



Università  
Ca' Foscari  
Venezia

Corso di Laurea  
in Economia e Gestione delle Aziende

Tesi di Laurea

**Sostenibilità e innovazione: il futuro del settore  
automotive**

**Relatore**

Ch.mo Prof. Carlo Bagnoli

**Laureando**

Matteo Oniga

Matricola 872328

**Anno Accademico**

2022 / 2023



Ringrazio i miei genitori e i miei affetti,  
Università Ca' Foscari e i suoi docenti,  
Ferrari S.p.A. e i colleghi di Maranello,  
e tutti coloro che mi sono stati vicino in questo percorso.

# INDICE

Introduzione.....	pag. 7
<b>Capitolo I Transizione energetica nel settore automotive.....</b>	<b>pag. 9</b>
1.1 Tipologie di propulsione .....	pag. 9
1.1.1 Vetture elettriche (EV).....	pag. 13
1.1.2 Impatti ambientali.....	pag. 17
1.2 Analisi di mercato.....	pag. 20
1.2.1 Mercato attuale.....	pag. 22
1.2.2 Previsioni future.....	pag. 26
1.3 Politiche a sostegno.....	pag. 29
1.3.1 Quadro normativo Europa.....	pag. 31
1.3.2 Quadro normativo Cina e US.....	pag. 35
<b>Capitolo II Ruolo delle batterie nel nuovo paradigma di mobilità.....</b>	<b>pag. 37</b>
2.1 Tipologie di pacchi batteria.....	pag. 37
2.1.1 Prezzi.....	pag. 39
2.1.2 Invecchiamento e degrado.....	pag. 41
2.2 Analisi di mercato.....	pag. 43
2.2.1 Domanda di batterie.....	pag. 45
2.2.2 Materie prime necessarie.....	pag. 46
2.3 Gestione del ciclo vita.....	pag. 48
2.3.1 Repurposing.....	pag. 49
2.3.2 Riciclaggio.....	pag. 51

<b>Capitolo III Guida autonoma: tecnologie, sfide e applicazioni.....</b>	<b>pag. 55</b>
3.1 Tipologie di automazione.....	pag. 57
3.1.1 Tecnologie utilizzate.....	pag. 58
3.1.2 Livelli di automazione.....	pag. 61
3.2 Responsabilità legale e politiche a sostegno.....	pag. 63
3.2.1 Quadro normativo.....	pag. 64
3.2.2 Etica informatica e problema del carrello.....	pag. 65
3.3 Il caso Waymo.....	pag. 69
<b>Capitolo IV Mobilità aerea: tecnologie, sfide e applicazioni.....</b>	<b>pag. 75</b>
4.1 Tipologie di veicoli volanti.....	pag. 76
4.1.1 Velivoli eVTOL.....	pag. 82
4.1.2 Impatti ambientali.....	pag. 86
4.2 Infrastrutture e politiche a sostegno.....	pag. 88
4.2.1 Vertiporti.....	pag. 88
4.2.2 Quadro normativo.....	pag. 91
4.3 Il caso Lilium.....	pag. 93
Conclusioni.....	pag. 98
Bibliografia.....	pag. 102



## INTRODUZIONE

Il settore automotive sta attraversando una profonda trasformazione, guidata da due tendenze fondamentali: la sostenibilità e l'innovazione. La presente tesi si propone di analizzare sfide attuali e future, opportunità e tecnologie chiave di questa transizione verso una nuova mobilità.

In questa prospettiva, il primo capitolo esamina le possibili alternative dei veicoli ad oggi sul mercato, focalizzandosi sulla crescente realtà delle vetture elettriche a batteria (BEV), tecnologia che sembra più promettente per guidare la transizione energetica in atto.

Questo capitolo comprenderà un'analisi del mercato dell'auto e delle relative proiezioni future, così come una panoramica delle politiche governative a supporto della transizione elettrica.

Il secondo capitolo esplora le tecnologie più recenti relative alle batterie per i veicoli elettrici, a partire dai materiali necessari per la produzione fino alle diverse opzioni di riutilizzo e smaltimento una volta giunti alla fine del loro ciclo di vita, in ottica di economia circolare.

Le tecnologie delle vetture elettriche vengono poi declinate nei capitoli successivi nelle più innovative forme di mobilità futura.

Il terzo capitolo studia i livelli di automazione applicabili alle vetture, con le relative tecnologie necessarie e le annesse responsabilità legali, fino a raggiungere una piena guida autonoma. Si analizza il caso Waymo, il cui servizio di robotaxi elettrici senza un conducente umano è già attivo nelle strade pubbliche di California e Arizona.

Il quarto capitolo tratta poi di mobilità aerea urbana (UAM) e regionale (RAM), dove le tecnologie delle automobili elettriche sono applicate nello sviluppo di flying cars. Si studiano le diverse caratteristiche dei veicoli elettrici a decollo e atterraggio verticale, oltreché le infrastrutture necessarie ed il quadro normativo. È dedicato un paragrafo al caso Lilium, principale player nel settore dei VTOL, che sta ottenendo numerose omologazioni e accordi per la gestione di vertiporti.

Il progresso tecnologico nel campo dei veicoli elettrici avrà un ruolo cruciale nell'evoluzione verso la guida autonoma e nell'applicazione ai velivoli a decollo e atterraggio verticale.

Questo percorso, tra sfide attuali e future, ha il potenziale di garantire nuove soluzioni di mobilità intermodale praticabili, scalabili e rispettose dell'ambiente.

È importante notare che questa tesi non intende essere un'analisi completa e definitiva, ma mira piuttosto ad offrire un innovativo punto di vista sull'industria dell'auto, oggi più che mai colpita da un radicale processo di cambiamento verso una mobilità elettrica e sostenibile.



## **Capitolo I Transizione energetica nel settore automotive**

In risposta all'urgente sfida del cambiamento climatico, numerosi settori stanno sperimentando un'evoluzione profonda con l'obiettivo primario di ridurre le emissioni antropogeniche che contribuiscono al riscaldamento globale. Tra questi settori, uno dei più significativi è l'industria dei trasporti, che parallelamente all'industria dell'energia sta adottando cambiamenti verso una mobilità sostenibile.

I veicoli a motore a combustione interna, simboli dell'era dei combustibili fossili, stanno gradualmente diminuendo la loro quota di mercato in favore di altre soluzioni che promettono una mobilità più ecologica ed efficiente. Tale spostamento è stato favorito dalla crescente consapevolezza ambientale, da normative sempre più stringenti e da una rapida evoluzione tecnologica.

L'analisi di questo capitolo comprenderà le diverse tecnologie, con protagoniste le vetture BEV, l'impatto in termini di emissioni ambientali nell'intero ciclo di vita, il mercato attuale e le previsioni future.

Sebbene il percorso esatto di sviluppo del settore possa ancora essere incerto, con interrogativi da risolvere e sfide da superare, la direzione verso un significativo obiettivo globale di riduzione in termini di emissioni e sostenibilità ambientale è chiara. Le vendite globali di automobili elettriche hanno raggiunto un traguardo significativo, superando la cifra di 10 milioni nel 2022 e quintuplicando le vendite in soli 3 anni. Le previsioni future, analizzate nel dettaglio in seguito, prevedono un trend altrettanto positivo.

### **1.1 Tipologie di propulsione**

Nel panorama attuale dell'industria automobilistica, diverse tecnologie e motorizzazioni coesistono, ciascuna con il suo impatto ambientale e specifiche prestazioni.

Le vetture ICEV (internal combustion engine), sono dotate di un motore a combustione interna tradizionale e rappresentano ad oggi la tipologia di veicolo più comune. Possono essere alimentate a benzina o gasolio, e funzionano bruciando il combustibile per produrre l'energia necessaria per muovere la vettura.

Gli ICEV presentano vantaggi come la possibilità di ottenere un'elevata potenza combinata ad un'autonomia relativamente lunga. Tuttavia, presentano anche diversi svantaggi, tra cui un'elevata emissione di inquinanti ed un alto consumo di carburante.

Le vetture EV (electric vehicle) sono invece dotate di un motore che utilizza l'energia elettrica per produrre movimento. Tra queste, esistono tre principali categorie:

- Vetture ibride, con un motore elettrico che affianca quello a combustione interna, come soluzione di transizione tra le due tipologie di motore. Sono a loro volta divise in:
  - o Hybrid (HEV), dove un piccolo motore elettrico assiste il motore a combustione interna. Non possono essere ricaricate esternamente e l'energia cinetica prodotta durante la frenata viene convertita in energia elettrica per ricaricare le batterie.
  - o Plug-in Hybrid (PHEV), dove è presente una batteria più ampia e ricaricabile con presa elettrica esterna, che consente di percorrere distanze in modalità elettrica.
- Vetture BEV (Battery Electric Vehicles), alimentate esclusivamente da batterie elettriche ricaricabili e dunque capaci di non emettere inquinanti durante il loro utilizzo.
- Vetture FCEV (Fuel Cell Electric), che utilizzano celle a combustibile per convertire l'idrogeno in elettricità, alimentando un motore elettrico, anch'esso a zero emissioni.

Ad oggi sappiamo come il consumo energetico sia dominato dal petrolio, con quota 90% tra le diverse fonti adottabili.

L'incentivo verso una nuova mobilità elettrica, motivato da una necessità di sostenibilità ambientale, è ulteriormente enfatizzato dalla riduzione imminente delle riserve petrolifere, soprattutto nei giacimenti di paesi arabi e dell'America Latina.

Secondo uno studio di Bloomberg, la domanda di petrolio dal trasporto su strada è molto vicina al suo picco.

I veicoli elettrici stanno già sostituendo una domanda giornaliera di petrolio pari a 1,5 milioni di barili, e questo aumento sarà ancora più significativo nei prossimi anni.

La domanda di petrolio in Europa e Stati Uniti è già al suo apice, mentre la Cina dovrebbe raggiungerlo nel 2024. Si prevede che la domanda complessiva di carburante stradale, a livello mondiale, raggiungerà il suo massimo nel 2027.

Gli impatti negativi legati alle pratiche tradizionali di estrazione del petrolio, oltreché la riduzione di emissioni di gas serra, sono fattori che aumentano l'urgenza di transizione verso soluzioni più sostenibili come la mobilità elettrica.

Promuovere questa transizione rappresenta un passo fondamentale per creare un futuro più rispettoso dell'ambiente e in sintonia con le esigenze globali di sostenibilità.<sup>1</sup>

Nel campo della mobilità sostenibile si stanno sviluppando dei combustibili alternativi e più sostenibili, come i biocarburanti o i carburanti sintetici, carburanti liquidi prodotti artificialmente da fonti diverse dal petrolio.

Questi carburanti, se prodotti in modo sostenibile e con basse emissioni di gas serra, possono contribuire a ridurre l'inquinamento nel settore dei trasporti su strada.

La differenza principale tra carburanti sintetici e biocarburanti è la fonte della materia prima utilizzata per la loro produzione. I carburanti sintetici vengono prodotti da anidride carbonica e idrogeno, mentre i biocarburanti vengono prodotti da materie prime organiche, come piante, alghe o scarti animali.

Nei carburanti sintetici, l'idrogeno può essere prodotto da fonti rinnovabili, come l'energia solare o eolica, o da fonti fossili. La produzione di questi carburanti avviene in due fasi: la prima in cui l'anidride carbonica viene catturata dall'atmosfera o da fonti industriali, e la seconda in cui l'idrogeno viene prodotto tramite elettrolisi dell'acqua, che utilizza l'energia elettrica per separare gli atomi di idrogeno dagli atomi di ossigeno. Una volta ottenuti anidride carbonica e idrogeno, vengono combinati per formare il carburante sintetico.

I carburanti sintetici che sono prodotti utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili vengono anche denominati e-fuels.

I biocarburanti invece, a seconda delle materie prime con cui vengono prodotti, possono essere suddivisi in due categorie principali, a seconda che vengono prodotti da materie prime che sono utilizzate anche per l'alimentazione umana o animale oppure no.

---

<sup>1</sup> Di Benedetto, F. (2015). Oil & bio trading.

I biocarburanti di prima generazione sono prodotti da materie prime utilizzate anche per l'alimentazione umana o animale, come la soia (utilizzata per produrre biodiesel) o il mais (utilizzato per produrre etanolo). I biocarburanti di seconda e terza generazione sono invece prodotti da materie prime non utilizzate per l'alimentazione umana o animale. Ad esempio, vengono utilizzate alghe per produrre biodiesel, o scarti animali per produrre biometano.

Queste biomasse vengono trasformate in combustibile tramite processi chimici o termici. Uno dei principali vantaggi di questi tipi di carburante è la loro compatibilità con i motori tradizionali. I carburanti sintetici ed e-fuels sono infatti chimicamente identici ai carburanti tradizionali, come benzina e diesel. Ciò significa che possono essere utilizzati nei motori tradizionali senza la necessità di modifiche al veicolo, così come non richiedono modifiche sostanziali all'infrastruttura di distribuzione attuale, offrendo una soluzione più green rispetto ai combustibili fossili.

Diverse nazioni hanno iniziato a miscelare biocombustibili con i combustibili fossili tradizionali, come il bioetanolo nella benzina e il biodiesel nel diesel. Alcuni paesi, come il Brasile, hanno persino adottato biocarburanti in percentuali elevate o addirittura biocarburanti puri, richiedendo alle case automobilistiche di adattare alcune componenti dei motori e altre parti correlate, o comunque sviluppare veicoli a carburanti convenzionali che possano essere riforniti con e-fuel.

Stellantis, quarto gruppo automobilistico al mondo per volume di vendite con circa 6 milioni di veicoli venduti nel 2022, ha dichiarato che 24 tipologie di motori di veicoli europei venduti a partire dal 2014 (pari a circa 28 milioni di vetture circolanti) sono pronte per l'utilizzo di e-fuel "drop-in", ossia senza necessità di alcuna modifica al propulsore. Questo è stato dimostrato dai test effettuati in collaborazione con Aramco, uno dei principali player nel settore dell'energia integrata e della chimica. Dallo studio emerge la potenziale possibilità di ridurre le emissioni di anidride carbonica dai veicoli ICE esistenti di almeno il 70% sul ciclo di vita rispetto ai carburanti tradizionali.

Aramco sta attualmente sviluppando due impianti dimostrativi per produrre carburanti sostenibili. Il primo si trova in Arabia Saudita e mira a produrre benzina sintetica per veicoli leggeri in collaborazione con ENOWA. Il secondo si trova a Bilbao, in Spagna,

ed è una collaborazione tra Aramco e Repsol per la produzione di diesel e carburante sintetico a basse emissioni di carbonio per automobili e aerei.<sup>2</sup>

Questa tecnologia può contribuire a ridurre l'inquinamento atmosferico, specialmente sui veicoli con motore a combustione interna già circolanti, ma sembra comunque non essere sufficiente per garantire un abbattimento radicale delle emissioni.<sup>3</sup>

Si prevede infatti, soprattutto a causa del loro elevato costo di produzione, che tali carburanti non raggiungeranno prezzi convenienti e quantitativi necessari per ottenere un impatto ambientale significativo.<sup>4</sup>

### *1.1.1 Vetture elettriche (EV)*

Il più recente report di BloombergNEF sul tema delle nuove tendenze che impatteranno la mobilità nei prossimi decenni afferma come l'elettrificazione tramite veicoli elettrici (EV) sia il modo più efficiente disponibile commercialmente per rendere il trasporto su strada non inquinante.<sup>5</sup>

Esistono però alcune sfide da superare prima di poter raggiungere una piena mobilità elettrica. Innanzitutto, la ricerca sulle batterie è ancora in pieno sviluppo per cercare di garantire maggiore potenza e durata di carica, e i materiali necessari per soddisfare una domanda globale diffusa potrebbero generare difficoltà. Inoltre, è necessario garantire un'infrastruttura elettrica geograficamente diffusa e facilmente fruibile, come può essere la rete di distribuzione di benzina e diesel, superando le incertezze relative a gestione e proprietà delle infrastrutture di ricarica e allocando importanti investimenti da parte di governi e privati.

---

<sup>2</sup> Stellantis (2023). Aramco and Stellantis Collaboration Indicates eFuel Compatibility with European Engine Families. Tratto da: <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2023/september/aramco-and-stellantis-collaboration-indicates-efuel-compatibility-with-european-engine-families>

<sup>3</sup> Pearson, R. J.; Turner, J. W. G. (2014). 2 - The role of alternative and renewable liquid fuels in environmentally sustainable transport

<sup>4</sup> BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.

<sup>5</sup> BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.

L'infrastruttura di ricarica per le vetture elettriche è comunque in rapido sviluppo, e, specialmente in Europa, Cina e Stati Uniti, si sono già registrati grandi progressi.

Nonostante la maggior parte delle operazioni di ricarica dei veicoli elettrici sia attualmente effettuata presso le abitazioni dei proprietari, c'è una crescente richiesta di stazioni di ricarica pubbliche per garantire lo stesso livello di comodità e accessibilità offerto dalla tradizionale distribuzione di carburante per veicoli a combustione. In particolare, nelle aree urbane densamente popolate, dove l'installazione di una stazione di ricarica privata può essere problematica, l'infrastruttura pubblica di ricarica è fondamentale per promuovere l'adozione dei veicoli elettrici.

Come visibile nel più recente report dell'Agenzia internazionale dell'energia (IEA), alla fine del 2022 erano operativi circa 2,7 milioni di punti di ricarica pubblica in tutto il mondo, con un aumento significativo di oltre 900.000 nuovi punti installati solo nel corso dell'ultimo anno.

Questo incremento rappresenta un aumento del 55% rispetto all'anno precedente ed è paragonabile al livello di crescita avvenuto in quattro anni, tra il 2015 e il 2019.

Dal seguente grafico è visibile la crescita nel numero di colonnine di ricarica nel mondo, suddivisa in punti di ricarica veloci e lenti, dove gli “slow chargers” sono considerati tali se la loro potenza nominale è inferiore o uguale a 22 kW mentre sono classificati “fast chargers” con potenza a partire da 22 kW, fino ad arrivare anche a 350 kW.<sup>6</sup>

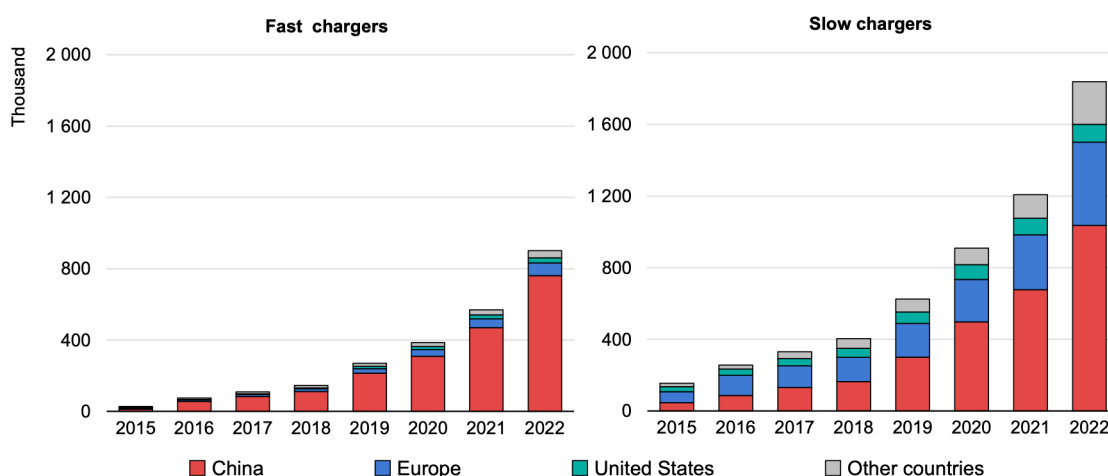


Fig. 1: Colonnine di ricarica per vetture elettriche nel mondo. Fonte: IEA.

<sup>6</sup> IEA (2023). Global EV Outlook 2023. Tratto da: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>

Per incrementare questa rete, investimenti pubblici e privati saranno essenziali.

In Nord America, nel giugno 2023 sette delle principali case automobilistiche mondiali (Mercedes-Benz, BMW, Stellantis, General Motors, Honda, Hyundai e Kia) hanno annunciato di creare una joint venture per lo sviluppo di una nuova rete di ricarica ad alta potenza con almeno 30.000 punti di ricarica. L'apertura delle prime stazioni è programmata per l'estate 2024.

L'obiettivo di diventare la principale rete di ricarica ad alta potenza sarà raggiunto grazie a fondi pubblici e privati. Negli U.S. sono infatti in vigore importanti investimenti per espandere la rete di ricarica pubblica, a livello sia federale che statale.<sup>7</sup>

Oltre ai semplici punti di ricarica, saranno dunque sempre più diffusi i cosiddetti "hub di ricarica", grandi parcheggi con centinaia di colonnine per alimentare le vetture a batteria. A Birmingham, nel 2023 Jaguar si è resa protagonista della nascita di uno dei più grandi hub di ricarica in Europa, con 180 punti dove poter ricaricare. La sua energia proviene da fonti rinnovabili, tra cui una copertura costituita interamente da pannelli solari.<sup>8</sup>

Tra i veicoli elettrici, oltre alle vetture a batteria si possono annoverare anche le automobili con motore elettrico alimentato a idrogeno.

Lo studio di Bloomberg prevede che i veicoli che utilizzano l'idrogeno per produrre energia elettrica (FCEV) non abbiano un impatto significativo sui veicoli passeggeri rispetto ai veicoli a batteria, ma che possano comunque essere una soluzione, specialmente per il trasporto a lungo raggio difficile da elettrificare (mezzi pesanti).

L'articolo di Engel et al. delinea come la soluzione alternativa rappresentata dalle vetture a idrogeno, anche denominate elettriche Fuel Cell, possa offrire diversi vantaggi.

Innanzitutto, i veicoli a idrogeno possono essere riforniti relativamente velocemente, circa 15 volte più velocemente rispetto ai veicoli elettrici a batteria che utilizzano la tecnologia di ricarica rapida.

---

<sup>7</sup> Mercedes Benz USA (2023). Seven Automakers Unite to Create a Leading High-Powered Charging Network Across North America. Tratto da: <https://media.mbusa.com/releases/release-28161694917579d4480a29fa1d00fa86-seven-automakers-unite-to-create-a-leading-high-powered-charging-network-across-north-america>

<sup>8</sup> Jaguar supports opening of one of Europe's largest EV charging hubs (2023). Tratto da: <https://media.jaguar.com/news/2023/09/jaguar-supports-opening-one-europes-largest-ev-charging-hubs>

Inoltre, l'infrastruttura per il rifornimento dell'idrogeno richiede solo la metà del capitale necessario per la ricarica veloce dei veicoli elettrici, occupando circa dieci volte meno spazio.

Tuttavia, l'articolo evidenzia come l'idrogeno sia penalizzato da costi più elevati di produzione, oltreché dai costi più elevati delle vetture stesse, e da un contenuto energetico limitato per unità di volume (a causa della sua bassa densità, che ne rende stoccaggio e trasporto relativamente difficili).

I costi che le rendono più costose delle auto elettriche sono dovuti a diversi fattori, tra cui la complessità della tecnologia, i costi dei materiali e la scarsa diffusione del mercato.

Infine, le auto a idrogeno sono poi meno efficienti delle auto elettriche, in quanto richiedono la conversione dell'energia elettrica in idrogeno e poi in energia chimica. Questo significa che le auto a idrogeno consumano più energia per percorrere la stessa distanza di un'auto elettrica.

Considerando poi le dimensioni delle vetture per trasporto di passeggeri, le soluzioni a idrogeno con tecnologia attuale sembrano non essere in linea in termini di dimensioni e peso, rendendoli generalmente meno vantaggiosi rispetto ai veicoli elettrici nella maggior parte degli scenari d'uso. Potendo però garantire, con grandi serbatoi, autonomie più elevate e minor tempo di rifornimento, la tecnologia a idrogeno sembra poter essere indicata per la decarbonizzazione dei mezzi pesanti, con maggiori esigenze in termini di carico trasportabile e alti chilometraggi, dove l'elettrico è ancora limitato.

Un esempio a conferma di questa tesi arriva da Toyota, che, grazie alla collaborazione annunciata a maggio 2023 con VDL Groep, ha appena prodotto il loro primo mezzo pesante dimostrativo a celle a combustibile, integrando la tecnologia a idrogeno che Toyota ha sviluppato per le vetture agli autocarri di VDL.

I loro test su strada inizieranno nel 2023 e dureranno cinque anni, con l'obiettivo di decarbonizzazione delle operazioni logistiche in Europa tra gli stabilimenti di Belgio, Francia, Germania e Paesi Bassi, connessi con rotte in cui è presente almeno una stazione di rifornimento a idrogeno.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Toyota Europe Newsroom (2023). VDL Groep reveals fuel cell truck for Toyota's European logistics. Tratto da: <https://newsroom.toyota.eu/vdl-groep-reveals-fuel-cell-truck-for-toyotas-european-logistics/>



L'infrastruttura di rifornimento di idrogeno è però ancora scarsa. Nel mondo ci sono circa 600 stazioni di rifornimento di idrogeno, rispetto alle oltre 2 milioni di stazioni di ricarica per auto elettriche.

In futuro, nonostante la tecnologia più promettente sembra essere quella dei veicoli elettrici, le soluzioni alimentate a idrogeno potrebbero dunque integrarsi in una mobilità orientata alla sostenibilità, senza emettere inquinanti nell'ambiente né generare rumore durante la fase di utilizzo.<sup>10</sup>

### *1.1.2 Impatti ambientali*

L'inquinamento ambientale del nostro pianeta e l'evoluzione climatica in atto stanno registrando un'influenza crescente nei comportamenti dei consumatori in fase di acquisto di un nuovo veicolo.

Veicoli tradizionali alimentati a combustibili fossili, come benzina e diesel, hanno contribuito in maniera considerevole all'aggravarsi delle emissioni di gas serra, ed oggi la predisposizione verso soluzioni di mobilità a minor impatto ambientale è crescente.

I veicoli elettrici sembrano essere la soluzione più promettente per ridurre l'inquinamento prodotto dai trasporti.

Per valutare l'effettivo impatto ambientale delle diverse tipologie di alimentazioni, lo studio di Girardi et al. si propone di confrontare tre diverse vetture destinate all'uso urbano: elettrica, a benzina e diesel.<sup>11</sup>

L'analisi mira a valutare l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita di tali veicoli (LCA – Life Cycle Assessment), ponendo particolare enfasi sulla fase di utilizzo in un contesto urbano italiano.

La scelta dei veicoli da confrontare si basa sulla necessità di garantire servizi simili, al fine di ottenere un confronto ambientale significativo.

---

<sup>10</sup> Engel, H.; Fleischmann, J.; Katzenstein, R.; Orthofer, A. & Schwickert, H. (2019). Hydrogen cars or battery electric vehicles—why not both? McKinsey Quarterly.

<sup>11</sup> Girardi, P.; Brambilla, C. & Mela G. (2019). Life Cycle Air Emissions External Costs Assessment for comparing Electric and traditional passenger cars. Integrated environmental assessment and management.

L'analisi usa come campione una Volkswagen Golf, uno dei pochi modelli di medie dimensioni disponibili nelle tre versioni elettrica, diesel e benzina, nonché rappresentativo in quanto veicolo più venduto in Europa per diversi anni.<sup>12</sup>

La metodologia adottata considera diversi fattori, tra cui il chilometraggio del ciclo di vita dei veicoli, la durata prevista della batteria nei veicoli elettrici, la produzione di energia elettrica, il consumo di carburante e le emissioni inquinanti.

È stato stimato che la batteria possa raggiungere una durata di 200.000 km.

Inoltre, si prende in considerazione l'utilizzo di energia elettrica in Italia, insieme all'importazione di energia elettrica dall'Europa.

Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico, si osserva che il veicolo elettrico presenta emissioni inferiori rispetto a benzina e diesel, ad eccezione dell'SO<sub>2</sub> (diossido di zolfo), a causa della produzione di elettricità per la ricarica delle batterie.

Gli esiti dell'analisi sottolineano comunque l'efficacia dei veicoli elettrici nel ridurre le esternalità dell'inquinamento atmosferico e dei gas serra, contribuendo a un minor impatto ambientale complessivo.

Si evidenzia che l'orientamento verso veicoli elettrici rappresenta una scelta sostenibile anche in termini di costi esterni, come dimostrato dai minori valori di danni alla salute umana e all'ambiente.

Per sintetizzare gli impatti ambientali si è utilizzato un unico valore monetario, così da condensare in modo efficace e comprensibile una vasta gamma di conseguenze legate all'ambiente, consentendo di mettere in relazione gli impatti ambientali con le valutazioni economiche.<sup>13</sup>

I risultati dell'analisi di Girardi et al. espongono che, a parità di vettura (offrendo dunque servizi simili all'utente), i costi esterni delle emissioni atmosferiche nell'intero ciclo di vita sono rispettivamente di circa € 12 ogni 1000 km per la versione elettrica, € 21 ogni 1000 km per il veicolo a benzina e € 24 ogni 1000 km per il veicolo diesel.

---

<sup>12</sup> Bekker, H. (2019). Europe: Best-selling car models. Frederiksberg (DK): Care Sales Statistics.

