluzione delle vendite trimestrali di veicoli elettrici per area geografica (2021-2024)⁶.

Fonte: Adattato da IEA, 2024

⁵ IEA, 2024: Global EV Outlook 2024. Executive Summary. International Energy Agency.

⁶ Ibidem.

Come possiamo notare dal Grafico in Figura 2, a partire dal 2023 la crescita in Cina diventa marcatamente maggiore rispetto alla crescita dell'Europa e degli Stati Uniti, dovuto anche al mercato di fascia alta che inizia ad essere saturo.

Questo distacco non è solo una questione di numeri di vendita, ma è anche il riflesso del fatto che la Cina è stata molto veloce a verticalizzare la produzione delle batterie, permettendo di abbassare i costi e di immettere sul mercato modelli “entry-level” che i consumatori possono effettivamente permettersi. Cosa che evidentemente i produttori occidentali stanno ancora faticando ad applicare.

In confronto, queste regioni hanno rappresentato circa il 65% delle vendite totali di auto in tutto il mondo. Mentre le vendite di auto elettriche nelle economie emergenti sono state in ritardo rispetto a quelle dei tre grandi mercati, la crescita è ripresa nel 2023 in paesi come il Vietnam (circa il 15% di tutte le auto vendute) e la Thailandia (10%). Misure politiche come i sussidi all'acquisto e gli incentivi per i veicoli elettrici (EV) e la produzione di batterie stanno svolgendo un ruolo chiave.

Entro il 2030, quasi un'auto su tre sulle strade in Cina è elettrica in questo scenario, e quasi una su cinque sia negli Stati Uniti che nell'Unione europea. Il rapido assorbimento di veicoli elettrici di tutti i tipi – auto, furgoni, camion, autobus e veicoli a due/tre ruote – evita 6 milioni di barili al giorno (mb/d) di domanda di petrolio nello scenario delle politiche dichiarate nel 2030 e oltre 10 mb/d nel 2035. Questo equivale alla quantità di petrolio utilizzata per il trasporto su strada negli Stati Uniti oggi. I recenti sviluppi politici continuano a rafforzare le aspettative per una rapida elettrificazione, come i nuovi standard sulle emissioni adottati in Canada, nell'Unione europea e negli Stati Uniti nell'ultimo anno. Gli incentivi industriali incoraggiano anche l'aggiunta di valore e la creazione di posti di lavoro attraverso le catene di approvvigionamento dei veicoli elettrici. Se tutti gli obiettivi nazionali energetici e climatici fissati dai governi vengono soddisfatti per intero e in tempo, come nello scenario degli impegni annunciati, due terzi di tutti i veicoli venduti nel 2035 potrebbero essere elettrici, evitando circa 12 mb/d di petrolio⁷.

⁷ Ibidem.

Alla luce di quanto illustrato, risulta evidente che il mercato dell'automotive non è in una semplice fase di cambiamento, ma si sta spaccando in due.

Troviamo da un lato la Cina in grande crescita soprattutto per il tramite di costi di produzione imbattibili;

Dall'altro lato troviamo invece L'Europa insieme agli Stati Uniti che mostrano inevitabilmente dei segnali di affaticamento.

Risulta quasi impossibile non notare un paradosso. Nonostante l'aumento delle vendite globali, gli investitori hanno un grado di incertezza che ha raggiunto i massimi storici.

Il calo di domanda di Petrolio previsto rappresenta un forte segnale, bisogna però considerare che oltre a dover convincere una maggior fetta di mercato a puntare su veicoli a conduzione elettrica bisogna anche capire se le case automobilistiche Europee e Statunitensi saranno in grado di reggere il colpo a livello di margini di profitto. Infatti, guardando colossi come il Gruppo Volkswagen, possiamo notare che ha dovuto rivedere la ribasso le sue stime di margine operativo a causa di enormi costi di riconversione industriale e della guerra dei prezzi con i competitor asiatici.

Mentre un'auto termica garantisce margini consolidati, l'elettrico richiede investimenti miliardari che, nel breve periodo, 'erodono' i profitti.

In conclusione, i segni di cambiamento nel mercato ci indicano che la transizione è ormai avviata, bisogna però ancora superare numerosi ostacoli macroeconomici che causano un grande distacco di prezzo tra elettrico e termico, i quali potrebbero rallentare le ambizioni poste dai moderni quadri politici.

1.1.3 Normative europee e internazionali

La polarizzazione del mercato verso l'elettrico, non è dovuto ad una scelta o preferenza dei consumatori, ma soprattutto ad un quadro normativo che non lascia margini di manovra.

Nel corso del paragrafo andremo ad analizzare le colonne portanti di questa svolta normativa: il Green Deal Europeo, il pacchetto Fit for 55, il Regolamento (UE) 2023/851 e, infine, la clausola di revisione prevista per il 2026.

Il punto di partenza è rappresentato dal Green Deal europeo, strategia di crescita dell'UE.

Lanciato nel 2019, consiste in un pacchetto di iniziative strategiche che hanno avviato l'UE sulla strada di una transizione verde, con l'obiettivo ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050.

Si tratta del contributo dell'UE all'accordo di Parigi, che l'UE e tutti i suoi Stati membri hanno ratificato e che ha stabilito l'obiettivo di mantenere il riscaldamento globale entro +1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.

Il Green Deal sostiene la trasformazione dell'UE in una società equa e prospera con un'economia moderna e competitiva.

Sottolinea la necessità che tutti i settori di intervento contribuiscano alla lotta contro i cambiamenti climatici. La strategia sostiene misure in vari settori economici, tra cui l'energia, i trasporti, l'industria, l'agricoltura, la finanza sostenibile e altri ancora.

Se è vero che la transizione verde comporterà un costo elevato, poiché richiede ingenti investimenti nella trasformazione del nostro modello economico, il costo dell'inazione sarà molto maggiore. Secondo le stime, se non faremo nulla per affrontare i cambiamenti climatici, entro la fine del secolo i danni globali potrebbero ammontare fino al 12% del PIL.

La visione del Green Deal europeo prevede l'obiettivo di rendere l'UE la prima zona al mondo a impatto climatico zero entro il 2050, al fine di ridurre l'inquinamento e ripristinare un sano equilibrio nella natura e negli ecosistemi⁸.

⁸ Consiglio dell'Unione europea. (2024). Il Green Deal europeo: la tabella di marcia dell'UE per una transizione sostenibile.



Neutralità climatica

Drastica riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per rendere l'UE la prima zona al mondo a impatto climatico zero



Economia circolare

Nuovo modello economico in cui i prodotti sono riutilizzati, riparati e riciclati, riducendo i rifiuti e conservando le risorse



Industria pulita

Promozione di industrie più pulite, più sostenibili e più efficienti sul piano energetico che prosperino nei mercati dell'UE e mondiali



Ambiente più sano

Piano per ripristinare la natura e adoperarsi per l'azzeramento dell'inquinamento in modo da garantire un ambiente sano per le generazioni future



Agricoltura più sostenibile

Pratiche agricole più verdi per proteggere l'ambiente, fornendo nel contempo alimenti sani e a prezzi accessibili



Giustizia ed equità climatica

Piano per rendere la transizione equa e inclusiva, in modo da aiutare le persone più colpite dalla transizione e non lasciare indietro nessuno

Figura 3: Le principali aree di intervento del Green Deal europeo⁹.

Fonte: Adattato da Consiglio dell'Unione europea, 2024

La decarbonizzazione del settore dei trasporti è fondamentale per conseguire gli obiettivi climatici dell'UE. Le norme dell'UE mirano a rendere la mobilità più sostenibile, garantendo nel contempo la connettività in tutta l'UE.

Conformemente all'accordo di Parigi, i paesi dell'UE sono impegnati a rendere l'UE climaticamente neutra entro il 2050. Al fine di conseguire tale obiettivo, entro il 2030 l'UE ridurrà le sue emissioni nette di gas a effetto serra in tutti i settori dell'economia di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990 e continuerà a ridurre progressivamente le emissioni entro il 2050.

Per contribuire all'obiettivo, il settore dei trasporti deve subire una trasformazione radicale che richiederà una riduzione del 90% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990) entro il 2050.

Tra i vari settori in trasformazione, quello dei trasporti è il settore che ha mostrato maggiore resistenza andando addirittura in controtendenza.

⁹ Ibidem.

Mentre in altri settori le emissioni sono diminuite in modo significativo, le emissioni dei trasporti sono aumentate negli ultimi anni, arrivando a generare il 25% delle emissioni di gas a effetto serra dell'UE. È quindi fondamentale rendere il trasporto di passeggeri e merci nell'UE più efficiente e meno dipendente dai combustibili fossili.

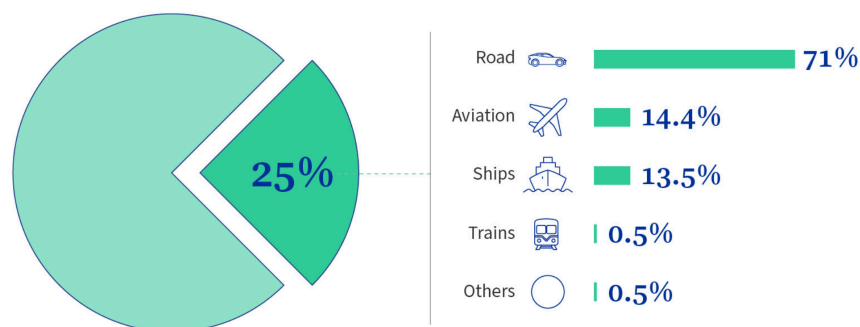


Figura 4: Ripartizione delle emissioni di gas a effetto serra nel settore dei trasporti dell'UE¹⁰.

Fonte: Adattato da Consiglio dell'Unione europea, 2024

Per tradurre gli obiettivi del Green Deal in norme vincolanti, l'Unione Europea ha varato il pacchetto "Fit for 55".

La legislazione "Fit for 55", ora pienamente adottata, pone l'UE sulla strada per raggiungere i suoi obiettivi climatici entro il 2030 in modo equo, conveniente e competitivo¹¹.

Il sistema di scambio di emissioni dell'UE (EU ETS), considerato il "motore economico" del pacchetto Fit for 55, è uno dei più grandi mercati mondiali del carbonio e lo strumento chiave dell'UE per ridurre le emissioni di gas serra.

Trovo importante precisare che il "Fit for 55" non ha inventato l'ETS, ma lo ha completamente trasformato in modo da renderlo più aggressivo.

¹⁰ Consiglio dell'Unione europea, 2024

¹¹ Consiglio dell'Unione europea. (2024). Trasporti puliti e sostenibili nell'UE.

- Il sistema mette un prezzo sul carbonio. Ogni anno, le entità coperte dall'ETS devono acquistare "quote" corrispondenti alle loro emissioni di gas serra¹².
- Ogni anno, viene fissato un limite a quante indennità vengono immesse sul mercato per quell'anno; quel limite diminuisce poi ogni anno che passa. Questo crea incentivi finanziari per le aziende per ridurre le emissioni.
- Tuttavia, alcuni settori che sono esposti alla "perdita di carbonio" ottengono indennità gratuite per sostenere la loro competitività.

L'ETS dell'UE copre circa il 40% delle emissioni totali dell'UE e ha già dimostrato di essere lo strumento chiave per la riduzione delle emissioni.

Dal 2005, momento in cui è stato introdotto, le emissioni dell'UE sono state tagliate del 41% nei settori coperti, tra cui il trasporto su strada(circa 10.000 aziende).

La riforma si tradurrà in ulteriori riduzioni delle emissioni, avvicinando l'UE alla neutralità climatica¹³.

Il Regolamento(UE) 2023/851, pubblicato in Gazzetta Ufficiale UE ad aprile 2023 modifica il Regolamento (UE) 2019/631 per quanto riguarda il rafforzamento dei livelli di prestazione in materia di emissioni di CO2 delle autovetture nuove e dei veicoli commerciali leggeri nuovi.

Le nuove norme puntano a ridurre le emissioni prodotte dal trasporto su strada, che detiene la percentuale più elevata di emissioni prodotte dai trasporti, fissando obiettivi di riduzione delle emissioni di CO2 del 55% per le autovetture nuove e del 50% per i furgoni nuovi dal 2030 al 2034 rispetto ai livelli del 2021 e del 100% sia per le autovetture nuove che per i furgoni nuovi dal 2035.

Il Regolamento prevede una clausola di revisione secondo la quale, nel 2026, la Commissione dovrà valutare approfonditamente i progressi compiuti verso il conseguimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni del 100% al 2035 e l'eventuale necessità di rivederli, tenendo conto degli sviluppi tecnologici.

¹² viene fissato un tetto massimo alle emissioni totali che diminuisce ogni anno, obbligando le aziende ad acquistare delle "quote" per ogni tonnellata di CO2 emessa.

¹³ Consiglio dell'Unione europea. (2024). Fit for 55: reform of the EU emissions trading system.

Per quanto riguarda gli emendamenti, la posizione del Parlamento Europeo ha introdotto dei cambiamenti al Regolamento, adottando gli emendamenti proposti alla Commissione Trasporti a settembre che introducono, tra le altre cose, l'importanza di applicare il principio di neutralità tecnologica, l'apertura a veicoli a basse emissioni e ai combustibili neutri in termini di CO₂ (“sono tutti i carburanti definiti dalla Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II) per i quali le emissioni del carburante al momento dell'uso possono essere considerate pari a zero”). Tra questi rientrano i biocarburanti, il biogas, i combustibili da biomassa, i carburanti rinnovabili liquidi e gassosi di origine non biologica per il trasporto (RFNBO) o i carburanti derivanti da carbonio riciclato(RCF) e anche altri combustibili non elencati nella direttiva RED II, a condizione che soddisfino i criteri di sostenibilità della direttiva e dei relativi atti delegati. La traiettoria dettata dal Regolamento(UE) 2023/851 non è di certo priva di flessibilità.

È stata infatti prevista, come preannunciato, una clausola di revisione del 2026, ovvero il momento in cui la visione politica dovrà confrontarsi con i dati effettivamente registrati, valutando se gli sviluppi tecnologici e la sostenibilità per le imprese ed i consumatori siano in grado di confermare il salto verso la mobilità a zero emissioni. In particolare, il dibattito si focalizzerà su due punti cardine:

- L'Integrazione della neutralità tecnologica: c'è la spinta per l'introduzione del cosiddetto “fattore di correzione del carbonio” (*Carbon Correction Factor*), che permetterebbe di far affidamento sull'apporto di combustibili neutri definiti dalla direttiva RED II (come i biocarburanti) ai fini della omologazione dei veicoli, evitando di focalizzarsi sulla singola tecnologia a conduzione elettrica.
- Accessibilità economica e adozione di massa: la clausola di revisione 2026 dovrà inoltre andare ad analizzare se l'infrastruttura di ricarica e il potere d'acquisto dei consumatori siano effettivamente allineati ai target¹⁴.

¹⁴ Amici della Terra. (2023). Quindicesimo rapporto sull'efficienza energetica in Italia.

1.2 Sostenibilità reale ed efficienza energetica

1.2.1 Analisi *Well-to-Wheel*: emissioni dirette vs indirette

Per comprendere la ratio economica celata dietro le vincolanti normative europee, è necessario andare oltre la mera distinzione tra veicoli inquinanti e i veicoli a zero emissioni basata sul solo tubo di scappamento, andando quindi ad analizzare l'inquinamento generato partendo dalla produzione di componenti come le batterie, passando per la circolazione in strada del veicolo ed arrivando fino allo smaltimento dei componenti.

Un'Analisi corretta e completa deve inevitabilmente adottare la metodologia "Life Cycle Assessment"(LCA), andando a valutare l'impatto Well-to-Wheel, ovvero dal pozzo alle ruote.

Con questo approccio siamo quindi in grado di quantificare le emissioni indirette, derivanti dalla produzione e dall'utilizzo del mezzo e dallo smaltimento, traducendole in esternalità negative che generano un effetto gravoso sulla società.

Nella sfida sulle emissioni tra le Auto Elettriche e quelle Termiche, le BEV inquinano 4 volte meno. Lo studio condotto dall'organizzazione indipendente International Council on Clean Transportation (ICCT) ha valutato l'intero ciclo di vita delle auto, svelando che gli ultimi modelli delle auto elettriche a batteria producono il 73% in meno di emissioni di gas climalteranti delle auto termiche.

Il rapporto ha confrontato la media ponderata delle vendite di veicoli a combustione interna (ICEV, benzina/diesel), veicoli ibridi elettrici (HEV), veicoli ibridi elettrici plug-in (PHEV), veicoli elettrici a batteria (BEV) e veicoli elettrici a celle a combustibile a idrogeno (FCEV). Quindi qualsiasi tipo di alimentazione in vendita, tranne il metano. E l'analisi ha coperto le emissioni di gas serra derivanti dalla produzione e dal riciclo di veicoli e batterie, dalla produzione di carburante ed elettricità, dal consumo di carburante e dalla manutenzione.

Si stima che i veicoli elettrici a batteria abbiano emissioni di produzione circa il 40% superiori rispetto ai veicoli a combustione interna derivanti dalla produzione delle batterie. In realtà queste emissioni vengono compensate dopo circa 17.000 km di

utilizzo¹⁵. Utilizzando solo energia elettrica rinnovabile, si stima che i BEV producano emissioni del ciclo di vita pari a 52 g CO₂ e /km, il 78% in meno rispetto ai veicoli a combustione interna a benzina¹⁶.

È estremamente importante porre l'accento su come il calcolo sulle emissioni sia sensibile alle variabili di input(ad esempio come viene generata la corrente elettrica, combustibili fossili o fonti rinnovabili). Abbiamo visto che le emissioni derivanti dalla produzione di un'auto elettrica sono parecchio superiori rispetto alla produzione di un veicolo con motore termico, è quindi importante specificare che l'ammortamento ambientale di queste emissioni di produzione può avvenire in tempi diversi. Infatti, mentre l'ICCT stima il break even point dopo appena 17.000 km (in condizioni ottimali e con generazione di energia 100% con fonti rinnovabili), test condotti da case automobilistiche come Volvo ci forniscono dati sensibilmente differenti, nel caso Volvo infatti parliamo di 77.000km (ben 60.000 in più rispetto al caso ICCT). Questo dimostra che le emissioni di un veicolo elettrico non sono un valore stabile, ma un valore dipendente da un grande numero di variabili.

Il risultato, è che le emissioni durante il ciclo di vita delle auto elettriche a batteria sono quasi 4 volte inferiori a quelle delle auto termiche. Invece, le emissioni delle auto ibride sono inferiori del 20% rispetto a quelle delle auto a benzina, mentre le ibride plug-in sono inferiori del 30%. Per le BEV si tratta di un risultato migliore del 24% rispetto alle stime dell'ICCT nel 2021.

¹⁵ Contro i 77.000km del test Volvo.

¹⁶ Rossi, F. (24 Maggio 2023). Emissioni auto elettriche vs auto termiche: chi vince davvero? Rinnovabili.it.