<sup>13</sup> Morel, S.; Traverso, M.; Preiss, P. (2018). Discussion Panel—Assessment of externalities: Monetisation and social LCA.

Seppur la vettura elettrica sia la scelta migliore dal punto di vista ambientale, in quanto non rilascia emissioni nocive nella fase di utilizzo, è importante notare che le BEV non siano a impatto zero: la produzione di energia elettrica per la ricarica delle batterie è infatti fortemente energivora e può comportare emissioni in atmosfera.

Il mix energetico di un paese è un fattore importante che influenza l'impatto ambientale delle auto elettriche. In paesi con un mix energetico basato su fonti di energia rinnovabili, come l'energia solare e l'energia eolica, le auto elettriche hanno un impatto ambientale inferiore rispetto a paesi con un mix energetico basato su fonti di energia fossili, come il carbone e il gas naturale.

Inoltre, la produzione e lo smaltimento del gruppo propulsore elettrico e della batteria ad alto voltaggio comportano un onere ambientale non trascurabile. La produzione delle batterie richiede l'estrazione di metalli pesanti, come il litio, il cobalto e il nichel, che possono avere un impatto negativo sull'ambiente. Lo smaltimento delle batterie è un problema complesso, poiché le batterie contengono sostanze tossiche che devono essere trattate in modo sicuro.

Questi aspetti verranno approfonditi nel prossimo capitolo.

Nonostante questi aspetti, le auto elettriche sono ancora un'alternativa più sostenibile alle auto con motore a combustione interna.

Inoltre, con l'aumento della diffusione delle energie rinnovabili e l'innovazione nella produzione e nello smaltimento delle batterie, l'impatto ambientale delle auto elettriche continuerà a diminuire.

Esaminando ora le esigenze di manutenzione e i costi correlati tra le varie tipologie di veicoli, dalle seguenti analisi emerge come i veicoli dotati di motore a combustione interna richiedano interventi manutentivi più significativi rispetto ai veicoli elettrici, in virtù del loro metodo di propulsione.

La configurazione intrinseca dei motori ICE richiede infatti la presenza di fluidi e filtri da sottoporre a periodici cambiamenti per garantire un corretto ed efficiente funzionamento, fluidi che sono assenti nelle vetture elettriche BEV.

Anche i periodici cambiamenti di altre componenti sono ridotti, come l'impianto frenante, che grazie al sistema di frenata rigenerativa che utilizza il motore elettrico da generatore convertendo l'energia cinetica in elettrica, ne garantisce una maggiore durata.

Inoltre, in termini di complessità, un motore elettrico vanta un numero di parti in movimento nettamente inferiore rispetto a un motore a combustione interna.<sup>14</sup>

Grazie all'analisi di Palmer et al., si può ottenere un quadro dei costi di manutenzione e riparazione dei veicoli elettrici a batteria (BEV) e degli equivalenti veicoli a combustione interna (ICEV) in diversi contesti geografici, ovvero Giappone, Regno Unito, e due stati degli Stati Uniti (California e Texas).

I risultati di questa analisi hanno rivelato una significativa riduzione percentuale dei costi di manutenzione e riparazione per le vetture elettriche, nei diversi contesti considerati.

In Giappone e nel Regno Unito, si è registrato un calo del 23%, mentre negli Stati Uniti, sia in Texas che in California, questa riduzione è stata rispettivamente del 24% e del 30%.<sup>15</sup>

Anche in seguito alla ricerca di Grosso et al., si nota un consenso scientifico che attesta come le automobili elettriche richiedano minori interventi di manutenzione e riparazione rispetto ai veicoli a combustione interna, affermando come tali costi risultino inferiori di almeno il 30% per le vetture elettriche a batteria rispetto a veicoli a combustione interna.<sup>16</sup>

Questo si traduce, oltre a minori costi, anche ad un ulteriore vantaggio in termini di sostenibilità per le vetture a batteria: minori interventi di manutenzione si traducono in una minore generazione di rifiuti. Fluidi come olio e ricambi come le pastiglie dei freni sono infatti elementi altamente inquinanti, specialmente in fase di smaltimento.

## **1.2 Analisi di mercato**

Sebbene il percorso esatto nel futuro dell'automotive possa ancora essere incerto, con interrogativi da risolvere e sfide da superare, la direzione verso un significativo impatto in termini di emissioni e sostenibilità ambientale è chiara.

---

<sup>14</sup> Barkenbus, J. N. (2020). Prospects for Electric Vehicles.

<sup>15</sup> Palmer, K.; Tate, J. E.; Wadud, Z.; Nellthorp, J. (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan.

<sup>16</sup> Grosso, M.; Raileanu, J. C.; Krause, J.; Raposo, M. A.; Duboz, A.; Garus, A.; Mourtzouchou, A.; Ciuffo, B. (2021). How will vehicle automation and electrification affect the automotive maintenance, repair sector?

La protagonista per il futuro sembra essere, tra le varie tipologie di alimentazione, l'automobile elettrica.

Secondo le stime dell'IEA, nei prossimi anni potrebbe incrementare considerevolmente la sua presenza nelle strade, oscillando tra il più prudente scenario di 200 milioni e il più ambizioso scenario di 350 milioni. Questo rappresenterebbe un incremento sostanziale rispetto al parco globale di EV attualmente in circolazione, che conta circa 26 milioni di auto elettriche.<sup>17</sup>

Inoltre, le vendite dei veicoli a combustione hanno raggiunto il loro massimo nel 2017 e negli ultimi anni sono state in declino, tendenza che secondo BloombergNEF continuerà a verificarsi a lungo termine. Entro il 2026, si prevedono vendite di veicoli a combustione inferiori del 39% rispetto al 2017. Anche il parco circolante di veicoli a combustione raggiungerà il picco nel 2025, per poi lasciare spazio a soluzioni di mobilità più sostenibile.<sup>18</sup>

Analizzando la fiducia dei consumatori nei confronti dei veicoli elettrificati dal recente report di EY, studio condotto su 20 paesi con oltre 15mila intervistati, si evince come questa sia notevolmente aumentata rispetto ai dati del 2022.

Ciò si traduce in un aumento delle intenzioni di acquisto per la maggior parte dei mercati: nel mondo, infatti, il 55% degli intervistati interessati a comprare un veicolo nuovo ha dichiarato di acquistarlo di tipologia full electric o ibrido.

In particolare, si è registrato un aumento delle intenzioni di acquisto verso questi veicoli del 19% negli Stati Uniti, del 12% in Svezia e dell'11% in Giappone. Considerando la classifica generale, si vede al primo posto la Cina, dove il 75% dei consumatori sono propensi all'acquisto di vetture a batteria, seguita dall'Italia con il 70%, Norvegia con il 67% e Svezia e Giappone con il 64%.

L'analisi poi evidenzia i fattori che motivano tale propensione all'acquisto, dove quest'anno per la prima volta l'aumento dei prezzi dei carburanti è in testa alle motivazioni, con quota 40%, seguito poi dalle tematiche di sostenibilità ambientale, al 38%.

---

<sup>17</sup> IEA (2023). Global EV Outlook 2023. Tratto da: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.

<sup>18</sup> BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.

Tra le motivazioni che frenano l'adozione dei veicoli elettrici resta ancora al primo posto la percezione di un'infrastruttura non ancora adeguata.

Grazie ai sussidi e al progressivo calo dei prezzi di queste vetture, il costo d'acquisto risulta oggi meno impattante (con una diminuzione del 18% rispetto al 2022), posizionandosi comunque al secondo posto.

Il terzo fattore considerato come punto percepito critico resta l'autonomia, dove ancora i livelli di chilometraggio sono mediamente inferiori rispetto alle vetture ICE.<sup>19</sup>

### 1.2.1 Mercato attuale

Le vendite globali di automobili elettriche hanno raggiunto un traguardo significativo, superando la cifra di 10 milioni nel 2022. In termini percentuali, le vetture elettriche nel 2022 contano il 14% della totalità di veicoli venduti.

Si è dunque registrato un notevole incremento di elettriche nel mondo, quintuplicando le vendite in soli 3 anni, considerando il dato di vendita del 2019 pari a circa 2 milioni di unità vendute.

Di seguito una tabella riassuntiva:

Anno	Vendite EV globali (milioni)	Quota di mercato EV (%)
2019	2,1	2,1
2020	3,2	3,2
2021	6,6	6,6
2022	10,5	14,2

Fig. 2: Vendite globali di EV e quote di mercato. Fonte: BloombergNEF.

Nel grafico a seguire è visibile lo storico di vendite globali di auto elettriche suddivise per mercato, grazie alle più recenti analisi di BloombergNEF.

Si evince l'importanza della Cina, in testa alla classifica con 6 milioni di unità vendute. A seguire l'Europa, secondo mercato con 2,7 milioni di unità, dove una vettura su cinque è venduta con tecnologia a batterie.

---

<sup>19</sup> EY (2023). EY Mobility Consumer Index 2023.

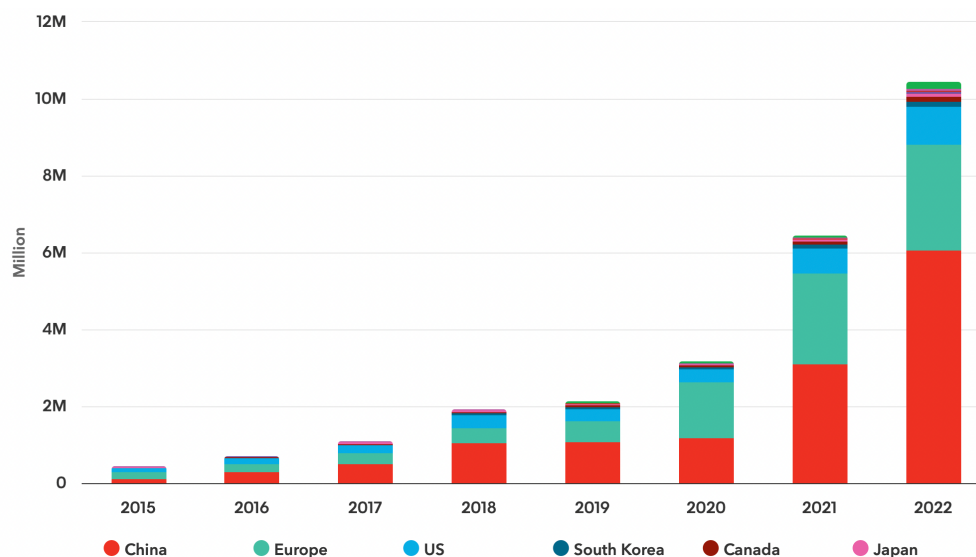


Fig. 3: Vendite globali di EV suddivise per mercati. Fonte: BloombergNEF, Marklines, Jato.

Tra i paesi Europei, la Norvegia mantiene la sua posizione di leadership nel settore dell'automobile elettrica.

In questo paese nordico, infatti, l'80% delle auto immatricolate nel 2022 sono elettriche BEV. Se aggiungiamo anche le ibride plug-in, si arriva al 90%.<sup>20</sup>

L'andamento delle vendite delle autovetture elettriche sembra destinato a mantenere una robusta traiettoria di crescita anche nel corso del 2023.

Durante il primo trimestre si è registrato un importante volume di vendite, superando la soglia delle 2,3 milioni di unità, riflettendo un aumento del circa il 25% rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente.

Le previsioni elaborate dall'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), ipotizzano la cifra di 14 milioni di vendite globali di vetture a batteria entro la fine del 2023, con un notevole incremento del 35% rispetto al dato del 2022.

Da ciò, si evince uno scenario in cui le vetture EV nel mondo potrebbero rappresentare un 18% delle vendite complessive di automobili del 2023.

Secondo le previsioni di BloombergNEF, le vendite di auto elettriche (EV) nel mondo raggiungeranno i 22 milioni nel 2023, con una quota di mercato del 26%.

Analizzando i modelli più venduti ad oggi, tra le vetture elettriche Tesla Model 3 si attesta come l'auto più venduta a livello globale dal 2018.

<sup>20</sup> Motus-E (2023). Le infrastrutture di ricarica a uso pubblico in Italia (Quarta edizione).

Nel 2023, Tesla Model 3 e Model Y hanno rappresentato oltre un terzo delle vendite globali di auto elettriche, contribuendo a rendere la casa produttrice di Elon Musk leader mondiale nel settore delle auto a batteria. Secondo i dati di JATO Dynamics, le auto elettriche più vendute al mondo nel 2023 sono state le seguenti:

1. Tesla Model Y (1,36 milioni di unità);
2. Tesla Model 3 (1,06 milioni di unità);
3. Wuling Hongguang Mini EV (443.384 unità);
4. BYD Qin Plus (352.163 unità);
5. Volkswagen ID.4 (280.239 unità).

Estendendo la classifica ai primi 10 modelli più venduti, emerge come le auto elettriche cinesi siano in dominio, contando 6 delle 10 auto più vendute. Questo è dovuto a una serie di fattori, tra cui i prezzi più bassi e i forti sussidi governativi, oltre alla crescente domanda dei consumatori orientali, che guardano con favore la produzione interna.

Ciò nonostante, l'americana Tesla Model Y continua ad essere l'auto elettrica più venduta al mondo per il secondo anno consecutivo, con un aumento delle vendite del 109% rispetto al 2022. Anche la Tesla Model 3 è rimasta al secondo posto, con un aumento delle vendite del 57%.

È importante, precisare come anche l'americana Tesla produca però le sue vetture principalmente in Cina. Tre anni fa è stata infatti costruita una gigafactory a Shanghai, e già nel 2021 l'impianto cinese ha superato la prima fabbrica di Tesla, quella californiana, grazie a un veloce incremento della capacità produttiva, passata da 450mila a 800mila veicoli l'anno. I continui investimenti in ammodernamento e innovazione prevedo di raggiungere presto la quota di 1 milione di veicoli l'anno garantendo all'impianto di Shanghai la posizione di principale hub per le esportazioni nonché principale fabbrica produttiva Tesla, dove ad oggi si producono Model 3 e Model Y.

Un traguardo storico e significativo della transizione in atto verso una mobilità sostenibile è visibile dai dati di vendita del primo semestre del 2023 in Europa, dove per la prima volta l'auto più venduta in assoluto, dunque non solo tra le elettriche, è una vettura a batteria. Si tratta di Tesla Model Y, al primo gradino del podio con 136.564 unità vendute.



La Model Y è seguita da due modelli non elettrici, al secondo posto Dacia Sandero (123.408 unità) e al terzo Volkswagen T-Roc (111.692 unità).<sup>21</sup>

Questo risultato deriva, oltreché da una maggiore sensibilità nei confronti dei consumatori europei verso l'ambiente, da una forte politica di taglio dei prezzi adottata dalla multinazionale americana. Dall'inizio del 2023, infatti, Tesla ha ridotto i prezzi di tutti i suoi modelli in Europa. In Italia, ad esempio, la Tesla Model 3 Long Range (con 602 km di autonomia dichiarata) è passata da €52.990 a €48.990, mentre la Tesla Model Y Long Range (con 533 km di autonomia dichiarata) è passata da €59.990 a €53.990, impattando positivamente sulle vendite.



*Fig. 4: Tesla Model Y, auto più venduta in Europa nel primo semestre 2023. Fonte: Tesla.*

Un aspetto interessante del mercato attuale, dove ancora una volta Tesla è leader globale, è la vendita online delle nuove vetture.

Dall'ultimo studio di BearingPoint che analizza le vendite online nel settore automotive in Europa, Stati Uniti e Asia, emerge come più del 70% dei principali produttori oggi offra ai clienti la possibilità di completare il processo di vendita online. Rispetto a due anni fa, i produttori che offrono questo servizio sono aumentati di circa il 110%.

Anche in termini di qualità di esperienza Tesla è al primo posto. A seguire si trova Polestar. Entrambe adottano un modello di business simile, che inizia con l'esperienza diretta del cliente in un punto vendita fisico (showroom) e prosegue con la vendita online, evitando il coinvolgimento delle concessionarie.<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> Jato Dynamics (2023). Global EV Sales 2023, Q2: Tesla Model 3, Model Y Remain Top Sellers, Europe Continues to Grow.

<sup>22</sup> BearingPoint (2023). New Car Online Sales 2023

### *1.2.2 Previsioni future*

Nonostante la complessità di anticipare l'evoluzione futura del mercato automobilistico, dato il susseguirsi costante di cambiamenti e innovazioni, questo sottocapitolo si pone l'obiettivo di esaminare le principali previsioni dei volumi di vendita e rispettive quote di mercato provenienti dalle più autorevoli società di consulenza del settore. Inoltre, verranno analizzati i piani strategici delle principali case automobilistiche sul mercato.

Secondo le previsioni di BloombergNEF, le vendite di auto elettriche (EV) nel mondo raggiungeranno i 22 milioni nel 2023, con una quota di mercato del 26%. Nel 2025, le vendite di auto elettriche sono stimate in 42 milioni, con una quota di mercato del 44%. Nel 2030, le vendite di auto elettriche si prevede raggiungeranno 123 milioni, con una quota di mercato del 70%.

Secondo le stime più conservative di IEA, nel 2030 i veicoli elettrici (EV) potrebbero rappresentare il 35% delle vendite complessive di automobili.

Secondo le proiezioni di Bain & Company, in Europa nel 2030 le vetture elettriche potrebbero contare il 55% delle vendite totali, in Cina il 40% e negli Stati Uniti il 32%.<sup>23</sup> Anche le analisi di Boston Consulting Group sono in linea con queste numeriche: si stima infatti che le vetture EV costituiranno circa il 60% delle vendite di veicoli nuovi a livello mondiale nel 2035.<sup>24</sup>

Si prevede inoltre che l'adozione dei veicoli elettrici a batteria avverrà a ritmi differenziati nelle diverse regioni del mondo.

Boston Consulting Group prevede come l'Unione Europea, grazie alla rigorosa posizione normativa, si posizioni in prima linea con i BEV che rappresenteranno oltre il 90% delle vendite di veicoli leggeri entro il 2035.

Anche negli Stati Uniti e in Cina, seppur con un certo ritardo rispetto all'Europa, è prevista una rapida progressione.

Di seguito sono visibili le proiezioni nel dettaglio.

---

<sup>23</sup> Bain & Company (2022). Tratto da: <https://www.bain.com/about/media-center/press-releases/2022/new-research-from-bain--company-shows-electric-vehicles-are-set-to-reshape-the-auto-industry-faster-than-anticipated/>

<sup>24</sup> Boston Consulting Group (2023). Rewiring the Auto Industry for the Electric, Connected Future. Tratto da: <https://www.bcg.com/publications/2023/rewiring-auto-industry-electric-connected-future>

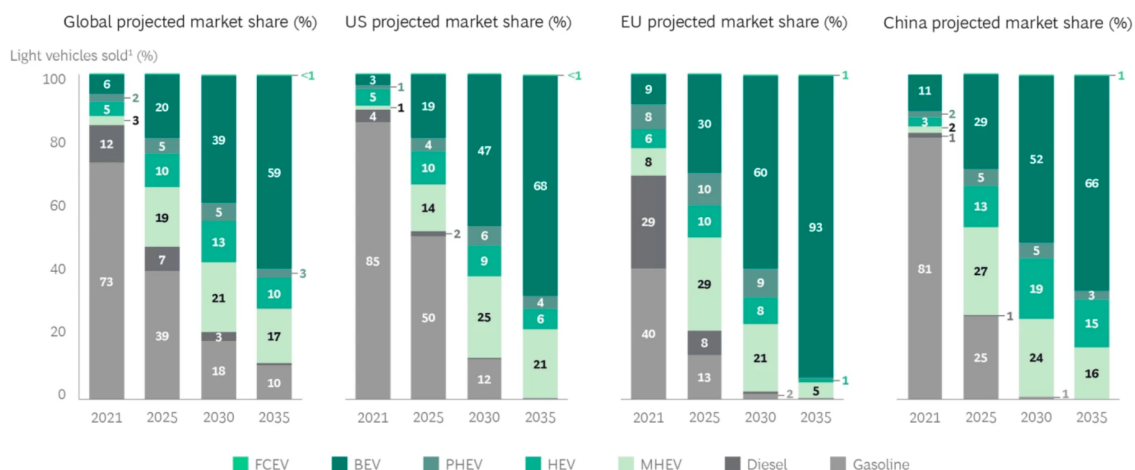


Fig. 5: Quote di mercato previste per le diverse tipologie di alimentazione. Fonte: Boston Consulting Group.

L'adozione nei mercati globali diversi da Cina, Stati Uniti ed Europa sarà più lenta: al di fuori di queste regioni, si prevede che i BEV costituiranno solo il 35% delle vendite di autovetture entro il 2035, abbassando la media globale.<sup>25</sup>

Per garantire questo andamento di crescita, l'attuazione di politiche nazionali e incentivi volti a sostenere e incentivare ulteriormente le vendite nel settore vertono un ruolo cruciale e saranno approfonditi nel prossimo sottocapitolo.

Anche analizzando i piani strategici di lungo periodo delle principali case automobilistiche globali è evidente la direzione verso una produzione incentrata sulle vetture a batteria.

Stellantis, che possiede 14 marchi automobilistici (tra cui Fiat, Alfa Romeo, Citroën, Chrysler, Fiat, Lancia, Maserati, Opel e Peugeot), ha pubblicato l'ultimo piano strategico a lungo termine nel 2022.

In questo, ha dichiarato l'obiettivo a vendere entro il 2030 il 100% delle sue vetture in Europa come veicoli completamente elettrici, mentre negli Stati Uniti prevede che il 50% delle vendite sarà composto da veicoli elettrici.

A partire dal 2024, tutte le nuove vetture lanciate dai suoi marchi includeranno una versione completamente elettrica. Nel 2024, la loro gamma di veicoli elettrici conterà 45 modelli, che crescerà fino a oltre 75 modelli entro il 2030.

<sup>25</sup> Boston Consulting Group (2022). Electric Cars Are Finding Their Next Gear. Tratto da: <https://www.bcg.com/publications/2022/electric-cars-finding-next-gear>

Le previsioni di vendita mondiali di veicoli Stellantis alimentati a batteria prevedono 1 milione di unità nel 2024, con l'obiettivo di crescere fino al raggiungimento di 5 milioni di unità nel 2030. Questo rappresenta un impegno significativo per la mobilità elettrica e la riduzione delle emissioni di carbonio.<sup>26</sup>

Mercedes-Benz ha dichiarato di essere pronta per un passaggio alla produzione 100% elettrica entro la fine di questo decennio. L'azienda tedesca sta infatti attuando una rapida transizione verso i veicoli elettrici: a partire dal 2025, tutte le nuove architetture dei veicoli saranno esclusivamente elettriche, e i clienti avranno la possibilità di scegliere un'opzione completamente elettrica per ciascun modello prodotto dall'azienda.

Per garantire l'alto livello di approvvigionamento di batterie e raggiungere gli obiettivi di produzione e vendita di veicoli BEV, Mercedes prevede la costruzione di 8 nuove fabbriche di celle per batterie in diverse parti del mondo.<sup>27</sup>

Volkswagen, altro storico colosso tedesco, prevede entro il 2030 di incrementare la percentuale di veicoli completamente elettrici in Europa al 70% delle sue vendite totali. Allo stesso modo, negli Stati Uniti e in Cina, Volkswagen punta ad ottenere una percentuale di auto elettriche pari al 50% delle sue vendite entro il 2030.

L'azienda sta accelerando la produzione ed espandendo la gamma di veicoli elettrici in tutti i segmenti di mercato. La strategia di Volkswagen è quella di affermarsi come il marchio leader mondiale nella mobilità elettrica climaticamente neutra.<sup>28</sup>

Anche tra i produttori nipponici è visibile la stessa tendenza. Nissan, nel suo ultimo piano aziendale di lungo termine, introdurrà 23 nuovi modelli elettrificati, tra cui 15 nuovi EV entro l'anno fiscale 2030 puntando a un mix di elettrificazione di oltre il 50% a livello globale dei marchi Nissan e Infiniti. In Europa prevedono già nel 2026 più del 75% delle vendite full electric, in Giappone più del 55%, e in Cina più del 40%.<sup>29</sup>

---

<sup>26</sup> Stellantis (2022). A Bold Strategic Plan. Tratto da:

<https://www.stellantis.com/en/company/dare-forward-2030>

<sup>27</sup> Mercedes-Benz (2021). Strategy Update: electric drive. Tratto da: <https://group.mercedes-benz.com/dokumente/konzern/sonstiges/daimler-mercedes-benz-strategy-update-electric-drive.pdf>

<sup>28</sup> Volkswagen (2021). Strategy. Tratto da: [https://www.volkswagen-newsroom.com/en/strategy-](https://www.volkswagen-newsroom.com/en/strategy-3912#:~:text=Until%202030%2C%20we%20want%20to,to%2050%20percent%20by%202030.)

[3912#:~:text=Until%202030%2C%20we%20want%20to,to%2050%20percent%20by%202030.](https://www.volkswagen-newsroom.com/en/strategy-3912#:~:text=Until%202030%2C%20we%20want%20to,to%2050%20percent%20by%202030.)  
<sup>29</sup> Nissan (2021). Nissan svela la visione "Ambition 2030" che mira a migliorare la mobilità del futuro. Tratto da: <https://italy.nissannews.com/it-IT/releases/release->

Anche Ferrari, come dichiarato nell'ultimo Capital Markets Day, sta lavorando per diversificare significativamente la sua gamma di prodotti. Entro il 2026, il 60% dei modelli Ferrari vanterà tecnologie ibride ed elettriche. Inoltre, Ferrari sta guardando al 2030 con una visione ancora più orientata verso la sostenibilità. Entro il 2030, l'azienda mira a un'offerta composta per il 40% da veicoli completamente elettrici, per il 40% da veicoli ibridi e solo per il 20% da veicoli ICE.

La prima Ferrari completamente elettrica sarà lanciata nel 2025, e si prevede garantirà un'esperienza di guida capace di mantenere le caratteristiche distintive di Ferrari, tra cui la potenza, il peso, il suono e le emozioni di guida. Un elemento distintivo sarà la gestione delle batterie, che saranno acquistate esternamente per ottenere il maggior livello di innovazione tecnologica, ma assemblate artigianalmente a Maranello integrandole nel telaio delle vetture. Questo processo è funzionale all'obiettivo di minimizzare il peso del veicolo, una delle sfide maggiori per un'auto sportiva elettrica.<sup>30</sup>

### **1.3 Politiche a sostegno**

La transizione verso un modello di mobilità sostenibile non può essere realizzata esclusivamente attraverso un maggiore livello di consapevolezza ambientale da parte dei consumatori o tramite gli impegni delle case automobilistiche, nonostante siano fattori importanti per promuoverla.

Le politiche pubbliche e le normative governative svolgono un ruolo cruciale per raggiungere tale obiettivo.

Le politiche pubbliche possono infatti incoraggiare la diffusione di tecnologie e soluzioni sostenibili, disincentivare l'utilizzo di veicoli a combustione interna e investire in infrastrutture per la mobilità sostenibile.

Ecco alcuni esempi di politiche pubbliche e normative governative che possono promuovere la mobilità sostenibile:

- Incentivi fiscali per l'acquisto di veicoli elettrici e ibridi;
- Imposizione di tasse o tariffe sui veicoli a combustione interna;

---

0f1f4ed24f506b7f803912791206fecf-nissan-svela-ambition-2030-la-nuova-visione-per-migliorare-la-mobilita-del-futuro

<sup>30</sup> Ferrari (2022). Ferrari Capital Markets Day Piano Strategico 2022-2026. Tratto da: <https://www.ferrari.com/it-IT/corporate/articles/ferrari-capital-markets-day-2022>

- Regolamentazione delle emissioni dei veicoli;
- Investimento in infrastrutture per la mobilità sostenibile.

Queste politiche e normative possono contribuire a rendere i veicoli sostenibili più accessibili e convenienti, e a ridurre la domanda di veicoli a combustione interna.

Guardando una proiezione dei risultati futuri con gli attuali obiettivi dei diversi paesi, la prospettiva è positiva, ma i responsabili delle politiche e le aziende automobilistiche devono ancora agire per accelerare l'adozione e rimuovere alcuni ostacoli.

Il recente report di BCG su clima e sostenibilità evidenzia i seguenti scenari:

- L'Unione Europea sta procedendo verso l'obiettivo Net Zero Emission del suo parco auto circolante, previsto per il 2050, raggiungibile continuando gli investimenti in trasporto pubblico di massa e opzioni di mobilità pulita. Secondo le previsioni, l'UE ha la possibilità di raggiungere il suo obiettivo di ridurre le emissioni automotive entro il 2030 (rispetto ai livelli del 2005) dal 45% al 50%. Tuttavia, è necessaria un'azione più incisiva per garantire che il parco auto si rinnovi rapidamente, che i proprietari di PHEV utilizzino l'elettricità anziché la benzina per i loro veicoli e che i consumatori siano incentivati all'acquisto di EV.
- La Cina, avendo ad oggi una quota superiore al 20% di nuovi veicoli alimentati a batteria, si prevede raggiunga il suo obiettivo fissato a 40% di vendita di veicoli completamente elettrici sul totale entro il 2030. Entro il 2040, però, tutte le nuove vendite di veicoli in Cina dovranno essere EV per raggiungere il più sfidante obiettivo di zero emissioni entro il 2060.
- Gli Stati Uniti dovranno recuperare terreno per raggiungere i loro obiettivi. Sebbene le proiezioni di BCG affermino esista ancora una finestra di opportunità affinché il paese possa raggiungere l'obiettivo di vendere tutti i nuovi veicoli a zero emissioni nel 2030, il parco auto degli Stati Uniti difficilmente si rinnoverà abbastanza rapidamente per consentire all'amministrazione di raggiungere l'obiettivo dichiarato di ridurre le emissioni del 50% entro il 2030 rispetto a una base del 2005.