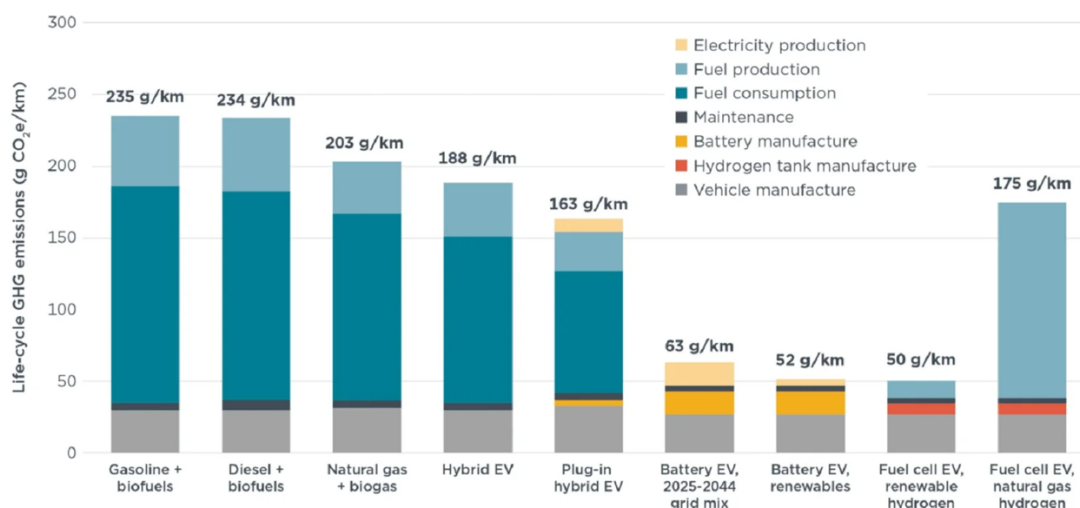


Figura 5: Confronto delle emissioni di gas serra (GHG) nel ciclo di vita per diverse tipologie di propulsione (2021-2024)¹⁷.

Fonte: Adattato da ICCT, 2021 (aggiornato 2024)

Le emissioni dei veicoli ibridi ed elettrici sono state stimate a 188 g di CO₂ /km, mentre i veicoli ibridi plug-in hanno mostrato emissioni di 163 g di CO₂ /km, considerando il consumo medio di carburante ed elettricità in condizioni reali.

Lo studio ICCT fa notare che se non si tiene conto dei cambiamenti previsti nel mix elettrico, allora si gonfiano le emissioni stimate del ciclo di vita dei veicoli elettrici a batteria e aumenta leggermente quelle dei veicoli ibridi plug-in¹⁸.

In definitiva, i dati suggeriscono che il passaggio all'elettrico puro sia l'unica strada in grado di garantire abbattimenti drastici delle emissioni nel lungo periodo, con la specifica che è necessario anche un maggior ricorso a fonti rinnovabili perché in caso diverso la generazione di elettricità attraverso combustibili fossili non lascerebbe spazio a grandi margini di miglioramento. Le soluzioni ibride (HEV e PHEV), pur rappresentando una

¹⁷ Adattato da ICCT, 2021 (aggiornato 2024)

¹⁸ Ibidem.

strada che consenta migliorie a piccoli passi, non appaiono sufficienti per riuscire a raggiungere la neutralità climatica entro il 2035, lasciando spazio a un'unica vera alternativa teorica rappresentata dai biocarburanti la cui sostenibilità sul piano economico rimane però frenata da costi di produzione e scalabilità ancora incerti. Altra possibile alternativa potrebbe essere l'idrogeno, capace di raggiungere risultati simili a condizione che si tratti di alimentazione ad idrogeno rinnovabile.

1.2.2 Limiti operativi: degradazione batterie e variabili climatiche

Anche se l'analisi Well-to-Wheel ha dimostrato nel precedente paragrafo la superiorità sul campo teorico dei veicoli a conduzione elettrica, la loro efficienza operativa nella realtà è soggetta a numerose variabili ambientali che ne condizionano gravosamente l'economicità. Infatti, i vari limiti operativi, che sono legati principalmente alla degradazione delle celle della batteria ed alle oscillazioni delle condizioni climatiche, si traducono in una volatilità dei costi di gestione e soprattutto sull'incertezza del valore residuo dell'investimento effettuato.

È quindi di fondamentale importanza comprendere a fondo questi limiti dei BEV per essere in grado di valutare l'effettiva capacità di penetrazione dei veicoli elettrici in mercati caratterizzati da condizioni geografiche e climatiche eterogenee.

Quanto durerà davvero la batteria del mio veicolo elettrico? È una domanda chiave per chiunque consideri l'acquisto di un veicolo elettrico. Il degrado della batteria, o il graduale declino della capacità di immagazzinare energia di una batteria, influisce sull'autonomia di guida, sulle prestazioni e sul valore di rivendita del veicolo. Per sostenere l'innovazione e costruire la fiducia della flotta nella tecnologia dei veicoli elettrici, Geotab ha condotto diversi studi approfonditi utilizzando dati telematici del mondo reale (dati raccolti dai veicoli stessi) per vedere quanto velocemente le batterie EV si degradano.

Il primo grande studio di Geotab nel 2020 sui veicoli elettrici leggeri ha mostrato un tasso medio di degrado della batteria del 2,3% all'anno. Entro il 2023, ulteriori analisi hanno mostrato un miglioramento, con 11 modelli EV comuni che hanno una media di solo l'1,8% di degradazione annua (probabilmente a causa dei progressi nella tecnologia delle batterie e nei sistemi di gestione termica).

Quando abbiamo ampliato lo studio nel 2025, la perdita media di capacità era tornata al 2,3% all'anno tra i 21 modelli di fabbricazione. Ciò significa che si prevede che la batteria media ha l'81,6% della sua capacità originale (stato di salute o SOH) dopo otto anni.

Questo ritorno a una media del 2,3% probabilmente riflette alcuni fattori combinati relativi ai veicoli più recenti e a come vengono utilizzati, come ad esempio:

- Ricarica ad alta potenza.
- Tipo di veicolo e chimica: il tasso medio di degrado sembra variare in modo significativo a seconda del modello. I veicoli multiuso (MPV) compresi i furgoni leggeri nella nostra analisi ha una media di un tasso più alto (2,7% all'anno) rispetto alle auto leggere (2,0% all'anno). Le differenze tra i modelli di veicoli sono probabilmente guidate da specifiche sostanze chimiche delle batterie progettate per diverse priorità come la massimizzazione dell'autonomia (densità di energia) o la massimizzazione della loro durata (longevità), nonché configurazioni uniche nei sistemi di gestione delle batterie.
- calo iniziale: molti veicoli elettrici mostrano un calo più netto della capacità nel primo anno o due prima che i livelli di velocità si stabilizzino.

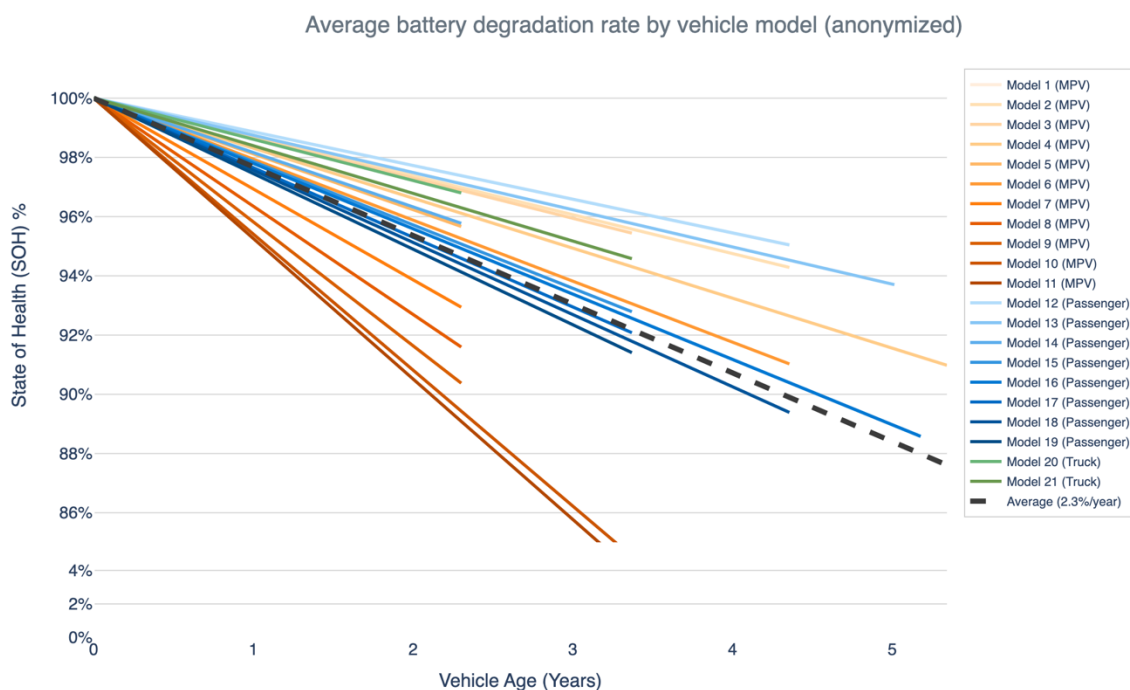


Figura 6: Tassi medi di degrado della batteria per categoria di veicolo e stato di salute (SOH)¹⁹.

Fonte: Adattato da Geotab, 2020.

Osservando il grafico, possiamo notare che nel lungo termine, la sostenibilità economica dei veicoli a conduzione elettrica è fortemente condizionata dal degrado delle batterie, che sebbene si aggiri intorno ad una media del 2,3% annuo, possiamo notare che questo dato è caratterizzato da un'ampia variabilità in base ai vari modelli facenti parte del test andando ad incidere pesantemente sul valore residuo del mezzo.

In termini di Total Cost of Ownership (TCO), il rapido degradare delle condizioni della batteria, in alcuni modelli in particolare, rappresenta un'incognita finanziaria che incide con forza sulla percezione degli investitori e sulla fiducia dei consumatori.

¹⁹ Adattato da Geotab, 2020.

Mentre il design intrinseco influenza la salute della batteria in tutti i modelli di veicoli, anche le condizioni operative del veicolo hanno un impatto. Per comprendere meglio il ruolo dei fattori esterni, abbiamo raggruppato i veicoli in condizioni operative simili, osservando i livelli di potenza, il clima locale e l'utilizzo²⁰.

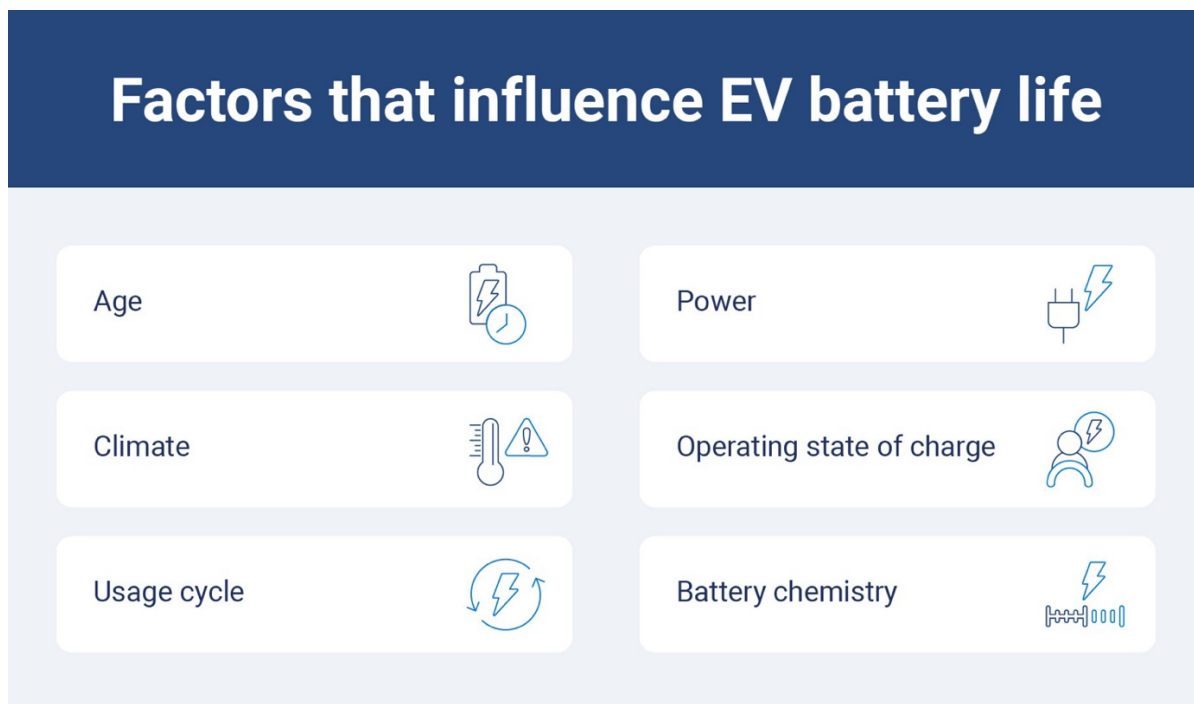


Figura 7: Variabili determinanti per la longevità e l'efficienza delle batterie EV²¹.

Fonte: Adattato da Geotab, 2020

Passando ad analizzare le variabili climatiche, possiamo osservare che queste agiscono come moltiplicatore dei consumi. Infatti, a differenza dei motori termici, dove il calore, spesso considerato come uno spreco anche se molto utile per il riscaldamento dell'abitacolo, rappresenta un sottoprodotto del processo di combustione, nei veicoli

²⁰ Argue, C. (2020). What can 6,000 electric vehicle batteries tell us about EV battery health? Geotab Blog.

²¹ Ibidem.

dotati di motore a conduzione elettrica il mantenimento del comfort termico all'interno della vettura diventa un costo energetico gravoso.

Nonostante l'aumento dell'offerta di veicoli elettrici, le statistiche di immatricolazione dei veicoli mostrano che i veicoli elettrici devono ancora essere pienamente accettati dal cliente. Nel caso particolare dei veicoli elettrici a batteria (BEV), l'autonomia di guida limitata per carica è una delle maggiori barriere per i clienti di oggi contro l'adozione di veicoli elettrici.

Oltre alle caratteristiche di viaggio e allo stile di guida, l'autonomia di un BEV è principalmente influenzata da tre fattori: la quantità di energia che può essere immagazzinata nella batteria del veicolo, l'efficienza energetica del veicolo e il consumo di energia ausiliaria. I miglioramenti nella tecnologia del propulsore elettrico e delle batterie nel corso degli anni hanno portato oggi a gamme fino a 500 km.

Tuttavia, a differenza dei veicoli con motore a combustione interna (ICEV), l'autonomia di un BEV ne risente sostanzialmente in condizioni ambientali fredde²².

Anche le alte temperature accelerano naturalmente il degrado della batteria perché il calore aumenta l'attività chimica e lo stress all'interno della cellula.

I dati confermano un effetto moderato: i veicoli che operano in climi caldi in media si degradano dello 0,4% più velocemente all'anno rispetto a quelli in climi miti²³.

Tornando al freddo, i due fattori principali che influenzano la gamma di BEV a basse temperature sono il fabbisogno di energia di riscaldamento e la sensibilità alla temperatura delle celle della batteria agli ioni di litio, che vengono utilizzate principalmente nei BEV moderni per l'accumulo di energia.

Poiché i propulsori elettrici hanno un'efficienza più elevata rispetto a quelli convenzionali, i BEV hanno meno calore di scarto disponibile per il riscaldamento della

²² Tarei, P. K., Thakker, S. V., & Nag, B. (2021). A Hybrid Framework for Assessing the Resilience of Electric Vehicle Supply Chain. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3), 115.

²³ Argue, C. (2020). What can 6,000 electric vehicle batteries tell us about EV battery health? Geotab Blog.

cabina rispetto agli ICEV. Per questo motivo, i riscaldatori elettrici sono installati nei BEV per garantire il comfort dei passeggeri in condizioni ambientali fredde. Poiché la loro potenza è fornita dalla batteria del veicolo, questo si aggiunge alla quantità di consumo di energia e quindi influisce sulla autonomia dei BEV .

Taggart ha analizzato oltre 10.000 Tesla Model S e ha osservato aumenti del consumo di energia fino al 45% a -10 °C, mentre i viaggi brevi in particolare hanno mostrato consumi più elevati a causa del riscaldamento transitorio della batteria e della cabina. Delos Reyes et al. hanno eseguito test di guida con una Nissan Leaf in Canada e hanno riscontrato una diminuzione dell'autonomia fino al 70% a -26 °C. Horrein et al. hanno eseguito una simulazione per dimostrare che i requisiti di riscaldamento possono ridurre la gamma di un BEV fino al 30%.

Le condizioni fredde causano una ridotta reattività e una diminuzione della conduttività ionica nelle cellule agli ioni di litio.

In questo contesto, Nagasubramanian et al. hanno dimostrato che in condizioni di freddo estremo (-40 °C) una cellula agli ioni di litio può perdere fino al 95% della sua energia e più del 98% della sua capacità energetica rispetto ai livelli di prestazioni a 25 °C.

Oltre a queste perdite temporanee nelle prestazioni cellulari, le basse temperature promuovono anche la Li-plating, che può portare a una riduzione permanente delle prestazioni cellulari.

Entrambi questi effetti sono in parte irreversibili, portando a una riduzione permanente della capacità energetica e di potenza della cellula. Per ridurre tali processi di invecchiamento cellulare, il sistema di gestione della batteria (BMS) limita le correnti di carica e scarica a basse temperature.

Steinstraeter et al. hanno dimostrato che la capacità di recupero di un BEV dipende fortemente dalla temperatura della batteria. Il recupero limitato in condizioni fredde è un fattore particolarmente critico del raggio di guida di un BEV, poiché l'energia ripristinata attraverso la frenata rigenerativa in condizioni calde (senza limitazioni) può contribuire al 18% dell'energia totale richiesta per un viaggio²⁴.

²⁴ Tarei, P. K., Thakker, S. V., & Nag, B. (2021). A Hybrid Framework for Assessing the Resilience of Electric Vehicle Supply Chain. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3), 115.

Questo rappresenta un trade off tecnologico: il sistema sceglie di sacrificare l'efficienza e il recupero di energia in frenata con lo scopo di preservare l'integrità delle celle facenti parte della batteria andando quindi a limitare se non ad evitare il fenomeno del Li-plating. Questo aspetto in termini economici ci indica che nei mesi caratterizzati da temperature più fredde (come anche temperature troppo calde), il costo marginale per km aumenta sensibilmente sia per il riscaldamento dell'abitacolo sia per la minor capacità del veicolo di recuperare energia in frenata.

Michaelidis ha dimostrato che la domanda di energia termica di un BEV può essere ridotta fino a due terzi quando viene utilizzata una pompa di calore invece di un riscaldatore di resistenza per fornire calore alla cabina. Tuttavia, praticamente due fattori limitano le prestazioni delle pompe di calore a basse temperature, che devono essere affrontate per garantire un corretto funzionamento in qualsiasi condizione. In primo luogo, il coefficiente di prestazione (COP) diminuisce a temperature più basse e, in secondo luogo, le pompe di calore mostrano un rischio di congelamento quando la temperatura scende al di sotto del punto di congelamento del refrigerante. Entrambi i fattori possono essere affrontati utilizzando un riscaldatore di resistenza aggiuntivo per mantenere le prestazioni della pompa di calore in qualsiasi momento ad un livello elevato e per garantire un funzionamento illimitato in qualsiasi condizione. Auer et al. hanno proposto un sistema di gestione termica predittiva per i veicoli elettrici a batteria, che utilizza le informazioni di navigazione dei viaggi pianificati per ottimizzare la strategia di riscaldamento²⁵.

In definitiva, l'analisi dei vari limiti operativi rende evidente come la sostenibilità economica dei veicoli a conduzione elettrica sia una variabile strettamente legata al contesto d'uso, infatti:

- da un lato, il degrado temporale della batteria rappresenta un elemento di incertezza rispetto al valore residuo del veicolo, rendendo quindi di fondamentale importanza il monitoraggio dello Stato di Salute per una corretta pianificazione finanziaria;

²⁵ Ibidem.