Di seguito i grafici che forniscono un quadro riassuntivo.<sup>31</sup>

---

<sup>31</sup> Boston Consulting Group (2022). Electric Cars Are Finding Their Next Gear. Tratto da <https://www.bcg.com/publications/2022/electric-cars-finding-next-gear>

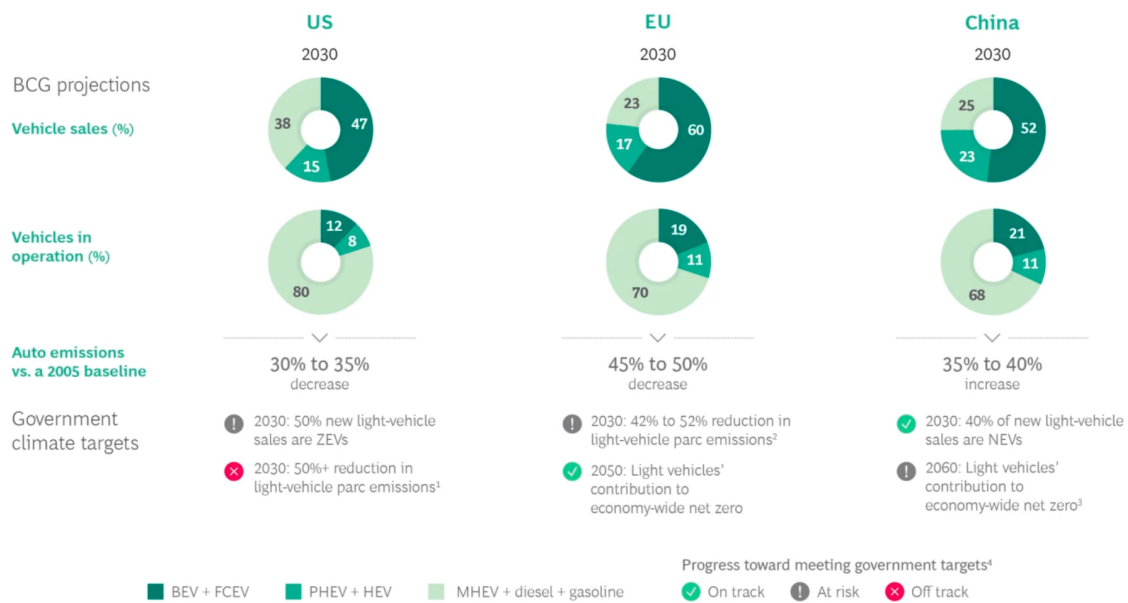


Fig. 6: Proiezione di nuove vendite di veicoli, parco circolante e riduzione delle emissioni. Fonte: BCG powertrain model, BCG auto emission model, BCG vehicles in operation (VIO) model.

A seguire si svolgerà un'analisi dell'attuale quadro normativo dedicato alla mobilità sostenibile di Europa, Cina e Stati Uniti.

### 1.3.1 Quadro normativo Europa

Nel Dicembre del 2019 in Europa è stato presentato l'ambizioso European Green Deal, un insieme di misure politiche promosse dalla Commissione Europea con l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica nell'UE entro il 2050, ponendo anche un obiettivo intermedio di riduzione delle emissioni di carbonio di almeno il 50% (e verso il 55%) rispetto ai livelli del 1990, entro il 2030. Questa iniziativa rappresenta un passo significativo nella direzione di affrontare il cambiamento climatico e trasformare profondamente l'approccio dell'Europa all'energia, all'industria e alla mobilità.<sup>32</sup>

Ricordando che un quarto delle emissioni di gas serra in Europa sono attribuibili ai trasporti, il Consiglio dei ministri dell'Ambiente dei Paesi membri dell'Unione Europea ha stabilito una chiara direzione per quanto riguarda il settore automotive.

<sup>32</sup> Teevan; C., Medinilla; A., Sergejeff; K. (2021). The Green Deal in EU foreign and development policy.

L'attenzione si è rivolta alla modalità di alimentazione delle prossime generazioni di veicoli: a partire dal 2035, è stata infatti fissata l'ambiziosa meta di vietare la commercializzazione all'interno dell'Europa di automobili dotate di motori a combustione interna (ICE).

Questa misura rappresenta un passo importante nell'ambito della strategia europea volta a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (Net Zero Emission), attraverso la riduzione delle emissioni derivanti dal traffico veicolare.<sup>33</sup>

In termini di emissioni, sappiamo che nel corso del 2020, il settore dei trasporti ha rappresentato circa il 20 per cento delle emissioni globali di gas serra.<sup>34</sup>

All'interno di queste emissioni relative al settore dei trasporti, oltre il 40 per cento è attribuito alle automobili.<sup>35</sup>

L'innovazione e l'adozione di vetture sostenibili sono state incentivate dunque da una combinazione di fattori, al di là della domanda di mercato, che hanno spinto i produttori di automobili a una rapida transizione della produzione verso la mobilità elettrica.

Le politiche pubbliche hanno svolto un ruolo determinante, e i paesi del Nord Europa si sono distinti in queste iniziative: la Norvegia in particolare, si è posta come obiettivo quello di bandire le auto a benzina e diesel entro il 2025, supportato da un forte impegno verso gli EV con vari incentivi governativi, da detrazioni fiscali a risparmi sul carburante. Questo impegno trova una solida base di giustificazione nei risultati riportati già nell'anno 2017, in cui oltre un quinto delle nuove auto immatricolate, rappresentativo del 21,3%, è stato rappresentato dai veicoli elettrici a batteria (BEV).

Questa cifra, tradotta in numeri assoluti, ammonta a 38.264 unità su un totale di 179.594 nuovi veicoli registrati nello stesso periodo.

Inoltre, è significativo notare che nel medesimo anno ben 139.000 veicoli elettrici erano in circolazione, rappresentando così il 5,1% del complessivo parco veicolare norvegese, composto da 2,7 milioni di unità.<sup>36</sup>

---

<sup>33</sup> Fontanelli, G. (2018). Autoshoock: viaggio nella rivoluzione dell'auto elettrica che rischia di distruggere l'industria più importante del mondo. Mind.

<sup>34</sup> Statista (2023). Global carbon dioxide emissions from 1970 to 2021, by sector.

<sup>35</sup> Statista (2023). Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2020, by subsector.

<sup>36</sup> OICA (2022). 2022 Statistics. Tratto da <https://www.oica.net/category/production-statistics/2022-statistics/>



In Svezia sono in corso piani per ampliare l'infrastruttura di stazioni di ricarica rapida del 600% nelle aree densamente popolate, riflettendo la visione della nazione di una mobilità elettrica diffusa entro il 2035.

Nel quadro delle sue strategie per favorire la transizione verso una mobilità più sostenibile, la Germania, oltre all'installazione di stazioni di ricarica rapida e stazioni di idrogeno lungo le sue autostrade, ha previsto uno stanziamento di tre miliardi di euro per il periodo compreso tra il 2025 e il 2030, come incentivo per aumentare la quota di mercato di veicoli non inquinanti.

L'incentivo si attesta a nove mila euro a favore degli acquirenti di automobili elettriche, mentre raggiunge la cifra di sei mila euro per gli acquirenti di vetture ibride plug-in.<sup>37</sup>

Questo trend di sostegno all'innovazione degli EV attraverso incentivi è emerso a livello globale.

Anche Francia e Regno Unito offrono infatti incentivi finanziari per l'adozione degli EV, sebbene le loro modalità possano variare in termini di tempistica di allocazione.

La Spagna ha introdotto generosi incentivi per la transizione alla mobilità elettrica, con consistenti bonus per la rottamazione di veicoli più vecchi e l'acquisto di auto elettriche. Inoltre, sono previsti incentivi specifici per promuovere la mobilità elettrica urbana e incoraggiare l'acquisto di auto plug-in con una determinata autonomia elettrica.

I paesi del Nord Europa guidano l'adozione degli EV attraverso una combinazione di politiche progressiste e incentivi, mentre altre nazioni stanno compiendo passi incrementali verso una mobilità sostenibile. Questo spostamento trasformativo sottolinea l'impegno globale nell'affrontare le preoccupazioni climatiche e ridefinire il futuro della mobilità.

Anche il governo italiano ha da tempo dimostrato il suo impegno a promuovere la mobilità elettrica.

Nel 2012 ha approvato la legge n. 134, che ha previsto incentivi per l'acquisto di veicoli elettrici. Nel 2014 ha approvato il Decreto del Presidente della Repubblica n. 145, che ha introdotto il Piano nazionale delle infrastrutture per la ricarica dei veicoli ad alimentazione elettrica.

---

<sup>37</sup> Varesi, S. (2010). Gli incentivi a favore dell'auto elettrica. Mimeo.

Nel 2018 ha approvato la legge n. 145, che ha ulteriormente incentivato l'acquisto di veicoli elettrici e ha introdotto tasse per la registrazione dei veicoli inquinanti.

Queste misure hanno avuto un impatto positivo sulla diffusione della mobilità elettrica in Italia.

I dati del Ministero dello Sviluppo Economico dimostrano infatti come nel 2018 il numero di veicoli elettrici circolanti nel paese è stato di circa 40.000 unità, aumentando a circa 115.000 unità nel 2021, sino alle circa 185.000 unità di fine 2022.

Si prevede che la crescita continuerà nei prossimi anni, con l'obiettivo del governo italiano di avere un milione di veicoli elettrici circolanti entro il 2030.

La legge di bilancio per il 2019 ha introdotto, in particolare, agevolazioni per gli acquirenti di veicoli a basse emissioni e aumenti delle imposte finalizzati a scoraggiare l'acquisto di veicoli ritenuti inquinanti, orientando le scelte d'acquisto verso veicoli a basse emissioni.<sup>38</sup>

Ciò è stato realizzato attraverso tre tipi di intervento:

- a) Incentivi per l'acquisto di nuove vetture ibride / elettriche, nella forma di sconti sul prezzo tra 1.500 e 6.000 euro per veicoli con prezzo inferiore a 50.000 euro (maggiori nel caso di rottamazione di veicoli inquinanti);
- b) Detrazioni fiscali per l'acquisto e la realizzazione di infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici;
- c) Tasse per l'immatricolazione di veicoli inquinanti (eco-tassa).

Il governo italiano sta inoltre investendo nella realizzazione di infrastrutture per la ricarica dei veicoli elettrici. Nel Piano nazionale per la mobilità sostenibile del 2018 ha previsto la realizzazione di 12.500 punti di ricarica pubblici entro il 2025, con un investimento di un miliardo di euro. Il governo italiano è impegnato a promuovere la mobilità elettrica anche a livello europeo, aderendo nel 2019 all'European Green Deal, il piano d'azione per rendere l'Europa climaticamente neutra entro il 2050.

---

<sup>38</sup> Baccelli, O.; Galdi, R.; Grea, G. (2017). L'e-mobility: Mercati e policies per un'evoluzione silenziosa. Milano.

### *1.3.2 Quadro normativo Cina e US*

Non solo in Europa le autorità governative stanno attivamente promuovendo iniziative volte a guidare l'evoluzione dell'industria automobilistica verso la mobilità elettrica. Un esempio significativo proviene dal governo cinese, che ha adottato una strategia ambiziosa: obbligare i produttori di automobili che producono o importano più di trentamila unità all'anno a trasformare gradualmente il loro portafoglio dalla vendita di modelli a combustione interna a veicoli elettrici e ibridi.<sup>39</sup>

Questo si affianca a considerevoli incentivi all'acquisto di vetture BEV e PHEV, i quali, già a partire dal 2013, variavano da ¥ 35.000 a ¥ 60.000 a seconda dell'autonomia dei veicoli, stabilendo anche un valore minimo di autonomia al fine di poter accedere a tali incentivi.<sup>40</sup>

Oltre a una serie di incentivi governativi come sconti sull'acquisto, esenzioni fiscali e accesso a corsie preferenziali, in alcune metropoli cinesi come Pechino è stata introdotta la lotteria delle targhe, già a partire dal 2011, al fine di promuovere la diffusione di veicoli a zero emissioni e ridurre l'inquinamento atmosferico.

La lotteria delle targhe a Pechino è un sistema nato per limitare il traffico automobilistico nella capitale cinese. Il sistema prevede che i residenti di Pechino che desiderano acquistare un'auto nuova debbano partecipare a una lotteria per ottenere una targa. Le estrazioni della lotteria si svolgono ogni due mesi, e solo i vincitori della lotteria ricevono una targa per il loro veicolo. I perdenti della lotteria possono partecipare a una seconda estrazione, che si svolge ogni mese. In queste estrazioni, la probabilità di vincere è molto bassa: nel 2023, la probabilità di vincere la prima estrazione è fissata a circa 1 su 20.000, e la probabilità di vincere la seconda è di circa 1 su 10.000.

Le uniche vetture esenti dalla lotteria sono le vetture elettriche, ibride plug-in o a idrogeno. Ciò significa che i residenti di Pechino che acquistano un'auto elettrica non devono partecipare alla lotteria per ottenere una targa, un grande vantaggio considerando le probabilità molto basse di vincita qualora volessero acquistare un veicolo con motore a combustione interna.

---

<sup>39</sup> Wang, X.; Wei, Z. & Ruet, J. (2022). Specialised vertical integration: the value-chain strategy of EV lithium-ion battery firms in China. *International Journal of Automotive Technology and Management*, Volume 22, Number 2.

<sup>40</sup> Li, S.; Zhu, X.; Ma, Y.; Zhang, F.; Zhou, H. (2020). The Role of Government in the Market for Electric Vehicles: Evidence from China.

Tale politica ha dunque notevolmente influenzato l'adozione dei veicoli a batteria nella capitale cinese.<sup>41</sup>

Per quanto riguarda il governo federale degli Stati Uniti, a partire dal 2010 ha introdotto un credito d'imposta sul reddito federale per i nuovi acquirenti di veicoli elettrici. Questo credito è determinato in base alla capacità della batteria e alla classificazione del peso lordo del veicolo, con un importo che varia da \$2,500 a \$7,500.

Oltre al livello federale, vari governi statali hanno intrapreso iniziative per promuovere l'adozione dei EV. Secondo la Conferenza Nazionale delle Legislature Statali, dal 2017 46 degli 50 stati hanno implementato incentivi, sia di natura monetaria che non monetaria, per incentivare l'utilizzo di veicoli a batteria. Questi incentivi comprendono esenzioni fiscali e rimborsi per l'acquisto, nonché incentivi non finanziari riduzioni di pedaggi e parcheggi gratuiti. Inoltre, sono attivi a livello federale, statale e locale anche finanziamenti per lo sviluppo di nuove stazioni di ricarica.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> Zhuge, C.; Wei, B.; Shao, C.; Shan, Y.; Dong, C. (2020). The role of the license plate lottery policy in the adoption of Electric Vehicles: A case study of Beijing.

<sup>42</sup> Li, J. (2023). Compatibility and Investment in the U.S. Electric Vehicle Market.

## **Capitolo II Ruolo delle batterie nel nuovo paradigma di mobilità**

Le batterie giocano un ruolo fondamentale nel nuovo paradigma di mobilità sostenibile. Sono infatti la componente essenziale dei veicoli elettrici, che rappresentano la soluzione più promettente per ridurre le emissioni di gas serra del settore dei trasporti.

Le batterie, cuore energetico delle vetture BEV, possono variare di tipologia in base alla loro composizione chimica.

Oltre ai veicoli elettrici, le batterie sono utilizzate anche in altre applicazioni di mobilità sostenibile, come:

- I veicoli ibridi plug-in, che combinano un motore a combustione interna con un motore elettrico;
- I sistemi di trasporto collettivo, come autobus e tram, che possono essere elettrici o ibridi, oppure i mezzi pesanti per trasporto merci su gomma;
- I droni e velivoli di nuova generazione, elettrici a decollo e atterraggio verticale (eVTOL), per trasporto passeggeri o merci.

L'innovazione tecnologica nel campo delle batterie è fondamentale per promuovere la diffusione della mobilità sostenibile, e i ricercatori stanno lavorando per sviluppare batterie con una maggiore autonomia, una maggiore durata e un costo inferiore. Tuttavia, è importante notare che una parte delle risorse necessarie per la produzione delle batterie utilizzate in questi veicoli è limitata. Attualmente, si stima che le riserve di litio possano non essere sufficienti per coprire la domanda prevista di batterie nei prossimi decenni.

Questa situazione mette chiaramente in luce che la scarsità di determinati componenti rappresenta una delle principali sfide affrontate dalle tecnologie legate ai veicoli elettrici.

### **2.1 Tipologie di pacchi batterie**

Le batterie agli Ioni di Litio sono attualmente la tecnologia dominante nel settore dei veicoli elettrici, grazie alla loro alta densità energetica e prestazioni. In questa tecnologia, gli elettroni si spostano dal polo negativo (anodo) al polo positivo (catodo) attraverso un

materiale conduttore chiamato elettrolita, che solitamente si trova in forma liquida nelle batterie attuali.

La batteria agli ioni di litio si distingue per il suo notevole compromesso tra densità energetica (misurata in Wh/kg) e peso. In media, questa batteria è in grado di immagazzinare circa 200 Wattora di energia per ogni chilogrammo di peso.

Tuttavia, il processo di produzione di litio è noto per richiedere notevoli quantità di risorse e avere un impatto significativo sull'ambiente.

Questo minerale viene principalmente estratto in paesi dell'Africa e del Sud America. Per ottenerlo, è necessario utilizzare un metodo che comporta lunghi periodi di evaporazione di acque salmastre, con una media di duemila tonnellate di queste acque necessarie per produrre solamente una tonnellata di litio. Questo processo richiede dunque molte risorse idriche, e può avere conseguenze gravi, tra cui il rischio di contaminazione delle riserve d'acqua potabile e l'avvelenamento di intere comunità.

Inoltre, la necessità di raggiungere elevate temperature per estrarre il litio implica l'uso di combustibili fossili, con gli impatti ambientali che ne conseguono. Il risultato è un rilascio di circa nove tonnellate di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) nell'atmosfera per ogni tonnellata di litio prodotta.<sup>43</sup>

Un impegno nell'adozione di nuove pratiche di estrazione, ricercando il minimo impatto negativo su persone e ambiente, così come la ricerca di tecnologie alternative al litio, sono aspetti cruciali per garantire la sostenibilità di questa transizione.

Secondo l'ultimo Report sui veicoli elettrici di BloombergNEF, sono già visibili progressi nella tecnologia delle batterie, con avanzamenti nelle chimiche di catodi e anodi di nuova generazione (come la batteria al litio-ferro-fosfato, LFP), nelle batterie a stato solido e nella tecnologia a ioni di sodio, che raggiungeranno la commercializzazione nei prossimi anni.

La tecnologia a ioni di sodio si configura come alternativa promettente per le vetture elettriche. Gli ioni di sodio sono più abbondanti e meno costosi del litio, il che potrebbe rendere le batterie a ioni di sodio più economiche rispetto alle batterie al litio.

---

<sup>43</sup> Mancini, E. (2021). Auto elettriche: l'impatto delle batterie al litio sull'ambiente e la geopolitica.

Inoltre, le batterie agli ioni di sodio possono funzionare in un range di temperature più ampio, rendendole più adatte per l'uso in condizioni estreme. Queste batterie hanno poi un ulteriore vantaggio, in termini di sicurezza: sono infatti meno propense a prendere fuoco o esplodere rispetto alle batterie agli ioni di litio.

Tuttavia, le batterie a ioni di sodio presentano anche alcuni svantaggi, tra cui una minore densità energetica (che si traduce, nell'applicazione in una elettrica, in un'autonomia inferiore) e una maggiore suscettibilità alla corrosione (inficiandone la vita utile). Per affrontare tali problemi, un miglioramento dei materiali anodici potrebbe dare maggior futuro a questa tecnologia.<sup>44</sup>

Le batterie a stato solido sono un'altra tecnologia promettente per migliorare le prestazioni delle batterie. Queste utilizzano un elettrolita solido al posto dell'elettrolita liquido utilizzato nelle batterie agli ioni di litio, che genera una serie di vantaggi.

Innanzitutto, le batterie allo stato solido hanno una densità energetica superiore, il che significa che possono immagazzinare più energia nello stesso volume. Ciò consente alle auto elettriche con tali batterie un'autonomia maggiore.

Inoltre, le “solid-state battery” sono meno propense a prendere fuoco o esplodere rispetto alle batterie agli ioni di litio, rendendole più sicure per gli utenti e per l'ambiente.

Infine, hanno una durata maggiore rispetto alle batterie agli ioni di litio.

Tra le limitazioni di queste batterie, in primis c'è il costo superiore rispetto alle batterie agli ioni di litio, seguito da una temperatura di esercizio più limitata.<sup>45</sup>

### *2.1.1 Prezzi*

Nel corso degli anni, i prezzi dei pacchi batteria agli ioni di litio sono diminuiti notevolmente. Nel 2013, il costo medio era di circa 732 dollari per kWh, ma nel 2022 questa cifra si è drasticamente ridotta a 151 dollari per chilowattora (kWh), come confermato dall'indagine sui prezzi delle batterie condotta da BloombergNEF.<sup>46</sup>

---

<sup>44</sup> Bai, X.; Wu, N.; Yu, G.; Li, T. (2023). Recent Advances in Anode Materials for Sodium-Ion Batteries.

<sup>45</sup> Huang, Y.; Shao, B.; Han, F. (2022). Solid-State Batteries: An Introduction.

<sup>46</sup> BloombergNEF (2022). Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. Tratto da: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>

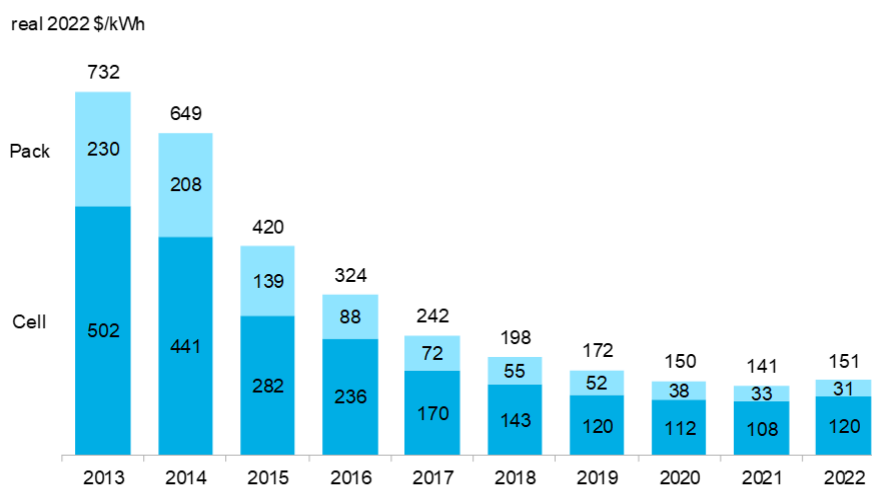


Fig. 7: Prezzo medio delle batterie agli ioni di litio dal 2013 al 2022, suddiviso in prezzo delle celle e del pacco batteria. Fonte: BloombergNEF.

Emerge come i prezzi dei pacchi batteria agli ioni di litio, che erano addirittura oltre 1.100 dollari per kilowatt-hour nel 2010, hanno subito una drastica diminuzione.

L'evoluzione dei costi delle batterie si è dimostrata una tendenza fondamentale che ha contribuito a rendere le vetture elettriche più accessibili e competitive sul mercato.

Tuttavia, si nota come i prezzi dei pacchi batteria agli ioni di litio abbiano subito il loro primo aumento dopo anni di calo, a causa dell'incremento dei costi delle materie prime e dei componenti delle batterie, oltre all'alta inflazione.

Nonostante l'adozione di chimiche a basso costo, come il fosfato di ferro e litio (LFP), i prezzi medi ponderati per volume dei pacchi batteria sono aumentati a \$151/kWh nel 2022, registrando il primo aumento dopo anni di consistenti riduzioni. In particolare, è visibile un aumento del 7% rispetto 2021.

Lo studio di Bloomberg prevede che i prezzi rimarranno elevati anche nel prossimo anno, e che inizieranno a diminuire a partire dal 2024, grazie a una maggiore capacità di estrazione e raffinazione del litio. Secondo le ultime proiezioni, è previsto che il prezzo medio delle batterie dovrebbe registrare una riduzione al di sotto di \$100/kWh entro il 2026, 2 anni dopo rispetto al loro report del 2021.<sup>47</sup>

<sup>47</sup> BloombergNEF (2021). Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. Tratto da: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>



La cifra di \$100/kWh è spesso citata come punto di riferimento per determinare quando le auto elettriche raggiungeranno la parità di prezzo con i veicoli convenzionali.

È importante menzionare come questa cifra di \$100 per kWh sia un riferimento nominale da oltre un decennio, senza tenere pienamente in considerazione l'aumento dei costi dovuto all'inflazione.

Dal report di Bloomberg emerge come la parità di prezzo tra le auto elettriche e i veicoli a combustione interna, inoltre, dovrebbe essere considerata più come un intervallo di valori anziché come una soglia fissa. Ai prezzi attuali delle batterie, esistono già alcuni segmenti di veicoli per cui è possibile adottare la tecnologia elettrica in modo economicamente vantaggioso, anche senza ricevere sovvenzioni.

Ad esempio, le auto elettriche premium sono probabilmente già competitive in termini di prezzo rispetto ai modelli a combustione interna, così come le piccole city car in Cina, dove le opzioni EV sono disponibili a partire da 5.000 dollari.

Tuttavia, è importante sottolineare come i prezzi delle batterie debbano ridursi ulteriormente affinché un numero maggiore di veicoli di fascia media possa adottare la tecnologia elettrica nel corso di questo decennio.<sup>48</sup>

### *2.1.2 Invecchiamento e degrado*

Le batterie dei veicoli elettrici sono soggette a invecchiamento e degrado, che si traducono in una riduzione della capacità di immagazzinare energia. Il degrado delle batterie è un processo naturale che avviene nel tempo, ma può essere accelerato da alcuni fattori specifici.

Le principali tipologie di invecchiamento che si stima possano influenzare la degradazione delle batterie sembrano essere due: il “calendar aging” e il “cyclical aging”.

Secondo lo studio di Keil et al., l'invecchiamento cosiddetto “calendar aging” comprende tutti i processi di invecchiamento che portano a una degradazione di una cella della batteria indipendentemente dal ciclo di carica-scarica. Questo è un fattore importante in molte applicazioni delle batterie agli ioni di litio in cui i periodi di funzionamento sono

---

<sup>48</sup> BloombergNEF (2022). Increase in Battery Prices Could Affect EV Progress. Tratto da: <https://about.bnef.com/blog/increase-in-battery-prices-could-affect-ev-progress/>

sostanzialmente più brevi rispetto agli intervalli di inattività, come nel caso dei veicoli elettrici.

In particolare, nei veicoli elettrici, le batterie spesso subiscono invecchiamento a causa delle frequenti ricariche e scariche, anche se il veicolo non è in uso. Questo fenomeno può essere attribuito alle variazioni di temperatura, all'umidità e ad altri fattori ambientali che possono influenzare la durata della batteria nel tempo.<sup>49</sup>

Riguardo l'esposizione a sbalzi termici, temperature elevate possono danneggiare gli elettrodi e ridurre la capacità della batteria, mentre temperature basse possono ridurre l'efficienza della batteria.

L'invecchiamento cosiddetto “cyclical aging” si verifica invece a causa dei cicli di carica e scarica. Questo tipo di invecchiamento è particolarmente rilevante in applicazioni in cui le batterie sono sottoposte a cicli frequenti, come nei veicoli elettrici che vengono spesso ricaricati e utilizzati. Le variazioni di tensione e corrente durante il ciclo di carica e scarica possono causare gradualmente la degradazione dei materiali all'interno delle batterie, influenzando la loro capacità e prestazioni complessive nel tempo. Ogni volta che una batteria viene caricata o scaricata, si verifica un processo di ossidazione che può danneggiare gli elettrodi. Questo degrado può essere ancora più enfatizzato se si utilizzano tecnologie di ricarica ad alta velocità.

La comprensione di questi tipi di invecchiamento e degrado è fondamentale per massimizzare la durata e le prestazioni delle batterie utilizzate nei veicoli elettrici, e conseguentemente anche per favorirne la diffusione rispetto ai tradizionali veicoli a combustione. Il divario competitivo tra questi veicoli può essere colmato dalla velocità di rifornimento, che deve però realizzarsi senza comportare degrado nella vita utile delle batterie.

Una possibile soluzione sembra essere stata recentemente scoperta da Bertei e Lagnoni (rispettivamente professore e ricercatore in Ingegneria Chimica dell'Università di Pisa), che, assieme ad altri autori provenienti da otto atenei internazionali, hanno dimostrato nell'articolo di agosto 2023 come questi limiti possano essere superati entro i prossimi anni.

---

<sup>49</sup> Keil, P.; Schuster, S. F.; Wilhelm, J.; Travi, J.; Hauser, A.; Karl, R. C.; Jossen, A. (2016). Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries.

L'articolo offre una inedita e definitiva quantificazione dei processi che causano l'invecchiamento durante la ricarica rapida delle batterie al litio.

Attualmente, nella ricarica rapida, si verifica un fenomeno di deposizione di litio metallico sulla superficie dell'anodo di grafite, il che può portare a una perdita irreversibile di litio e quindi a una diminuzione delle prestazioni e della sicurezza della batteria.

Tuttavia, lo studio ha scoperto che questo fenomeno (chiamato “placcatura al litio”) è parzialmente reversibile e fornisce dettagli sulla dinamica del suo riassorbimento, suggerendo come integrarlo nel funzionamento generale della batteria attraverso un modello computazionale avanzato.

In futuro, nei protocolli di ricarica rapida delle batterie di nuova generazione, sarà possibile migliorare le prestazioni e la longevità della batteria inserendo delle pause a determinati livelli di carica volte a risolvere questa “placcatura al litio”.<sup>50</sup>

Tali risultati, finalizzati ad ottenere una maggiore certezza sulla vita utile delle batterie, potranno avere un impatto notevole nell'incrementare le vendite dei veicoli BEV.

## **2.2 Analisi di mercato**

Le batterie sono un componente essenziale delle vetture elettriche, in quanto forniscono l'energia necessaria alla propulsione. Il mercato delle batterie per vetture elettriche è in rapida crescita, spinto dalla crescente domanda di veicoli a zero emissioni.

Il report di BloombergNEF sulle vetture a batteria sottolinea come l'obiettivo Net Zero Emission fissato al 2050 sia possibile, ma sono necessari investimenti significativi per garantire un progresso rapido, in particolare nelle aree della catena di fornitura delle batterie.

Una panoramica delle batterie per vetture elettriche e del loro mercato risulta essenziale per comprendere appieno come questa tecnologia stia trasformando il settore della mobilità.

---

<sup>50</sup> Lu, X.; Lagnoni, M.; Bertei, A.; Das, S.; Owen, R. E.; Li, Q.; O'Regan, K.; Wade, A.; Finegan, D. P.; Kendrick, E.; Bazant, M. Z.; Brett, D. J. L.; Shearing, P. R. (2023). Multiscale dynamics of charging and plating in graphite electrodes coupling operando microscopy and phase-field modelling.

Da giganti dell'industria automobilistica a start-up innovative, molte aziende stanno investendo massicciamente nello sviluppo di batterie più efficienti ed economiche.

I principali attori del mercato includono:

- CATL, azienda cinese classificabile come il principale produttore di batterie agli ioni di litio al mondo. CATL fornisce batterie per una vasta gamma di produttori di veicoli elettrici, tra cui Tesla, Volkswagen e BMW.
- LG Energy Solution, azienda sudcoreana classificabile come secondo produttore di batterie agli ioni di litio al mondo. LG Energy Solution fornisce batterie per una vasta gamma di produttori, tra cui General Motors, Ford e Hyundai.
- Panasonic, azienda giapponese tra i principali produttori di batterie al litio al mondo. Panasonic fornisce batterie per Tesla e altri produttori di EV.
- BYD, azienda cinese che è un importante produttore di veicoli elettrici, oltreché batterie. BYD fornisce batterie in primis per i propri veicoli elettrici, ma non solo.
- Samsung SDI, azienda sudcoreana della multinazionale Samsung Electronics, produttrice di beni elettronici. Samsung SDI fornisce batterie per un'ampia gamma di produttori di veicoli elettrici, tra cui Renault e Stellantis.

Il primo produttore globale, CATL, ha lanciato in agosto 2023 la prima batteria al mondo con tecnologia litio-ferro-fosfato (LFP) e ricarica superveloce 4C, ossia con potenza superiore di quattro volte rispetto alla capacità. Questo è un primo esempio di batterie di nuova generazione che contribuiranno a rivoluzionare il mondo delle vetture elettriche, e potenzialmente, garantirne una diffusione elevata.

La batteria (denominata Shenxing) sarà prodotta in Cina dalla fine del 2023 e disponibile nei veicoli elettrici a partire dal 2024, promette di alleviare notevolmente la cosiddetta “ansia da ricarica” dei conducenti di veicoli elettrici e di introdurre una nuova era di ricarica superveloce per i veicoli elettrici. Una ricarica rapida di soli 10 minuti consentirà infatti un'autonomia di 400 km, mentre con una carica completa offrirà un'autonomia di oltre 700 km.<sup>51</sup>

Parallelamente alla ricerca di nuove tecnologie per caricare più velocemente le batterie, i costruttori stanno sviluppando ulteriori innovazioni per ingaggiare i consumatori anche

---

<sup>51</sup> CATL (2023). CATL Launches Superfast Charging Battery Shenxing, Opens Up Era of EV Superfast Charging. Tratto da: <https://www.catl.com/en/news/6091.html>

nei periodi di attesa da ricarica. Un esempio è fornito da BMW, che ha recentemente stretto una partnership con AirConsole, azienda specializzata nello sviluppo di piattaforme di gaming online.

Nel 2023, AirConsole ha integrato la sua piattaforma nei veicoli dell'azienda tedesca. Questa collaborazione permette agli occupanti dei veicoli BMW di poter giocare a giochi multiplayer sull'ampio schermo situato nella console centrale dell'auto, e, grazie alla connettività online, di utilizzare i loro smartphone come controller, offrendo così un'esperienza di gioco interattiva durante periodi di attesa come la ricarica delle batterie. Tra i giochi disponibili presentati sulla nuova i5 elettrica, esistono giochi di corse, di sport, di strategia e molte altre opzioni, in continuo aggiornamento. BMW ha annunciato l'introduzione nel 2024 del gioco ispirato al famoso quiz show "Chi vuol essere milionario?", offrendo ancora più varietà e intrattenimento ai passeggeri.<sup>52</sup>

### 2.2.1 Domanda di batterie

L'analisi della domanda di batterie al litio destinate alle vetture elettriche rivela una crescita notevole e in rapido aumento.

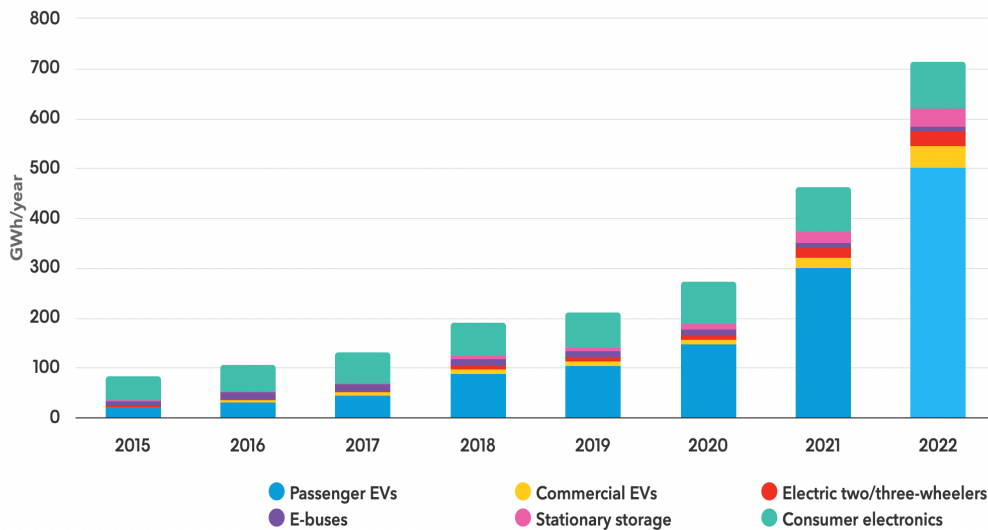


Fig. 8: Fabbisogno annuo di batterie agli ioni di litio per tipologia di applicazione. Fonte: BloombergNEF.

<sup>52</sup> BMW Group (2023). BMW e AirConsole hanno celebrato il lancio del gioco in auto con una presenza congiunta alla Gamescom, annunciando un nuovo gioco per il 2024. Tratto da: <https://www.press.bmwgroup.com/italy/article/detail/T0436961IT/bmw-e-airconsole-hanno-celebrato-il-lancio-del-gioco-in-auto-con-una-presenza-congiunta-alla-gamescom-annunciando-un-nuovo-gioco-per-il-2024?language=it>

Esaminando il grafico riportato di seguito, è possibile osservare come il fabbisogno globale di batterie al litio sia cresciuto in modo significativo negli ultimi anni. In cima alla lista delle applicazioni delle batterie al litio troviamo le vetture EV destinate al trasporto di passeggeri, seguite dall'elettronica di consumo.

Questo fabbisogno esercita una notevole pressione sulla catena di approvvigionamento di materiali quali il litio, il cobalto e il nichel.

È prevista un'ulteriore accelerazione nella crescita della domanda annuale di batterie, con stime che indicano un incremento di circa 5,7 TWh all'anno entro il 2035.

Per soddisfare tale domanda serviranno investimenti costanti: BloombergNEF prevede che almeno 188 miliardi di dollari debbano essere investiti in impianti di produzione di celle e componenti delle batterie entro la fine del decennio.

La proiezione al 2050 prevede che la domanda cumulata di batterie al litio raggiungerà 244 TWh.

### *2.2.2 Materie prime necessarie*

Analizzando i materiali necessari per soddisfare questa domanda, si stima che le riserve di cobalto e nichel possano essere sufficienti per soddisfarla, ma che le riserve di litio attualmente conosciute risultano critiche. Secondo Wail et al., nell'ipotesi di scenario Net Zero al 2050, anche considerando attività di riciclaggio le riserve di litio sono insufficienti per coprire la domanda prevista di batterie.<sup>53</sup>

Il grafico a seguire illustra la previsione della domanda annuale di metalli dal 2022 al 2050, al fine di coprire una crescente catena di approvvigionamento.

I rapporti evidenziati nella colonna di destra si basano sulla domanda annuale nell'anno specifico e la quantità di metallo è espressa in milioni di tonnellate di carbonato di litio (LCE).

---

<sup>53</sup> Weil, M.; Ziemann, S.; Peters, J. (2018). The Issue of Metal Resources in Li-Ion Batteries for Electric Vehicles.

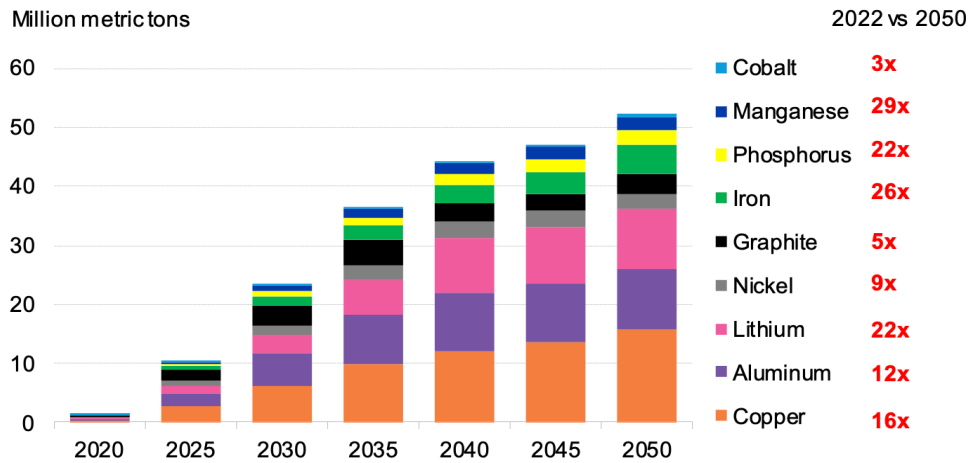


Fig. 9: Domanda di metalli necessari dal 2022 al 2050 per la produzione di batterie. Fonte: BloombergNEF.

È importante evidenziare come alcuni metalli raggiungeranno domande quasi 30 volte superiori da qui ai prossimi due decenni.

Un fattore di pressione alla catena di approvvigionamento delle batterie è il fatto che le medie delle autonomie delle vetture elettriche (EV) stanno aumentando rapidamente.

Analizzando le autonomie dei veicoli elettrici lanciati nel 2022, si attesta una media di 337 chilometri. Ciò è un notevole incremento rispetto ai 230 chilometri del 2018.

Per garantire questi risultati, le dimensioni medie dei pacchi batteria sono cresciute del 10% annuo, passando da 40 kWh a 60 kWh.

L'estensione delle autonomie dei veicoli BEV stimolerà una maggiore domanda di batterie al litio-ionico all'accelerarsi della loro adozione.

L'articolo di Michaux ricorda inoltre come oltre alle batterie per i veicoli elettrici, questi metalli sono utilizzati anche per svariati altre applicazioni, principalmente nell'elettronica di consumo ma anche per leghe metalliche e la produzione di munizioni, ad esempio. Tutto ciò aumenta ulteriormente la pressione nell'approvvigionamento di queste risorse limitate.<sup>54</sup>

Nuove chimiche delle batterie e riduzioni delle dimensioni saranno fattori cruciali per compensare questa pressione.

<sup>54</sup> Michaux, S. (2021). Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels.

## 2.3 Gestione del ciclo vita

La gestione sostenibile del ciclo vita delle batterie dei veicoli elettrici è un'altra importante sfida da considerare nella transizione verso la nuova mobilità.

Il processo di produzione delle attuali batterie al litio è noto per richiedere notevoli quantità di risorse e avere un impatto significativo sull'ambiente. Il recupero di metalli preziosi nelle batterie esauste dei veicoli elettrici è essenziale per limitare questo impatto, così come per conservare le risorse scarse e garantire materiale per la crescente domanda futura, riducendo la dipendenza dall'estrazione di nuove materie prime.

Le possibili opzioni durante il ciclo di vita delle batterie al litio dei veicoli elettrici, come descritto da Zhu et al., possono essere rappresentate dalla piramide visibile sotto, che ne delinea una gerarchia di gestione del rifiuto in ottica di economia circolare.

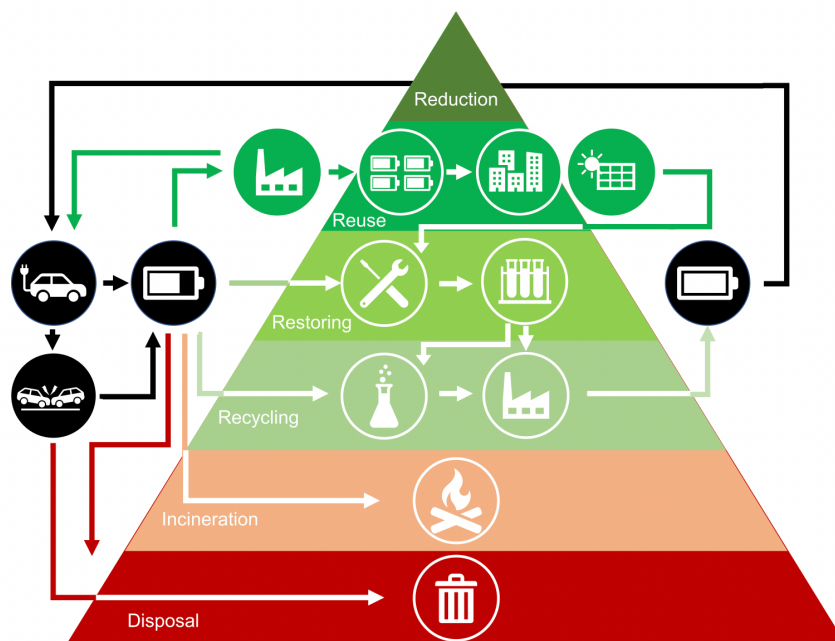


Fig. 10: Ciclo vita e differenti opzioni per le batterie al litio delle vetture elettriche. Fonte: Zhu et al.

Secondo il report di Roschier et al., il riciclaggio, pur essendo la principale strategia per gestire le batterie esauste, comporta perdite significative di materiali che rendono questo approccio non totalmente sostenibile.<sup>55</sup>

<sup>55</sup> Roschier, S.; Pitkämäki, A.; Jonsson, H. (2020). Business Finland: Assessment of Li-ion battery reuse solutions – final report.



In ottica di economia circolare, il riciclaggio andrebbe infatti considerato come ultima opzione. Strategie circolari di livello superiore come il riutilizzo, in inglese “repurposing”, consistente nel riadattare le batterie per un diverso scopo, hanno il potenziale per offrire maggiori benefici ambientali.<sup>56</sup>

In media, viene definita una vita utile delle batterie dei veicoli BEV tra gli 8 e i 10 anni. Nell’articolo di Haram et al. si attesta che la soglia di deterioramento per la sostituzione delle batterie nei veicoli elettrici al raggiungimento di circa il 70% della capacità della batteria rispetto alla sua massima capacità di immagazzinare energia.<sup>57</sup>

Anche l’articolo di Hua et al. afferma che una batteria per veicoli elettrici diventa imprevedibile e insicura oltre il 70-80% di deterioramento, segnando la fine della sua vita utile.<sup>58</sup>

Queste batterie possono però essere utilizzate per scopi diversi prima di essere smaltite.

### *2.3.1 Repurposing*

Il repurposing delle batterie delle vetture elettriche è il processo di riutilizzo delle batterie per scopi diversi da quelli per i quali sono state originariamente progettate. Una batteria con prestazioni non più sufficienti per alimentare una vettura BEV può infatti essere adatta per applicazioni con criteri di prestazione meno rigorosi, come l'accumulo di energia rinnovabile per impianti domestici o commerciali o sistemi di backup energetico.

Secondo quanto evidenziato da Hua et al., per ottenere il massimo valore da una batteria deteriorata di una vettura elettrica, è consigliabile innanzitutto sottoporla a riutilizzo per applicazioni nel settore automobilistico.

---

<sup>56</sup> Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain.

<sup>57</sup> Haram, M.H.S.M.; Lee, J.W.; Ramasamy, G.; Ngu, E.E.; Thiagarajah, S.P.; Lee, Y.H. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges.

<sup>58</sup> Hua, Y.; Zhou, S.; Huang, Y.; Liu, X.; Ling, H.; Zhou, X.; Zhang, C.; Yang, S (2020). Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles.

Successivamente, può essere riutilizzata per utilizzi meno esigenti, come i veicoli elettrici leggeri quali e-bike o e-scooter, per poi essere destinata a sistemi di accumulo di energia stazionaria prima di arrivare al riciclaggio, l'opzione finale.

Queste operazioni, oltre ad alleggerire la pressione nella filiera produttiva delle batterie, possono contribuire ad una riduzione dell'impatto ambientale. L'analisi di Tao et al. quantifica una riduzione in termini di "carbon footprint" rispettivamente tra l'8 e il 17% se si opta per il riposizionamento seguito dal riciclaggio della batteria, e una riduzione tra il 2 e il 6% per il solo riciclaggio.<sup>59</sup>

Anche se i requisiti energetici e di potenza sono minori, è importante menzionare come sicurezza e affidabilità rimangano elementi critici, qualsiasi sia l'ambito di riutilizzo della batteria. L'articolo di Börner et al. sottolinea che devono essere implementati standard per la valutazione e l'omologazione di batterie basate su batterie di veicoli a fine vita per controllare gli aspetti di sicurezza e affidabilità legati all'invecchiamento.<sup>60</sup>

Ad oggi le sfide principali del processo di repurposing includono i costi elevati legati alla manodopera e la poca automazione di questo processo, l'assenza di indicatori standardizzati e di algoritmi per stimare la durata delle batterie, e la scarsa standardizzazione dei design dei pacchi batteria BEV tra le varie case automobilistiche.

Zhu et al. affermano come un database completo sulla durata delle batterie risulta fondamentale per valutarne le prestazioni.

L'archiviazione dei dati in cloud è promossa in tutto il mondo, specialmente in Cina. Nell'Unione Europea, per registrare l'intera vita operativa di ogni singola batteria, si sta considerando l'idea di un "passaporto per batterie".

Negli USA, si sta sviluppando un sistema economico circolare e aziende come Tesla stanno raccogliendo numerosi dati sulla degradazione delle batterie.

Questi sforzi segnalano un futuro positivo per l'industria delle "second life batteries", ma la sfida sarà elaborare in maniera efficiente i dati e comprendere la fisica del degrado delle batterie, oltretutto garantire ai consumatori soluzioni economicamente vantaggiose.

---

<sup>59</sup> Tao, Y.; Rahn, C. D.; Archer, L. A.; You, F. (2021). Second life and recycling: Energy and environmental sustainability perspectives for high-performance lithium-ion batteries.

<sup>60</sup> Börner, M. F.; Frieges, M. H.; Späth, B.; Spütz, K.; Heimes, H. H.; Sauer, D. U.; Li, W. (2022). Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries.

Oggi i principali produttori di veicoli automobilistici hanno avviato o stanno pianificando progetti di riutilizzo delle batterie per garantirne una seconda vita. Tuttavia, la maggior parte delle attività è ancora di piccola scala, tra cui test pilota e attività di ricerca e sviluppo.<sup>61</sup>

Un esempio è il caso di Jaguar e Pramac, i quali hanno avviato una collaborazione per sviluppare un sistema di stoccaggio energetico alimentato dalle batterie a fine vita delle vetture elettriche Jaguar I-Pace, utilizzando batterie provenienti da veicoli di test. Ciascuna unità di stoccaggio è composta da 50 moduli derivanti dalle batterie I-Pace, è alimentata da pannelli solari e fornisce elettricità a zero emissioni, ad esempio in luoghi dove non è presente la rete elettrica. Tale unità è stata anche implementata nel campionato mondiale FIA Formula E 2022 per alimentare l'attrezzatura diagnostica del team Jaguar e fornire elettricità ausiliaria ai box.<sup>62</sup>

Le partnership tra produttori di veicoli e aziende specializzate nel riutilizzo delle batterie diventeranno dunque sempre più importanti.

### *2.3.2 Riciclaggio*

Il riciclaggio delle batterie delle vetture elettriche è un processo complesso, ma importante per ridurre l'impatto ambientale.

Il processo di riciclaggio inizia con la raccolta delle batterie esauste. Le batterie vengono poi smontate per recuperare i materiali preziosi contenuti all'interno, come il litio, il cobalto, il nichel e il manganese.

Questi materiali sono fondamentali per la produzione di nuove batterie, e il loro riciclaggio può contribuire a limitare la carenza di materie prime.

Secondo l'articolo di Qiao et al., la domanda di litio per le batterie al litio in Cina stimata per il 2050 potrebbe essere soddisfatta fino al 60% grazie al riciclaggio.<sup>63</sup>

---

<sup>61</sup> Zhu, J.; Mathews, I.; Ren, D.; Li, W.; Cogswell, D.; Xing, B.; Sedlatschek, T.; Kantareddy, S. N. R.; Yi, M.; Gao, T.; Xia, Y.; Zhou, Q.; Wierzbicki, T.; Bazant, M. Z. (2021). End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries.

<sup>62</sup> Jaguar (2022). Second life: Jaguar I-Pace batteries power zero-emission energy storage unit. Tratto da <https://media.jaguar.com/news/2022/03/second-life-jaguar-i-pace-batteries-power-zero-emission-energy-storage-unit>

<sup>63</sup> Qiao, D.; Wang, G.; Gao, T.; Wen, B.; Dai, T. (2021). Potential impact of the end-of-life batteries recycling of electric vehicles on lithium demand in China: 2010–2050.

L'articolo di Jena et al. descrive le attuali tecnologie di recupero dei metalli dalle batterie agli ioni di litio. Tra i processi principali si ha il processo idrometallurgico, pirometallurgico e catodo-catodo.

Il processo idrometallurgico prevede una prima separazione tramite una fase di lisciviazione per poi consentire l'estrazione dei metalli con solvente e precipitazione chimica o altri metodi elettrolitici, estraendo Cobalto, Litio, Nichel e Manganese.

La pirometallurgia prevede la fusione ad alte temperature, che comporta una fase di combustione e separazione per produrre una nuova lega metallica mista.

Nel processo di riciclaggio catodo-catodo, o riciclaggio diretto, i materiali delle batterie agli ioni di litio vengono sottoposti a un pretrattamento come un unico composto, per poi essere direttamente recuperato il materiale catodico e/o anodico dagli elettrodi delle batterie a fine vita, rendendo tale processo più semplice e potenzialmente più economico.<sup>64</sup>

Tali processi non sono però privi di rischi ambientali. Christensen et al. affermano come il processo pirometallurgico possa generare impatti ambientali negativi riguardanti il riscaldamento globale, la formazione di ozono fotochimico, l'effetto cancerogeno, l'eutrofizzazione e la riduzione dello strato di ozono.

In contrasto, l'idrometallurgia emette meno gas serra, ma richiede un trattamento aggiuntivo delle acque reflue per evitare l'inquinamento delle acque riceventi, a causa degli acidi. Sono stati associati dunque rischi di acidificazione delle acque terrestri.<sup>65</sup>

Alcuni dei principali ostacoli al riciclaggio delle batterie delle vetture elettriche includono la complessità del processo di riciclaggio, i costi elevati che ne conseguono e la mancanza di infrastrutture dedicate per il corretto riciclaggio delle batterie.

Infrastrutture dedicate ancora poco sviluppate combinate ai grandi aumenti di volume delle batterie previsti, potrebbero infatti non garantire la sicurezza necessaria.

Dall'articolo di Mrozik et al. emerge come trasporto, logistica e immagazzinamento delle batterie agli ioni di litio siano ulteriori temi critici, specialmente in termini di sicurezza.

---

<sup>64</sup> Jena, K. K.; Alfantazi, A.; Mayyas, A. T. (2021). Comprehensive review on concept and recycling evolution of lithium-ion batteries (LIBs).

<sup>65</sup> Christensen, P. A.; Anderson, P. A.; Harper, G. D. J.; Lambert, S. M.; Mrozik, W.; Rajaeifar, M. A.; Wise, M. S.; Heidrich, O. (2021). Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles.

Dopo essere rimosse dalle auto elettriche, le batterie al litio vengono solitamente trasportate senza che sia noto il loro stato di salute.

Se danneggiate internamente, possono avviare un processo di surriscaldamento graduale che può passare inosservato per un lungo periodo. Tuttavia, queste batterie danneggiate possono rilasciare improvvisamente vapore composto da gas tossici ed inquinanti oppure innescare incendi difficilmente estinguibili, causando ingenti danni ambientali.

Oltre al riciclaggio, le batterie esauste delle vetture elettriche possono essere smaltite tramite incenerimento: le batterie vengono bruciate in un inceneritore, e le ceneri vengono poi smaltite in discarica. Questa pratica è molto inquinante e l'intervento dei governi dovrà essere forte per garantire la sostenibilità dell'intera filiera della nuova mobilità elettrica. A tal proposito, l'Unione Europea ha stabilito stringenti obiettivi di riciclaggio per le batterie delle vetture elettriche, che dovranno essere riciclate per almeno una determinata percentuale.

Questa ed altre proposte sono state elaborate dall'UE nella proposta di regolamento sulle batterie e la gestione dei loro rifiuti, normativa adottata a partire da Dicembre 2020 nell'ambito dell'European Green Deal.

Tra le principali novità introdotte dalla proposta vi sono:

- Obbligo di dichiarazione del contenuto minimo di materiale riciclato utilizzato nella produzione della batteria, da evidenziare nell'etichetta della batteria;
- Introduzione di requisiti di durata e prestazioni minimi, che verranno introdotti per le batterie industriali a partire dal 2026;
- Aumento degli obiettivi di raccolta delle batterie esauste, che dovranno essere raccolte e riciclate anziché essere abbandonate nell'ambiente;
- Introduzione di tassi minimi di raccolta per i rifiuti di batterie provenienti dai mezzi di trasporto. In particolare, è stata fissata una soglia pari al 75% di raccolta entro il 2025 e all'85% entro la fine del 2030.<sup>66</sup>

Per evitare pratiche errate di riciclaggio e smaltimento sarà necessario l'intervento dei governi per sviluppare normative dedicate, ma anche gli sforzi della ricerca e delle aziende per soluzioni più sostenibili.

---

<sup>66</sup> Epifanio, C.; Italiano, A. (2022). L'impatto delle batterie sull'ambiente: cosa prevede il nuovo regolamento UE.

I produttori di automobili dovrebbero porsi l'obiettivo di sviluppare materiali meno pericolosi che non solo migliorino la capacità e l'efficienza delle batterie, ma prevengano anche impatti ambientali negativi, specie in fase di smaltimento.

A tal proposito, Mrozik et al. suggeriscono come possibile soluzione nelle future generazioni di batterie al litio la sostituzione di metalli tossici, come cobalto e nichel, con alternative meno tossiche, come il manganese.<sup>67</sup>

---

<sup>67</sup> Mrozik, W.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O.; Christensen, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries.

### Capitolo III Guida autonoma: tecnologie, sfide e applicazioni

Più di un secolo dopo l'inizio della produzione di massa di automobili, la mobilità sta raggiungendo un secondo grande punto di svolta: una transizione verso la guida autonoma, la connettività, l'elettrificazione e le forme di mobilità condivisa.

L'acronimo inglese è ACES: autonomous driving, connectivity, electrification, and shared-mobility.