- dall'altro lato, troviamo anche la sensibilità climatica, che agisce come moltiplicatore del TCO. Con sviluppi tecnologici come pompe di calore o sistemi di gestione predittiva si può però cercare per lo meno di andare a mitigare questi effetti, anche se ciò comporta un sensibile aumento dell'investimento iniziale.

Possiamo quindi confermare che le variabili geografiche e climatiche non possono essere considerate come semplici dettagli ma fungono da vero e proprio driver economico, determinante nel definire l'effettiva convenienza del passaggio dal termico all'elettrico.

1.3 L'economia del ciclo di vita e il valore dell'usato

1.3.1 Il Costo Totale di Possesso (TCO) e impatto sui consumatori

Mentre nello scorso paragrafo sono state analizzate le criticità tecniche e climatiche dei veicoli dotati di motore elettrico, nel seguente paragrafo l'obiettivo è tradurre queste evidenze, tramite la lente del Total Cost of Ownership, in termini monetari.

Appare evidente che la sfida per il consumatore non è solo tecnologica, ma per lo più finanziaria, nel determinare se il risparmio dell'elettrico su costi operativi e di manutenzione sia considerabile sufficiente a compensare il sensibilmente maggiore esborso iniziale, ma soprattutto l'incertezza sul valore dell'usato.

Secondo l'ultimo Car Cost Index di LeasePlan, nonostante i crescenti prezzi dell'energia, i veicoli elettrici sono più convenienti che mai.

LeasePlan ha da poco pubblicato l'ultima edizione del suo Car Cost Index, che rivela come i veicoli elettrici (EV), in quasi tutti i segmenti e tutti i paesi europei, abbiano in questo momento lo stesso prezzo, o un prezzo inferiore, sulla base del costo totale di proprietà (TCO) rispetto alle auto a benzina o diesel, nonostante i prezzi crescenti del carburante e dell'elettricità.

L'annuale Car Cost Index è un'analisi approfondita sul TCO e di operatività di un veicolo in 22 paesi europei, che spazia dal segmento dei veicoli sub-compatti al mercato executive.

I 22 paesi inclusi nel Car Cost Index sono: Austria, Belgio, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Lussemburgo, Norvegia, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Repubblica Ceca, Romania, Slovacchia, Spagna, Svezia, Svizzera e Ungheria.

I costi sono ponderati sui primi quattro anni di proprietà e presumono un chilometraggio di 30.000 km all'anno. Il 'costo competitivo' viene definito, per gli scopi prefissati dall'Indice, come: veicoli elettrici non più costosi del 5% rispetto ai propri omologhi con motore a combustione interna (ICE)

Il Car Cost Index scorpora i diversi costi relativi alla proprietà di un veicolo in ciascun paese, inclusi energia/carburante, deprezzamento, imposte, interessi, assicurazione e manutenzione.

Risultati principali dell'Indice di quest'anno:

- Nonostante l'inflazione dei prezzi energetici, i costi di alimentazione si mantengono significativamente inferiori per i veicoli elettrici rispetto ai veicoli a benzina e diesel: i costi di alimentazione rappresentano il 15% del TCO di un veicolo elettrico, mentre salgono al 23% e al 28% per i conducenti di veicoli a benzina e diesel.
- In quasi tutti i segmenti e in quasi tutti i paesi europei, i veicoli elettrici attualmente hanno lo stesso prezzo o sono più convenienti dei veicoli a benzina o diesel, sulla base del TCO.
- Il costo medio mensile della guida di un veicolo varia notevolmente tra i diversi paesi europei – da €905 mensili in Grecia a €1.313 in Svizzera.
- È presente sul mercato una quantità senza precedenti di modelli di veicoli elettrici. Il primo Car Cost Index aveva esaminato solo 11 veicoli elettrici, mentre l'edizione di quest'anno ne comprende 33²⁶.

²⁶ Ayvens. (2022). Car Cost Index 2022: l'analisi comparativa dei costi dei veicoli elettrici e a combustione in Europa.

Tex Gunning, allora CEO di LeasePlan, nel dicembre 2022 ha dichiarato: “Gli EV sono il modo migliore per proteggere i conducenti dall’impennata dei costi del carburante. Purtroppo, i governi stanno cancellando con troppa fretta gli incentivi per gli EV, anche nei paesi con obiettivi ambiziosi di emissioni zero-netto. Questa attitudine all’‘eliminazione non accompagnata da un programma’ avrà conseguenze disastrose nel contrasto al cambiamento climatico. Abbiamo bisogno di politiche coerenti e a lungo termine che permettano di essere certi del fatto che la guida elettrica è la scelta di buon senso per tutti i conducenti.”²⁷

A seguito di aumenti di prezzo senza precedenti nel 2022, i prezzi delle batterie stanno scendendo di nuovo quest'anno. Il prezzo delle batterie agli ioni di litio è sceso del 14% a un minimo storico di 139 dollari/kWh, secondo l'analisi del fornitore di ricerca BloombergNEF (BNEF). Ciò è stato guidato dal calo dei prezzi delle materie prime e dei componenti con l'aumento della capacità produttiva in tutte le parti della catena del valore della batteria, mentre la crescita della domanda non è stata all'altezza di alcune aspettative del settore.

Di conseguenza, molti produttori di veicoli elettrici e batterie hanno rivisitato i loro obiettivi di produzione, che a loro volta hanno avuto un impatto sui prezzi delle batterie. I prezzi del litio hanno raggiunto un punto alto alla fine del 2022, ma i timori che i prezzi sarebbero rimasti alti si sono in gran parte placati da allora e i prezzi stanno ora scendendo di nuovo.

Su base regionale, i prezzi medi del pacco batteria erano più bassi in Cina, a 126 dollari/kWh. I pacchetti negli Stati Uniti e in Europa erano rispettivamente dell'11% e del 20% più alti. I prezzi più alti riflettono l'im maturità relativa di questi mercati, i costi di produzione più elevati, i volumi inferiori e la vasta gamma di applicazioni. C'è stata anche un'intensa concorrenza sui prezzi a livello nazionale in Cina quest'anno, poiché i produttori di batterie hanno aumentato la capacità produttiva con l'obiettivo di afferrare una quota della crescente domanda di batterie.

BNEF si aspetta che i prezzi medi del pacco batteria scendano di nuovo l'anno prossimo, raggiungendo i 133 dollari/kWh (in dollari reali del 2023). L'innovazione tecnologica e

²⁷ Ayvens. (2022). Car Cost Index 2022: l'analisi comparativa dei costi dei veicoli elettrici e a combustione in Europa. Comunicato stampa.

il miglioramento della produzione dovrebbero guidare ulteriori cali dei prezzi delle batterie nei prossimi anni, a 113 dollari/kWh nel 2025 e 80 dollari/kWh nel 2030.

I continui investimenti in ricerca e sviluppo, miglioramenti dei processi di produzione ed espansione della capacità in tutta la catena di approvvigionamento aiuteranno a migliorare la tecnologia delle batterie e a ridurre i costi nel prossimo decennio²⁸.

I veicoli elettrici creano meno emissioni di gas serra rispetto ai veicoli alimentati a gas e la loro accelerazione rapida e silenziosa significa che sono anche divertenti da guidare²⁹. Quindi non c'è da meravigliarsi che le vendite di veicoli elettrici siano in crescita - il 5,3% delle vendite di auto nuove negli Stati Uniti nel 2022, rispetto al 3% del 2021, secondo la società di ricerca automobilistica Wards Intelligence - mentre le vendite di veicoli a benzina convenzionali sono diminuite.

In teoria, poiché i veicoli elettrici mancano di motori, trasmissioni complesse e sistemi di carburante o di scarico, dovrebbero costare meno per la manutenzione rispetto ai veicoli a gas. In media, è vero: uno studio CR del 2020 ha scoperto che i veicoli elettrici riducono i costi di riparazione e manutenzione del 50 per cento rispetto alle auto a gas simili. Potresti risparmiare centinaia di dollari all'anno, ma i tuoi risparmi effettivi dipenderanno dall'auto.

Jake Fisher, direttore dei test automobilistici per Consumer Reports, afferma: "I veicoli elettrici si basano su nuove tecnologie e alcune case automobilistiche stanno solo facendo le loro prime incursioni nel mercato dei veicoli elettrici". "Le aziende potrebbero non aver avuto il tempo di risolvere tutti i problemi di produzione e progettazione"³⁰. Di conseguenza, i nuovi veicoli elettrici potrebbero avere più problemi all'inizio.

Per compensare, i veicoli elettrici offrono generose garanzie su parti come batterie e propulsori elettrici (di solito circa otto anni o 100.000 miglia).

Il costo dell'elettricità per caricare un veicolo elettrico è quasi sempre centinaia di dollari in meno all'anno rispetto alla spesa per il carburante per un veicolo a gas simile. Ma

²⁸ BloombergNEF. (2023). Lithium-ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh.

²⁹ nonostante l'assenza di feedback acustico e vibrazionale riduca il coinvolgimento sensoriale.

³⁰ Preston, B. (2023). Will an Electric Car Save You Money? Consumer Reports.

esattamente la differenza può variare ampiamente a seconda delle tariffe dell'elettricità e dei prezzi del gas di dove vivi.

Inoltre, alcune case automobilistiche, tra cui Hyundai, Kia, Toyota e Volkswagen, offrono accesso gratuito a determinati caricabatterie pubblici ad alta velocità per alcuni anni dopo l'acquisto di un veicolo³¹.

Jake Fisher, sottolinea come per certi profili di utenza la scelta dell'ibrido rimanga superiore:

"A seconda dei costi locali del gas e dell'elettricità, gli ibridi potrebbero avere un senso finanziario migliore rispetto ai veicoli elettrici per alcuni acquirenti, soprattutto perché molti hanno un'eccezionale affidabilità a lungo termine"³².

Quindi dalle affermazioni di Fisher, possiamo trarne che nell'attesa di evoluzioni a ribasso del prezzo dei BEV, l'ibrido ad oggi rappresenta la soluzione di compromesso più efficiente per la maggior parte dei consumatori.

Chi si dice pronto ad acquistare un'elettrica purché costi grossomodo come un'auto tradizionale, si segni queste date: 2025-2027. È il periodo entro il quale, secondo gli analisti di Bloomberg, i prezzi di Ev ed endotermiche in Europa arriveranno ad essere sostanzialmente allineati, per poi diventare addirittura più bassi. L'ultimo rapporto del Bnef (Bloomberg New Energy Finance), redatto da un pool di ricercatori in collaborazione con l'associazione ambientalista Transport & Environment, prevede infatti che l'azione combinata di politiche ambientali comunitarie, strategie delle Case e decrescita dei costi delle batterie porterà a uno sviluppo del mercato tale per cui la spesa necessaria per viaggiare a emissioni zero sarà, entro pochi anni, teoricamente ridotta.

Al riguardo troviamo però pareri discordati.

Quelle di Bloomberg sono proiezioni più ottimistiche rispetto a quelle fornite dall'industria, in larga parte più scettica sulle prospettive di un recupero a breve termine dei sovraccosti insiti alla transizione verso l'elettrico: basta rileggere, per esempio, le dichiarazioni di Luca De Meo, ceo del gruppo Renault, per cui tra dieci anni un

³¹ Ibidem.

³² Ibidem.

powertrain elettrico costerà ancora il doppio di uno tradizionale. Opinioni peraltro vicine a quelle espresse sul tema da altri big come Carlos Tavares, ad di Stellantis, e Akio Toyoda³³.

Possiamo osservare che a differenza delle analisi di mercato di BNEF, che mostrano ottimismo sulle economie di scala, i leader del settore automobilistico mostrano una visione più pragmatica, mettendo in guardia sulla volatilità delle materie prime, e suggerendo che la “Price Parity” potrebbe non essere così immediata (come invece suggerito da BNEF) per tutti i segmenti del mercato.

Ricordando che i listini medi delle batterie sono scesi dell’89% nell’ultimo decennio, e del 13% nel solo 2020, parallelamente a un aumento della densità (e quindi dell’efficienza di questa tecnologia) del 7% su base annua, Bloomberg ipotizza che i prezzi medi per kWh diminuiranno del 50% dal 2020 al 2030, arrivando a 58 dollari per kWh entro 2030. Di contro, sulle previsioni incombe l’incertezza legata ai costi delle materie prime (nei primi quattro mesi del 2021, carbonato di litio al +72%, idrossido di litio al +47% e cobalto al +58%), destinata a perdurare fino al 2035: un elemento di volatilità che potrebbe incidere sui tempi di sviluppo del mercato.

³³ Quattroruote. (10 maggio 2021). Auto elettriche, studio Bloomberg: "Entro sei anni costeranno meno delle endotermiche".

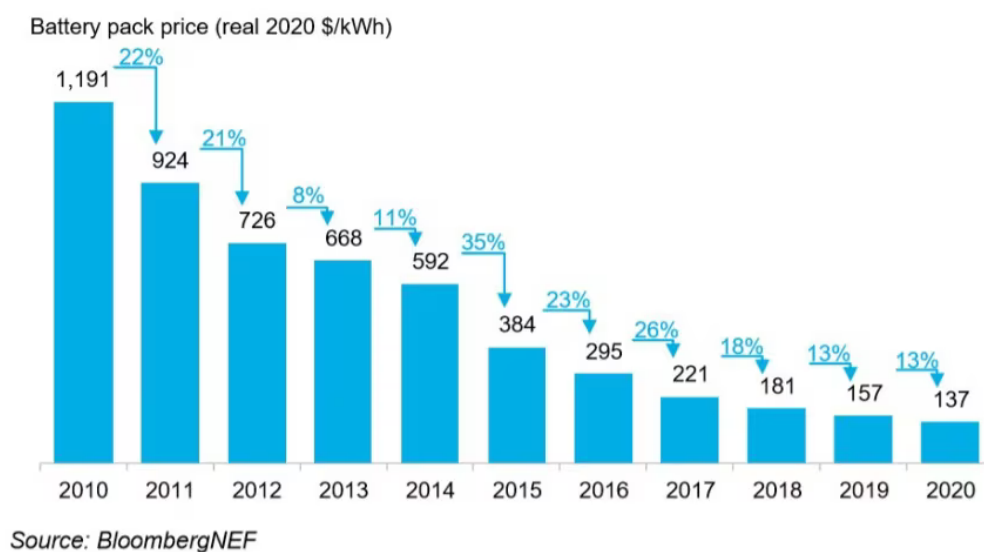


Figura 8: Evoluzione del prezzo medio ponderato dei pacchi batteria agli ioni di litio (2010-2020)³⁴.

Fonte: Adattato da BloombergNEF (BNEF), 2020

In questo scenario, il raggiungimento del pareggio dei prezzi tra vetture elettriche ed endotermiche dipenderà anche da fattori esterni. Perché avvenga in poco più di un lustro, come dice la ricerca, saranno necessarie anche delle forzature: a partire da limiti sulle emissioni sempre più stringenti e progressivi, come previsto dall'impianto delle direttive Ue, per arrivare a un continuo incentivo, sotto forma di agevolazioni e bonus, da parte dei governi nazionali. Servirà, ovviamente, anche un potenziamento dei servizi, e in particolare della rete di ricarica. Con queste premesse, le nuove generazioni di Ev native, costruite su piattaforme ottimizzate, modulari e su larga scala, potrebbero ridurre di oltre un terzo il loro prezzo finale rispetto a quello attuale³⁵.

³⁴ Adattato da BloombergNEF (BNEF), 2020.

³⁵ Ibidem.

Possiamo quindi concludere che, l'analisi del Total Cost of Ownership mette in evidenza come la competitività economica dei veicoli a conduzione elettrica sia al giorno d'oggi una realtà matura, sul piano degli oneri gestionali, ma presenti ancora ingenti criticità per quanto riguarda principalmente investimento iniziale e tenuta del valore residuo. Inoltre, le differenti visioni tra l'approccio propositivo di analisti come BNEF e la Prudenza gestionale dei colossi dell'automotive ci indicano che il mercato si trova ancora in una fase di transizione.

In questo scenario caratterizzato da grande incertezza, la tecnologia Full Hybrid emerge oggi come soluzione di raccordo più efficiente, capace di congiungere benefici della trazione elettrica con stabilità economica e flessibilità d'uso tipici delle motorizzazioni termiche.

1.3.2 Economia del riciclo e gestione del fine vita.

Attualmente è in corso il processo di decarbonizzazione della nostra società e le batterie agli ioni di litio risultano essere fondamentali per tale transizione. Esse contengono materiali critici che rendono il loro riciclo un imperativo strategico; tuttavia, questo non è ancora una realtà industriale.

Il progetto Acrobat è finalizzato a sviluppare un processo di riciclo di batterie litio ferro fosfato, con l'obiettivo di recuperare oltre il 90% di materiali critici, con importanti conseguenze sia ambientali sia economiche.

Le batterie litio ferro fosfato (LFP) sono una particolare tipologia di batterie agli ioni di litio (LIBs) e si caratterizzano per una elevata stabilità e sicurezza ed una lunga durata; inoltre, esse non contengono cobalto e nichel, il che le rende meno costose rispetto ad altre tipologie di LIBs. Grazie a tali caratteristiche, le batterie LFP stanno occupando un segmento crescente del mercato: esse, infatti, vengono utilizzate nei sistemi di accumulo stazionario, nella mobilità elettrica ed anche in alcune applicazioni domestiche.

Le batterie LFP contengono materiali critici (CRM, critical raw materials), ossia materiali fondamentali per la nostra economia, ma non disponibili in Europa, in particolare litio, fosforo e grafite.

Per poter favorire l'indipendenza dell'Europa da tali approvvigionamenti, risulta necessario riciclare localmente tali materie prime da prodotti a fine vita.

Vi sono inoltre importanti questioni ambientali da considerare, poiché le LIBs contengono sostanze pericolose per l'ambiente, che potrebbero essere rimosse durante le operazioni di riciclo.

Tuttavia, ad oggi non esistono in Europa processi implementati su scala industriale specifici per le batterie LFP.

Nell'ambito del progetto Acrobat, VITO, SIM2 Institute of KU Leuven, Fraunhofer ILT, ENEA ed Accurec Recycling GmbH svilupperanno un processo di riciclo innovativo e sostenibile delle batterie LFP, al fine di recuperare CRMs da reimmettere nel processo produttivo. L'obiettivo finale è recuperare oltre il 90% di CRMs.

Il Progetto Acrobat, quindi, sottolinea l'importanza dell'obiettivo di riuscire a recuperare oltre il 90% di tali batterie realizzando in questo modo il cosiddetto Urban Mining (estrarre minerali dai prodotti vecchi invece che dalle miniere).

Questo obiettivo non è un mero imperativo ecologico, ma bensì una necessità economica con lo scopo di garantire l'indipendenza europea da approvvigionamenti esteri (principalmente Cina).

Osservando la questione dal punto di vista del consumatore, lo sviluppo di processi di riciclo su scala industriale sarebbe capace di trasformare le batterie LFP (una tipologia di batterie al litio, tra le più convenienti sotto vari aspetti) a fine vita, in una fonte di materie prime seconde, con l'obiettivo di stabilizzare i costi di produzione di veicoli elettrici nel lungo termine e di garantire che il veicolo dotato di tali batterie, anche al termine della sua utilità, mantenga un valore residuo legato ai materiali (molti critici) recuperabili, consentendo quindi di realizzare un'Economia Circolare³⁶.

Trovare applicazioni per queste batterie ancora utili può creare un valore significativo e, in definitiva, anche aiutare a far scendere il costo dello stoccaggio per consentire un'ulteriore integrazione delle energie rinnovabili nelle nostre reti.