Questa convergenza di diverse discipline e cluster tecnologici è un approccio all'innovazione definibile come "deep tech".

Il deep tech è considerato uno dei principali driver di innovazione e si stima possa avere forti impatti su business e società. L'approccio deep tech non parte da nuove soluzioni tecnologiche, ma da problemi di mercato esistenti, spesso legati a sfide cruciali come la sostenibilità. È basato sulla convergenza dei più innovativi cluster tecnologici, tra cui la computazione e la cognizione, con la sensoristica e la movimentazione, la materia e l'energia. Queste tecnologie, specialmente quando combinate, si stima possano avere un impatto significativo sulla modellazione della società.<sup>68</sup>

La combinazione di tecnologie computazionali e sensoristiche per lo sviluppo di veicoli a guida autonoma, può portare a forti impatti positivi in termini di sostenibilità e di qualità della vita delle persone: l'automobile, con tecnologia a zero emissioni, potrà, oltreché garantire spostamenti più efficienti, diventare ad esempio un ufficio o una sala di lettura, il tutto garantendo un livello di sicurezza maggiore rispetto a una tradizionale guida "umana".

L'industria automotive sta vivendo un dirompente approccio combinando tecnologie provenienti da campi come l'intelligenza artificiale e il machine learning.

Queste tecnologie hanno il potenziale per rivoluzionare l'intera industria e le previsioni stimano che da qui ai prossimi dieci anni avverrà un effetto disruptive che supererà quello dei precedenti cinquant'anni o più.<sup>69</sup>

---

<sup>68</sup> Bagnoli, C.; Portincaso, M. (2021). La nuova onda di innovazione che le imprese devono cavalcare.

<sup>69</sup> McKinsey (2019). The trends transforming mobility's future.

Già entro il 2025, McKinsey prevede in Europa e Nord America vetture con livelli di guida autonoma altamente automatizzati ed in grado di guidare autonomamente sulle autostrade.

Entro il 2035, si prevede anche che le tecnologie di guida autonoma genereranno potenziali ricavi fino a 400 miliardi di dollari.<sup>70</sup>

Oltre ad ottimizzare l'efficacia della mobilità, la tecnologia di guida autonoma presenta un enorme potenziale in termini di sicurezza. Gli incidenti stradali, principale causa di morte e lesione negli Stati Uniti, potrebbero infatti essere notevolmente ridotti.

Metropoli di rilevanza potrebbero assumere la posizione di mercati primari per i veicoli autonomi condivisi, sfruttando la vasta platea di potenziali clienti presenti.<sup>71</sup>

Dall'outlook di Bloomberg si evince come nel corso del 2022 le flotte di veicoli autonomi (AV) abbiano già percorso oltre 80 milioni di chilometri, e che gli operatori stiano estendendo i propri servizi verso nuove città.

A seconda delle regioni in cui operano, i robotaxi possono coprire una distanza annuale da tre a cinque volte superiore rispetto ai veicoli guidati da persone. Ciò si traduce in un minor numero di veicoli necessari per garantire lo stesso livello di mobilità ai consumatori, in uno scenario ad alta presenza di veicoli autonomi. Questo può comportare un impatto significativo anche sugli investimenti riguardanti l'infrastruttura di trasporto. Integrando infatti un milione circa di colonnine di ricarica ad alta velocità ottimizzate per flotte di robotaxi, si potrebbe fare a meno di circa 200 milioni di colonnine a bassa velocità, con annessi risparmi in termini economici.<sup>72</sup>

McKinsey prevede che il settore della mobilità condivisa abbia il potenziale per generare ricavi fino a 1 trilione di dollari entro il 2030.<sup>73</sup>

Aziende come Cruise (società di General Motors), Waymo (progetto Google), e Zoox (sussidiaria di Amazon), hanno già implementato servizi di mobilità autonoma offrendo

---

<sup>70</sup> McKinsey (2023). Autonomous driving's future: Convenient and connected.

<sup>71</sup> McKinsey (2023). Where does shared autonomous mobility go next?

<sup>72</sup> BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.

<sup>73</sup> McKinsey (2023). Shared mobility: Sustainable cities, shared destinies.



il trasporto di passeggeri su strade pubbliche con robotaxi autonomi appositamente progettati, in diverse città statunitensi.<sup>74</sup>

### 3.1 Tipologie di automazione

Le principali tecnologie intelligenti che favoriscono l'automazione presenti nelle vetture, come descritto da Zhao et al., possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- Navigazione: tecnologie per la geolocalizzazione dell'auto, consentendone il tracciamento al fine di eseguire percorsi pianificati e spostamenti autonomi, garantendone la connessione in rete;
- Pianificazione del percorso: mappe elettroniche che forniscono dati su traffico e segnaletica stradale;
- Controllo dell'auto: tecnologie per gestire i movimenti come velocità e cambi di direzione;
- Percezione dell'ambiente: sensori e telecamere per mappare l'ambiente, individuare ostacoli e misurarne la loro distanza.<sup>75</sup>

Questi elementi possono essere implementati nelle vetture al fine di garantire diversi livelli di automazione nelle vetture per trasporto di passeggeri su strada.

Ad oggi sempre più veicoli sul mercato del nuovo vantano sistemi di automazione parziale, che utilizzano tecnologie avanzate per assistere il conducente nel controllo del veicolo.

Si tratta dei cosiddetti “ADAS”, acronimo di Advanced Driver Assistance Systems, finalizzati a prevenire gli incidenti stradali, a migliorare la sicurezza e l'efficienza della guida e a ridurre lo stress del conducente, il cui ruolo resta comunque fondamentale per condurre il veicolo.

Questi sistemi viaggiano di pari passo con gli elementi di connettività, anch'essi sempre più presenti sulle attuali nuove vetture. Le vetture connesse possono infatti ricevere

---

<sup>74</sup> McKinsey (2023). Technology Trends Outlook.

<sup>75</sup> Zhao, J.; Liang, B.; Chen, Q. (2018). The key technology toward the self-driving car.

informazioni sul traffico, comunicare con le infrastrutture stradali ed essere interconnessi con le altre vetture, favorendo una mobilità autonoma.

Come descritto dall'elaborazione dell'Osservatorio Autopromotec sulla base di uno studio condotto dal gruppo britannico Omdia, entro la fine del 2023 il numero di veicoli connessi in circolazione in tutto il mondo supererà i 350 milioni, registrando un aumento del 18% rispetto al 2022.

Si prevede che entro il 2027 il parco automobilistico globale di veicoli connessi supererà i 640 milioni di unità e continuerà a crescere, raggiungendo oltre 900 milioni di veicoli all'inizio del prossimo decennio.<sup>76</sup>

L'incremento del livello tecnologico potrebbe condurre in un futuro prossimo al perfezionamento e all'avanzamento dei sistemi di assistenza alla guida, già ampiamente in uso come supporto per i conducenti, così come a una maggiore implementazione della connettività nelle vetture.

Questi progressi potrebbero favorire l'adozione di sistemi di guida autonoma, con il potenziale di consentire una diffusione globale di veicoli operanti senza necessità di intervento umano, permettendo alle persone all'interno di svolgere altre attività durante gli spostamenti, come lavorare o riposare, oltreché ottenere un maggiore livello di sicurezza stradale.

### *3.1.1 Tecnologie utilizzate*

Nel contesto dei veicoli a guida autonoma, sensori, telecamere e radar assumono un ruolo fondamentale nell'acquisizione di dati ambientali per garantire una guida sicura ed efficiente. Esistono una gamma di dispositivi sensoriali per percepire il mondo circostante e, combinati con l'intelligenza artificiale, permettono di prendere decisioni intelligenti sulla guida.

Tra le principali tecnologie troviamo:

1. Telecamere: Le telecamere costituiscono il sensore più ampiamente adottato nei veicoli a guida autonoma. Sono fondamentali per rilevare e analizzare gli oggetti e le

---

<sup>76</sup> Osservatorio Autopromotec (2023). Auto connesse, nel 2027 saranno oltre 640 milioni nel mondo.

persone nell'ambiente circostante. Le telecamere consentono di acquisire informazioni sulla posizione, la velocità e la direzione di movimento degli oggetti circostanti, contribuendo in modo significativo alla percezione dell'ambiente da parte del veicolo. Grazie alla capacità di rilevare il colore, possono individuare semafori e luci lampeggianti dei veicoli, e le attuali tecnologie garantiscono un buon funzionamento anche in condizioni di luce diurna e scarsa illuminazione.

1. Radar: Il radar è un sensore che sfrutta le onde elettromagnetiche per la rilevazione di oggetti e movimenti. Rispetto alle telecamere, il radar è particolarmente utile in condizioni di visibilità ridotta, come pioggia intensa o nebbia, poiché non dipende dalla luce visibile. Questa tecnologia offre la capacità di individuare e monitorare oggetti nell'ambiente circostante indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, di giorno e di notte.
2. Lidar (Light Detection and Ranging): Il lidar rappresenta un sensore basato su tecnologia laser che crea una mappatura tridimensionale dettagliata dell'ambiente circostante. Questo sistema funziona giorno e notte emettendo milioni di impulsi laser al secondo a 360 gradi. Il sensore misura il tempo che impiega fino a riflettersi su una superficie e poi ritornare alla vettura. Questo sistema può comporsi da diversi tipi di lidar: un lidar a corto raggio che fornisce una visione ininterrotta dell'area più vicina al veicolo, un lidar a medio raggio per una maggiore risoluzione e un Lidar a lungo raggio in grado di percepire oggetti lontani, con un potenziale di visione a distanza pari a tre campi da calcio.
3. Sensori a ultrasuoni: I sensori a ultrasuoni utilizzano onde sonore ad alta frequenza per rilevare la presenza di oggetti nelle immediate vicinanze del veicolo. Questi sensori sono particolarmente efficaci nel rilevare ostacoli a breve distanza, come oggetti sulla strada, e contribuiscono alla sicurezza del veicolo in situazioni di parcheggio e manovra.
4. Ulteriori sensori: a seconda del sistema installato nelle vetture, possono essere implementate ulteriori tecnologie, tra cui giroscopi e accelerometri connessi al GPS, componente essenziale in questa tipologia di veicoli per determinare la posizione del veicolo.

Nella seguente figura è possibile vedere rappresentati i vari dispositivi, dove in verde sono evidenziati i lidar, in blu le telecamere, in viola i radar, in giallo i sensori sonori e in arancione gli ulteriori sensori.<sup>77</sup>



*Fig. 11: Tecnologie adottate in una vettura a guida autonoma. Fonte: Waymo.*

Questi sensori e telecamere sono progettati per operare in modo sinergico, così da migliorare la precisione e la completezza delle informazioni acquisite.

Ad esempio, le telecamere possono essere utilizzate per identificare gli oggetti rilevati dal radar, così come il radar può rilevare oggetti che potrebbero non essere visibili alle telecamere.

I dati che ne risultano sono cruciali per una percezione accurata dell'ambiente, consentendo di effettuare decisioni basate su informazioni spaziali dettagliate.

Per calibrare al meglio queste tecnologie, oltre ai test su circuiti tradizionali o su strada pubblica, si stanno sviluppando degli specifici siti di test.

Un recente esempio arriva da BMW Group, che nel luglio 2023 ha inaugurato in Repubblica Ceca il primo sito di sviluppo in Europa centrale dedicato specificamente per queste attività, a seguito di un investimento di 300 milioni di euro. Il suo nome è Future Mobility Development Center (FMDC) ed offre le migliori condizioni del mondo reale per testare la guida altamente e completamente automatizzata, integrando la simulazione virtuale delle situazioni di guida. Questa sintesi tra virtuale e realtà rappresenta un

---

<sup>77</sup> Waymo (2021). Waymo Safety Report.

approccio virtuoso per implementare un elevato grado di sicurezza nella futura mobilità automatizzata.<sup>78</sup>

### *3.1.2 Livelli di automazione*

Per delineare i livelli di automazione nei veicoli, il National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) del Dipartimento dei Trasporti degli Stati Uniti ha implementato una specifica scala.

Questa scala, nello standard internazionale J3016 del SAE, è stata inizialmente lanciata nel 2014. Ad oggi è la scala più citata nell'industria dei veicoli autonomi, e la sua ultima versione, affinata per garantire la chiarezza ad un pubblico internazionale, risale al 2021. Si tratta di una scala composta da sei livelli, dove più è alto il livello e più sono implementate le capacità di automazione della vettura. È possibile individuare due macrocategorie: dal livello 0 al 2, e dal livello 3 al 5. Di seguito la descrizione:

- I livelli da 0 a 2 sono quelli in cui i conducenti umani sono responsabili del monitoraggio dell'ambiente di guida. Nelle vetture sono presenti dei sistemi di supporto che vanno sempre supervisionati. Per mantenere un livello di sicurezza, il conducente deve essere sempre pronto a svoltare, frenare o accelerare. Sono rispettivamente:
  - 0: nessuna automazione. La vettura si limita a segnalare situazioni di pericolo o fornire assistenza momentanea. Esempi di tecnologie appartenenti a questa categoria sono la frenata di emergenza, il sensore dell'angolo cieco o l'avviso di uscita dalla carreggiata.
  - 1: assistenza al conducente. Qui la vettura è o capace di svoltare, oppure di frenare/accelerare per supportare il conducente. Le relative tecnologie sono il lane assist (mantenimento della corsia) per la prima funzione e il cruise control adattivo (regolatore di velocità) per la seconda. Non sono presenti entrambe.

---

<sup>78</sup> BMW Group (2023). Il BMW Group lancia una struttura per i test di guida e di parcheggio automatizzati a Sokolov. Tratto da:  
<https://www.press.bmwgroup.com/italy/article/detail/T0426360IT/il-bmw-group-lancia-una-struttura-per-i-test-di-guida-e-di-parcheggio-automatizzati-a-sokolov>

- 2: automazione parziale per specifici compiti di guida. La vettura è capace di svoltare e allo stesso tempo di frenare/accelerare per supportare il conducente. Sono dunque presenti contemporaneamente sia le tecnologie di lane assist che di cruise control adattivo.
- I livelli da 3 a 5, dove esistono sistemi di guida automatizzati (che, quando attivati, non richiedono di guidare), sono rispettivamente:
  - 3: automazione per determinati scenari di guida. Qui la vettura può guidare in maniera totalmente autonoma, ma, se il sistema lo richiede, è necessario l'intervento umano.
  - 4: completa automazione o guida autonoma per la maggior parte delle situazioni di guida. Qui l'intervento umano non viene mai richiesto, ma, se ci verificano condizioni di guida particolarmente critiche, il veicolo autonomo non opererà o effettuerà una "safe stop". Non è necessario installare volante o pedali in questi veicoli. In tale categoria rientrano la maggior parte dei taxi a guida autonoma esistenti.
  - 5: completa automazione o guida autonoma in qualsiasi scenario, senza bisogno di intervento umano. Rispetto al livello 4, non ci sono condizioni in cui la vettura non possa operare.<sup>79</sup>

L'articolo di Yu et al. prevede che i veicoli autonomi (AV) diventeranno predominanti nel prossimo futuro, rivoluzionando l'industria automobilistica in termini di connettività, sicurezza ed efficienza.

Nell'articolo si sottolinea inoltre l'importanza di modelli decisionali basati su "machine learning", utili in particolare per il traffico congestionato, poiché modelli decisionali semplici potrebbero non soddisfare le applicazioni reali dei veicoli autonomi (ad esempio, per il cambio corsia).

L'importanza dei dati su come i veicoli autonomi interagiscono con gli altri utenti della strada e come si comportano giocano e giocheranno un ruolo cruciale. Alcuni dataset sono già stati pubblicamente rilasciati da produttori di veicoli autonomi come Waymo, Lyft e Apollo.<sup>80</sup>

---

<sup>79</sup> SAE (2021). SAE Levels of Driving Automation Refined for Clarity and International Audience. Tratto da: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>

<sup>80</sup> Yu, H.; Jiang, R.; He, Z.; Zheng, Z.; Li, L.; Liu, R.; Chen, X. (2021). Automated vehicle-involved traffic flow studies: A survey of assumptions, models, speculations, and perspectives.

Un esempio cruciale è dato da Tesla: nel precedente capitolo si è visto come l'azienda americana sia prima in classifica nell'industria dei veicoli elettrici in termini di volumi di vendita. Con una flotta di diversi milioni di automobili vendute nel mondo dotate di telecamere e altri sensori che registrano i dati di utilizzo quotidianamente, dispongono di un grande vantaggio in termini di dataset rispetto alle altre aziende del settore.

Nell'articolo di settembre 2023 pubblicato da CNBC, si afferma come il più recente software di guida autonoma Tesla (la versione denominata FSD 12) invece di utilizzare centinaia di migliaia di righe di codice come le versioni precedenti, utilizza l'intelligenza artificiale ed il machine learning per imparare a guidare come gli esseri umani.

Grazie ai miliardi di fotogrammi di video disponibili, la rete neurale dell'Autopilot Tesla viene allenata mostrando numerosissimi scenari in cui dei veri conducenti umani hanno agito in situazioni di guida complessa. Per garantire una capacità migliore del conducente umano meglio, gli scenari vengono filtrati ed utilizzati solo nei casi in cui le situazioni siano state gestite in maniera corretta.

Il progetto è risultato valido solo dopo un milione di video clip analizzati: il grande numero di Tesla circolanti è stato dunque cruciale per istruire al meglio la rete neurale.

Il sistema di intelligenza artificiale Tesla è arrivato ad analizzare 10 milioni di clip raccolti dalle auto dei clienti e sembra pronto per essere rilasciato, non appena i regolatori lo approveranno.<sup>81</sup>

### **3.2 Responsabilità legale e politiche a sostegno**

I veicoli che possono muoversi senza un conducente umano al volante è una realtà diventata sempre più tangibile grazie ai continui progressi tecnologici. Tuttavia, con questa innovazione che promette di trasformare radicalmente il nostro modo di concepire il trasporto su strada emergono anche importanti questioni legali e politiche che richiedono una seria riflessione.

Nel caso in cui un veicolo autonomo sia coinvolto in un incidente con conseguenze mortali esistono ancora interrogativi e perplessità in tema di responsabilità legale.

---

<sup>81</sup> CNBC (2023). How Elon Musk set Tesla on a new course for self-driving. Tratto da: <https://www.cnbc.com/2023/09/09/ai-for-cars-walter-isaacson-biography-of-elon-musk-excerpt.html>

In seguito, sarà analizzato il panorama in continua evoluzione della responsabilità legale associata alla guida autonoma, delineando come i governi, le industrie e gli organismi di regolamentazione stiano affrontando queste questioni cruciali.

Nell'analizzare i possibili scenari e sviluppare processi decisionali per un veicolo autonomo quando esistono dilemmi sacrificali, risulta però difficile raggiungere un consenso. Decidere chi debba essere considerato responsabile a seguito di incidenti mortali, implica infatti considerazioni di natura morale, oltretutto legale.<sup>82</sup>

### *3.2.1 Quadro normativo*

Il quadro normativo per i veicoli autonomi è ancora in fase di sviluppo in tutto il mondo. La maggior parte dei paesi ha però già adottato o sta adottando leggi e regolamenti per garantire la sicurezza e l'accettazione pubblica di questa nuova tecnologia. Analizzando la regolamentazione nel territorio statunitense, si notano differenze tra i diversi Stati federati.

In Nevada, per esempio, è richiesto un certificato di conformità che attesti la capacità di un veicolo autonomo di funzionare senza un conducente fisico a bordo. In Florida, i veicoli autonomi devono rispettare le norme stradali esistenti, sia federali che statali, senza richiedere un "certificato di conformità". In California, i veicoli autonomi devono essere dotati di sistemi intelligenti per avvisare quando sono in modalità autonoma, così come a Washington D.C., dove le regole sono simili per i requisiti tecnologici, ma più in linea con il Nevada per quanto riguarda la responsabilità.

Dal 2013, vari Stati come Arizona, Hawaii e Colorado hanno introdotto regolamentazioni simili. Nei diversi stati, è stato introdotto anche un aumento dei massimali assicurativi per questi veicoli.<sup>83</sup>

---

<sup>82</sup> Hevelke, A.; Nida-Rümelin, J. (2015). Responsibility for crashes of autonomous vehicles: An ethical analysis.

<sup>83</sup> Anderson, J. M.; Kalra, N.; Stanley, K. D.; Sorensen, P.; Samaras, C.; Oluwatola, O. A. (2016). Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers.



In Europa è attivo il progetto di sicurezza "Vision Zero" promosso dalla Commissione Europea con l'obiettivo di azzerare il numero di incidenti mortali entro il 2050. Per raggiungerlo, le vetture a guida autonoma giocano un ruolo fondamentale.<sup>84</sup>

Ciò nonostante, l'UE ha dichiarato che non siano necessarie ulteriori regolamentazioni o modifiche delle direttive per i veicoli autonomi, in quanto già complete le vigenti direttive sull'assicurazione delle autovetture e sulla responsabilità del prodotto.<sup>85</sup>

Queste direttive, secondo l'articolo di Punev, non sembrano però essere sufficiente a fornire un quadro uniforme per le vittime di incidenti stradali causate da vetture autonome, in quanto gli Stati membri trattano la responsabilità del conducente in modi diversi. Una possibile soluzione suggerita consiste nell'implementare un'assicurazione obbligatoria senza responsabilità, accompagnata dal trasferimento della responsabilità al produttore della vettura, in quanto una regolamentazione basata sui conducenti risulterebbe poco adatta.<sup>86</sup>

Inoltre, dispositivi come una scatola nera in cui si registrano le attività dell'auto autonoma e del relativo ambiente, risultano importanti per determinare le cause degli incidenti. In Germania, ad esempio, è obbligatoria l'installazione di una scatola nera per permettere a questi mezzi di circolare sulle strade pubbliche.<sup>87</sup>

### *3.2.2 Etica informatica e problema del carrello*

Per delineare le azioni corrette che la vettura dovrebbe eseguire in situazioni pericolose che portano ad incidenti anche fatali, i programmatori si riferiscono anche ad aspetti legati all'etica e alla filosofia morale. Si è infatti creata una sotto disciplina, che viene descritta da Losano come etica dell'informatica. Questa si focalizza sul comprendere come agire in maniera corretta, con scelte socialmente accettabili, e si applica anche nelle vetture a guida autonoma.<sup>88</sup>

---

<sup>84</sup> European Commission (2018). Sustainable mobility for Europe: Safe, connected, and clean.

<sup>85</sup> Patti, F. (2019). The European road to autonomous vehicles.

<sup>86</sup> Punev, A. (2020). Autonomous Vehicles: The Need for a Separate European Legal Framework.

<sup>87</sup> Kouroutakis, A. E. (2020). Autonomous Vehicles; Regulatory Challenges and the Response From UK and Germany.

<sup>88</sup> Losano, M.G. (2019). Verso l'auto a guida autonoma in Italia.

In caso di emergenza, infatti, i veicoli devono agire prendendo scelte complesse. Un caso noto in psicologia è quello in cui è necessario decidere chi investire e chi salvare in situazioni di pericolo, conosciuto come "problema del carrello" di Philippa Foot.

Questo dilemma coinvolge un carrello senza conducente sui binari, che si avvicina a cinque persone, con la possibilità di cambiare il percorso per colpire una sola persona rimasta bloccata sull'altro binario. È presente un osservatore che può intervenire premendo un interruttore per deviare il carrello e salvare le cinque persone, ma causando l'impatto con l'altra persona.

Da qui, sorge la questione etica se sia giustificato premere il pulsante per reindirizzare il carrello.

La filosofa, seguendo un approccio utilitaristico, ritiene eticamente accettabile premere il pulsante, sacrificando una persona al fine di salvarne cinque.<sup>89</sup>

Anche se potrebbe sembrare un problema poco verosimile, i veicoli autonomi dovranno affrontare una gamma infinita di scenari, e alcuni dei quali potrebbero essere simili al dilemma del carrello.

I produttori automobilistici, programmando i loro veicoli autonomi per situazioni simili a quella del carrello, possono adottare varie opzioni algoritmiche, ognuna riflettente specifici valori.

Una panoramica riassuntiva degli approcci possibili dal punto di vista psicologico può essere la seguente:

- Approccio utilitaristico: l'obiettivo è di massimizzare il benessere sociale, ossia minimizzare il numero di vite perse (senza differenziare, ad esempio per età o sesso);<sup>90</sup>
- Approccio deontologico: la scelta è basata su ciò che è considerato doveroso, indipendentemente dalle conseguenze finali;<sup>91</sup>
- Approccio Rawlsiano: si mira a proteggere le persone svantaggiate, utilizzando calcoli per determinare le probabilità di sopravvivenza;<sup>92</sup>

---

<sup>89</sup> Foot, P. (1967). The problem of abortion and the doctrine of double effect.

<sup>90</sup> Bonnefon, J.; Shariff, A.; Rahwan, I. (2016). The social dilemma of autonomous vehicles.

<sup>91</sup> Balistreri, M. (2019). Macchine senza guidatore: considerazioni morali.

<sup>92</sup> Leben, D. (2017). A Rawlsian algorithm for autonomous vehicles.

- Approccio egoistico: si dà priorità a sé stessi ed alla propria sicurezza a discapito delle vite degli altri;<sup>93</sup>
- Approccio randomico: si lascia che la vettura scelga casualmente.<sup>94</sup>

Data la presenza di vantaggi e svantaggi in ciascuno di essi, è difficile prediligere un approccio con certezza.

Nel settembre 2016, la Germania, grazie ad una Commissione dedicata, ha promosso il primo tentativo di stabilire delle linee guida ufficiali per le scelte etiche dei veicoli autonomi. Questa Commissione ha identificato venti regole etiche, con un focus sulle situazioni di danno inevitabile (dove è necessario individuare un soggetto su cui la vettura andrà a scontrarsi).

Le regole prevedono una gerarchia su cui indirizzare la condotta lesiva: in primis, oggetti e beni materiali; in seguito, animali; se poi non è in alcun modo possibile deviare lo scontro, persone.<sup>95</sup>

Nel 2019, anche l'Unione Europea ha istituito alcuni principi etici che devono essere seguiti durante le diverse fasi di sviluppo, distribuzione e utilizzo di strumenti intelligenti come le vetture autonome. Tra questi aspetti troviamo l'essere legale, etico, trasparente, affidabile, equo e rispettoso dell'uomo.<sup>96</sup>

Le complesse decisioni etiche che i veicoli autonomi potrebbero dover prendere, secondo il Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston, richiedono una garanzia di accettazione della collettività e nonché una grande attenzione della comunità scientifica. A tal proposito, il MIT ha creato una piattaforma sperimentale chiamata "Moral Machine", che ha coinvolto partecipanti da tutto il mondo per esprimere il loro punto di vista su scelte morali in scenari prestabiliti, indicando le azioni da loro considerate più corrette.

---

<sup>93</sup> Kumfer, W.; Burgess, R. (2015). Investigation into the role of rational ethics in crashes of automated vehicles.

<sup>94</sup> Wiseman, Y.; Grinberg I. (2016). When an inescapable accident of autonomous vehicles is looming.

<sup>95</sup> Ethik-Kommission (2017). Automatisiertes und Vernetztes Fahren, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

<sup>96</sup> European Commission (2019). Ethics guidelines for trustworthy AI.

La piattaforma ha raccolto oltre 40 milioni di opinioni provenienti da diverse nazioni e contesti socioculturali, con l'obiettivo di identificare dei principi etici quanto più condivisi.

I dati raccolti sono stati analizzati anche in base alla geolocalizzazione, rivelando tre macroaree culturali: occidentale (tra cui Nord America ed Europa), orientale (tra cui paesi islamici e Giappone) e meridionale (tra cui paesi Latino-americani).

Dai risultati emergono diverse visioni di cosa sia “giusto”, a seconda delle influenze culturali. Ad esempio, il gruppo orientale ha dimostrato una maggiore volontà di salvare i pedoni anziani anziché quelli giovani. Nel gruppo meridionale, è emersa una più bassa preferenza per la vita umana rispetto a quella di animali domestici.

Esistono comunque alcune preferenze condivise tra tutti i gruppi, come la propensione di salvare i pedoni rispetto ai passeggeri oppure di salvare chi rispetta le norme anziché chi le infrange.<sup>97</sup>

Si è visto dunque come gli scenari di guida eccezionali stiano sfidando programmatori, autorità, e mondo della ricerca nella definizione di algoritmi di guida legalmente fondati, eticamente validi e tecnicamente fattibili.

Mentre diverse discussioni si ispirano al classico problema filosofico del "carrello" visto in precedenza per affrontare situazioni di scelta, il recente articolo di D'amato et al. risponde suggerendo un approccio basato sul contratto sociale della guida come soluzione concreta per implementare questa tipologia di mobilità autonoma senza perplessità.

Secondo questo approccio, sono tre le regole gerarchiche a dover guidare il comportamento dei veicoli autonomi: rispettare il dovere di diligenza verso tutti gli utenti della strada, evitare attivamente di causare danni e seguire il codice stradale con azioni che l'uomo ritiene ragionevoli.