Le batterie EV hanno una vita difficile. Soggette a temperature operative estreme, centinaia di cicli parziali all'anno e tassi di scarica variabili, le batterie agli ioni di litio

³⁶ Forte, F. (2023). Riciclo di batterie agli ioni di litio a fine vita: il progetto ACROBAT. ENEA.

nelle applicazioni EV si degradano fortemente durante i primi cinque anni di funzionamento e sono progettate per circa un decennio di vita utile nella maggior parte dei casi. Tuttavia, queste batterie possono vivere una seconda vita, anche quando non soddisfano più gli standard di prestazione EV, che in genere includono il mantenimento dell'80% della capacità utilizzabile totale e il raggiungimento di un tasso di autoscarica a riposo di solo circa il 5 per cento per un periodo di 24 ore. Dopo la rigenerazione, tali batterie sono ancora in grado di funzionare in modo sufficiente per servire applicazioni meno esigenti, come i servizi di stoccaggio di energia stazionari.

Quando una batteria EV raggiunge la fine della sua prima vita utile, i produttori hanno tre opzioni: possono smaltirla, riciclare i metalli preziosi o riutilizzarla.

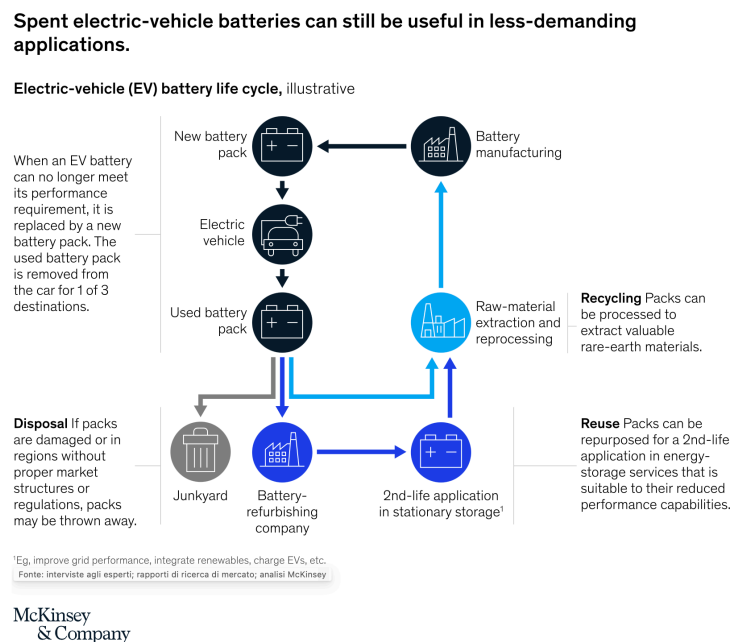


Figura 9: Ciclo di vita e opzioni di gestione del fine vita per le batterie dei veicoli elettrici³⁷.

Fonte: Adattato da McKinsey & Company, 2019

³⁷ Adattato da McKinsey & Company, 2019.

Il riutilizzo può fornire il massimo valore nei mercati in cui c'è domanda di batterie per applicazioni di accumulo di energia stazionarie che richiedono cicli di batterie meno frequenti (ad esempio, da 100 a 300 cicli all'anno). Sulla base dei requisiti di ciclo, tre applicazioni sono più adatte per le batterie EV di seconda vita: fornire una capacità di riserva di energia per mantenere l'affidabilità dell'alimentazione di un'utilità a un costo inferiore spostando risorse più costose e meno efficienti (ad esempio, vecchie turbine a gas a ciclo combinato), rinviare gli investimenti di trasmissione e distribuzione e sfruttare le opportunità di arbitraggio energetico immagazzinando energia rinnovabile per l'uso durante i periodi di scarsità, fornendo così una maggiore flessibilità della rete e rassodamento alla rete. Nel 2025, le batterie di seconda vita potrebbero essere dal 30 al 70 per cento meno costose rispetto a quelli nuovi in queste applicazioni, legando molto meno capitale per ciclo.

Tuttavia, per sbloccare questo nuovo pool di fornitura di batterie, è necessario superare diverse sfide nel riutilizzo delle batterie EV:

- Mancanza di standardizzazione: La varietà di chimiche e formati tra i diversi OEM (produttori) complica i processi di rigenerazione.
- Competitività dei prezzi: Il rapido calo dei costi delle batterie nuove rischia di erodere il vantaggio economico dell'usato.
- Incertezza normativa e tecnica: L'assenza di garanzie standardizzate sullo Stato di Salute (SoH) e di quadri normativi maturi genera incertezza sulla responsabilità tra produttore e acquirente finale.

Sebbene queste sfide siano significative, possono essere superate da un'azione mirata da parte dei fornitori, degli utenti finali e delle autorità di regolamentazione del settore, consentendo l'emergere di un'industria sostenibile delle batterie di seconda vita³⁸.

³⁸ Engel, H., Hertzke, P., & Siccardi, G. (2019). Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. McKinsey & Company.

Da quanto analizzato, emerge che la gestione del fine vita delle batterie al litio si afferma come una variabile economica fondamentale per la sostenibilità sul lungo periodo del Total Cost of Ownership.

Le analisi condotte, con particolare riferimento ai dati emersi dai progetti di ricerca di Acrobat e le analisi strategiche di McKinsey evidenziano che il passaggio da un modello di smaltimento lineare, ad un modello di smaltimento circolare, dà la possibilità di estrarre valore durante l'intero processo di ammortamento del bene.

I numeri non lasciano dubbi.

La Second Life offre l'opportunità di ammortizzare i costi iniziali utilizzando la batteria per compiti alternativi come l'accumulo energetico; l'Urban Mining invece, garantisce la sicurezza degli approvvigionamenti di materie critiche per i paesi occidentali, minimizzando quindi la dipendenza da paesi esteri come la Cina.

L'emergere di un mercato sostenibile del riciclo e uso alternativo di componenti, garantisce la stabilizzazione del valore residuo dei mezzi elettrici.

Lo scenario analizzato rende i veicoli a conduzione elettrica oltre che una scelta a basso impatto ambientale anche una scelta d'investimento sempre più resiliente e trasparente per il consumatore.

1.4 L'evoluzione della fiscalità: dal gettito delle accise al "Pay per Mile"

Un'analisi svolta dal Centro Studi UNEM per valutare la domanda di energia al 2030, vede una riduzione sostanziale di carburanti liquidi impiegati nella mobilità, stimata in circa 5 milioni di tonnellate rispetto ad oggi, quale saldo tra la contrazione dei prodotti fossili e lo sviluppo di quelli rinnovabili, e una crescente domanda di energia elettrica trascinata da oltre 4 milioni di auto elettriche pure (BEV) in analogia con le tendenze previste dall'ultimo PNIEC.

Se tali tendenze dovessero essere confermate, si avrebbe di conseguenza una riduzione del gettito fiscale derivante dalle sole accise sui carburanti che, sempre al 2030, si può stimare, pur continuando a tassare i carburanti liquidi rinnovabili quanto i fossili, in circa 3,8 miliardi di euro. Un valore che potrebbe superare i 9 miliardi di euro al 2040.

Restando al 2030, per compensare tali minori entrate, a meno di aumentare le accise su benzina e gasolio, già tra le più alte di Europa, l'altra via estrema sarebbe quella di rivedere l'attuale tassazione sulle ricariche destinate alle auto elettriche, con effetti rilevanti sulle tasche dei consumatori. Infatti, se oggi per fare 100 km con un'auto elettrica (BEV) si spende mediamente tra i 5 e i 6,5 euro, al 2030 questa spesa potrebbe quadruplicare considerato che il calo delle entrate fiscali si dovrebbe riproporzionare su circa 4,1 GWh di consumi elettrici legati al trasporto, con un aggravio stimato in circa 0,92 euro/kWh che, sommati ai 0,35 euro/kWh medi attuali, porterebbe il costo di una ricarica a 1,27 euro/kWh.

Considerando che una BEV, a seconda del modello, per fare 100 km consuma mediamente tra i 15 e i 19 kWh, per compensare il minor gettito fiscale la spesa per l'utente finale sarebbe infatti compresa tra un minimo di 19 euro e un massimo di oltre 24 euro, appunto quattro volte il costo attuale e il doppio rispetto a quello sostenuto oggi con un'auto ibrida a benzina.

Del resto, se l'Italia è tra i Paesi dove la penetrazione elettrica appare più lenta rispetto al resto d'Europa, è anche quella dove il gettito fiscale garantito dalla mobilità è sicuramente tra i più significativi³⁹.

Il rischio di un deficit miliardario nelle casse dello Stato impone dunque una transizione fiscale che sia parallela a quella tecnologica. Spaziando oltre i confini nazionali, il modello del Pay-per-mile proposto dal governo britannico offre una visione di come il principio del 'chi usa paga' possa sostituire le tradizionali accise nell'era della mobilità a zero emissioni.

eVED, ufficialmente chiamato Electric Vehicle Excise Duty, è la soluzione del governo del Regno Unito al calo delle entrate delle accise sul carburante con l'accelerazione dell'adozione dei veicoli elettrici. Piuttosto che pagare l'accisa annuale fissa sui veicoli, i conducenti di auto elettriche pagheranno in base alle miglia effettive percorse a partire da aprile 2028.

I conducenti di benzina e diesel attualmente pagano le accise sul carburante alla pompa (circa 6 pence per miglio). Dal 1° aprile 2028, i conducenti di veicoli elettrici pagheranno una tassa basata sulla distanza addebitata a 3 pence per miglio, la metà dell'equivalente delle accise sul carburante per i motori a combustione.

Il sistema prevede, per le auto elettriche a batteria, un corrispettivo di 3 pence per miglio mentre, per gli Ibridi Plug-In 1,5 pence per miglio. Inoltre, per proteggere la privacy non è richiesto il tracciamento GPS o la segnalazione della posizione.

Il sistema pay-per-mile rappresenta un cambiamento fondamentale nel modo in cui il Regno Unito tassa i veicoli. Man mano che sempre più conducenti abbracciano i vantaggi delle auto elettriche, le entrate tradizionali delle accise sul carburante, che attualmente contribuiscono a circa 25 miliardi di sterline all'anno, sono in calo. Il governo ha bisogno di finanziamenti sostenibili a lungo termine per infrastrutture stradali che funzionano in un panorama dei veicoli sempre più elettrificato.

³⁹ UNEM (15 novembre 2023). Nota Stampa: Accise e Mobilità Elettrica.

Molti hanno espresso confusione su come gli attuali tassi VED(Vehicle Excise Duty) interagiscono con il nuovo sistema eVED.

Per quanto riguarda la situazione attuale, da aprile 2025 fino a marzo 2028, i veicoli elettrici pagano, per il primo anno 10 sterline di tassa di possesso per veicoli, mentre dal secondo anno in poi 195 sterline di tassa di possesso per veicoli all'anno.

Durante questo periodo non è prevista nessuna tassa di chilometraggio. Ciò rappresenta un cambiamento significativo rispetto alla precedente esenzione di cui godevano i conducenti di auto elettriche, ma mantiene ancora vantaggi sostanziali rispetto ai veicoli a benzina e diesel.

Dopo aprile 2028, i veicoli elettrici pagheranno, sia il VED con tariffa standard da 195 sterline all'anno, sia eVED la nuova tassa sul chilometraggio fissata a 3 pence per miglio al massimo.

Esempio reale per un guidatore di 8.500 miglia:

- VED: £195
- eVED ($8.500 \times £0.03$): £255
- Tassa annuale totale: 450 sterline

Per quanto riguarda invece i veicoli a trazione termica, i conducenti di benzina e diesel attualmente pagano, per il VED 195 sterline all'anno come tariffa standard, come accisa sul carburante circa 480 sterline all'anno (per 8.500 miglia a 6 p per miglio), per un totale di 675 sterline

Anche con eVED incluso, le auto elettriche rimangono sostanzialmente più economiche dei loro equivalenti a benzina, con un risparmio di 225 sterline all'anno per il conducente medio.

Ma come funzionerà effettivamente il nuovo modello eVED?

Il sistema dà priorità alla semplicità integrandosi con i processi VED familiari attraverso tre semplici passaggi: stima annuale, pagamento anticipato e riconciliazione di fine anno.

La prima fase è quella della stima annuale dove, al momento del rinnovo della tassa di possesso sul veicolo il conducente stima il chilometraggio annuale per l'anno a venire. Questo è semplice: la maggior parte dei conducenti conosce le loro tipiche miglia annuali dai precedenti record MOT (Ministry of Transport test) o dai modelli di guida generali.

Il governo fornirà indicazioni sulle tecniche di stima, aiutando i conducenti che possono avere modelli di chilometraggio variabili o sono nuovi alla proprietà di veicoli elettrici. Ci sarà poi la flessibilità di adeguare le stime se le circostanze cambiano in modo significativo.

Dopodiché si effettua il pagamento dell'addebito stimato di eVED insieme al VED. Le opzioni di pagamento includono rate mensili, pagamenti semestrali e pagamento forfettario annuale.

Per concludere, alla fine dell'anno dopo aver inviato il chilometraggio effettivo, il DVLA (Driver and Vehicle Licensing Agency) calcola automaticamente, se il veicolo è stato guidato di più è dovuto un piccolo pagamento di bilanciamento, se invece è stato guidato meno si riceve un credito per l'eVED del prossimo anno.

Questo approccio "aiuta gli automobilisti a facilitare i pagamenti nel corso dell'anno e a ridurre la probabilità di grandi pagamenti di bilanciamento", secondo il documento di consultazione ufficiale. Il sistema è progettato per essere indulgente: piccole stime eccessive o sottostime non comporteranno sanzioni, solo aggiustamenti semplici alla fine dell'anno⁴⁰.

Dall'analisi di quanto appena citato emerge che questa trasformazione della fiscalità del mondo automobilistico rappresenta un punto fondamentale per il corretto svolgimento della transizione sostenibile.

⁴⁰ The Electric Car Scheme Team. (2024). Potential pay-per-mile road tax: What it means for UK drivers.

Ciò nonostante, l'incertezza legata ai futuri regimi di tassazione e sugli effettivi costi di gestione influisce marcatamente sui bilanci degli stati. Inoltre, influisce anche pesantemente sulle dinamiche d'acquisto e sulle strategie dei produttori.

Ed è proprio in questo contesto fortemente instabile sia economicamente che normativamente parlando che si inserisce l'analisi della strategia industriale applicata dalle case automobilistiche.

Davanti a tali incertezze, per le case automobilistiche diventa inevitabile proporre delle tecnologie capaci di alleviare, almeno in parte, i timori legati ad autonomia e svalutazione dell'usato percepiti dai consumatori.

1.5 Verso una nuova strategia industriale

1.5.1 La crisi del comparto automotive europeo: il caso Volkswagen e i limiti del paradigma Full Electric

L'azienda Volkswagen sta interrompendo la produzione di auto nel suo stabilimento di Dresda a causa della debole domanda, delle pressioni sui costi e della ristrutturazione.

La casa automobilistica tedesca Volkswagen cesserà la produzione nel suo stabilimento di Dresda nei prossimi giorni, segnando la prima chiusura delle attività in Germania negli 88 anni di storia dell'azienda, secondo il Daily Sabah.

La chiusura della linea di produzione arriva in mezzo a una significativa pressione sul flusso di cassa del gruppo a causa delle deboli vendite in Cina e in Europa, nonché dell'impatto delle tariffe statunitensi sulle esportazioni verso gli Stati Uniti.

L'impianto di Dresda ha operato a una capacità minima negli ultimi anni e i media locali hanno riferito a novembre che le prospettive dell'impianto erano estremamente limitate.

La decisione di interrompere la produzione fa parte di un più ampio programma di ristrutturazione in Germania, concordato con i sindacati, che prevede una riduzione di 35.000 dipendenti entro il 2030.

Volkswagen è stata sotto pressione a causa dell'aumento dei costi in Europa, di una transizione più lenta del previsto verso i veicoli elettrici e dell'aumento della concorrenza

da parte dei produttori cinesi, specialmente nel segmento dei veicoli elettrici. Il CFO della società, Arno Antlitz, ha precedentemente notato che il flusso di cassa netto nel 2025 potrebbe essere solo leggermente positivo, mentre la pressione finanziaria continuerà nel 2026. Gli analisti sottolineano come il gruppo debba investire contemporaneamente sia nella produzione di veicoli elettrici che nelle nuove generazioni di motori a combustione interna.

Va notato che la CE si sta preparando a rivedere il divieto de facto di vendita di nuove auto con motori a combustione interna dal 2035. Questa potrebbe essere il più grande allontanamento dell'UE dalla propria linea verde negli ultimi cinque anni.

Nel suo ultimo rapporto, EUROFER ha migliorato le sue previsioni per le dinamiche di produzione nell'industria automobilistica dell'UE nel 2025, aspettandosi un calo del 3,8% su base annua invece del precedente 4,3%. Nonostante il leggero miglioramento, le prospettive generali per il settore rimangono contenute a causa di problemi strutturali persistenti e rischi esterni⁴¹.

Il caso Volkswagen citato mette in evidenza come una strategia incentrata esclusivamente sul Full Electric possa esporre anche i Colossi dell'automotive a rischi insormontabili. Specialmente in un mercato che mostra segnali preoccupanti a causa degli ostacoli sia economici che infrastrutturali rimasti tuttora invariati. Visti i margini di profitto estremamente ridotti, ed in alcuni casi addirittura negativi, emerge a gran voce la necessità di spaziare anche su altre alternative.

Diventa di fondamentale importanza quindi osservare le case che hanno scelto una strada differente, affidandosi a tecnologie ibride.

Queste tecnologie ibride vengono utilizzate non solo come ponte per l'elettrico, ma come effettivo motore per rendere sostenibile sul lungo periodo la transizione all'elettrico.

⁴¹ GMK Center. (2024). Volkswagen shuts down factory in Germany for the first time in 88 years.

1.5.2 e:HEV - Una Tecnologia Ponte? Il ruolo dell'Ibrido nella transizione

Il produttore giapponese Honda ha dichiarato che ridurrà i suoi investimenti nelle aree dell'elettrificazione e del software dai 10 trilioni di yen precedentemente previsti a 7 trilioni di yen entro il 2030. In considerazione dell'attuale rallentamento del mercato, Honda si aspetta che le vendite di BEV scendano al di sotto della soglia del 30% precedentemente previsto nel 2030.

La società intende ancora raggiungere i suoi obiettivi di "neutralità del carbonio per tutti i prodotti e le attività aziendali" e "zero incidenti mortali di collisione stradali" entro il 2050. Tuttavia, l'azienda non crede che raggiungerà il suo obiettivo del 2030 del 30% di vendite di veicoli elettrici. Citando un'elevata domanda di mercato per i modelli HEV, Honda sta ora riallineando la sua strategia, in modo che per lo più modelli HEV di nuova generazione saranno introdotti sul mercato nel 2027 in poi, come propulsore che giocherà un ruolo chiave durante il periodo di transizione verso la divulgazione dei veicoli elettrici e migliorerà ulteriormente la sua gamma HEV.

Nell'ambito del nuovo piano strategico, Honda prevede di migliorare la redditività con la continua espansione della sua attività motociclistica, insieme agli effetti di riduzione dei costi nel settore automobilistico associati all'adozione del sistema e delle piattaforme e:HEV di nuova generazione e a un aumento delle vendite unitarie dei modelli HEV. In particolare, Honda cita l'obiettivo di migliorare la tecnologia HEV per ottimizzare il risparmio di carburante del 10%, oltre a ridurre i costi per il sistema ibrido stesso del 50%, almeno rispetto ai modelli del 2018. In termini di sviluppo del modello, la società scrive che lancerà 13 modelli HEV a livello globale in un arco di quattro anni a partire dal 2027⁴².

Honda ha iniziato a prendere iniziative, in anticipo sui tempi, per adottare tecnologie di elettrificazione alle sue automobili in vari modi, al fine di ridurre le emissioni di CO₂,

⁴² Randall, C. (2025). Honda to cut back on EV investments. *electrive*.

che Honda considera una sfida critica per un produttore di prodotti per la mobilità. Tra queste tecnologie di elettrificazione, i sistemi ibridi-elettrici sono i più familiari e Honda sta espandendo ulteriormente la sua gamma di modelli ibridi-elettrici.

Un veicolo ibrido-elettrico è dotato di motori elettrici oltre a un motore termico e raggiunge un eccellente risparmio di carburante utilizzando in modo efficiente queste due fonti di energia.

Il sistema ibrido-elettrico e:HEV è stato creato combinando tutte le tecnologie di motore ed elettrificazione che Honda ha accumulato fino ad oggi e adottando una serie di nuove tecnologie per ottenere un risparmio di carburante estremamente elevato e un nuovo livello di divertimento di guida.

Ma come funziona effettivamente un ibrido e:HEV?

Il motore elettrico muove il veicolo per l'intera gamma di velocità e il motore a combustione interna (ICE) viene attivato solo durante la navigazione ad alta velocità. Questo sistema raggiunge un eccellente risparmio di carburante offrendo al contempo il divertimento esilarante e sofisticato di guidare unico solo per e:HEV, irraggiungibile con un sistema solo ICE.

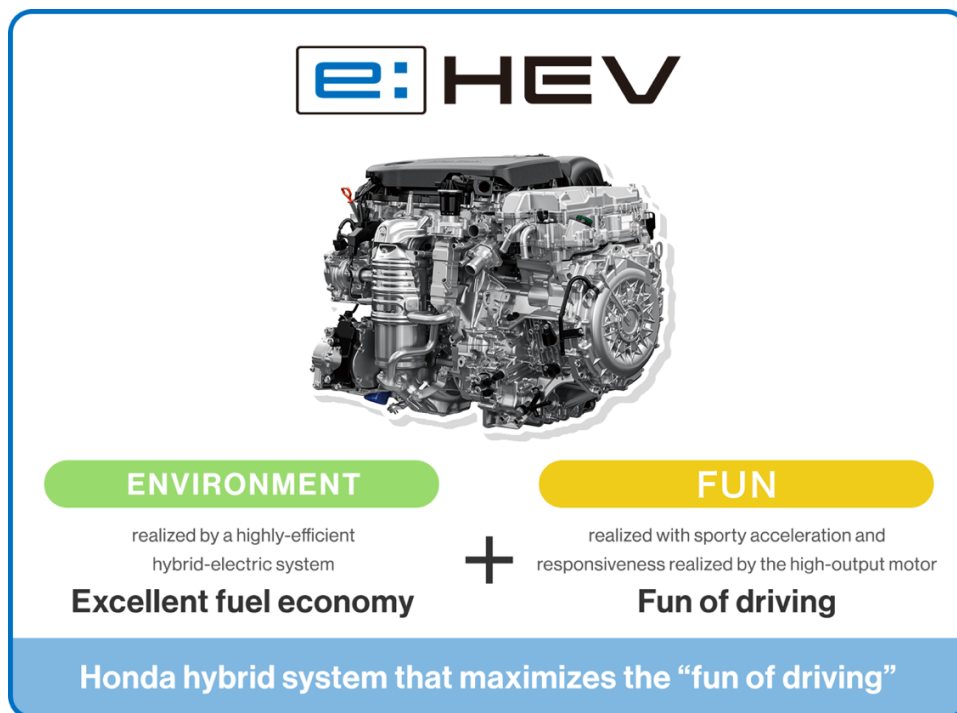


Figura 10: Ottimizzazione del trade-off tra sostenibilità ambientale e performance nel sistema e:HEV⁴³.

Fonte: Adattato da Honda Motor Co., Ltd., 2024

Un ICE può generare un'elevata potenza ad alta gamma di giri/min, ma ha difficoltà a generare grandi coppie a bassa velocità, ad esempio quando l'auto inizia a muoversi da un arresto. A causa di questa caratteristica, il risparmio di carburante dei veicoli ICE non è molto elevato nelle aree urbane dove sono richieste frequenti soste e partenze. D'altra parte, un motore elettrico può generare la massima coppia dalla gamma a bassa velocità, ad esempio quando il veicolo inizia a muoversi. Utilizzando un motore elettrico a bassa velocità e un ICE ad alta velocità, il veicolo ibrido-elettrico raggiunge un'elevata efficienza e quindi un elevato risparmio di carburante.

In generale, ci sono tre tipi di sistemi ibridi: 1) un ibrido in serie, in cui il motore termico genera elettricità e il motore elettrico muove il veicolo; 2) un ibrido parallelo, in cui il motore termico è la fonte primaria di trazione mentre quello elettrico funge da assistente;

⁴³ Adattato da Honda Motor Co., Ltd., 2024

e 3) un ibrido in serie-parallelo, in cui entrambi i motori agiscono insieme per muovere il veicolo.

Per la gamma di velocità da bassa a media, dove il motore elettrico ha un vantaggio rispetto al motore termico, l'e:HEV funziona come un ibrido in serie e muove il veicolo con il motore elettrico. Durante la crociera ad alta velocità, dove il motore termico ha un vantaggio sul motore elettrico, l'e:HEV funziona come un ibrido parallelo e il motore a combustione che è semplicemente e direttamente collegato agli pneumatici muove principalmente il veicolo. In altre parole, l'e:HEV è un sistema ibrido intelligente unico di Honda, che sfrutta sia i sistemi ibridi in serie che quelli paralleli. Mentre il sistema ibrido in serie-parallelo regola il rapporto tra motore termico e motore elettrico in base alle condizioni di guida, l'e:HEV utilizza un motore elettrico efficiente per la maggior parte delle situazioni di guida quotidiane. Ci sono due modalità di azionamento del motore: modalità EV drive e modalità Hybrid drive. L'e:HEV realizza una guida elettrica di alta qualità e un'eccellente efficienza per entrambe le modalità presentando una struttura semplice senza un ripartitore di potenza complesso.

Il sistema ibrido a due motori Honda è costituito da un motore di trazione e da un motore generatore, che convertono in modo efficiente la potenza del motore in elettricità, forniscono energia per guidare gli pneumatici e caricare la batteria, rigenerando anche l'elettricità durante la decelerazione. Il motore di trazione utilizza un magnete privo di terre rare pesanti⁴⁴.

Alla luce dei dati appena citati, il riallineamento strategico della casa Honda ci dimostra come la flessibilità economica sia diventata indispensabile per superare l'attuale rallentamento del mercato dei veicoli full electric. Honda, infatti, ha puntato su un'architettura semplificata e sull'abbattimento del 50% dei costi dei sistemi di guida ibridi; in questo modo la casa giapponese non si è limitata semplicemente a rispondere ad una domanda di mercato transitoria. Essa costituisce in questo modo una transizione che possa essere definita finanziariamente sostenibile.

⁴⁴ Honda Motor Co. (2024). Two-Motor Hybrid System: Honda e:HEV.

L'efficienza in tutte le fasi di guida del sistema e:HEV e l'attenzione verso la riduzione della vulnerabilità della catena del valore, ci confermano che l'ibrido non è più una mera tecnologia di transizione. Possiamo affermare che l'ibrido è il motore della redditività della casa per giungere verso gli obiettivi preposti a livello Europeo e non solo fissati al 2050.

CAPITOLO 2: L'idrogeno e i vettori energetici alternativi

Nello scorso capitolo è stato analizzato il dualismo propulsione elettrica – motore termico.

Emerge ora la necessità di individuare una soluzione capace di coniugare i vantaggi di ambo i sistemi. Ed è qui che l'Idrogeno entra in campo, configurandosi come vettore energetico capace di offrire una risposta alle limitazioni legate all'autonomia e ai tempi di rifornimento, soprattutto per settori in cui l'elettrificazione risulta non essere efficace.

Nel corso dell'analisi esploreremo il ruolo che l'idrogeno può svolgere in questa transizione partendo dalla complessità di produzione e dai costi associati alla scalabilità dell'idrogeno verde.

In questo capitolo metteremo a confronto diversi approcci tecnologici:

dalle celle a combustione all'applicazione della combustione diretta di idrogeno sfruttando i motori tradizionali. Tra i vari vantaggi la combustione diretta di idrogeno permetterebbe anche di salvaguardare l'industria meccanica esistente.

Infine, verranno esaminate le applicazioni nei trasporti pesanti e le sfide infrastrutturali necessarie.

2.1 Produzione e costi: la sfida della sostenibilità

L'idrogeno è l'elemento chimico più diffuso in tutto l'Universo ed è l'elemento chiave alla base della vita sulla Terra.

Quando si parla di “idrogeno” nel contesto energetico si intende in realtà la molecola di idrogeno H_2 , molecola presente allo stato gassoso in condizioni ambiente e in realtà molto poco diffusa in atmosfera. L'importanza della molecola idrogeno risiede nella possibilità di produrre energia, termica mediante combustione o elettrica mediante elettrolisi, in maniera pulita senza emissione di anidride carbonica. La difficoltà risiede nel fatto che la molecola di idrogeno è scarsamente presente in Natura e va quindi prodotta, consumando a sua volta energia e con un costo associato. Il bilancio tra le emissioni di CO_2 nella produzione della molecola di idrogeno e i costi complessivi per la sua generazione, trasporto e stoccaggio è alla base dell'intero ruolo dell'idrogeno nella transizione energetica.

La tematica della produzione di idrogeno ha portato a definire una serie di “colori” con i quali distinguere i diversi processi produttivi dell'idrogeno in base alla fonte energetica utilizzata e, conseguentemente, alle relative emissioni di CO_2 in atmosfera. Nel Report saranno descritti in particolare le seguenti tecnologie di produzione, rispettivamente “marrone”, “grigio”, “blu” e “verde” (e “giallo”), in quanto le uniche con uno stadio di sviluppo significativo ad essere presenti oggi sul mercato.

Oggi la quasi totalità dell'idrogeno prodotto ha un forte e negativo impatto sull'ambiente, immettendo circa 5-10 ton CO_2 /ton H_2 nel caso dello SMR o peggio 18-20 ton CO_2 /ton H_2 nel caso della gassificazione.

D'altra parte, i costi di produzione dell'idrogeno mediante questi processi sono bassi, rispettivamente 1-2 \$/kg H_2 per lo SMR (Steam Methane Reforming) e 1-1,5 \$/kg H_2 per la gassificazione.

Il tema centrale della produzione dell'idrogeno è concentrato in come produrre idrogeno per gli attuali usi e per gli usi futuri come il trasporto pesante, il riscaldamento urbano o la decarbonizzazione di alcuni processi industriali come la siderurgia, a costi competitivi con gli attuali, ma senza emissioni di CO₂ in atmosfera.

Con idrogeno blu si intende la produzione di idrogeno da SMR o, più raramente, da gassificazione accoppiata a processi di sequestro e cattura della CO₂ prodotta, (Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS). Esistono una serie di impianti pilota a livello industriale per la produzione di idrogeno blu che, con approcci diversi, hanno dimostrato la possibilità di arrivare a un costo complessivo di produzione dell'idrogeno blu attorno ai 2-2,5 \$/kg H₂, con circa il 90% come massimo livello di cattura dell'anidride carbonica generato nel processo – corrispondente a una soglia di emissioni di circa 5 ton CO₂/ton H₂. Il problema è che a livello europeo, in accordo alle attuali soglie di emissioni stabilite dalla RED II, la produzione di idrogeno pulito deve mantenere la propria quota di emissioni al di sotto della 3 ton CO₂/ton H₂. Oggi l'idrogeno blu non sarebbe in grado di soddisfare i limiti imposti dalla RED II.

L'idrogeno verde, ovvero la produzione di idrogeno mediante elettrolisi dell'acqua utilizzando elettricità prodotta da fonti rinnovabili, è ad oggi l'unica tecnologia presente sul mercato in grado di rispettare appieno i limiti di emissioni imposte dalla RED II: l'idrogeno verde è quindi il pilastro su cui è centrata tutta la Strategia Europea dell'idrogeno.

L'idrogeno verde si basa sulla rottura della molecola dell'acqua H₂O in una cella elettrolitica, sviluppando ai due elettrodi rispettivamente H₂ e O₂. La produzione di idrogeno verde avviene quindi alimentando mediante elettricità prodotta da fonte rinnovabile una serie di celle elettrolitiche in serie, denominata stack, che consumano acqua e producono idrogeno e ossigeno.

Esistono diverse tipologie di elettrolizzatori. In sintesi, il cuore della produzione dell'idrogeno verde è rappresentato dall'elettrolizzatore le cui diverse tecnologie

costruttive sono in gara per abbassare i valori della CAPEX e delle OPEX, in particolare il consumo di energia elettrica.

La gara tra le diverse tecnologie per gli elettrolizzatori è molto aperta e il margine di riduzione dei costi molto ampio, in particolare con la crescita dell'industrializzazione dei processi produttivi e con la scala degli acquisti.

	Marrone	Grigio	Blu	Verde
Fonte	Carbone	Gas metano	Carbone/Gas metano	Energia elettrica rinnovabile
Pro	- Basso costo materia prima - Tecnologia matura e diffusa nel mercato	- Basso costo materia prima - Tecnologia matura e diffusa nel mercato	- Riduzione delle emissioni - Soluzione transitoria verso l'idrogeno verde	Emissioni nulle
Contro	Emissioni molto elevate	Emissioni elevate	Emissioni non nulle	- Costo elevato delle tecnologie - Attuale capacità installata inferiore al fabbisogno
Emissioni	18-20 kgCO ₂ /kgH ₂	9-10 kgCO ₂ /kgH ₂	Maggiore di 5 kgCO ₂ /kgH ₂ *	0 kgCO ₂ /kgH ₂
LCOH attuale	1 - 1,5 USD/kgH ₂	1 - 2 USD/kgH ₂	2 - 2,5 USD/kgH ₂	2,5 - 7 USD/kgH ₂

**Si considera l'intero processo e si ipotizza l'utilizzo di combustibili fossili per alimentare energeticamente il processo di Carbon Capture e Storage*

Figura 11: Confronto dei parametri tecnici, economici ed ambientali delle principali tipologie di idrogeno⁴⁵.

Fonte: Adattato da InfobuildEnergia, 2024

Ma come è organizzata oggi la filiera dell'idrogeno verde e quali sono le condizioni economiche per la sua crescita?

Nei prossimi anni sono stati annunciati ingenti investimenti in termini di costruzione di impianti per produrre idrogeno a «bassa emissione»; infatti, si dovrebbe passare da una capacità attuale di circa 700 MW a oltre 36,5 GW al 2030.

⁴⁵ Adattato da InfobuildEnergia, 2024.

Le tecnologie principali sono l'ATR+CCS (*Autothermal Reforming*) per l'idrogeno blu, di cui sono stati annunciati progetti con una capacità complessiva pari a 13,1 GW e gli elettrolizzatori PEM per l'idrogeno verde, che vedranno una crescita di installato pari a 10,4 GW. L'analisi svolta ha permesso di osservare come allo stato attuale, senza nessuna incentivazione o senza una qualche forma di «prescrizione» all'utilizzo di una quota di idrogeno verde, gli utilizzatori finali, che attualmente utilizzano metano o idrogeno grigio, non hanno alcuna convenienza economica nello "switchare" all'idrogeno verde.

Il costo finale di produzione dell'idrogeno è legato soprattutto ai costi dei consumi elettrici dell'elettrolizzatore e dell'eventuale compressore. Le eventuali misure di incentivazione, a differenza di quanto fatto in passato per le FER (Fonti Energetiche Rinnovabili), dove si è puntato ad abbattere le CAPEX, dovrebbero puntare ad abbattere il costo dell'energia elettrica utilizzata dall'elettrolizzatore, al fine di rendere comparabile il costo dell'idrogeno verde con quello grigio.

Ad oggi, per un operatore che valutasse la possibilità di realizzare un impianto fotovoltaico o eolico in presenza di incentivi FER 1 (incentivi legati all'immissione in rete) non risulterebbe economicamente conveniente accoppiare il proprio impianto ad un elettrolizzatore. Diversa potrebbe essere la situazione se esistesse una forma di incentivazione ad hoc in merito all'energia prodotta da un impianto FER e autoconsumata in loco dall'elettrolizzatore.

Alla luce di tutte queste considerazioni, si conferma ancora la necessità da parte dell'Italia di finalizzare la propria Strategia nazionale per l'idrogeno, definendo chiaramente gli obiettivi che si vogliono raggiungere e i percorsi per raggiungerli. Inoltre, al fine di ottimizzare lo sviluppo «primordiale» del mercato, potrebbe essere necessario creare nuovi sistemi di incentivazione o modificare gli attuali, ma anche avviare possibili progetti pilota volti a valutare le differenti configurazioni lato produzione, trasporto e utilizzo finale.

Gli obiettivi per il settore dell'idrogeno dovrebbero essere integrati a loro volta all'interno della roadmap di decarbonizzazione prevista dal Fit for 55.

Appare indispensabile, quindi, implementare un percorso volto ad attuare azioni di policy per permettere una crescita delle rinnovabili sul territorio italiano coerente non solo con gli obiettivi presenti nel Fit for 55, ma anche con la volontà di creare (come descritto all'interno delle linee guida dell'Hydrogen Strategy) un mercato relativo all'idrogeno verde⁴⁶.

È il momento giusto per attingere al potenziale dell'idrogeno per svolgere un ruolo chiave in un futuro energetico pulito, sicuro e conveniente. Su richiesta del governo del Giappone sotto la sua presidenza del G20, l'Agenzia internazionale dell'energia (IEA) ha prodotto questo rapporto storico per analizzare lo stato attuale dell'idrogeno e per offrire indicazioni sul suo sviluppo futuro. Il rapporto rileva che l'idrogeno pulito sta attualmente godendo di uno slancio politico e commerciale senza precedenti, con il numero di politiche e progetti in tutto il mondo in rapida espansione.

Oggi ci sono circa 50 obiettivi, mandati e incentivi politici che supportano direttamente l'idrogeno, con la maggior parte focalizzata sui trasporti. Ora è il momento di aumentare le tecnologie e ridurre i costi per consentire all'idrogeno di diventare ampiamente utilizzato. Le raccomandazioni pragmatiche e attuabili ai governi e all'industria che vengono fornite renderanno possibile sfruttare appieno questo crescente slancio.

L'idrogeno può aiutare ad affrontare varie sfide energetiche critiche. Offre modi per decarbonizzare una serie di settori – tra cui il trasporto a lungo raggio – dove si sta dimostrando difficile ridurre significativamente le emissioni. Può anche aiutare a migliorare la qualità dell'aria e rafforzare la sicurezza energetica.

Nonostante gli obiettivi climatici internazionali molto ambiziosi, le emissioni globali di CO2 legate all'energia hanno raggiunto un massimo storico nel 2018.

L'idrogeno è versatile. Le tecnologie già disponibili oggi consentono all'idrogeno di produrre, immagazzinare, spostare e utilizzare l'energia in modi diversi. Un'ampia varietà di combustibili è in grado di produrre idrogeno, tra cui energie rinnovabili, nucleare, gas naturale, carbone e petrolio.

⁴⁶ InfobuildEnergia (2024). Idrogeno verde, blu, grigio: facciamo chiarezza.

Il gas naturale è attualmente la fonte primaria di produzione di idrogeno, rappresentando circa tre quarti della produzione globale annuale di idrogeno di circa 70 milioni di tonnellate.