I filosofi utilitaristi sostengono che, nel dilemma del carrello, uccidere una persona per salvarne cinque sia eticamente accettabile, guidando la progettazione di veicoli autonomi a massimizzare il bene sociale.<sup>98</sup>

Tuttavia, la legge attuale non richiede di considerare l'impatto complessivo sulla società in caso di incidenti, ma solo di rispettare la legge stessa.<sup>99</sup>

---

<sup>97</sup> Awad, E.; Dsouza, S.; Kim, R.; Schulz, J.; Henrich, J.; Shariff, A.; Bonnefon, J.; Rahwan, I. (2018). The moral machine experiment.

<sup>98</sup> Greene, J. D. (2016). Our Driverless Dilemma.

<sup>99</sup> Cudd, A.; Eftekhari, S. (2021). Contractarianism.

La teoria di D'Amato, dunque, suggerisce di adottare questa prospettiva, evitando eterni dibattiti filosofici ed affermando come l'unico requisito etico sia seguire i doveri giuridici, che per loro natura incarnano principi etici.

Agendo in questo modo, le attuali leggi statunitensi possono già fornire un riferimento abbastanza completo per determinare le scelte di guida appropriate, rispondendo al dilemma del carrello in maniera legale ed etica, nel rispetto del dovere di diligenza verso gli altri utenti della strada. Il codice della strada è infatti stabilito dell'uomo; dunque, rispettandolo si garantisce la supervisione umana data dal pubblico e non dal singolo programmatore, con la garanzia che la vettura autonoma non intraprenda rischi irragionevoli.

Uno sviluppo ingegneristico attento può garantire che scenari eccezionali di guida saranno estremamente rari, e le regole gerarchiche indicate sopra potranno essere sufficienti per garantire un comportamento coerente della vettura autonoma con la giurisdizione attuale. Nel caso di scontro imminente, l'auto autonoma non causerà intenzionalmente altri scontri per evitare il primo. Se questo potrebbe impedire di raggiungere l'obiettivo utilitaristico di massimizzare il benessere sociale, dall'altro contiene la collisione evitando che nuovi attori vengano coinvolti.

Sebbene questi principi non assicurino sempre una soluzione ottimale, D'amato et al. sostengono di poter generare fiducia negli utenti, garantendo allo stesso tempo il rispetto dei diritti altrui (senza che i veicoli autonomi valutino il valore di un individuo su un altro).

Questo porta ad una possibile soluzione al "problema del carrello" concretamente applicabile, dimostrando che è possibile implementare già con le leggi attuali i veicoli autonomi come mezzo di mobilità sicuro e sostenibile.<sup>100</sup>

### **3.3 Il caso Waymo**

Waymo è una divisione di Alphabet Inc., la società madre di Google, che da oltre un decennio si concentra sullo sviluppo di tecnologie di guida autonoma.

---

<sup>100</sup> D'amato, A.; Dancel, S.; Pilutti, J.; Tellis, L.; Frascaroli, E.; Gerdes, J. C. (2022). Exceptional Driving Principles for Autonomous Vehicles.

Nel 2009 è nato il primo progetto e nel 2015, con la cosiddetta "Google Car", è stata la prima azienda a completare con successo un viaggio completamente autonomo su strade pubbliche. Ad oggi offre servizi di robotaxi in diverse città degli Stati Uniti, tra cui San Francisco, Phoenix e Mountain View.

Waymo utilizza una varietà di vetture per i suoi test e servizi di guida autonoma, principalmente con alimentazione elettrica, come il SUV Jaguar I-Pace. Per rispondere alle complesse esigenze della guida autonoma, Waymo ha sviluppato un insieme di sensori da implementare sulle vetture consentendo una rilevazione dell'ambiente circostante a 360 gradi, sia di giorno che di notte, fino a una distanza di quasi tre campi da calcio.

Il Waymo Driver, il "cervello" del servizio Waymo installato nella flotta vetture, è un Sistema di Guida Automatizzato di livello 4 (come definito nello standard SAE J3016 precedentemente approfondito) e non richiede la presenza di un conducente umano nel sedile del conducente quando è impostato nella modalità a guida autonoma "solo passeggero". Ogni vettura Waymo è dotata di telecamere, lidar, radar e ulteriori sensori come giroscopi e accelerometri associati al GPS. Questo completo set di tecnologie opera sinergicamente per creare una dettagliata rappresentazione 3D dell'ambiente, identificando oggetti sia statici che in movimento, come altri utenti stradali.

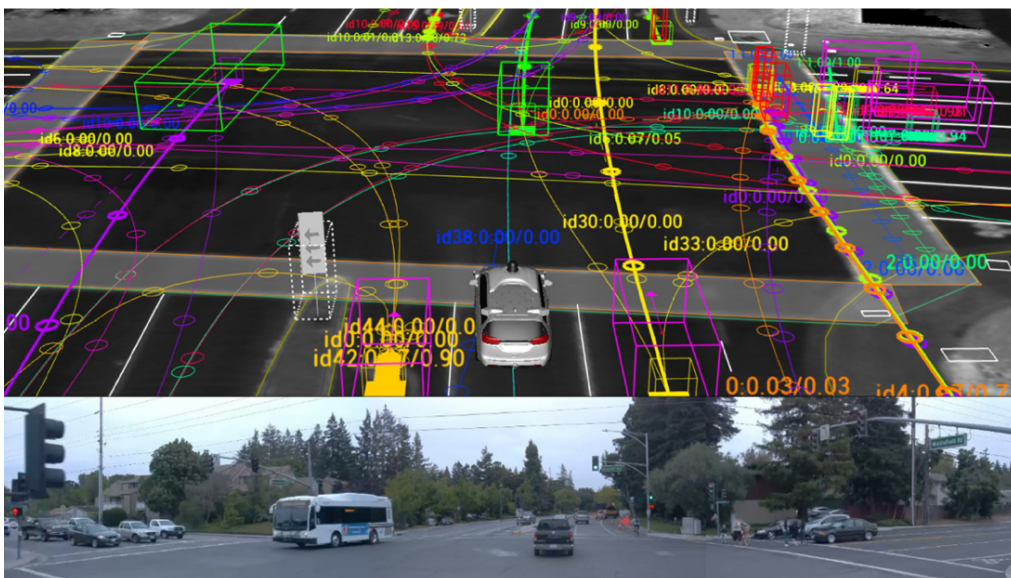


Fig. 12: Mappatura dell'ambiente circostante del software Waymo. Fonte: Waymo.

La missione di Waymo è quella di introdurre la tecnologia di guida autonoma nel mondo, rendendo sicuro e agevole il trasporto di persone verso le loro destinazioni.

La sicurezza rappresenta l'obiettivo primario di Waymo, cercando di evitare quelle migliaia di morti che ogni anno si registrano a causa di incidenti stradali.

Waymo ha investito nella sicurezza e ha sviluppato processi che ispirano fiducia nella capacità della tecnologia di guida autonoma di servire le esigenze del pubblico in termini di trasporto più sicuro e mobilità migliorata.

L'azienda ha dichiarato che il loro obiettivo, grazie alle tecnologie sviluppate internamente, è quello di rendere il Waymo Driver il conducente "più esperto al mondo".<sup>101</sup>

I servizi di robotaxi di Waymo consentono ai passeggeri di prenotare via app la corsa e di viaggiare su strade pubbliche nei veicoli totalmente autonomi.

Il database di dati raccolti da Waymo è stato reso disponibile ed analizzato dallo studio del 2023 di Hu, Zheng, & Chen al fine di identificare i comportamenti del veicolo autonomo rispetto ai veicoli a guida umana e delinearne le differenze. Le condizioni di guida contenute in questo database sono le più svariate e includono diverse tipologie di strade (urbane, autostrade), condizioni climatiche (sole, pioggia) e di luce (giorno e notte). I dati sono stati raccolti grazie alle 5 telecamere (frontali e laterali) e ai 5 sensori Lidar (4 a corto raggio e 1 a medio raggio) presenti nella vettura Waymo.

A seguito delle analisi attraverso misure surrogate di sicurezza, spesso utilizzate nella letteratura sulla sicurezza stradale per correlare i rischi di incidenti nel traffico, i veicoli autonomi si sono rivelati molto più sicuri dei veicoli guidati dall'uomo.

Le due principali misure identificate sono le seguenti:

- Time to Collision (TTC): tempo residuo prima che si verifichi una collisione tra due veicoli (considerando che essi continuino su un percorso di collisione e mantengano la stessa differenza di velocità).<sup>102</sup>
- Deceleration Required to Avoid Crash (DRAC): tempo di decelerazione minimo che il veicolo necessita per fermarsi tempestivamente (o eguagliare la velocità del veicolo davanti) evitandone la collisione.<sup>103</sup>

---

<sup>101</sup> Waymo (2021). Waymo Safety Report.

<sup>102</sup> Hayward, J. C. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger.

<sup>103</sup> Cooper, D. F.; Ferguson, N. (1976). Traffic studies at t-junctions. 2. A conflict simulation record.

Le vetture autonome Waymo hanno dimostrato di avere valori di TTC significativamente più grandi e di DRAC più piccoli rispetto a una vettura guidata dall'uomo, il che le rende molto più sicure.

A favore della sicurezza, l'approccio conservativo della Google Car si è visto tradursi in tempi di avanzamento e spazi durante gli ingorghi significativamente maggiori rispetto alla guida dell'uomo, avendo un effetto negativo in termini di scorrimento del flusso di traffico durante gli ingorghi. L'auto autonoma, però, vanta una percentuale di comportamenti instabili nelle corsie nettamente inferiore rispetto all'uomo, e questo potrebbe risultare vantaggioso nel ridurre le oscillazioni del traffico.

Complessivamente, si evidenzia come la vettura autonoma Waymo attualmente adotti un comportamento conservativo per garantire la sicurezza, anche a scapito dell'efficienza del traffico.

È importante notare che questa analisi si concentra però sul comportamento di un singolo veicolo autonomo, in quanto i dati disponibili non analizzano flotte di vetture autonome.

In futuro, l'implementazione di flotte di veicoli autonomi connessi e capaci di coordinarsi tra loro con uno stile di guida "cooperativo" potrebbero consentire di migliorare simultaneamente sia la sicurezza che l'efficienza, portando a un notevole miglioramento nell'intero panorama della mobilità.<sup>104</sup>

Analizzando i numeri del più recente report Waymo, si nota come le auto della flotta statunitense abbiano raggiunto nel gennaio 2023 il traguardo del primo milione di miglia (l'equivalente di 1.6 milioni di chilometri) percorse nelle strade pubbliche di California e Arizona senza alcun umano alla guida.

Dall'articolo di Victor et al. si evidenzia come durante questo primo milione di miglia di servizio taxi si siano verificati solamente due incidenti, definibili tali rispetto ai criteri del sistema di campionamento delle indagini sugli incidenti stradali della National Highway Traffic Safety Administration (database rappresentativo di collisioni segnalate alla polizia e in cui almeno un veicolo viene trainato).

---

<sup>104</sup> Hu, X.; Zheng, Z.; Chen, D. & Sun J. (2023). Autonomous vehicle's impact on traffic: empirical evidence from Waymo Open Dataset and implications from modelling.



Entrambi questi incidenti sono stati dei tamponamenti senza alcun ferito. Nel caso più grave dei due, il veicolo Waymo è stato colpito nella parte posteriore da una vettura guidata da un conducente distratto dall'uso del cellulare in prossimità di un semaforo rosso. Inoltre, ci sono stati 18 eventi di contatto minori, di entità non rilevante per essere definiti incidenti secondo i criteri descritti sopra. 9 di questi contatti, non hanno causato alcun danno. In tutti questi scontri, la causa è imputabile a comportamenti rischiosi dei guidatori umani.

Ciò che risulta importante è che non si siano registrati incidenti mortali, né coinvolgimento di utenti vulnerabili della strada.<sup>105</sup>

Dall'ancor più recente articolo di Di Lillo et al., datato settembre 2023, si evince come Waymo abbia già raggiunto la quota di 3.8 milioni di miglia percorse garantendo servizi di robotaxi senza alcun essere umano al volante. In questo articolo si è confrontata la sicurezza dei conducenti autonomi rispetto ai conducenti umani, dimostrando che il servizio autonomo di Google è significativamente più sicuro per gli altri utenti della strada.

Questo risultato è stato ottenuto confrontando le richieste di risarcimento assicurativo di terze parti di Waymo rispetto a veicoli privati.

L'analisi è stata condotta utilizzando i dati derivanti dall'assicurazione per la responsabilità civile, in quanto capaci di fornire un quadro più completo rispetto ai database sugli incidenti riportati dalla polizia (che raccolgono solo dati di incidenti di più grave entità).

Nelle oltre 3,8 milioni di miglia percorse senza conducenti umani, il Waymo Driver ha avuto zero richieste di risarcimento per lesioni corporee, rispetto a 1,11 richieste per milione di miglia dei conducenti umani derivante dai dati della compagnia assicurativa Swiss Re. Un dato fondamentale a dimostrazione della maggiore sicurezza del servizio Waymo, e in generale della guida autonoma.

Inoltre, si sono ridotte in modo significativo anche le richieste di risarcimento per danni materiali, con 0,78 richieste per milione di miglia rispetto alle 3,26 dei conducenti umani.

---

<sup>105</sup> Victor, T.; Kusano, K.; Gode, T.; Chen, R.; Schwall, M. (2023). Safety Performance of the Waymo Rider-Only Automated Driving System at One Million Miles.

Questi dati sono in linea anche con i dati di Waymo raccolti in fase di test, in cui era presente un operatore umano all'interno della vettura (in modalità guida autonoma). Nelle operazioni di test si sono percorse distanze molto più alte, raggiungendo oltre 35 milioni di miglia, dove anche qui il Waymo Driver ha dimostrato una significativa riduzione delle richieste di danni corporei e materiali rispetto a conducenti umani.<sup>106</sup>

---

<sup>106</sup> Di Lillo, L.; Gode, T.; Zhou, X.; Atzei, M.; Chen, R.; Victor, T. (2023). Comparative Safety Performance of Autonomous- and Human Drivers: A Real-World Case Study of the Waymo One Service.

## Capitolo IV Mobilità aerea: tecnologie, sfide e applicazioni

La sfida delle strade congestionate persiste e coinvolge praticamente tutti i paesi.

Gli automobilisti a Monaco di Baviera trascorrono in media 87 ore all'anno nel traffico.<sup>107</sup>

In America, a Los Angeles, nel periodo precedente alla pandemia si registravano fino a 119 ore perse nel traffico.<sup>108</sup>

L'auto volante, in grado di sollevarsi dal suolo e navigare nell'aria superando le limitazioni stradali, è un sogno che affascina l'immaginazione umana da decenni, nonché una soluzione per risolvere il problema delle strade congestionate. Questa soluzione, grazie a tecnologie avanzate associate ad un approccio deep tech, sembra essere sempre più vicina.

Lo studio di McKinsey sul futuro della mobilità afferma come nel prossimo decennio una trasformazione significativa coinvolgerà l'ecosistema della mobilità, ed un elemento chiave di questa trasformazione sarà la riduzione dell'uso dell'auto privata, la cui quota di mobilità totale si prevede diminuirà dal 45% nel 2022 al 29% nel 2035.

Grazie agli avanzamenti tecnologici, tale risultato potrà essere raggiunto con opzioni di mobilità innovative, come i taxi a guida autonoma (visti nel capitolo precedente) oppure dei velivoli specificamente studiati per contesti urbani.<sup>109</sup>

L'articolo di Wheeler et al. considera le auto volanti e gli aeromobili a decollo e atterraggio verticale (VTOL) una tecnologia promettente che potrebbe rivoluzionare il mondo della mobilità personale. Oltre alla capacità di ridurre i problemi di traffico nelle aree urbane e garantire tempistiche di viaggio notevolmente ridotte, nella loro configurazione elettrica (eVTOL) offrono anche una promettente capacità di abbattere le emissioni ambientali, configurandosi come una possibile soluzione di mobilità sostenibile a 360 gradi.<sup>110</sup>

---

<sup>107</sup> Heinrich, J. (2022). Major urban mobility trends of the future.

<sup>108</sup> Liu, J. (2019). Commuters in this city spend 119 hours a year stuck in traffic.

<sup>109</sup> McKinsey (2023). The future of mobility. McKinsey Quarterly.

<sup>110</sup> Wheeler, P.; Sirimanna, T. S.; Bozhko, S.; Haran, K. S. (2021). Electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems.

I principali progetti sono ancora in fase di sviluppo, ma si prevede che la mobilità aerea urbana diventerà una realtà concreta nei prossimi anni.

#### **4.1 Tipologie di veicoli volanti**

Già dagli inizi del 900, gli inventori hanno concepito "flying cars" e altre forme di mobilità aerea urbana. Come spiega l'articolo di Cohen, la storia e gli sviluppi di questo settore possono essere classificati in diverse fasi.

Dal 1910 agli anni '50, sono emersi i primi concetti di "auto volanti" personali, avendo tuttavia importanti vincoli in termini di tecnologia e regolamentazioni.

Dagli anni '50 agli anni '80 sono iniziate le prime operazioni di mobilità aerea tramite elicotteri per trasporto urbano di passeggeri, in città come New York.

Dagli anni 10 del nuovo millennio, con il crescente interesse dei servizi su richiesta, aziende come Uber hanno iniziato a considerare soluzioni di mobilità aerea per trasporti urbani su richiesta.

Ad oggi, si stanno sviluppando servizi con veicoli a decollo e atterraggio verticale (VTOL), con possibili servizi hub e spoke (vertiporti o eliporti, per collegare luoghi urbani e suburbani integrando la mobilità aerea all'interno di viaggi intermodali) sino ad arrivare a servizi point-to-point, dove i passeggeri possono accedere direttamente agli aeromobili VTOL dalla propria posizione senza la necessità di hub, con un trasporto punto-a-punto.<sup>111</sup>

Questa forma di mobilità alternativa ha l'obiettivo di sviluppare un sistema di trasporto aereo sicuro, sostenibile, economico e accessibile per agevolare la mobilità delle persone, ma anche la distribuzione di merci e i servizi di emergenza all'interno delle aree metropolitane, così come in aree remote o scarsamente servite dalle infrastrutture tradizionali. Grazie ai rapidi progressi nella tecnologia e nell'ingegneria, questo scenario sta iniziando a prendere forma, aprendo nuove opportunità e modelli di business.

Aspetti come l'elettrificazione, l'automazione e la connettività, elementi approfonditi nella prima fase di questo elaborato riferiti alle vetture tradizionali, sono tecnologie

---

<sup>111</sup> Adam P. Cohen, S. A. (2021). Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges. Transactions on intelligent transportation systems.

cruciali per superare le limitazioni delle infrastrutture stradali consentendo un trasporto rapido ed efficiente attraverso il cielo.<sup>112</sup>

Il percorso verso l'integrazione delle auto volanti nella società richiede innovazioni tecniche, ma anche questioni legate a sicurezza, a regolamentazione, infrastrutture necessarie e impatti sull'ambiente, necessitando di collaborazioni efficaci tra governi, industrie e organizzazioni.

Attualmente, come descritto nell'articolo di Swaminathan et al., l'industria delle "flying cars" conta più di 250 aziende ed una attenzione importante da parte dei policymakers mondiali, al fine di sviluppare nuovi concetti di mobilità sostenibile.<sup>113</sup>

Questi veicoli possono avere diverse architetture, a partire dalla modalità di decollo e atterraggio. L'articolo cita:

- VTOL, veicoli a decollo e atterraggio verticale (vertical takeoff and landing), come elicotteri o droni;
- HTOL, a decollo e atterraggio orizzontale (horizontal takeoff and landing), come un aereo tradizionale
- STOL, a decollo e atterraggio corto (short takeoff and landing), come un aereo capace di decollare orizzontalmente in uno spazio più ridotto rispetto ad un HTOL.

Tra queste alternative, si può notare come i principali player del settore si stiano focalizzando sui veicoli a decollo e atterraggio verticale, in particolare con alimentazione elettriche (eVTOL), per questo nuovo settore della mobilità aerea.

Tale settore, definito rispettivamente come Mobilità Aerea Urbana e Regionale (UAM & RAM), crea infatti nuovi parametri di utilizzo dei velivoli e requisiti prestazionali differenti dal tradizionale mondo aeronautico, coprendo distanze finora associate ad un paradigma di mobilità stradale.

---

<sup>112</sup> Melo, S. P.; Cerdas, F.; Barke, A.; Thies, C.; Spengler, T. S.; Herrmann, C. (2021). Life cycle engineering of future aircraft systems: The case of eVTOL vehicles.

<sup>113</sup> Swaminathan, N.; Reddy, S. R.; Rajashekhara, K. & Haran, K. S. (2022). Flying Cars and eVTOLs - Technology Advancements, Powertrain Architectures and Design. Transactions on Transportation Electrification.

Prima di analizzare le differenti specifiche tecniche di questi velivoli, è importante differenziare il concetto di auto volante da VTOL, descritto da Swaminathan et al.

I veicoli VTOL si presentano come progetti specifici per decolli e atterraggi verticali, consentendo di operare in spazi ristretti e di superare le limitazioni delle tradizionali piste di decollo e atterraggio. Questi veicoli possono includere elicotteri, droni e aeromobili VTOL a propulsione fissa. La capacità di volo verticale facilita l'accesso di tali velivoli in luoghi difficili da raggiungere o in cui l'installazione di una pista di decollo è impraticabile, come i centri cittadini.

Le automobili volanti, invece, si configurano come veicoli che uniscono la capacità di volo con la circolazione su strada. A differenza dei veicoli a decollo e atterraggio verticale, le automobili volanti sono concepite per operare sia in qualità di autoveicoli terrestri, sia come aeromobili con capacità di decollo e atterraggio, con conseguenti complessità in termini di struttura e propulsori.

L'articolo evidenzia che la distinzione tra VTOL e auto volanti può diventare sfumata in quanto alcuni veicoli sono progettati per operare sia come VTOL che come auto volanti, utilizzando una modalità di decollo e atterraggio verticale per il volo.

Secondo Swaminathan et al. è possibile effettuare una categorizzazione di questi mezzi in base a vari parametri chiave, tra cui la presenza e il posizionamento delle ali, l'alimentazione e il motore adottato, il design, l'autonomia e la capacità di trasporto.

Clarke et al. affermano come la scelta dell'architettura influisca notevolmente su efficienza in crociera e volo stazionario, così come sul livello di rumore emesso. Poiché tali velivoli sono destinati a operare in prossimità o all'interno delle zone urbane, è importante attribuire particolare attenzione a sicurezza per le persone e inquinamento acustico, per ridurre potenziali fonti di disturbo che potrebbero derivarne.<sup>114</sup>

La seguente tabella offre un quadro comparativo degli esistenti progetti di veicoli volanti, evidenziando le loro caratteristiche come tipologia di decollo e atterraggio, propulsore, potenza, autonomia, meccanismo, capacità, peso massimo al decollo (somma di peso a vuoto, combustibile, equipaggio, passeggeri e bagagli) ed anno di sviluppo del progetto.

---

<sup>114</sup> Clarke, M.; Smart, J.; Botero, E. M.; Maier, W.; Alonso, J. J. (2019). Strategies for Posing a Well-Defined Problem for Urban Air Mobility Vehicles.

Modello	Tipologia	Propulsore	Potenza	Autonomia	Meccanismo	Pax	MTOW	Anno		
Kitty Hawk Flyer	VTOL Hoverbike			10 km	Octocopter, lift fans	1	204 kg	2015		
EHang 184	VTOL	Full electric	1216 kW	16 km	Multi-rotor, coaxial doubleblade design	1	360 kg	2018		
SD - 03				30 km		1	499 kg	2020		
EHang 216				35 km		2	600 kg	2018		
Kitty Hawk Heaviside				160 km		1	374 kg	2019		
Archer Maker				325 kW	97 km	Tilt-rotor	4	3175 kg	2020	
Joby S4				200 kW	277 km		5	2177 kg	2020	
VA-X4				1 MW	160 km		5		2020	
Terrafugia TF-2A					100 km	Lift + Cruise	2	1200 kg	2020	
CityAirbus NextGen				560 kW	80 km		5	2200 kg	2021	
Lilium Jet 7 - seater					1 MW	250 km	Ducted vectored thrust	7	3175 kg	2023
Volocopter 2X					70 kW	35 km	Multi-rotor	2	450 kg	2017
Alaka'i Technologies Skai			Fuel cell	300 kW	644 km	5			2019	
UrbanAeronautics CityHawk			Jet fuel			150 km	Lift + Cruise	5	1930 kg	2021
Paragon VTOL Aerospace Soar				Fuel cell and Battery		480 to 1450 km	Multi-large ducted turbofans tilt + fans on fixed-wings	6		2021
Dufour Aerospace Aero3		Hybrid		1020 km	Tilt-wing	8	2800 kg	2021		
AeroMobil V.5.O	VTOL Flying Car	Full electric	Flight: 75 kW	Flight: 700 km	Wingtip lift and thrust rotor	4		2018		
Terrafugia TF-X		Hybrid		Flight: 800 km	Tilt-rotor	4		2015		
Aska A5		Electric with range extender			Flight: 402 km		4		2023	
Klein Vision AirCar	HTOL Flying Car	Gasoline	Flight: 120 kW	Flight: 1000 km		2	1100 kg	2017		
PAL -V Liberty		IC engine	Drive: 75 kW Flight: 150 kW	Drive: 1315 km Flight: 400 km	Single rotor with autogyro	2	910 kg	2018		
Terrafugia Transition		Hybrid		Flight: 75 kW	Drive: 1296 km Flight: 787 km		2	649 kg	2009	
AeroMobil V.4.O	STOL Flying Car	Gasoline	Drive: 80 kW Flight: 224 kW	Drive: 100 km Flight: 700 km		2	960 kg	2017		

Fig. 13: Modelli di veicoli volanti attualmente in produzione. Fonte: Swaminathan et al.

Un primo fattore di differenziazione fondamentale è la tecnologia adottata per le ali, che identifica due approcci distinti alla realizzazione di automobili volanti. Si possono infatti identificare veicoli dotati di ali retrattili, come AeroMobil V5.0, Terrafugia TF-X, Aska, Pal-V Liberty, AirCar e The Transition, e veicoli senza ali, caratterizzati dall'utilizzo di multi-rotori, o addirittura propulsori a elica staccabili, come il progetto innovativo Pop-Up Next (risultato della collaborazione tra Audi e Airbus). L'assenza delle ali (ossia l'utilizzo di soli rotori) comporta innegabili vantaggi e svantaggi.

Tra i primi, si può annoverare una riduzione del peso complessivo del veicolo, nonché un vantaggio per il costruttore in termini economici.

Non avendo ali, i multi-rotori tipicamente vantano eliche di grandi dimensioni, offrendo l'ulteriore vantaggio di essere particolarmente stabili nelle fasi di decollo e atterraggio.

Tuttavia, lo svantaggio che ne consegue consiste nella significativa diminuzione delle capacità aerodinamiche. Ciò ne compromette velocità ed autonomia nel volo orizzontale prolungato, rendendoli adatti esclusivamente ad un contesto di mobilità aerea urbana (UAM), non riuscendo a garantire autonomie necessarie per coprire distanze regionali (RAM).<sup>115</sup>

Esistono inoltre soluzioni che adottano sia dei rotori verticali per il sollevamento, rendendo stabili decollo e atterraggio, che delle ali fisse con un tradizionale sistema di propulsione per le crociere a più lungo raggio. Questa caratteristica prende il nome di “lift + cruise”.

Analizzando i rotori, possono esistere soluzioni con rotori di tipo fisso (fixed-rotor) oppure orientabile (tilt-rotor). Quest'ultimo permette all'asse dell'elica di compiere una rotazione di 90 gradi mentre l'aeromobile passa dalla fase di volo stazionario a quella di volo in avanti, ottimizzando l'architettura rispetto ad un lift + cruise, ma aumentandone la complessità tecnica.<sup>116</sup>

Gli aeromobili dotati del sistema tilt-rotor prendono il nome di velivoli a spinta vettoriale. I rotori orientabili sono progettati in modo tale da consentire una variazione dell'angolo e dunque della direzione della spinta, consentendo di avere maggiore flessibilità ed agilità.

---

<sup>115</sup> Pradeep, P.; Wei, P. (2019). Energy-efficient arrival with rta constraint for multirotor evtol in urban air mobility.

<sup>116</sup> Chauhan, S. S.; Martins, J. R. R. A. (2020). Tilt-Wing eVTOL Takeoff Trajectory Optimization.



Questa tecnologia è applicata alla maggior parte dei veicoli con un range maggiore di 100km.

Oltre ai velivoli a spinta vettoriale menzionati in precedenza, esiste anche una tecnologia chiamata "ducted vectored thrust", ossia a spinta vettoriale canalizzata, dove la ventola è posizionata all'interno di un condotto cilindrico.

L'articolo di Nathen et al. dimostra diversi vantaggi associati a questa configurazione.

Il primo è la riduzione delle perdite alle estremità delle pale. Inoltre, la presenza di una fila di statori elimina il vortice di uscita. Tutto ciò si traduce in un notevole incremento in termini di efficienza in crociera, a scapito di una maggiore potenza richiesta per il volo verticale o stazionario. La fase stazionaria è però solo una piccola parte dell'intero volo, specialmente in ottica di mobilità aerea regionale (RAM), dove si stima essere circa il 10% dell'intero viaggio.