Questo rappresenta circa il 6% del consumo globale di gas naturale. Il gas è seguito dal carbone, a causa del suo ruolo dominante in Cina, e una piccola frazione è prodotta dall'uso di petrolio ed elettricità.

Un futuro di energia pulita richiede sia la cattura di CO₂ dalla produzione di idrogeno da combustibili fossili sia una maggiore fornitura di idrogeno da elettricità pulita.

L'idrogeno può essere trasportato come gas da gasdotti o in forma liquida da navi, proprio come il gas naturale liquefatto (GNL). Può essere trasformato in elettricità e metano per alimentare le case e l'industria alimentare, e in carburanti per auto, camion, navi e aerei.

L'idrogeno può consentire alle energie rinnovabili di fornire un contributo ancora maggiore. La molecola di idrogeno è una delle opzioni principali per lo stoccaggio di energia da fonti rinnovabili e sembra promettente per essere un'opzione a basso costo per lo stoccaggio di elettricità per giorni, settimane o addirittura mesi.

Con un settore energetico globale in evoluzione, la versatilità dell'idrogeno sta attirando un maggiore interesse da parte di un gruppo eterogeneo di governi e aziende. Gli investimenti nell'idrogeno possono aiutare a promuovere nuovi sviluppi tecnologici e industriali nelle economie di tutto il mondo, creando posti di lavoro qualificati.

Oggi, viene utilizzato principalmente nella raffinazione del petrolio e per la produzione di fertilizzanti. Per dare un contributo significativo alle transizioni di energia pulita, deve essere adottato anche in settori in cui è quasi completamente assente al momento, come i trasporti, gli edifici e la produzione di energia⁴⁷.

⁴⁷ IEA (2019). The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities.

2.2 Tecnologia FCEV e motori a combustione interna (H2 ICE)

Toyota crede fermamente che sia troppo presto per concentrarsi su un'unica soluzione a emissioni zero motivo per cui sta sviluppando contemporaneamente la tecnologia Fuel Cell a idrogeno e la combustione a idrogeno insieme alla tecnologia Full Electric.

I veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV) alimentati a idrogeno hanno un ruolo unico nella decarbonizzazione dei trasporti e nell'economia più ampia. Sono fondamentali per fornire zero emissioni in molti tipi di trasporto su strada, dalle autovetture come la Toyota Mirai, ai furgoni, camion e autobus.

Per oltre 30 anni, Toyota ha investito in modo significativo nella sua tecnologia di celle a combustibile, di cui è leader a livello mondiale. Invece di utilizzare l'energia dall'elettricità immagazzinata in una batteria, i veicoli elettrici a celle a combustibile a idrogeno (FCEV) generano la loro elettricità attraverso una reazione chimica tra idrogeno e ossigeno in una pila di celle a combustibile. È un processo che porta a zero emissioni a parte l'acqua. Il rifornimento del serbatoio di idrogeno da una pompa richiede meno di cinque minuti. Una volta sulla strada, un FCEV offre un viaggio a emissioni zero che è sicuro, conveniente e piacevole come in un veicolo convenzionale.

L'enorme potenziale delle FCEV e l'uso più ampio dell'idrogeno dipendono da due fattori:

la disponibilità di idrogeno verde prodotto da energie rinnovabili;

e un'infrastruttura con una rete di stazioni di rifornimento di idrogeno in tutta Europa.

Questi fattori critici sono riconosciuti all'interno del Green Deal dell'UE, dove l'idrogeno è identificato come una delle priorità chiave per raggiungere la neutralità del carbonio. Toyota si impegna negli sforzi coordinati di tutte le case automobilistiche, fornitori di energia, governi e autorità pubbliche per aiutare a sviluppare infrastrutture nazionali ed europee di idrogeno che supporteranno tutti i FCEV.

Toyota ha iniziato lo sviluppo di FCEV a idrogeno nel 1992. È stata introdotta con successo la berlina Toyota Mirai sui mercati mondiali nel 2014. L'ultima generazione di Mirai, lanciata nel 2021, porta la tecnologia FCEV a un livello superiore. Il suo sistema di celle a combustibile completamente ridisegnato è più leggero e potente. In combinazione con un imballaggio intelligente e una migliore efficienza aerodinamica, ha esteso l'autonomia di guida a circa 650 km, senza emissioni diverse dall'acqua pura.

Per quanto riguarda il funzionamento, una cella a combustibile preleva l'idrogeno da un serbatoio pressurizzato, dopo di che reagisce con l'ossigeno per produrre elettricità per alimentare un motore elettrico. Il processo si svolge in una cella a combustibile PEM (Polymer Electrolyt Membrane) composta da gruppi di piastre sottili, separate da membrane⁴⁸.

La Toyota ha reso nota un'ulteriore peculiarità per quanto riguarda il sistema di filtraggio dell'aria. L'aria fuoriuscente dallo scarico della Toyota Mirai di seconda generazione risulta essere più pulita di quella che entra, generando un effetto di “emissioni negative”.

Come preannunciato la Toyota mostrando una visione lungimirante non solo non si è limitata a sviluppare motori a conduzione elettrica andando a spaziare anche nel mondo dell'idrogeno, ma anche all'interno del mondo dell'idrogeno non si è limitata ad una singola tecnologia. Infatti, oltre allo sviluppo di tecnologie FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) Toyota ha investito su un altro tipo di motore alimentato ad idrogeno, l'ICE H2 (Hydrogen Internal Combustion Engine).

Gli ingegneri di Toyota hanno equipaggiato il motore turbo a 3 cilindri da 1,6 litri della GR Corolla con la tecnologia del motore a iniezione diretta di idrogeno ad alta pressione derivata dall'attività di sport motoristici. Hanno aggiunto il know-how di imballaggio del serbatoio di idrogeno della Toyota Mirai, ottenendo come risultato un prototipo di idrogeno Corolla Cross in grado di trasportare cinque passeggeri e i loro bagagli⁴⁹.

⁴⁸ Toyota Europe (2024). Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV).

⁴⁹ Toyota Europe (2022). Toyota Corolla Cross Hydrogen Concept: a prototype that could be another step towards hydrogen.

I vantaggi chiave della combustione di idrogeno includono la capacità di sfruttare le tecnologie esistenti dei motori a combustione interna, i tempi di rifornimento rapidi e la chiara riduzione dell'uso e della necessità di elementi di fornitura limitati come litio e nichel. Adattando le tecnologie esistenti e sfruttando ulteriormente gli investimenti esistenti, la combustione dell'idrogeno potrebbe portare a soluzioni di riduzione delle emissioni diffuse e accessibili più velocemente⁵⁰.

Si può quindi affermare che c'è una chiara opportunità per le auto a combustione di idrogeno negli sport motoristici!

Infatti, sfruttando questa nuova tecnologia Toyota ha partecipato all'intera stagione 2022 delle gare Super Taikyu con una GR Corolla H2 a combustione di idrogeno. Queste gare intensamente competitive si sono rivelate il banco di prova perfetto. Entro la fine della stagione la potenza di combustione dell'auto era aumentata del 24% e la coppia del 33%. L'autonomia si era ampliata del 30% e il tempo di rifornimento ridotto da 5 minuti a 90 secondi! Con l'auto che offriva prestazioni dinamiche alla pari con un motore a benzina convenzionale⁵¹.

⁵⁰ Toyota Newsroom (2022). Toyota Corolla Cross Hydrogen Concept l'approccio multi-tecnologico di Toyota verso le zero emissioni.

⁵¹ Toyota Europe (2022). Toyota Corolla Cross Hydrogen Concept: a prototype that could be another step towards hydrogen.

Caratteristica	Full Hybrid (HEV) – Toyota Prius	Full Electric (BEV) – Toyota bZ4X	Hydrogen (FCEV) – Toyota Mirai	Hydrogen (H2 ICE) – Corolla Cross H2 (Prototipo)
Alimentazione	Benzina + Energia recuperata	Energia da accumulo (ioni di litio)	Idrogeno (H2)	Idrogeno (H2)
Modalità Conversione	Motore termico + Motore elettrico	Motore elettrico	Cella a combustibile (PEM)	Motore a combustione interna (Pistoni)
Emissioni Scarico	Ridotte (circa 85-100 g/km di CO ₂)	Zero	solo vapore acqueo	Quasi Zero (solo tracce di ossidi di azoto)
Tempo Rifornimento	3-5 minuti.	30-60 minuti (con ricarica Fast DC)	Meno di 5 minuti	Da 90 secondi a 5 minuti
Autonomia	+/- 800 - 1000 km	Circa 400 - 500 km. (in generale 400-700)	Circa 650 km	Circa 200 km (in fase di sviluppo)
Materiali Critici	Basso impiego di batterie al Litio	Alto impiego di Litio, Nichel e Cobalto	Platino (cella) e scarso impiego di Litio	Riduzione drastica di materiali rari per batterie

Tabella 1: Analisi comparativa delle architetture powertrain e dei relativi parametri energetici-ambientali⁵².

Fonte: Elaborazione dell'autore su dati Toyota Newsroom e standard WLTP.

⁵² Elaborazione dell'autore su dati Toyota Newsroom e standard WLTP.

2.3 Applicazioni strategiche: dai trasporti pesanti al ferroviario

Il sistema a celle a combustibile di Toyota presenta la flessibilità necessaria per essere impiegato in un'ampia gamma di applicazioni legate all'idrogeno. I moduli compatti Toyota sono già utilizzati in diversi veicoli di grandi dimensioni, come l'autobus Toyota Sora in Giappone e gli autobus Caetano in Portogallo. Toyota sta inoltre dimostrando l'efficacia dell'integrazione di questa tecnologia nei mezzi pesanti, con test attualmente in corso su treni, imbarcazioni e carrelli elevatori. Oltre al settore dei trasporti, i moduli Toyota vengono integrati in generatori stazionari per fornire energia a stabilimenti industriali, grandi eventi o per la gestione delle emergenze. Il focus è rivolto alle applicazioni in cui le celle a combustibile a idrogeno offrono un chiaro vantaggio competitivo⁵³.

Il progetto ZANZEFF "Shore to Store" ha dimostrato che i camion elettrici a celle a combustibile possono eguagliare le prestazioni del diesel per fornire un'alternativa a emissioni zero pronta per la distribuzione commerciale.

Toyota Motor North America e Kenworth Truck Company hanno dimostrato le capacità dei loro veicoli elettrici a celle a combustibile di classe 8 (FCEV) progettati congiuntamente come potenziale sostituzione a emissioni zero di camion diesel con il completamento delle loro operazioni nel progetto Zero- and Near-Zero Emissions Freight Facilities (ZANZEFF) "Shore to Store" presso il porto di Los Angeles, il bacino di Los Angeles e l'Inland Empire.

L'obiettivo principale per la partecipazione di Toyota e Kenworth al progetto era quello di eguagliare quasi le prestazioni dei camion drayage⁵⁴ alimentati a diesel eliminando al contempo le emissioni per fornire una soluzione sostenibile nel trasporto pesante. La linea di base per il camion Toyota-Kenworth T680 FCEV – nome in codice "Ocean" – era un

⁵³ Toyota Europe (2024). Toyota Fuel Cell: Fuel cell applications.

⁵⁴ veicoli pesanti specializzati nel trasporto a breve distanza di container marittimi.

motore diesel del 2017 che operava a circa 200 miglia al giorno. Il T680 FCEV ha un'autonomia di circa 300+ miglia quando è completamente carico fino a 82.000 libbre (circa 37 tonnellate). Grazie all'assenza di tempi morti per la ricarica tra i turni e a un tempo di rifornimento ridotto di soli 15-20 minuti, gli FCEV potrebbero eseguire più turni al giorno e coprire fino a 400-500 miglia.

I camion Ocean hanno ridotto i gas serra di 74,66 tonnellate di CO₂ per camion all'anno rispetto al motore diesel di base.

Il successo dei dieci camion nel servire i clienti del mondo reale è stato il risultato di una stretta collaborazione tra diversi membri del progetto, tra cui Kenworth e Toyota, The Port of Los Angeles come leader del progetto, Shell per l'infrastruttura del combustibile a idrogeno e una sovvenzione del California Air Resource Board (CARB).

Joe Adams, ingegnere capo Kenworth, ha dichiarato: "Abbiamo chiaramente dimostrato che l'idrogeno è un carburante pulito praticabile in grado di alimentare il trasporto commerciale per i clienti, abbinando le prestazioni del diesel in termini di autonomia e potenza, con un rifornimento rapido per tempi di inattività minimi e un funzionamento regolare e silenzioso"⁵⁵.

Il progetto 'Shore to Store' ha rappresentato uno dei più ampi casi di studio al mondo per la convalida del modello in condizioni reali. L'iniziativa ha dimostrato l'applicazione pratica della tecnologia a celle a combustibile a idrogeno su vasta scala, all'interno di un quadro operativo che permette alle strutture logistiche di organizzare i futuri flussi di merci “dalla costa al punto vendita” (appunto Shore to Store).

Con il completamento di questo progetto, la porta è ora aperta per l'adozione più ampia della tecnologia per l'uso in altre applicazioni pesanti, tra cui l'aumento dell'uso di camion pesanti nel trasporto commerciale⁵⁶.

Un treno a idrogeno è un veicolo ferroviario alimentato da celle a combustibile, che convertono l'idrogeno in elettricità per guidare i motori del treno. Come parte della spinta

⁵⁵ Toyota Pressroom (2022). Toyota, Kenworth Prove Fuel Cell Electric Truck Capabilities with Successful Completion of Truck Operations for ZANZEFF Project.

⁵⁶ Ibidem.

globale per la decarbonizzazione ferroviaria, i treni a idrogeno offrono un'alternativa pulita al diesel, specialmente su linee non elettrificate.

Nel 2016 Alstom ha presentato per la prima volta il treno a idrogeno Coradia iLint, treno regionale con zero emissioni dirette di carbonio che rappresenta una vera alternativa alla tradizionale propulsione termica. Con ciò Alstom si è posizionato come il primo produttore ferroviario al mondo a sviluppare un treno passeggeri basato sulla tecnologia dell'idrogeno.

In funzione, questo treno non produce emissioni CO₂ ed emette solo acqua. Il treno alimentato ad idrogeno Coradia iLint è speciale per la sua combinazione di diversi elementi innovativi come la conversione di energia pulita, lo stoccaggio flessibile di energia nelle batterie e la gestione intelligente della potenza di trazione e dell'energia disponibile. È stato progettato per linee non o parzialmente elettrificate per tratte fino a 1.000km⁵⁷, consente un funzionamento pulito e sostenibile garantendo i più alti livelli di prestazione⁵⁸.

⁵⁷ rivelandosi quindi competitivo anche sul campo dell'autonomia.

⁵⁸ Alstom (2024). Alstom Coradia iLint: world's 1st hydrogen-powered passenger train.

2.4 Barriere infrastrutturali e analisi Well-to-Wheel

Anche se l'efficacia dei mezzi alimentati da celle a combustibile è stata dimostrata con successo, permangono numerosi vincoli riguardanti l'assenza di una adeguata rete di distribuzione capillare. Ci si trova quindi davanti al cosiddetto “Paradosso dell'Uovo e della Gallina”. Da una parte, gli operatori logistici non acquistano veicoli a causa della mancanza di stazioni. Dall'altra gli investitori non realizzano stazioni per mancanza di veicoli.

Questo contesto ha reso quindi fondamentale un intervento legislativo a livello sovranazionale.

L'Unione Europea ha quindi adottato il regolamento Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR).

L'AFIR stabilisce obiettivi vincolanti per tutti gli stati membri. Il fine ultimo di questi obiettivi è garantire la continuità territoriale dei trasporti transfrontalieri.

La commissione Europea riporta ufficialmente che: “Gli Stati membri garantiscono che, nel proprio territorio, entro il 31 dicembre 2030 sia installato un numero minimo di stazioni di rifornimento di idrogeno accessibili al pubblico.

A tal fine, gli Stati membri assicurano che, entro la stessa data, lungo la rete centrale TEN-T siano dispiegate stazioni di rifornimento di idrogeno accessibili al pubblico, con una distanza massima di 200 km l'una dall'altra. Tali stazioni devono essere progettate per una capacità minima cumulativa di 1 tonnellata al giorno e dotate di almeno un erogatore a 700 bar.

Gli Stati membri garantiscono inoltre che, entro il 31 dicembre 2030, sia installata almeno una stazione di rifornimento di idrogeno accessibile al pubblico in ciascun nodo urbano.⁵⁹”

La normativa citata mira a creare un’infrastruttura minima capace di consentire ai mezzi pesanti alimentati ad idrogeno di circolare liberamente, riducendo quindi l’incertezza per aziende di trasporto e produttori come Toyota.

Produrre idrogeno da energia a basse emissioni di carbonio è costoso al momento. L'analisi dell'AIE rileva che il costo della produzione di idrogeno da elettricità rinnovabile potrebbe diminuire del 30% entro il 2030 a causa del calo dei costi delle energie rinnovabili e dell'aumento della produzione di idrogeno. Le celle a combustibile, le attrezzature di rifornimento e gli elettrolizzatori (che producono idrogeno da elettricità e acqua) possono tutti beneficiare della produzione di massa.

La generazione di elettricità ricavata da fonti rinnovabili o dal nucleare offre un'alternativa all'uso dell'elettricità di rete per la produzione di idrogeno.

Con il calo dei costi per l'elettricità rinnovabile, in particolare dal solare fotovoltaico e dall'eolico, l'interesse per l'idrogeno elettrolitico sta crescendo e negli ultimi anni ci sono stati diversi progetti dimostrativi. Tuttavia, produrre l'intero fabbisogno attuale di idrogeno esclusivamente tramite elettricità richiederebbe circa 3.600 TWh, una cifra superiore alla generazione elettrica annua totale dell'intera Unione Europea.

⁵⁹ Unione Europea (2023). Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure.

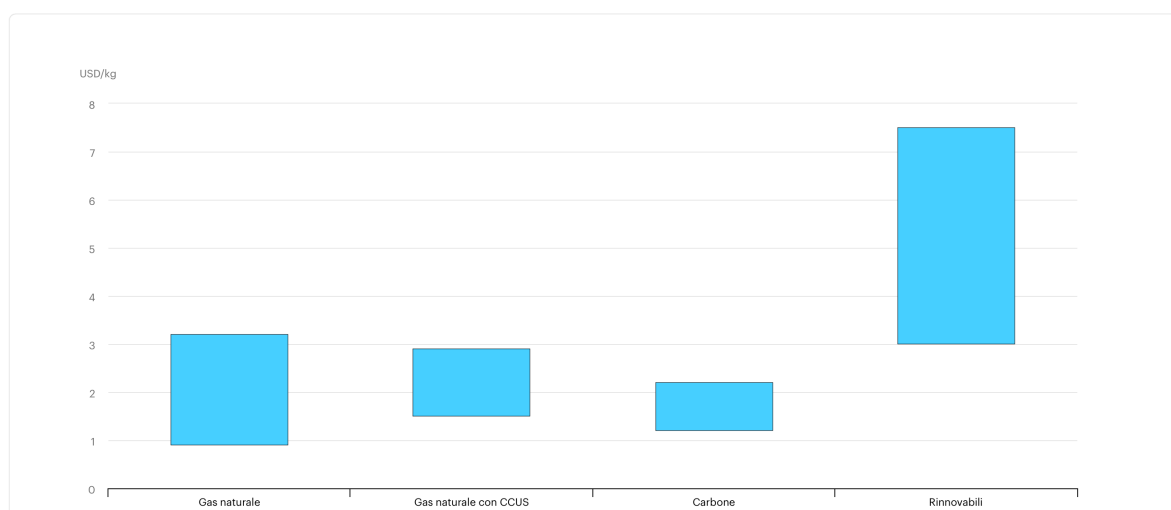


Figura 12: Costi di produzione dell'idrogeno per fonte energetica⁶⁰.