Tra gli ulteriori vantaggi di questa tecnologia troviamo sicurezza e basso inquinamento acustico. Infatti, il condotto rende le conseguenze in caso di perdita di una pala o di collisione con uccelli molto più sicure rispetto alle eliche aperte, oltretutto un rumore decisamente ridotto grazie alla presenza di rivestimenti acustici all'interno del condotto stesso.

Si possono distinguere due tipologie di aeromobili a ventole canalizzate. La prima è simile a quanto utilizzato negli aerei tradizionali di grandi dimensioni: la ventola canalizzata è collocata a distanza dalla struttura principale dell'aeromobile, per minimizzare le interazioni aerodinamiche.

La seconda integra la ventola canalizzata direttamente nella fusoliera e nelle ali. Ciò che ne risulta è una stretta interazione aerodinamica tra queste componenti.

Il Lilium jet ne rappresenta un esempio, e verrà analizzato in dettaglio nel capitolo successivo.<sup>117</sup>

In generale, per questa tipologia di velivoli, il numero e la dimensione di eliche giocano un ruolo fondamentale.

L'articolo di Ullman et al. espone infatti come avere un maggior numero di eliche a più piccole dimensioni, rispetto ai tradizionali concetti di aerei a elica con una o poche grandi eliche, sia la soluzione più adatta.

---

<sup>117</sup> Nathen, P.; Strohmayer, A.; Miller, R.; Grimshaw, S.; Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.

Si tratta del concetto di DEP (Distributed Electric Propulsion). Nel DEP, ognuna di queste eliche è alimentata da un proprio motore elettrico o unità di propulsione, che può essere controllato in modo indipendente dagli altri.

Ciò offre vantaggi significativi in termini di sicurezza e controllo (se uno o più motori o ventole si guastano, gli altri possono compensare il carico e mantenere l'aeromobile in volo in modo sicuro), efficienza (grazie alla capacità di funzionare a velocità e potenza diverse) e riduzione del rumore (distribuendo la propulsione su ventole più piccole).<sup>118</sup>

Un'ulteriore suddivisione può essere basata sulla tipologia di alimentazione e motore utilizzati. Alcuni veicoli volanti attuali sono spinti da motori a combustione interna tradizionali, mentre altri adottano motori ibridi o elettrici, mirando a conseguire vantaggi in termini di emissioni ridotte e maggiore efficienza energetica.

#### *4.1.1 Velivoli eVTOL*

Come per il mondo della mobilità su strada, analizzato nei precedenti capitoli, l'introduzione di tecnologie elettriche sembra la più promettente per aprire nuovi scenari di mobilità aerea urbana (UAM) e regionale (RAM) più sostenibili e rispettosi dell'ambiente.

L'articolo di Nathen et al. descrive infatti come la mobilità aerea urbana (UAM) richieda velivoli con un'autonomia operativa compresa tra 5 e 40 chilometri, ed una velocità variabile tra 70 e 120 chilometri orari, sufficiente per spostamenti all'interno di percorsi cittadini.

Nella mobilità aerea regionale (RAM), che riguarda connessioni tra diverse aree metropolitane e dunque spostamenti più lunghi, si prevede una necessità di autonomia operativa compresa tra 100 e 300 chilometri, ed una richiesta prestazionale in termini di velocità superiore ai 200 chilometri orari.

In queste operazioni di UAM e RAM, i velivoli più indicati sono proprio quelli a decollo e atterraggio verticale elettrici. Nathen et al. definiscono quattro fasi principali durante il volo di un VTOL, come rappresentato nell'immagine in seguito.

---

<sup>118</sup> Ullman, D.; Homer, V.; Horgan, P. (2017). Comparing electric sky taxi visions.



Fig. 14: Fasi di volo di un veicolo VTOL. Fonte: Nathen et al.

La prima è la fase di decollo e atterraggio, dove il volo è verticale. A seguire, la fase di transizione: qui il velivolo passa dal volo verticale a quello in orizzontale. C'è dunque la fase di salita o discesa fino all'altitudine ed alla velocità desiderata, cosiddetta di crociera. Una volta assestati questi valori, si arriva dunque alla fase di crociera, che si assume contare per il 90-95% del tempo totale di volo.

Nell'articolo si pone come standard un'altitudine di crociera nominale di 3000 metri. Questa è infatti l'altitudine fino alla quale un aeromobile per mobilità UAM e RAM può operare, senza dover essere predisposto di una cabina passeggeri pressurizzata.

Ognuna di queste fasi richiede specifiche condizioni di potenza e prestazioni dall'aeromobile per completare con successo il volo.<sup>119</sup>

Tra le principali configurazioni di VTOL elettrici esistono sostanziali differenze in termini di prestazione, a seconda delle distanze per cui sono progettati all'interno del range UAM e RAM.

Bacchini e Cestino hanno condotto diverse valutazioni dei principali eVTOL, considerando parametri chiave come l'energia necessaria e il tempo richiesto per completare tre missioni di volo di riferimento. Nell'analisi, l'E-Hang 184 è stato scelto per rappresentare la configurazione multi-rotore, il Kitty Hawk Cora è stato selezionato per la configurazione lift + cruise, mentre il Jet Lilium è stato utilizzato come esempio di configurazione a spinta vettoriale.

I risultati emersi da questa analisi dimostrano come la scelta della migliore configurazione di eVTOL dipenda strettamente dalla natura del volo da compiere.

<sup>119</sup> Nathen, P.; Strohmayer, A.; Miller, R.; Grimshaw, S.; Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.

Nel caso di missioni a breve raggio, ossia di mobilità aerea urbana (UAM), i multirotori si sono rivelati più efficienti, grazie alle loro prestazioni superiori in fase di decollo e atterraggio.

Per missioni a più lungo raggio come la mobilità aerea regionale (RAM), i multirotori non risultano adatti a causa della loro limitata autonomia. In questo caso, gli eVTOL a spinta vettoriale sono più efficienti in crociera e possono coprire distanze maggiori, risultando la scelta migliore.

La configurazione lift plus cruise, poi, rappresenta un compromesso tra queste due configurazioni.

In sintesi, l'analisi ha sottolineato l'importanza di selezionare la configurazione di eVTOL più adatta alle esigenze specifiche di ciascuna missione, tenendo conto delle prestazioni richieste in decollo e atterraggio, in crociera e dell'autonomia desiderata.<sup>120</sup>

Di seguito è possibile trovare una rappresentazione visuale che sintetizza i concetti di aeromobili eVTOL analizzati sopra.




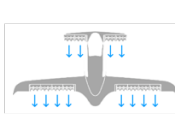
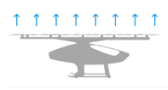



	Multicopter	Lift + Cruise	Tilt Rotor	Ducted Vectored Thrust
Aircraft				
				
UAM	✓	✓	✓	✓
RAM	✗	⊘	✓	✓

Fig. 15: Confronto tra diverse architetture di velivoli a decollo e atterraggio verticale (VTOL). Fonte: Nathen et al.

Questi velivoli si possono differenziare anche a seconda delle tecnologie di automazione di cui sono dotati.

L'articolo di Takacs et al. propone delle specifiche linee guida per i livelli di autonomia nei VTOL in una scala da 0 a 5, come quanto visto nelle vetture a guida autonoma.

<sup>120</sup> Bacchini, A.; Cestino, E. (2019). Electric VTOL Configurations Comparison.

Questa la descrizione:

- Livello 0: Nessuna automazione, con il pilota umano che controlla tutte le operazioni;
- Livello 1: Assistenza al pilota, con alcune manovre critiche automatizzate e il pilota che può regolare parametri come direzione, altitudine e velocità;
- Livello 2: Automazione parziale, dove il decollo e l'atterraggio sono completamente automatizzati, ma richiedono la supervisione umana. La crociera è su una traiettoria prestabilita e la tecnologia è capace di evitare eventuali collisioni, ma anche qui si richiede la supervisione umana;
- Livello 3: Automazione condizionale, in cui non è richiesta la supervisione del pilota in decollo, crociera e atterraggio. Il sistema autonomo può apportare modifiche alla traiettoria in caso di necessità e richiede il controllo del pilota se il VTOL esce dal suo dominio operativo;
- Livello 4: Alta automazione, dove tutte le operazioni di movimento sono svolte autonomamente, incluse le manovre di emergenza e la gestione degli imprevisti, senza necessità di supervisione umana. In caso di necessità, il VTOL può effettuare autonomamente un atterraggio di emergenza;
- Livello 5: Automazione completa, in cui il VTOL non è dotato di interfacce di controllo umano, ed è autonomo in tutte le operazioni, in aria e a terra. È capace di eseguire diverse sequenze di decollo e atterraggio.<sup>121</sup>

È previsto che i primi veicoli a decollo e atterraggio verticale saranno operati in parte o completamente da piloti umani. Questo per garantire la sicurezza dei passeggeri e consentire agli operatori di raccogliere dati e informazioni sul funzionamento dei veicoli in condizioni reali.

Alcune fasi o episodi delle operazioni potrebbero poi essere sottoposte a controllo autonomo, e si potrà consentire il volo e l'operazione remota dei veicoli pilotandoli da centri di controllo a terra, prima di passare ad una completa autonomia.

In questa fase è compresa non solo la supervisione passiva delle operazioni dei VTOL, ma anche il monitoraggio dei dati di volo, il controllo delle missioni e la capacità di intervenire in situazioni di emergenza o fornire istruzioni ai veicoli autonomi.

---

<sup>121</sup> Takacs, A.; Haidegger, T. (2022). Infrastructural Requirements and Regulatory Challenges of a Sustainable Urban Air Mobility Ecosystem.

Questo controllo remoto da terra consentirà di ridurre i costi operativi e di aumentare l'efficienza.

Si ipotizza dunque un periodo graduale di transizione verso l'autonomia, in cui la presenza umana rimarrà fondamentale per garantire la sicurezza e gestire situazioni eccezionali. Per garantire che la transizione sia fluida e sicura per tutti i soggetti coinvolti, sarà necessaria un'attenta pianificazione e un'architettura di controllo sofisticata.<sup>122</sup>

#### *4.1.2 Impatti ambientali*

In seguito alle analisi di Kasliwal et al., si può notare come le implicazioni dal punto di vista della sostenibilità non siano sempre chiare, ma in alcuni determinati utilizzi i VTOL potrebbero essere una soluzione più ecologica rispetto a tradizionali vetture, sia con motore a combustione interna (ICEV) che elettriche a batteria (BEV).<sup>123</sup>

Infatti, un viaggio di 100 km (da punto a punto) su un eVTOL con un solo occupante (il pilota), comporta emissioni di gas serra per persona più basse del 35% rispetto a un veicolo con motore a combustione interna e superiori del 28% rispetto a un veicolo elettrico a batteria, entrambi con un solo occupante.

Se confrontiamo però un eVTOL con capacità massima di carico (tre passeggeri) con vetture stradali con un'occupazione media, che è pari a 1,54 persone, le emissioni di gas serra degli eVTOL per passeggero-chilometro risultano inferiori del 52% rispetto agli ICEV e del 6% rispetto ai BEV.

Gli eVTOL, dunque, possono offrire un trasporto potenzialmente più sostenibile, se utilizzati a pieno regime. Tutto ciò, in un tempo decisamente minore.

La ricerca ha infatti calcolato che, considerato come nel precedente caso un viaggio di 100 km (da punto a punto), il trasporto con un eVTOL, rispetto ad una tradizionale autovettura, permette di risparmiare l'83% del tempo.

---

<sup>122</sup> Thipphavong, D. P.; Apaza, R.; Barmore, B.; Battiste, V.; Burian, B.; Dao, Q.; Feary, M.; Go, S.; Goodrich, K. H.; Homola, J.; Idris, H. R.; Kopardekar, P. H.; Lachter, J. B.; Neogi, N. A.; Ng, H. K.; Oseguera-Lohr, R. M.; Patterson, M. D.; Verma, S. A. (2018). Urban air mobility airspace integration concepts and considerations.

<sup>123</sup> Kasliwal, A. F. (2019). Role of flying cars in sustainable mobility.

Chiaramente è un risultato variabile in base a moltissimi fattori, a partire dall'alto tasso di congestione stradale, alle restrizioni nello spazio aereo, fino alle condizioni atmosferiche.

Questo notevole risparmio di tempo, spiega Kasliwal et al., può favorire gli occupanti ad optare per una opzione di mobilità condivisa (e dunque, sostenibile), ammortizzando la spesa ed ottenendo così un vantaggio dal punto di vista ambientale oltretutto un beneficio economico e temporale.

A tal proposito, l'articolo di Ahmed et al. esplora in modo empirico la "willingness to pay" delle persone ad utilizzare i servizi di taxi volanti e auto volanti condivise, e i fattori che influenzano la decisione delle persone di adottare questi nuovi modi di trasporto.<sup>124</sup>

Tra i risultati, si nota come i fattori principali per cui le persone sono disposte ad incrementare la disponibilità a pagare sono principalmente la riduzione del tempo di viaggio, la maggior sicurezza in tema di incidenti, ed il minore impatto ambientali in emissioni di CO2.

È interessante vedere anche come cambiano le preferenze relative alla tipologia di guida di questi veicoli a seconda delle priorità dei rispondenti. Tra essi, chi ricerca il minor tempo di viaggio possibile preferisce avere auto volanti guidate dall'uomo. Chi invece ha come priorità la sicurezza, preferisce che questi mezzi di trasporto siano autonomi.

La sinergia tra tali forme di mobilità urbana aerea e le autovetture convenzionali si definiscono viaggi intermodali, e l'articolo di McKinsey afferma come piattaforme che integrano tutte le diverse opzioni di mobilità disponibili per un determinato percorso stiano già emergendo e possano favorire la diffusione della mobilità aerea urbana.<sup>125</sup>

Questa soluzione di mobilità intermodale può offrire dunque vantaggi sia per mitigare l'impatto ambientale, che per ridurre le problematiche legate alla congestione del traffico, oltre a migliorare l'accessibilità in regioni remote ed ottimizzare il tempo dei consumatori. Così come negli aerei tradizionali e negli altri servizi di trasporto pubblico, anche nei VTOL i viaggi saranno principalmente condivisi con altre persone, in ottica di sharing economy, sistema economico sostenibile in rapida crescita.

---

<sup>124</sup> Sheikh Shahriar Ahmed, G. F. (2021). An exploratory empirical analysis of willingness to hire and pay for flying taxis and shared flying car services. *Journal of Air Transport Management*.

<sup>125</sup> McKinsey (2023). The future of mobility. *McKinsey Quarterly*.

## 4.2 Infrastrutture e politiche a sostegno

L'avvento dei veicoli a decollo e atterraggio verticale sta rivoluzionando il concetto di mobilità urbana, superando le tradizionali barriere del traffico stradale e aprendo le porte a un futuro di spostamenti più veloci ed efficienti all'interno delle città.

Tuttavia, per rendere questo una realtà, è necessario affrontare una serie di sfide complesse. Tra queste, la creazione di infrastrutture adatte e l'implementazione di politiche e normative adeguate sono cruciali.

I velivoli per la mobilità aerea urbana richiedono infrastrutture di terra per decollare, atterrare, effettuare manutenzione e ricaricare le batterie.

Sarà necessario costruire nuove infrastrutture adeguate, i cosiddetti vertiporti, per consentire decolli e atterraggi sicuri nonché l'integrazione efficace di questi mezzi di trasporto nel tessuto urbano.

Per garantire ciò, le piattaforme di decollo e atterraggio dovranno posizionarsi in spazi liberi da qualsiasi ostacolo che potrebbe interferire con le operazioni.

Politiche e normative stanno emergendo per regolare questa nuova forma di mobilità, al fine di garantire la sicurezza dei passeggeri e al contempo il rispetto dell'ambiente.

### 4.2.1 Vertiporti

Le strutture progettate per il decollo e l'atterraggio di velivoli a decollo e atterraggio verticale vengono definite come vertiporti. Possono essere di diverse dimensioni, a seconda del traffico previsto e della loro collocazione.

McKinsey ha delineato tre potenziali archetipi di infrastrutture per i veicoli elettrici a decollo e atterraggio verticale, fornendo le relative stime di costo. Di seguito i dettagli:

1. Vertihubs: si tratta delle più grandi strutture per la mobilità aerea urbana, progettati come edifici autonomi in aree centrali ad alto traffico. Sono tipicamente situati in prossimità di tradizionali aeroporti.

Ogni vertihub ha tipicamente circa 10 aree attive di decollo e atterraggio, con ulteriori 20 spazi per il parcheggio o la manutenzione, che verrà svolta all'interno.

I vertihub possono includere all'interno delle aree di attesa anche servizi complementari come negozi e ristoranti per i passeggeri.



Il costo stimato di costruzione è compreso tra 6 e 7 milioni di dollari, con costi operativi annuali che vanno dai 15 ai 17 milioni di dollari.

2. Vertibases: si tratta di strutture di medie dimensioni, costruite ex novo o adattate da strutture esistenti come parcheggi o tetti di grattacieli. Sono situate in aree con traffico medio, come i centri delle città o in importanti luoghi di lavoro/commercio. Una vertibase dispone di circa tre spazi attivi di decollo e atterraggio, con sei spazi aggiuntivi per il parcheggio o la manutenzione. Considerando l'elevata affluenza di utenti, è prevista anche qui la presenza di apposite aree di attesa con i relativi servizi essenziali.

I costi di costruzione sono stimati tra 500.000 e 800.000 dollari, con costi operativi annuali compresi tra 3 e 5 milioni di dollari.

3. Vertipads: I vertipads sono le strutture più piccole della nuova mobilità aerea, spesso utilizzate come "spoke" (collegamenti secondari) in una rete "hub-and-spoke". Come le vertibases, possono essere di nuova costruzione o adattate da strutture esistenti. Di solito sono collocate in aree suburbane o rurali, meno densamente popolate e fino a 50 miglia dalla rete principale.

Un vertipad è composto da un'area di decollo e atterraggio e due spazi per il parcheggio o la manutenzione, con una piccola area di attesa per i passeggeri.

I costi di costruzione sono stimati tra 200.000 e 400.000 dollari, con costi operativi annuali compresi tra 600.000 e 900.000 dollari.

Potential archetypes for urban-air-mobility infrastructure, illustrative

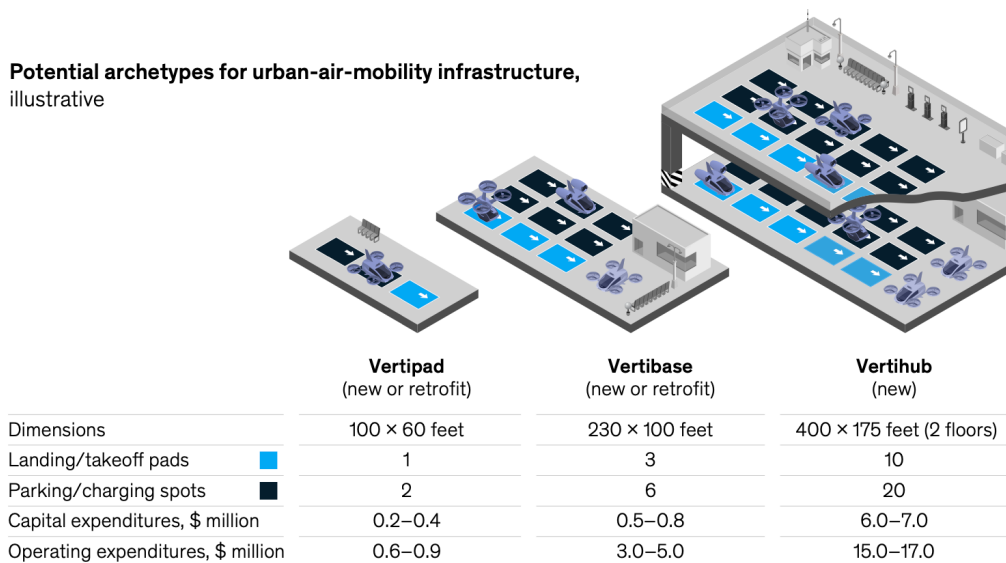


Fig. 16: Confronto tra diverse infrastrutture per velivoli a decollo e atterraggio verticale (VTOL). Fonte: McKinsey.

Si prevede che ogni città sarà destinata ad ospitare una combinazione di questi tre tipi di strutture, con una composizione che potrebbe variare.

Nelle grandi città densamente popolate, la rete di infrastrutture potrebbe includere circa 85-100 punti di decollo e atterraggio. Questo comprende vertihubs presso aeroporti principali e in città, vertibases in aree di pendolarismo e vertipads in varie località di interesse. Costruire questa rete potrebbe costare circa 35-45 milioni di dollari, con costi operativi annuali di 110-130 milioni di dollari.

Nelle città di medie dimensioni o meno densamente popolate, la rete potrebbe consistere in 38-65 punti di decollo e atterraggio. Ciò includerebbe vertihubs presso aeroporti principali e in città, vertibases per pendolari e vertipads vicino a stazioni suburbane. Costruire questa rete potrebbe costare tra 15 e 20 milioni di dollari, con costi operativi annuali compresi tra 35 e 50 milioni di dollari.<sup>126</sup>

L'agenzia europea per la sicurezza aerea EASA nel 2022 ha introdotto le prime specifiche di progettazione al mondo per i vertiporti.

Queste specifiche tecniche introducono un concetto cruciale per garantire che i decolli e gli atterraggi dei veicoli VTOL avvengano in sicurezza: l'esistenza di una zona sopra il vertiporto, dalla forma a imbuto, denominata "volume privo di ostacoli". che assicura che i VTOL possano eseguire le fasi di decollo e atterraggio con un notevole componente verticale, senza ostacoli. Questo design mira a rispettare le restrizioni ambientali e acustiche tipiche degli ambienti urbani, garantendo anche traiettorie omnidirezionali verso i vertiporti.<sup>127</sup>

Al fine di collegare i vertiporti, e migliorare l'efficienza del traffico mitigando potenziali rischi, una proposta della NASA suggerisce di posizionare dei corridoi di volo dedicati ai VTOL su aree a basso rischio, delimitate da coordinate geografiche, al di fuori dei tradizionali servizi di controllo del traffico aereo.<sup>128</sup>

Come descritto dall'agenzia europea per la sicurezza aerea EASA, questi corridoi aerei creati per collegare il luogo di partenza al luogo di arrivo degli aerotaxi hanno lo scopo

---

<sup>126</sup> McKinsey (2020). To take off, flying vehicles first need places to land.

<sup>127</sup> EASA (2022). EASA issues world's first design specifications for vertiports. Tratto da: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-issues-worlds-first-design-specifications-vertiports>

<sup>128</sup> Rothhaar, P. M.; Murphy, P. C.; Bacon, B. J.; Gregory, I. M.; Grauer, J. A.; Busan, R. C.; Croom, M. A. (2014). NASA Langley distributed propulsion VTOL tiltwing aircraft testing, modeling, simulation, control, and flight test development.

di garantire un flusso regolare e sicuro del traffico aereo, facilitando il trasporto di passeggeri.

Sono progettati definendo uno spazio aereo specifico in cui le operazioni di mobilità aerea urbana possano essere condotte in massima sicurezza, ricercando anche il minimo impatto in termini di emissioni ambientali, come il rumore, nelle zone densamente popolate.

Ove possibile, i corridoi di volo possono includere rotte sopra corsi d'acqua come fiumi, laghi o tratti di mare per minimizzare il rischio su persone a terra e proprietà.

Tuttavia, questo richiede l'installazione di attrezzature di sicurezza aggiuntive a bordo degli aerotaxi e la comunicazione di procedure di emergenza per gli occupanti, compresi piloti e passeggeri, in caso di necessità di un ammaraggio forzato.<sup>129</sup>

#### *4.2.2 Quadro normativo*

In questo sottoparagrafo, si discuterà del quadro normativo dei veicoli a decollo e atterraggio verticale.

Le autorità aeronautiche di tutto il mondo stanno infatti lavorando per elaborare regolamenti che affrontino le sfide della nuova mobilità aerea. Questi sforzi sono ancora in fase di sviluppo, ma saranno fondamentali per consentire la diffusione dei VTOL.

L'articolo di Boesl et al. sottolinea come all'evoluzione della tecnologia e dell'infrastruttura dei veicoli autonomi su strada corrisponderà un impulso parallelo allo sviluppo e alla convalida dei VTOL.

Essendo l'utilizzo dei veicoli a decollo e atterraggio verticale potenzialmente caratterizzato da un alto grado di autonomia, si prevede dunque anche una parziale sovrapposizione normativa con i regolamenti (approfonditi nel precedente capitolo della tesi) dedicati ai veicoli autonomi su strada.<sup>130</sup>

---

<sup>129</sup> EASA (2021). Air Taxis as urban transport. Tratto da:  
<https://www.easa.europa.eu/it/light/topics/air-taxis-urban-transport>

<sup>130</sup> Boesl, D. B.; Haidegger, T.; Khamis, A.; Mai, V.; M'orch, C.; Rao, B.; Jacobs, A.; Vanderborght, B. (2021). Automating the Achievement of SDGs: Robotics Enabling & Inhibiting the Accomplishment of the SDGs.

In merito a questa nuova mobilità aerea, le autorità di regolamentazione e le istituzioni governative adotteranno strategie di comunicazione volte a sensibilizzare l'opinione pubblica, al fine di guadagnare la fiducia del pubblico e promuovere l'adozione su larga scala della tecnologia VTOL.

Negli Stati Uniti, questa iniziativa è stata già attuata attraverso l'Advanced Air Mobility Coordination and Leadership Act, legge approvata nel 2022 con lo scopo di promuovere lo sviluppo e l'adozione della mobilità aerea urbana in modo sicuro ed efficiente.

Questa legge istituisce un gruppo di lavoro interagenzia guidato dal Dipartimento dei Trasporti degli Stati Uniti (DOT) per lo sviluppo di una rete di trasporto VTOL avanzata, fornendo anche finanziamenti per la ricerca e la promozione dell'innovazione nel settore della mobilità aerea, oltreché sviluppare linee guida e regolamenti dedicati.<sup>131</sup>

Nell'Unione Europea, il Regolamento 2019/947 in vigore dal 30 Dicembre 2020, ha suddiviso le operazioni dei droni in tre categorie principali, in base al livello di rischio.

Nei casi di operazioni a basso rischio, l'operatore deve conformarsi ai requisiti pertinenti senza richiedere una preventiva autorizzazione per il volo.

Per le operazioni con un rischio intermedio, è necessario ottenere un'autorizzazione preventiva da parte dell'autorità competente, oltre a partecipare a una valutazione del rischio e ad accordi di responsabilità.

Nel caso di operazioni ad alto rischio di sicurezza, è richiesta sia la certificazione dell'aeromobile che dell'operatore, insieme a un rigoroso programma di formazione per il pilota.

L'obiettivo principale di questo regolamento è garantire un adeguato livello di sicurezza nelle operazioni di tali velivoli, obbligando gli Stati membri dell'UE a rispettare queste normative.

Nel 2021, l'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) ha emesso specifiche tecniche dedicate ai veicoli a decollo e atterraggio verticali, che sono state raccolte in un documento chiamato "Condizioni Speciali per VTOL e Strumenti di Conformità".

---

<sup>131</sup> Takacs, A.; Haidegger, T. (2022). Infrastructural Requirements and Regulatory Challenges of a Sustainable Urban Air Mobility Ecosystem.

Questo documento è stato oggetto di una consultazione pubblica ed è finalizzato a stabilire dei chiari obiettivi di sicurezza e design, includendo aspetti come i possibili guasti nel funzionamento o l'installazione di scatole nere.<sup>132</sup>

Per quanto riguarda la creazione di spazi aerei dedicati per questa tipologia di mobilità aerea urbana, sono ancora in fase di sviluppo delle normative riguardo disponibilità e gestione di corridoi specifici per VTOL.

Tuttavia, ci sono alcune linee guida generali che sono state pubblicate da diverse organizzazioni, tra cui l'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO), l'Unione Europea e gli Stati Uniti. La Federal Aviation Administration ha in programma di pubblicare un regolamento definitivo per i corridoi aerei UAM entro il 2024.

### 4.3 Il caso Lilium

Lilium è un'azienda tedesca fondata nel 2015, ed è una dei leader mondiali nel settore degli aeromobili a decollo e atterraggio verticali elettrici, con l'obiettivo di rivoluzionare il settore della mobilità aerea.

Il suo velivolo Lilium Jet è il primo jet al mondo a decollo e atterraggio verticale totalmente elettrico. Si tratta di un eVTOL con tecnologia a spinta vettoriale canalizzata (vectored thrust) capace di ospitare fino a sette persone.



*Fig. 17: Lilium Jet 7-seater eVTOL. Fonte: Lilium.*

---

<sup>132</sup> European Union Aviation Safety Agency (2020). Civil Drones (Unmanned Aircraft).

L'assenza di una coda tradizionale ha infatti consentito di prolungare la fusoliera, massimizzando lo spazio interno dell'aeromobile, garantendo sedute aggiuntive rispetto alle configurazioni più comuni a quattro posti.

È dotato di un totale di 36 motori elettrici situati sulla parte posteriore delle ali e dei canard, capaci di ruotare fino a 90 gradi, consentendo di passare da una disposizione orizzontale ad una verticale, garantendo vantaggi in termini di manovrabilità e controllo.