Fonte: Adattato da IEA (2020), Hydrogen production costs by production source, 2018.

Con il calo dei costi per il fotovoltaico solare ed eolico, la costruzione di elettrolizzatori in luoghi con eccellenti condizioni di risorse rinnovabili potrebbe diventare un'opzione di fornitura a basso costo per l'idrogeno, anche dopo aver preso in considerazione i costi di trasmissione e distribuzione del trasporto di idrogeno da località (spesso remote) di energie rinnovabili agli utenti finali⁶¹.

Nonostante l'abbattimento dei costi, permane un limite importante, quello dell'efficienza energetica. L'idrogeno, infatti, per essere prodotto e poi utilizzato deve superare numerose conversioni. Dall'elettrolisi alla compressione, fino alla riconversione nella cella a combustibile.

Queste numerose conversioni fanno sì che solamente il 35% circa dell'energia impiegata inizialmente arrivi effettivamente alle ruote, contro oltre il 70% per i veicoli a batteria.

Ora ci si spiega l'enorme domanda elettrica stimata dalla IEA.

I prezzi dell'idrogeno per i consumatori dipendono fortemente da quante stazioni di rifornimento ci sono, da quanto spesso vengono utilizzate e da quanto idrogeno viene

⁶⁰ Adattato da IEA (2020), Hydrogen production costs by production source, 2018.

⁶¹ IEA (2019). The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities.

consegnato al giorno. Affrontare questo è probabile che richieda pianificazione e coordinamento che riuniscano governi nazionali e locali, industria e investitori.

I regolamenti attualmente limitano lo sviluppo di un'industria dell'idrogeno pulito. Il governo e l'industria devono lavorare insieme per garantire che le normative esistenti non siano un ostacolo inutile agli investimenti. Il commercio beneficerà di norme internazionali comuni per la sicurezza del trasporto e dello stoccaggio di grandi volumi di idrogeno e per tracciare gli impatti ambientali delle diverse forniture di idrogeno.

L'IEA ha individuato alcune opportunità a breve termine per dare impulso all'idrogeno nel percorso verso un suo utilizzo pulito e diffuso. Concentrarsi su questi trampolini di lancio concreti potrebbe aiutare l'idrogeno a raggiungere la scala necessaria per abbattere i costi e ridurre i rischi, sia per i governi che per il settore privato.

Prima di tutto, costruire sulle infrastrutture esistenti, come milioni di chilometri di gasdotti naturali. L'introduzione di idrogeno pulito per sostituire solo il 5% del volume delle forniture di gas naturale dei paesi aumenterebbe significativamente la domanda di idrogeno e ridurrebbe i costi.

È necessario inaugurare le prime rotte marittime internazionali per il commercio dell'idrogeno. In tal senso, possono essere sfruttate le lezioni apprese dalla fortunata espansione del mercato globale del GNL (Gas Naturale Liquefatto). Il commercio internazionale di idrogeno deve essere avviato in tempi brevi affinché possa incidere concretamente sul sistema energetico globale. Inoltre, bisogna stimolare la domanda commerciale di idrogeno pulito. Sono disponibili tecnologie di idrogeno pulito, ma i costi rimangono impegnativi. Sono necessarie politiche capaci di creare mercati sostenibili per l'idrogeno pulito, specialmente per ridurre le emissioni derivanti dall'idrogeno prodotto da combustibili fossili, al fine di sostenere gli investimenti di fornitori, distributori e utilizzatori. Attraverso il potenziamento delle catene di approvvigionamento, tali investimenti possono favorire una riduzione dei costi, sia per l'idrogeno ottenuto da elettricità a basse emissioni di carbonio, sia per quello derivante da combustibili fossili con sistemi di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio⁶².

⁶² Ibidem.

Quindi, anche se l'idrogeno rappresenta una soluzione tecnologica per il trasporto pesante, rimangono ostacoli legati alle barriere infrastrutturali e alle perdite energetiche della catena Well to Wheel. Questi ostacoli ne rallentano quindi l'adozione su larga scala.

Per rendere completa l'analisi delle alternative ai consolidati combustibili fossili, nel prossimo capitolo l'analisi si sposterà sui biocarburanti. Andremo ad analizzare il potenziale di decarbonizzazione e la compatibilità dei biocarburanti con i motori a combustione interna, riuscendo quindi a sfruttare un know how già consolidato.

CAPITOLO 3: Combustibili Rinnovabili e Decarbonizzazione: Il Futuro del Motore Endotermico

Precedentemente è stato analizzato il potenziale dell'idrogeno all'interno della transizione in atto. Nel seguente capitolo l'analisi si sposta sui biocarburanti. Questi sono ritenuti una risorsa strategica per la decarbonizzazione dei motori a combustione, e soprattutto sono capaci di farlo evitando di stravolgere le infrastrutture esistenti.

Di fondamentale importanza, per comprendere a pieno il ruolo dei biocarburanti, sarà l'analisi dell'impatto ambientale tramite la metodologia Life Cycle Assessment. Questa, infatti, mette in evidenza come il Ciclo Chiuso del Carbonio sia in grado di rendere il motore termico sostanzialmente neutro. Nel corso del capitolo sarà inoltre approfondito il concetto di "Drop-in fuels".

Infine, si porgerà uno sguardo al ruolo svolto dai motorsport. In particolare, la Formula 1, svolge il ruolo di laboratorio d'eccellenza. Con i nuovi regolamenti, l'impegno verso carburanti al 100% sostenibili funge da acceleratore tecnologico, favorendo quindi il trasferimento di innovazioni dalla pista ai veicoli circolanti su strada.

3.1 Classificazione e potenziale dei carburanti rinnovabili

La più recente direttiva UE sulla promozione delle energie rinnovabili definisce i biocarburanti “carburanti liquidi per il trasporto ricavati dalla biomassa”. I biocarburanti sono alternative rinnovabili ai combustibili fossili e hanno l’obiettivo di contribuire a ridurre le emissioni di gas a effetto serra (GES) nel settore dei trasporti e a migliorare la sicurezza dell’approvvigionamento dell’UE.

Nel 2021 i biocarburanti hanno costituito il 4,3 % dei carburanti utilizzati nel settore dei trasporti stradali a livello mondiale. I biocarburanti attualmente utilizzati tendono a essere miscelati con i carburanti fossili: il bioetanolo può essere miscelato con la benzina e il biodiesel con il diesel fossile.

Diversi tipi di biomassa (“materia prima”) possono essere usati per la produzione di biocarburanti. La revisione del 2018 della direttiva UE sulla promozione delle energie rinnovabili (in seguito denominata “RED II”), distingue tre categorie principali di biocarburanti in base alla materia prima o alla tecnologia utilizzata.

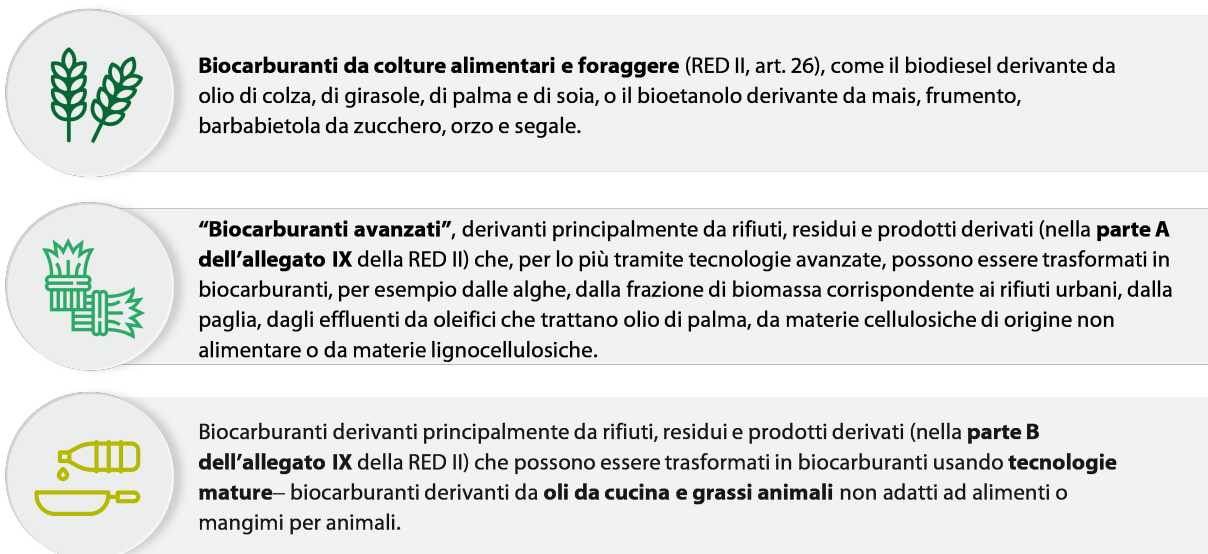


Figura 13: Categorie principali di biocarburanti prodotti da materie prime⁶³.

Fonte: Corte dei conti europea

Per le ultime due, la RED II contiene una lista di materie prime e gruppi di materie prime specifiche.

I biocarburanti che non utilizzano nessuna delle materie prime incluse nelle tre categorie sono definiti “altri biocarburanti” e comprendono, ad esempio, i biocarburanti derivanti da colture non alimentari o da colture tessili come il lino o la canapa.

Il settore dei biocarburanti si contende le materie prime con altri settori, in particolare quello alimentare, ma anche quello dei prodotti cosmetici e farmaceutici, delle bioplastiche e del riscaldamento. Ciò influenza la disponibilità e i prezzi di mercato di questi materiali e può anche suscitare questioni etiche riguardanti l'ordine di priorità tra beni alimentari e carburanti.

Nonostante abbiano il potenziale per ridurre le emissioni di GES, i biocarburanti potrebbero anche avere un impatto negativo su ambiente e clima.

⁶³ Adattato da Corte dei conti europea.

Inoltre, estendere i terreni agricoli in aree come foreste o torbiere potrebbe provocare un aumento delle emissioni di GES anziché una loro riduzione.

Per mitigare i rischi di effetti negativi su ambiente e clima, la RED II stabilisce diversi criteri di sostenibilità per i biocarburanti, i quali sono considerati “sostenibili” se soddisfano tutti i seguenti criteri.

- 1) Le materie prime di origine agricola NON devono provenire da:
terreni dall'elevato valore in termini di biodiversità;
terreni con elevate scorte di carbonio;
terreni che nel gennaio 2008 erano torbiere.
- 2) La biomassa forestale dev'essere supportata da prove sui meccanismi che assicurano:
la legalità delle operazioni di raccolta;
la rigenerazione forestale nelle aree in cui è stata effettuata la raccolta;
la tutela di aree designate quali zone di protezione della natura, tra cui zone umide e torbiere;
che la raccolta mantenga inalterate o aumenti la qualità del suolo, la biodiversità e la capacità produttiva a lungo termine delle foreste.
- 3) La riduzione delle emissioni di GES prodotte dai biocarburanti, in rapporto alle emissioni prodotte dai combustibili fossili, deve essere:
almeno del 50% per i biocarburanti prodotti in stabilimenti già operativi il 5 ottobre 2015;
almeno del 60% per i biocarburanti prodotti in stabilimenti operativi dal 6 ottobre 2015 al 31 dicembre 2020;
almeno del 65% per i biocarburanti prodotti in stabilimenti operativi a partire dal 1° gennaio 2021⁶⁴.

I parametri osservati, come l'imposizione della riduzione delle emissioni e il divieto di uso di materie prime provenienti da terreni protetti, smentiscono quindi la diceria secondo cui i biocarburanti sarebbero dannosi tanto quanto il petrolio. In questo contesto tecnologie come l'ibrido e:HEV Honda o i motori utilizzati in Formula 1, alimentati

⁶⁴ European Court of Auditors (2023). Special report 29/2023: The EU's biofuels policy lacks a clear roadmap.

tramite i biocarburanti compresi nella direttiva RED II, rappresentano una sintesi perfetta tra ingegneria meccanica e tutela del clima.

In questo modo si riesce ad ottenere un duplice obiettivo:

abbattere le emissioni;

e soprattutto si riesce ad evitare lo smantellamento delle infrastrutture di distribuzione attuali.

3.2 Analisi ambientale: il ciclo del carbonio e l'impatto LCA

Uno dei maggiori vantaggi ottenuti dall'utilizzo di biocarburanti avanzati come l'HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) è la loro capacità di operare in un sistema circolare.

Urge infatti fare una netta distinzione tra biocarburanti e i combustibili fossili:

i combustibili fossili introducono nuovo carbonio in atmosfera prelevandolo dal sottosuolo;

i biocarburanti invece gestiscono emissioni già presenti nel ciclo biogenico.

Quando si parla di HVO⁶⁵, ci si riferisce ad un biocarburante formato al 100% da olio vegetale idrogenato puro. È un gasolio rinnovabile prodotto da materie prime di scarto e residui vegetali e da oli generati da colture che non sono in competizione con la filiera alimentare. Per poter produrre HVOlution Eni ha stretto accordi di valorizzazione di scarti

⁶⁵ HVOlution nel caso di ENI.

e rifiuti e partnership internazionali in vari Paesi dell'Africa, come Mozambico, Kenya e Congo⁶⁶.

Per un biocarburante, infatti le emissioni di CO₂ derivanti dalla fase di combustione sono pari convenzionalmente a 0, in quanto in applicazione di un concetto di circolarità, la CO₂ emessa durante la combustione del biocarburante è compensata da quella biogenica sequestrata in precedenza durante la crescita della biomassa da cui è ricavato il biocarburante stesso⁶⁷.

Per avere un quadro reale dell'impatto ambientale è però necessario analizzare le emissioni lungo tutta la filiera includendo trasporto, produzione e raffinazione (Life Cycle Assessment).

Secondo il criterio convenzionale della Direttiva UE 2018/2001 "REDII", la riduzione delle emissioni di CO₂ del biocarburante HVO lungo tutta la filiera del prodotto nel 2022 è stata tra il 60% e il 90%, rispetto al mix fossile di riferimento, a seconda delle materie prime utilizzate per la sua produzione⁶⁸.

⁶⁶ Automobile.it (2023). Diesel HVOlution: cos'è e come funziona il nuovo biodiesel.

⁶⁷ Enilive (2024). HVOlution: il biocarburante di Eni prodotto con 100% di materie prime rinnovabili.

⁶⁸ Ibidem.

3.3 Compatibilità tecnica e "Drop-in fuels"

I biocarburanti sono in grado di fornirci un vantaggio strategico notevole. Questo vantaggio consiste nella loro natura di drop-in fuels. Il termine Drop-in fuels ci indica che sono carburanti che possono essere utilizzati anche nell'immediato nei motori di ultima generazione e inoltre possono essere distribuiti tramite pompe di benzina esistenti evitando modifiche strutturali.

I dati forniti dall'Associazione dell'Industria Automobilistica Tedesca (VDA) sottolineano l'importanza rappresentata da quest'alternativa per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Infatti, come evidenziato dalla Presidente della VDA Hildegard Müller: "Il fatto è questo: l'accelerazione dell'elettromobilità, inclusi i veicoli a idrogeno nel settore dei trasporti commerciali, consentirà significativi risparmi di CO₂ nei prossimi anni. Allo stesso tempo, ciò non è sufficiente, poiché in Germania continueranno a circolare veicoli con motori a combustione ancora per molto tempo. [...] Anche se l'obiettivo del governo federale di 15 milioni di auto elettriche entro il 2030 venisse raggiunto, sulle strade tedesche circoleranno ancora almeno 40 milioni di auto e camion con motori a combustione"⁶⁹.

Per questa flotta di veicoli, i carburanti rinnovabili sono urgentemente necessari. La VDA chiede quindi anche una sotto-quota di RFNBO (idrogeno e carburanti sintetici) di almeno il cinque per cento per il 2030.

Con i carburanti rinnovabili, il parco circolante esistente di veicoli con motore a combustione può essere utilizzato in modo ampiamente carbon-neutral nel lungo termine⁷⁰.

⁶⁹ VDA. (2024). VDA calls for ambitious implementation of RED III in national law. VDA Press Release.

⁷⁰ Ibidem.

Si chiama HVOlution, il primo diesel di Eni Sustainable Mobility prodotto con il 100% di materie prime rinnovabili (ai sensi della Direttiva “RED II”). HVOlution è un biocarburante che viene prodotto da materie prime di scarto e residui vegetali, e da olii generati da colture non in competizione con la filiera alimentare. HVOlution può contribuire all’immediata decarbonizzazione del settore dei trasporti anche pesanti, tenuto conto delle emissioni allo scarico, perché utilizzabile con le attuali infrastrutture e in tutte le motorizzazioni omologate, di cui mantiene invariate le prestazioni.

Il nuovo biocarburante di Eni, dal 2016, rappresenta il 15% del carburante Eni Diesel+, disponibile in circa 3.500 stazioni di servizio italiane⁷¹.

Stefano Ballista, amministratore delegato di Eni Sustainable Mobility, ha dichiarato: “Il biocarburante puro HVOlution ha un ruolo fondamentale perché già da oggi può dare un contributo importante alla decarbonizzazione della mobilità, anche del trasporto pesante. Questo prodotto arricchisce l’offerta nelle stazioni di servizio, affiancandosi all’attuale proposta di prodotti low-carbon, come le ricariche elettriche, e di servizi per le persone in mobilità[...]”⁷².

La compatibilità del motore di una vettura con HVOlution è consultabile nel libretto di manutenzione del veicolo. Al momento possono utilizzare il biocarburante di Eni le vetture di ultima generazione⁷³.

⁷¹ Eni. (2023). Eni Sustainable Mobility: il biocarburante da materie prime 100% rinnovabili arriva nelle stazioni di servizio. Eni Press Release.

⁷² Ibidem.

⁷³ Ibidem.

3.4 Prospettive economiche e sfide della filiera

L' "Industrial Action Plan for the European Automotive Sector", presentato nel marzo 2025 dalla Commissione Europea, continua nel solco di una impostazione dirigistica e strategicamente debole che ignora il principio di neutralità tecnologica, il contributo dei carburanti rinnovabili per i target di decarbonizzazione e misure compatibili con le dinamiche di mercato e a sostegno della filiera dell'automotive e dei trasporti.

Un approccio che, senza un netto cambio di strategia che metta al centro i target di decarbonizzazione e non quelli dell'elettrificazione, rischia di compromettere definitivamente la leadership italiana ed europea nel settore dell'automotive e delle energie connesse, con un impatto drastico sull'occupazione e sull'intero tessuto industriale e produttivo.

Questo l'allarme lanciato dall'Osservatorio per la Transizione dei Trasporti, organismo nato nel maggio 2024 su iniziativa di NGV Italy, Confartigianato, Federauto e UNEM, che oggi a Bruxelles, presso la sede del Parlamento Europeo, ha presentato ad una nutrita rappresentanza di europarlamentari italiani, di tutti gli schieramenti, il Position Paper "Verso una transizione non ideologica dell'Automotive e dei Trasporti" che indica otto punti strategici ritenuti indispensabili per rendere più razionale e meno ideologico il processo di transizione dell'automotive e dei trasporti.

In particolare, nel documento si sottolinea come sia anzitutto necessario anticipare di almeno un anno la revisione delle clausole relative ai target di riduzione delle emissioni di CO₂ secondo criteri che valutino adeguatamente le ricadute economiche e sociali di tali misure. Inoltre, ai fini del rispetto del principio della neutralità tecnologica, si sollecita l'introduzione di un Carbon Correction Factor, sia per i veicoli leggeri che per quelli pesanti, che consenta di superare il dogma del calcolo delle emissioni solo allo scarico e permetta di considerare "zero o low emissions" la componente rinnovabile nei fuels utilizzati.

Il documento richiama altresì la necessità di avviare già nel 2025 una approfondita e imparziale relazione su come promuovere i Renewable Fuels (Biofuels, Biomethane, Bio-LNG, RCF, RFBNO, Bioethanol, ecc.), includendo il Life Cycle Assessment (LCA) quale criterio davvero funzionale per valutare la reale decarbonizzazione dei trasporti. In

questo contesto, diventa strategico sostenere le filiere per la produzione dei feedstock da impiegare per i biofuels, in linea con le indicazioni della stessa Commissione Europea⁷⁴.

Mariarosa Baroni, presidente di NGV Italy ha dichiarato: “[...] È ora necessaria una regolamentazione per il settore automotive che sia ‘con i piedi per terra’, concreta, razionale, applicabile al mercato reale e sostenibile dal punto di vista economico. Serve valorizzare tutte le tecnologie in grado di contribuire alla decarbonizzazione a partire dal biometano, dai biofuel e dall’idrogeno, sostenendo una vera neutralità tecnologica e applicabilità del well-to-wheel”⁷⁵.

Gianni Murano, presidente di UNEM, ha invece così commentato: “Il Position Paper presentato oggi al Parlamento Europeo vuole essere di stimolo per l’avvio di una discussione meno ideologica e più concreta sul tema della decarbonizzazione dei trasporti che necessita di una chiara correzione di rotta. [...]È giunto il momento di ricominciare a ragionare in termini di neutralità e pluralità tecnologica premiando quelle soluzioni in grado di ridurre l’impronta carbonica dei fuels utilizzati. I biocarburanti oggi, e quelli sintetici domani, sono la strada ideale considerato che possono essere impiegati utilizzando le attuali infrastrutture distributive. Le condizioni per uno sviluppo di filiere nazionali ed europee ci sono tutte, sia dal punto di vista tecnologico che delle materie prime necessarie. Compito dei policy makers è consentire uno sviluppo sostenibile di questa filiera con misure che rimettano al centro la decarbonizzazione con un approccio finalmente libero da pregiudizi verso alcune tecnologie”⁷⁶.

La transizione energetica globale è più lenta, poiché governi e responsabili politici pongono sempre più l’accento sulla convenienza e sulla sicurezza dell’energia in un contesto di incertezza geopolitica. È questo il risultato della Global Energy Perspective 2025, il Rapporto che McKinsey & Company, Società di consulenza manageriale leader a livello mondiale ha presentato il 13 ottobre 2025, che offre

⁷⁴ Unem. (2025). Presentato al Parlamento Europeo il Position Paper Osservatorio Trasporti. Unem Press Release.

⁷⁵ Ibidem.

⁷⁶ Ibidem.

un'analisi completa delle forze che modellano il settore energetico e le previsioni sulle tendenze della domanda e dell'offerta di energia per una serie di tipi di combustibile e regioni fino al 2050.

Il Rapporto, giunto alla sua X edizione, mira ad evidenziare il divario tra l'attuale traiettoria mondiale e ciò che sarebbe necessario per evitare gli effetti peggiori del cambiamento climatico, come definito dall'Accordo di Parigi.

È importante specificare che non esiste una soluzione miracolosa per la decarbonizzazione. Paesi e regioni seguiranno traiettorie distinte in base alle condizioni economiche locali, alla dotazione di risorse e alle realtà che caratterizzano specifici settori industriali.

In questo scenario, la competitività dei costi e una transizione energetica pragmatica dal punto di vista economico rimangono fondamentali. L'accessibilità economica dell'energia, l'affidabilità (inclusa la sicurezza energetica a livello nazionale o regionale) e la riduzione delle emissioni continuano a costituire un trio di priorità che guidano il processo decisionale in ambito energetico. Senza accessibilità economica, unitamente alla bancabilità, non si potrà realizzare un'adozione diffusa di nuove tecnologie a basse emissioni di carbonio.

Si prevede quindi che i combustibili fossili manterranno una quota importante del mix energetico anche oltre il 2050. Nello scenario Continued Momentum la domanda probabilmente raggiungerà un plateau tra il 2030 e il 2035.

Di conseguenza è improbabile che i combustibili alternativi essenziali raggiungano un'ampia diffusione prima del 2040, a meno che non vengano imposti come obbligatori. L'attuale enfasi sull'accessibilità economica implica che alcune fonti alternative, come l'idrogeno verde e altri combustibili sostenibili, potrebbero non essere competitive con i combustibili tradizionali nel breve termine.

Le dinamiche regionali giocano un ruolo importante nei risultati degli scenari. Ad esempio, si prevede che la Cina continuerà a essere leader nell'elettrificazione⁷⁷.

Motivo per cui, mentre la Cina consolida la sua leadership sul piano dell'elettrico, l'Europa deve cercare di rimanere competitiva sfruttando le dinamiche che ha a suo favore. È di fondamentale importanza lo sviluppo di una filiera autonoma di biocarburanti in Europa. La costituzione di una filiera autonoma deve mirare a garantire la sicurezza energetica nazionale senza rinunciare agli obiettivi di decarbonizzazione.

3.5 La Formula 1 come acceleratore tecnologico: dalla pista alla strada

Se diamo uno sguardo alla storia dell'industria automobilistica, possiamo notare che le competizioni motoristiche svolgono il ruolo di veri e propri laboratori di ricerca avanzata.

Per il 2026 la Formula 1 ha deciso di riscrivere completamente il proprio DNA Tecnologico.

L'obiettivo di questa trasformazione è quello di rendere la sfida per il titolo mondiale una corsa verso la sostenibilità globale. L'introduzione dei nuovi regolamenti oltre a mirare verso la riduzione dell'impronta carbonica nella F1, si propone di accelerare lo sviluppo di soluzioni biotecnologiche e sintetiche in grado di rivoluzionare il mercato.

Il fondamento di questa transizione è racchiuso all'interno del Regolamento Tecnico FIA.

Il Regolamento FIA, stabilisce criteri ferrei con lo scopo di garantire che l'innovazione sviluppata in pista sia etica, scalabile e soprattutto tecnicamente rilevante per l'industria civile.

⁷⁷ Regioni & Ambiente (2025). Global Energy Perspectives 2025: il report di McKinsey.

Art. 16.1.2 Principi di Base

Per quanto riguarda il carburante, i requisiti dettagliati di questo Articolo hanno lo scopo di garantire l'uso di carburanti sostenibili avanzati (Advanced Sustainable - AS) composti esclusivamente da componenti AS, costituiti da composti certificati, flussi di raffineria e additivi, e di proibire l'uso di specifici composti chimici atti ad aumentare la potenza.[...] Tutti i componenti e i carburanti AS devono essere mantenuti costantemente separati dai componenti e dai carburanti non sostenibili.

Il carburante finale miscelato deve ottenere un risparmio di emissioni di gas serra (GHG), rispetto alla benzina di origine fossile, pari almeno a quello definito per il settore dei trasporti nella Direttiva Europea sulle Energie Rinnovabili (RED) in vigore dal 1° gennaio dell'anno precedente al relativo Campionato di Formula 1. Il calcolo del risparmio di GHG tiene conto di eventuali emissioni nette di carbonio derivanti dal cambiamento d'uso del suolo, dell'energia utilizzata per la raccolta e il trasporto della biomassa e della produzione e lavorazione del componente sostenibile avanzato. In ogni processo in cui viene utilizzata energia sostenibile, questa deve essere eccedente rispetto al fabbisogno domestico locale. Dove disponibili, i valori di risparmio delle emissioni di GHG saranno tratti dall'attuale Direttiva UE sulle Energie Rinnovabili (RED) o da altre fonti equivalenti riconosciute a livello internazionale.

L'uso di questi composti e flussi di raffineria nel carburante di F1 dipenderà dalla prova che il fornitore stia effettivamente sviluppando tali composti per l'uso in carburanti commerciali e che siano disponibili presso impianti in grado di produrre almeno 5m³ all'anno o siano disponibili in commercio in volumi simili da terze parti. I composti e le classi di composti accettabili sono definiti negli Articoli 16.2 e 16.4.3. Inoltre, per coprire la presenza di impurità a basso livello, la somma dei componenti che non rientrano nelle definizioni degli Articoli 16.2 e 16.4.3 è limitata al massimo all'1% m/m (massa su massa) del carburante totale.

Art. 16.2.8 Componente Sostenibile Avanzato

Un Componente Sostenibile Avanzato (AS) è un componente certificato per essere stato derivato da una materia prima rinnovabile di origine non biologica (ad esempio, un RFNBO, Renewable Fuels of Non-Biological Origin), da rifiuti urbani o da biomassa non alimentare. Tale biomassa include, ma non è limitata a: biomassa lignocellulosica, alghe, residui o scarti agricoli e colture energetiche dedicate non alimentari coltivate su terreni marginali non adatti alla produzione alimentare.

[...]

I biocomponenti derivanti da colture alimentari possono essere considerati componenti sostenibili avanzati solo se hanno già assolto al loro scopo alimentare (ad esempio, l'olio vegetale esausto, poiché è già stato utilizzato e non è più idoneo al consumo umano).

Inoltre, la biomassa da cui è stato ricavato il componente sostenibile avanzato non deve provenire da terreni ad alta biodiversità, come foreste primarie incontaminate o aree boschive, terreni designati per la protezione della natura o praterie ad alta biodiversità, che si trovavano in tale stato nel gennaio 2008 o successivamente. Infine, la biomassa non deve provenire da terreni con elevate riserve di carbonio, come zone umide e torbiere⁷⁸.

Il Regolamento FIA illustrato ha definito il perimetro entro cui operare.

Sono però i costruttori a trasformare le norme in innovazione.

Il ritorno ufficiale di Honda in Formula 1 per il 2026 è l'esempio più rappresentativo di come il motorsport sia diventato un'arena per perfezionare queste nuove tecnologie.

⁷⁸ FIA. (2024). 2026 Formula 1 Technical Regulations (Issue 8). Fédération Internationale de l'Automobile.

L'obiettivo è quindi usare il motorsport come veicolo che ci traini verso tecnologie che mirano alla neutralità carbonica e che vedremo nei prossimi anni su strada oltre che in pista.

La stagione 2026 segnerà un importante punto di svolta per la Formula 1 nel suo complesso. Per Honda, sarà anche l'inizio di una nuova sfida. Honda ha chiuso le sue attività di Formula 1 alla fine della stagione 2021, e ora, in un momento in cui la F1 viene fondamentalmente rimodellata da nuovi regolamenti, torna allo sport per iniziare a fornire unità di potenza all'Aston Martin Aramco Formula One Team (AMAF1).

L'unità di potenza di nuova generazione introdotta in base a questi regolamenti è tecnicamente estremamente impegnativa e proprio per questo motivo, rappresenta una sfida che vale la pena affrontare. Con una percentuale significativamente più alta di elettrificazione e l'adozione di combustibili sostenibili, la nuova unità di potenza si allinea strettamente con la direzione richiesta dai tempi. Honda vede questa come un'arena ideale in cui perfezionare ulteriormente e rafforzare le sue tecnologie avanzate.

Piuttosto che una semplice relazione fornitore-costruttore, l'obiettivo è condividere sfide, filosofie di sviluppo e direzione a lungo termine a un livello fondamentale, crescendo insieme come un team unificato che persegue gli stessi obiettivi⁷⁹.

⁷⁹ Honda Global. (2026). Special Interview: Koji Watanabe, President of HRC, on the 2026 F1 Regulations. Honda Official Website.

CONCLUSIONE

Il sentiero di analisi tracciato in questo lavoro mostra un ritratto della transizione energetica dei trasporti molto più eterogeneo di quello che pervade la narrativa dell'elettrificazione dominante nel dibattito politico odierno. Se da un lato i veicoli a batteria elettrici rappresentano una misura a breve termine vitale per ridurre direttamente le emissioni inquinanti nel dominio urbano, l'analisi tecnica mostra che l'elettrificazione forzata non può essere l'unica strada percorribile per rispondere alla sfida climatica.

Date le criticità dell'elettrico, dalla limitata densità energetica delle batterie alla questione dell'impatto ambientale dell'estrazione delle materie prime, la soluzione appare essere un approccio multi tecnologico. La tecnologia ibrida è il punto di convergenza ideale tra queste. La combinazione con i biocarburanti, inoltre, consente di sfruttare al meglio i vantaggi delle due tecnologie: le emissioni si riducono enormemente sfruttando l'efficienza della parte elettrica con la neutralità carbonica del combustibile rinnovabile, senza richiedere una rivoluzione infrastrutturale o la sostituzione dei veicoli esistenti.

Come evidenziato nel corso del secondo capitolo, l'idrogeno rappresenta il vettore ideale per quanto riguarda i trasporti pesanti e le lunghe percorrenze, nonostante ci sia ancora il bisogno di superare numerosi limiti legati principalmente alla rete di rifornimento e all'efficienza Well to Wheel, causata dalle fasi di elettrolisi, compressione e riconversione in cella a combustibile che risultano in una massiccia dispersione energetica.

Allo stesso modo, i biocarburanti, affrontati nel terzo capitolo, appaiono come la soluzione più prossima alla portata: il concetto di drop in fuels applicato alle motorizzazioni ibride di nuova generazione rappresenta, ad oggi, la via più breve e concreta per una decarbonizzazione di massa sostenibile nel lungo periodo. Scommettere su queste due alternative, inoltre, risponde oggi ad un'urgenza geopolitica reale: ridurre la forte dipendenza dai mercati esteri e soprattutto dalla Cina in termini di materie prime critiche e batterie. Puntare su vettori energetici che riconoscano l'eccellenza motoristica continentale significa, in ambito economico, tutelare il primato europeo del settore

automotive e garantire la permanenza di un'eredità industriale ed occupazionale di cui non possiamo fare a meno.

Tirando le somme, è possibile sostenere che grazie alla ricerca di nuove soluzioni da adattare al motore a combustione interna, come l'alimentazione di questi con vettori energetici rinnovabili e sistemi ibridi avanzati, è possibile e soprattutto auspicabile mantenere in vita la tecnologica ICE per garantire la resilienza del sistema dei trasporti. Una dimostrazione arriva dal mondo del motorsport. Il laboratorio della Formula Uno ha dimostrato che il futuro della mobilità non può dipendere da un'unica tecnologia. La soluzione va trovata in un mix energetico consapevole in cui idrogeno, biocarburanti ed ibrido cooperino con lo scopo di garantire una transizione sostenibile non solo per l'ambiente, ma anche per l'industria e l'economia globale. Ed è proprio in quest'ottica che il ruolo della ricerca accademica e dell'innovazione ingegneristica diventano pilastri su cui fondare la nuova era della mobilità. Continuare ad investire nell'ottimizzazione dei rendimenti termodinamici e nello sviluppo di fonti di alimentazione alternative non rappresenta un legame con il passato ma, la volontà di preservare un'eccellenza tecnologica che è parte integrante dell'industria europea. Possiamo quindi affermare che sostenere la neutralità tecnologica significa alimentare un processo costante che sia capace di coniugare le necessità di abbattimento delle emissioni con la competitività economica e la valorizzazione del know how ingegneristico, garantendo una solida risposta alle sfide climatiche del domani.

BIBLIOGRAFIA

Alstom (2024). *Alstom Coradia iLint: world's 1st hydrogen-powered passenger train.*

Amici della Terra (2023). *Quindicesimo rapporto sull'efficienza energetica in Italia.*

Argue, C. (2020). *What can 6,000 electric vehicle batteries tell us about EV battery health?* Geotab Blog.

Automobile.it (2023). *Diesel HVOlution: cos'è e come funziona il nuovo biodiesel.*

Ayvens (2022). *Car Cost Index 2022: l'analisi comparativa dei costi dei veicoli elettrici e a combustione in Europa.*

Bacone, R. (XIII secolo).

BloombergNEF (2023). *Lithium-ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh.*

Consiglio dell'Unione europea (2024). *Fit for 55: reform of the EU emissions trading system.*

Consiglio dell'Unione europea (2024). *Il Green Deal europeo: la tabella di marcia dell'UE per una transizione sostenibile*.

Consiglio dell'Unione europea (2024). *Trasporti puliti e sostenibili nell'UE*.

Engel, H., Hertzke, P., & Siccardi, G. (2019). *Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage*. McKinsey & Company.

Eni (2023). *Eni Sustainable Mobility: il biocarburante da materie prime 100% rinnovabili arriva nelle stazioni di servizio*. Eni Press Release.

Enilive (2024). *HVOlution: il biocarburante di Eni prodotto con 100% di materie prime rinnovabili*.

European Court of Auditors (2023). *Special report 29/2023: The EU's biofuels policy lacks a clear roadmap*.

FIA (2024). *2026 Formula 1 Technical Regulations (Issue 8)*. Fédération Internationale de l'Automobile.

Forte, F. (2023). *Riciclo di batterie agli ioni di litio a fine vita: il progetto ACROBAT*. ENEA.

GMK Center. (2024). *Volkswagen shuts down factory in Germany for the first time in 88 years.*

Honda Global (2026). *Special Interview: Koji Watanabe, President of HRC, on the 2026 F1 Regulations.* Honda Official Website.

Honda Motor Co. (2024). *Two-Motor Hybrid System: Honda e:HEV.*

IEA (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities.*

IEA (2024). *Global EV Outlook 2024. Executive Summary.* International Energy Agency.

InfobuildEnergia (2024). *Idrogeno verde, blu, grigio: facciamo chiarezza.*

IPCC (2022). *Transport. In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Capitolo 10.

Preston, B. (2023). *Will an Electric Car Save You Money?* Consumer Reports.

Quattroruote. (10 maggio 2021). *Auto elettriche, studio Bloomberg: "Entro sei anni costeranno meno delle endotermiche".*

Randall, C. (2025). *Honda to cut back on EV investments.* electrive.

Regioni & Ambiente (2025). *Global Energy Perspectives 2025: il report di McKinsey.*

Rossi, F. (24 Maggio 2023). *Emissioni auto elettriche vs auto termiche: chi vince davvero?* Rinnovabili.it.

Storia dell'automobile. (9 dicembre 2025). In *Wikipedia*. Consultato in data 29 gennaio 2026, da https://it.wikipedia.org/wiki/Storia_dell%27automobile.

Tarei, P. K., Thakker, S. V., & Nag, B. (2021). *A Hybrid Framework for Assessing the Resilience of Electric Vehicle Supply Chain*. World Electric Vehicle Journal, 12(3), 115.

The Electric Car Scheme Team (2024). *Potential pay-per-mile road tax: What it means for UK drivers*.

Toyota Europe (2022). *Toyota Corolla Cross Hydrogen Concept: a prototype that could be another step towards hydrogen*.

Toyota Europe (2024). *Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV)*.

Toyota Europe (2024). *Toyota Fuel Cell: Fuel cell applications*.

Toyota Newsroom (2022). *Toyota Corolla Cross Hydrogen Concept l'approccio multi-tecnologico di Toyota verso le zero emissioni*.

Toyota Pressroom (2022). *Toyota, Kenworth Prove Fuel Cell Electric Truck Capabilities with Successful Completion of Truck Operations for ZANZEFF Project*.

UNEM (15 novembre 2023). *Nota Stampa: Accise e Mobilità Elettrica*.

Unem (2025). *Presentato al Parlamento Europeo il Position Paper Osservatorio Trasporti*. Unem Press Release.

Unione Europea (2023). *Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure*.

VDA (2024). *VDA calls for ambitious implementation of RED III in national law*. VDA Press Release.