Il Lilium Jet è adatto al trasporto passeggeri su tratte urbane (UAM), ma anche regionali. L'uscita dai soli confini urbani è infatti possibile grazie alle sue doti prestazionali: si stima una autonomia di 261 chilometri ed una velocità di crociera di 300 chilometri orari, come descritto da Nathen et al.

Questi valori si assumono con la tecnologia disponibile ad oggi in merito alle batterie al litio con materiali catodici standard, la cui densità di energia si attesta su 320 Wh/kg.

Singh afferma come siano attualmente in corso ricerche intensive per lo sviluppo di batterie allo stato solido, prevedendo che saranno disponibili sul mercato entro il 2025 con una densità energetica superiore a 400Wh/kg.

Con questa tecnologia, il Lilium Jet potrebbe raggiungere una autonomia superiore ai 330 chilometri.<sup>133</sup>

I vantaggi dei velivoli a spinta vettoriale canalizzata, analizzati nel sottocapitolo superiore di questa tesi, si riassumono in maggiore efficienza aerodinamica, sicurezza e basso inquinamento acustico. Il Lilium Jet ne è un ottimo esempio: in questo eVTOL, il concetto di Distributed Electric Propulsion visto in precedenza viene tradotto in 36 ventole canalizzate, ognuna alimentata da un proprio motore elettrico.

Le ventole canalizzate sono integrate in modo compatto vicino al bordo d'uscita dell'ala, portando a tre principali vantaggi. Primo, aiutano a mantenere il flusso d'aria sopra l'ala, migliorando le prestazioni di volo. Secondo, consentono di utilizzare le ventole canalizzate per il controllo della spinta, eliminando la necessità di superfici di controllo aerodinamico tradizionali (non è infatti presente una coda o un timone), riducendo peso e complessità. Terzo, il design compatto e la presenza di quattro ali migliora le prestazioni di volo in crociera, riducendo la resistenza e aumentando l'autonomia.

---

<sup>133</sup> Singh, J. (2020). Next-generation solid-state batteries.

Inoltre, le ventole canalizzate hanno una maggiore velocità di rotazione rispetto alle eliche, migliorando la sicurezza strutturale e l'esperienza complessiva.

In termini di inquinamento acustico, grazie all'intubazione dei rotori che consente di convogliare il rumore nella direzione assiale del tubo, il Lilium Jet è estremamente efficiente. Durante la fase di crociera, produce infatti un rumore di circa 20 decibel: molto inferiore rispetto a quanto prodotto da altri aerotaxi, con valori di oltre 100 decibel. L'analisi di Nathen et al. dimostra come il jet Lilium emetta livelli di rumore inferiori a 60 decibel nelle fasi di decollo e atterraggio, ad una distanza di osservazione di 100 metri. Questo valore è comparabile al livello di rumore generato da una conversazione.<sup>134</sup>

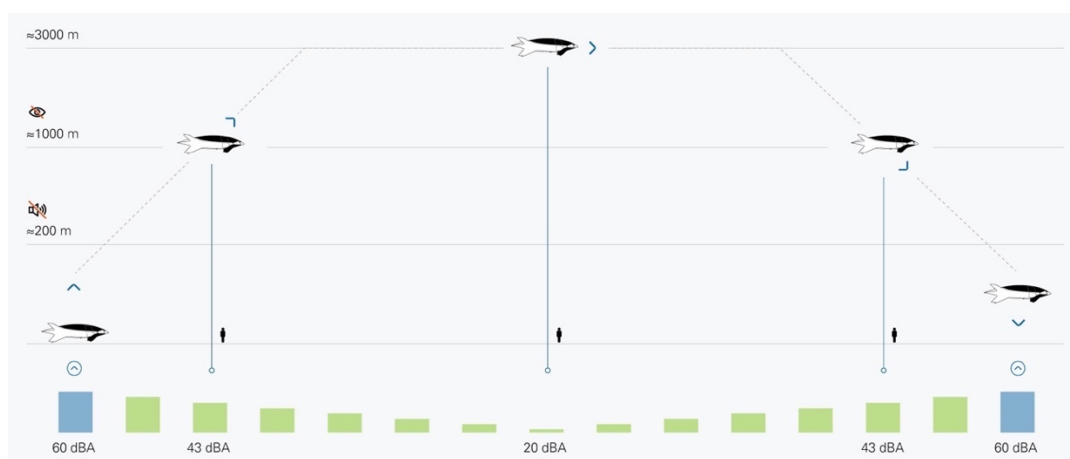


Fig. 18: Livelli di emissioni sonore prodotte dal Lilium Jet. Fonte: Lilium.

Lilium ha ottenuto la base di certificazione da parte dell'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea EASA per il Lilium Jet nel 2020. I requisiti dell'EASA, pubblicati nel 2019 dopo un'ampia consultazione dell'industria, rappresentano gli obiettivi di sicurezza più elevati a livello globale per gli aeromobili eVTOL.

La Federal Aviation Administration (FAA) ha inoltre emesso nel 2023 il suo G-1 per il Lilium Jet, rendendo Lilium l'unico produttore di eVTOL con una base di certificazione sia EASA che FAA per un aeromobile eVTOL. Ciò rappresenta un importante passo avanti verso la sua commercializzazione.

<sup>134</sup> Nathen, P.; Strohmayer, A.; Miller, R.; Grimshaw, S.; Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.

In luglio 2023, Lilium ha inoltre annunciato con successo il completamento della quarta e ultima audit di Approvazione dell'Organizzazione di Progettazione (DOA) da parte dell'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA).

Questo rappresenta un passo significativo verso il raggiungimento dello status di DOA, un requisito cruciale per i produttori di aeromobili. Lilium è ora nella fase finale del processo DOA, che prevede il follow-up e la chiusura delle azioni pendenti e delle procedure amministrative. Il certificato DOA è previsto per la fine dell'anno.<sup>135</sup>

L'azienda si sta concentrando anche sulla creazione di una piattaforma digitale che consentirà la prenotazione dei voli e la gestione delle flotte di eVTOL, incluso il supporto alla manutenzione e alle riparazioni. Questo approccio mira a fornire un servizio senza interruzioni di continuità ai passeggeri.

Lilium è fortemente integrata nella catena del valore dell'industria della nuova mobilità aerea, con oltre 800 dipendenti e una visione chiara per il futuro.<sup>136</sup>

La sua differenziazione principale risiede nel focus esclusivo sul trasporto passeggeri, insieme a un design ad ala fissa e rotori orientabili adatto a voli regionali.

Lilium ha dichiarato l'intenzione di non limitarsi a vendere i propri eVTOL, ma anche di operarli direttamente, gestendo le operazioni di volo.

Per farlo, sta costruendo una solida rete di collaborazioni per essere un attore chiave nel settore della mobilità aerea futura, cercando di esternalizzare la gestione delle infrastrutture fisiche necessarie per il funzionamento dei loro servizi, come vertiporti e hub regionali.

Lilium sta collaborando con diverse aziende e organizzazioni, tra cui Tavistock Development per la creazione di vertiporti in Florida, Ferrovial per una rete di vertiporti americani a livello regionale, e con diversi aeroporti tedeschi.

---

<sup>135</sup> Lilium completes final audit in major step towards achieving EASA Design Organization Approval (2023). Tratto da: <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-completes-final-audit-achieving-easa-design-organization-approval>

<sup>136</sup> Tratto da: <https://lilium.com/company>



In giugno 2023 ha siglato una partnership con UrbanV, società costituita dal Gruppo SAVE, Aeroporti di Roma, Aeroporto di Bologna e Aeroports de la Côte d'Azur, per la progettazione e gestione di vertiporti.

Il fine è quello di abilitare le prime rotte sostenibili eVTOL in Europa: tra Roma, Venezia, Bologna, Nizza, Cannes, Saint Tropez e territori circostanti.<sup>137</sup>

---

<sup>137</sup> Liliium and UrbanV to collaborate on vertiports in Italy, the French Riviera and beyond (2023). Tratto da: <https://www.urbanv.com/en/liliium-and-urbanv-to-collaborate-on-vertiports-in-italy-the-french-riviera-and-beyond/>

## CONCLUSIONI

La crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale e sociale oltreché economica sta rivoluzionando l'industria automobilistica.

Attraverso un'analisi del ciclo di vita dei veicoli, si è dimostrato come le auto elettriche (a emissioni zero nella fase d'uso) risultano nell'intero processo, dalla produzione allo smaltimento, l'opzione significativamente più sostenibile rispetto ai veicoli tradizionali a benzina e diesel.

L'idrogeno può rappresentare un'alternativa, ma con le attuali tecnologie si sono evidenziati costi di produzione più elevati ed un contenuto energetico limitato per unità di volume, rendendolo più adatto per autocarri e mezzi pesanti.

I carburanti sintetici, che potrebbero essere una soluzione per la decarbonizzazione di flotte di vetture circolanti a benzina e diesel, difficilmente raggiungeranno prezzi convenienti per avere un impatto significativo sul comparto automobilistico del nuovo.

Le vendite globali di auto elettriche hanno superato i 10 milioni nel 2022, con una quota di mercato del 14%. Si prevede che nel 2025 ci saranno circa 40 milioni di auto elettriche nel mondo, fino ad arrivare nel 2030 a circa 120 milioni, con una quota di mercato del 70%. Un segnale della crescente diffusione è visibile nel più recente dato di vendita Europeo, dove nel 2023 per la prima volta è un'auto elettrica in testa alle classifiche, come più venduta in termini assoluti. A conferma di questa tendenza, l'analisi delle strategie a lungo termine dei principali car-makers ha mostrato come la maggior parte di essi stia pianificando una produzione totalmente elettrica entro il 2030.

L'attenzione per le vetture elettriche è aumentata anche per le politiche governative, che hanno destinato diverse leggi specifiche, emanando incentivi o limitando l'uso delle vetture inquinanti. Tra le politiche più stringenti si possono citare la lotteria delle targhe per veicoli a combustione interna a Pechino e il divieto europeo di commercializzazione di tali veicoli a partire dal 2035.

Le batterie agli ioni di litio dominano attualmente il mercato, ma stanno emergendo alternative come le batterie agli ioni di sodio e le batterie allo stato solido.

I costi delle batterie agli ioni di litio sono diminuiti significativamente. Per garantire che il costo di una vettura BEV sia pari a una vettura ICE, si stima però sia necessario raggiungere un costo paria a \$100/kWh, previsto per il 2026.

Oggi le batterie possono durare fino a 200.000 km e garantiscono una autonomia media di 337 chilometri. Tra le criticità spicca la potenziale degradazione: un recente studio sulla placcatura al litio ha però dimostrato che la possibilità di limitarla esiste. Questo dovrebbe garantire una maggiore durata, nonché una maggiore velocità di ricarica, per le future batterie. CATL, primo produttore di batterie al mondo, nel 2024 aprirà il mercato delle batterie di nuova generazione grazie a una nuova batteria al litio-ferro-fosfato, con ricarica superveloce 4C e un'autonomia di 700 km.

In questa transizione, la disponibilità di batterie per soddisfare la crescente domanda di auto elettriche è un punto critico. In ottica di economia circolare, repurposing e il riciclaggio delle batterie saranno fondamentali, ma le riserve di litio oggi conosciute sembrano insufficienti per coprire la domanda prevista. Ulteriori sfide sono legate a logistica e stoccaggio delle batterie esauste o danneggiate.

Se il futuro prossimo è destinato ad abbandonare il tradizionale motore a scoppio a vantaggio delle tecnologie elettriche e dunque della sostenibilità ambientale, una seconda ondata di innovazione dominata da un approccio deep tech trasformerà il tradizionale concetto di vettura con un conducente umano alla guida in flotte totalmente autonome, garantendo un livello molto più alto di sicurezza. Questo grazie all'uso di sensori e telecamere, intelligenza artificiale, machine learning e grandi quantità di dati.

Le vetture Waymo, che operano come robotaxi negli Stati Uniti con standard di guida autonoma di livello 4, hanno già percorso 3,8 milioni di miglia nelle strade pubbliche. Durante queste miglia non è stata registrata alcuna richiesta di risarcimento per lesioni corporee, rappresentando un risultato significativo per dimostrare come questa tecnologia stia progredendo in termini di sicurezza ed efficienza stradale.

Tuttavia, esistono ancora sfide etiche e morali da affrontare nella programmazione delle decisioni dei veicoli autonomi. Sono state analizzate diverse tipologie di approcci, e nonostante si sia delineata una possibile soluzione, una proposta universalmente condivisa deve ancora essere raggiunta.

Si è poi analizzata l'applicazione di queste tecnologie nel settore della mobilità aerea urbana e regionale, specificamente per la progettazione di veicoli a decollo e atterraggio verticale alimentati elettricamente (eVTOL). È stato evidenziato come questi innovativi velivoli possano contribuire a ridurre le emissioni di gas serra e migliorare l'efficienza dei viaggi su distanze comprese tra 5 e 300 chilometri, consentendo di risparmiare circa l'80% del tempo rispetto all'utilizzo di tradizionali autovetture.

È stato esaminato il caso dell'azienda Lilium, che si distingue per essere l'unico produttore nel settore degli eVTOL ad avere ottenuto una base di certificazione sia dall'Agenzia europea per la sicurezza aerea (EASA) che dalla Federal Aviation Administration (FAA) per un aeromobile eVTOL. Inoltre, Lilium ha già siglato partnership sia in America che in Europa per sviluppare una rete di infrastrutture dedicate, chiamate vertiporti, per il decollo e l'atterraggio di questi velivoli.

Per supportare appieno questa transizione verso la mobilità aerea urbana e regionale, ulteriori investimenti dedicati e maggiori sforzi normativi saranno necessari. Nonostante queste sfide, l'adozione di eVTOL sembra promettere una serie di vantaggi, tra cui la riduzione del traffico stradale, una maggiore accessibilità in zone remote e benefici per la qualità della vita dei consumatori e dell'ambiente.



## Bibliografia

1. Di Benedetto, F. (2015). Oil & bio trading.
2. Stellantis (2023). Aramco and Stellantis Collaboration Indicates eFuel Compatibility with European Engine Families. Tratto da: <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2023/september/aramco-and-stellantis-collaboration-indicates-efuel-compatibility-with-european-engine-families>
3. Pearson, R. J.; Turner, J. W. G. (2014). 2 - The role of alternative and renewable liquid fuels in environmentally sustainable transport.
4. BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.
5. BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.
6. IEA (2023). Global EV Outlook 2023. Tratto da: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
7. Mercedes Benz USA (2023). Seven Automakers Unite to Create a Leading High-Powered Charging Network Across North America. Tratto da: <https://media.mbusa.com/releases/release-28161694917579d4480a29fa1d00fa86-seven-automakers-unite-to-create-a-leading-high-powered-charging-network-across-north-america>
8. Jaguar supports opening of one of Europe's largest EV charging hubs (2023). Tratto da: <https://media.jaguar.com/news/2023/09/jaguar-supports-opening-one-europes-largest-ev-charging-hubs>
9. Toyota Europe Newsroom (2023). VDL Groep reveals fuel cell truck for Toyota's European logistics. Tratto da: <https://newsroom.toyota.eu/vdl-groep-reveals-fuel-cell-truck-for-toyotas-european-logistics/>
10. Engel, H.; Fleischmann, J.; Katzenstein, R.; Orthofer, A. & Schwickert, H. (2019). Hydrogen cars or battery electric vehicles—why not both? McKinsey Quarterly.
11. Girardi, P.; Brambilla, C. & Mela G. (2019). Life Cycle Air Emissions External Costs Assessment for comparing Electric and traditional passenger cars. Integrated environmental assessment and management.
12. Bekker, H. (2019). Europe: Best-selling car models. Frederiksberg (DK): Care Sales Statistics.
13. Morel, S.; Traverso, M.; Preiss, P. (2018). Discussion Panel—Assessment of externalities: Monetisation and social LCA.

14. Barkenbus, J. N. (2020). Prospects for Electric Vehicles. Sustainability 12, Number 14.
15. Palmer, K.; Tate, J. E.; Wadud, Z.; Nellthorp, J. (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan.
16. Grosso, M.; Raileanu, J. C.; Krause, J.; Raposo, M. A.; Duboz, A.; Garus, A.; Mourtzouchou, A.; Ciuffo, B. (2021). How will vehicle automation and electrification affect the automotive maintenance, repair sector?
17. IEA (2023). Global EV Outlook 2023. Tratto da: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
18. BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.
19. EY (2023). EY Mobility Consumer Index 2023.
20. Motus-E (2023). Le infrastrutture di ricarica a uso pubblico in Italia (Quarta edizione).
21. Jato Dynamics (2023). Global EV Sales 2023, Q2: Tesla Model 3, Model Y Remain Top Sellers, Europe Continues to Grow.
22. BearingPoint (2023). New Car Online Sales 2023.
23. Bain & Company (2022). Tratto da: <https://www.bain.com/about/media-center/press-releases/2022/new-research-from-bain--company-shows-electric-vehicles-are-set-to-reshape-the-auto-industry-faster-than-anticipated/>
24. Boston Consulting Group (2023). Rewiring the Auto Industry for the Electric, Connected Future. Tratto da: <https://www.bcg.com/publications/2023/rewiring-auto-industry-electric-connected-future>
25. Boston Consulting Group (2022). Electric Cars Are Finding Their Next Gear. Tratto da: <https://www.bcg.com/publications/2022/electric-cars-finding-next-gear>
26. Stellantis (2022). A Bold Strategic Plan. Tratto da: <https://www.stellantis.com/en/company/dare-forward-2030>
27. Mercedes-Benz (2021). Strategy Update: electric drive. Tratto da: <https://group.mercedes-benz.com/dokumente/konzern/sonstiges/daimler-mercedes-benz-strategy-update-electric-drive.pdf>
28. Volkswagen (2021). Strategy. Tratto da: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/strategy-3912#:~:text=Until%202030%2C%20we%20want%20to,to%2050%20percent%20by%202030.>

29. Nissan (2021). Nissan svela la visione “Ambition 2030” che mira a migliorare la mobilità del futuro. Tratto da: <https://italy.nissannews.com/it-IT/releases/release-0f1f4ed24f506b7f803912791206fecf-nissan-svela-ambition-2030-la-nuova-visione-per-migliorare-la-mobilita-del-futuro>
30. Ferrari (2022). Ferrari Capital Markets Day Piano Strategico 2022-2026. Tratto da: <https://www.ferrari.com/it-IT/corporate/articles/ferrari-capital-markets-day-2022>
31. Boston Consulting Group (2022). Electric Cars Are Finding Their Next Gear. Tratto da: <https://www.bcg.com/publications/2022/electric-cars-finding-next-gear>
32. Teevan, C.; Medinilla, A.; Sergejeff, K. (2021). The Green Deal in EU foreign and development policy.
33. Fontanelli, G. (2018). Autosshock: viaggio nella rivoluzione dell’auto elettrica che rischia di distruggere l’industria più importante del mondo. Mind.
34. Statista (2023). Global carbon dioxide emissions from 1970 to 2021, by sector.
35. Statista (2023). Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2020, by subsector.
36. OICA (2022). 2022 Statistics. Tratto da: <https://www.oica.net/category/production-statistics/2022-statistics/>
37. Varesi, S. (2010). Gli incentivi a favore dell’auto elettrica. Mimeo.
38. Baccelli, O.; Galdi, R.; Grea, G. (2017). L'e-mobility: Mercati e policies per un'evoluzione silenziosa. Milano.
39. Wang, X.; Wei, Z. & Ruet, J. (2022). Specialised vertical integration: the value-chain strategy of EV lithium-ion battery firms in China. International Journal of Automotive Technology and Management, Volume 22, Number 2.
40. Li, S.; Zhu, X.; Ma, Y.; Zhang, F.; Zhou, H. (2020). The Role of Government in the Market for Electric Vehicles: Evidence from China.
41. Zhuge, C.; Wei, B.; Shao, C.; Shan, Y.; Dong, C. (2020). The role of the license plate lottery policy in the adoption of Electric Vehicles: A case study of Beijing.
42. Li, J. (2023). Compatibility and Investment in the U.S. Electric Vehicle Market.
43. Mancini, E. (2021). Auto elettriche: l’impatto delle batterie al litio sull’ambiente e la geopolitica.
44. Bai, X.; Wu, N.; Yu, G.; Li, T. (2023). Recent Advances in Anode Materials for Sodium-Ion Batteries.
45. Huang, Y.; Shao, B.; Han, F. (2022). Solid-State Batteries: An Introduction.



46. BloombergNEF (2022). Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. Tratto da: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>
47. BloombergNEF (2021). Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. Tratto da: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>
48. BloombergNEF (2022). Increase in Battery Prices Could Affect EV Progress. Tratto da: <https://about.bnef.com/blog/increase-in-battery-prices-could-affect-ev-progress/>
49. Keil, P.; Schuster, S. F.; Wilhelm, J.; Travi, J.; Hauser, A.; Karl, R. C.; Jossen, A. (2016). Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries.
50. Lu, X.; Lagnoni, M.; Bertei, A.; Das, S.; Owen, R. E.; Li, Q.; O'Regan, K.; Wade, A.; Finegan, D. P.; Kendrick, E.; Bazant, M. Z.; Brett, D. J. L.; Shearing, P. R. (2023). Multiscale dynamics of charging and plating in graphite electrodes coupling operando microscopy and phase-field modelling.
51. CATL (2023). CATL Launches Superfast Charging Battery Shenxing, Opens Up Era of EV Superfast Charging. Tratto da: <https://www.catl.com/en/news/6091.html>
52. BMW Group (2023). BMW e AirConsole hanno celebrato il lancio del gioco in auto con una presenza congiunta alla Gamescom, annunciando un nuovo gioco per il 2024. Tratto da: <https://www.press.bmwgroup.com/italy/article/detail/T0436961IT/bmw-e-airconsole-hanno-celebrato-il-lancio-del-gioco-in-auto-con-una-presenza-congiunta-alla-gamescom-annunciando-un-nuovo-gioco-per-il-2024?language=it>
53. Weil, M.; Ziemann, S.; Peters, J. (2018). The Issue of Metal Resources in Li-Ion Batteries for Electric Vehicles.
54. Michaux, S. (2021). Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels.
55. Roschier, S.; Pitkämäki, A.; Jonsson, H. (2020). Business Finland: Assessment of Li-ion battery reuse solutions – final report.
56. Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain.
57. Haram, M.H.S.M.; Lee, J.W.; Ramasamy, G.; Ngu, E.E.; Thiagarajah, S.P.; Lee, Y.H. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges.
58. Hua, Y.; Zhou, S.; Huang, Y.; Liu, X.; Ling, H.; Zhou, X.; Zhang, C.; Yang, S (2020). Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles.

59. Tao, Y.; Rahn, C. D.; Archer, L. A.; You, F. (2021). Second life and recycling: Energy and environmental sustainability perspectives for high-performance lithium-ion batteries.
60. Börner, M. F.; Frieges, M. H.; Späth, B.; Spütz, K.; Heimes, H. H.; Sauer, D. U.; Li, W. (2022). Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries.
61. Zhu, J.; Mathews, I.; Ren, D.; Li, W.; Cogswell, D.; Xing, B.; Sedlatschek, T.; Kantareddy, S. N. R.; Yi, M.; Gao, T.; Xia, Y.; Zhou, Q.; Wierzbicki, T.; Bazant, M. Z. (2021). End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries.
62. Jaguar (2022). Second life: Jaguar I-Pace batteries power zero-emission energy storage unit. Tratto da: <https://media.jaguar.com/news/2022/03/second-life-jaguar-i-pace-batteries-power-zero-emission-energy-storage-unit>
63. Qiao, D.; Wang, G.; Gao, T.; Wen, B.; Dai, T. (2021). Potential impact of the end-of-life batteries recycling of electric vehicles on lithium demand in China: 2010–2050.
64. Jena, K. K.; Alfantazi, A.; Mayyas, A. T. (2021). Comprehensive review on concept and recycling evolution of lithium-ion batteries (LIBs).
65. Christensen, P. A.; Anderson, P. A.; Harper, G. D. J.; Lambert, S. M.; Mrozik, W.; Rajaeifar, M. A.; Wise, M. S.; Heidrich, O. (2021). Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles.
66. Epifanio, C.; Italiano, A. (2022). L’impatto delle batterie sull’ambiente: cosa prevede il nuovo regolamento UE.
67. Mrozik, W.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O.; Christensen, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries.
68. Bagnoli, C.; Portincaso, M. (2021). La nuova onda di innovazione che le imprese devono cavalcare.
69. McKinsey (2019). The trends transforming mobility’s future.
70. McKinsey (2023). Autonomous driving’s future: Convenient and connected.
71. McKinsey (2023). Where does shared autonomous mobility go next?
72. BloombergNEF (2023). Electric Vehicle Outlook 2023.
73. McKinsey (2023). Shared mobility: Sustainable cities, shared destinies.
74. McKinsey (2023). Technology Trends Outlook.
75. Zhao, J.; Liang, B.; Chen, Q. (2018). The key technology toward the self-driving car.

76. Osservatorio Autopromotec (2023). Auto connesse, nel 2027 saranno oltre 640 milioni nel mondo.
77. Waymo (2021). Waymo Safety Report.
78. BMW Group (2023). Il BMW Group lancia una struttura per i test di guida e di parcheggio automatizzati a Sokolov. Tratto da: <https://www.press.bmwgroup.com/italy/article/detail/T0426360IT/il-bmw-group-lancia-una-struttura-per-i-test-di-guida-e-di-parcheggio-automatizzati-a-sokolov>
79. SAE (2021). SAE Levels of Driving Automation Refined for Clarity and International Audience. Tratto da: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>
80. Yu, H.; Jiang, R.; He, Z.; Zheng, Z.; Li, L.; Liu, R.; Chen, X. (2021). Automated vehicle-involved traffic flow studies: A survey of assumptions, models, speculations, and perspectives.
81. CNBC (2023). How Elon Musk set Tesla on a new course for self-driving. Tratto da: <https://www.cnbc.com/2023/09/09/ai-for-cars-walter-isacson-biography-of-elon-musk-excerpt.html>
82. Hevelke, A.; Nida-Rümelin, J. (2015). Responsibility for crashes of autonomous vehicles: An ethical analysis.
83. Anderson, J. M.; Kalra, N.; Stanley, K. D.; Sorensen, P.; Samaras, C.; Oluwatola, O. A. (2016). Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers.
84. European Commission (2018). Sustainable mobility for Europe: Safe, connected, and clean.
85. Patti, F. (2019). The European road to autonomous vehicles.
86. Punev, A. (2020). Autonomous Vehicles: The Need for a Separate European Legal Framework.
87. Kouroutakis, A. E. (2020). Autonomous Vehicles; Regulatory Challenges and the Response From UK and Germany.
88. Losano, M.G. (2019). Verso l'auto a guida autonoma in Italia.
89. Foot, P. (1967). The problem of abortion and the doctrine of double effect.
90. Bonnefon, J.; Shariff, A.; Rahwan, I. (2016). The social dilemma of autonomous vehicles.
91. Balistreri, M. (2019). Macchine senza guidatore: considerazioni morali.
92. Leben, D. (2017). A Rawlsian algorithm for autonomous vehicles.

93. Kumfer, W.; Burgess, R. (2015). Investigation into the role of rational ethics in crashes of automated vehicles.
94. Wiseman, Y.; Grinberg I. (2016). When an inescapable accident of autonomous vehicles is looming.
95. Ethik-Kommission (2017). Automatisiertes und Vernetztes Fahren, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
96. European Commission (2019). Ethics guidelines for trustworthy AI.
97. Awad, E.; Dsouza, S.; Kim, R.; Schulz, J.; Henrich, J.; Shariff, A.; Bonnefon, J.; Rahwan, I. (2018). The moral machine experiment.
98. Greene, J. D. (2016). Our Driverless Dilemma.
99. Cudd, A.; Eftekhari, S. (2021). Contractarianism.
100. D'amato, A.; Dancel, S.; Pilutti, J.; Tellis, L.; Frascaroli, E.; Gerdes, J. C. (2022). Exceptional Driving Principles for Autonomous Vehicles.
101. Waymo (2021). Waymo Safety Report.
102. Hayward, J. C. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger.
103. Cooper, D. F.; Ferguson, N. (1976). Traffic studies at t-junctions. 2. A conflict simulation record.
104. Hu, X.; Zheng, Z.; Chen, D. & Sun J. (2023). Autonomous vehicle's impact on traffic: empirical evidence from Waymo Open Dataset and implications from modelling.
105. Victor, T.; Kusano, K.; Gode, T.; Chen, R.; Schwall, M. (2023). Safety Performance of the Waymo Rider-Only Automated Driving System at One Million Miles.
106. Heinrich, J. (2022). Major urban mobility trends of the future.
107. Di Lillo, L.; Gode, T.; Zhou, X.; Atzei, M.; Chen, R.; Victor, T. (2023). Comparative Safety Performance of Autonomous- and Human Drivers: A Real-World Case Study of the Waymo One Service.
108. Liu, J. (2019). Commuters in this city spend 119 hours a year stuck in traffic.
109. McKinsey (2023). The future of mobility. McKinsey Quarterly.
110. Wheeler, P.; Sirimanna, T. S.; Bozhko, S.; Haran, K. S. (2021). Electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems.
111. Adam P. Cohen, S. A. (2021). Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges. Transactions on intelligent transportation systems.

112. Melo, S. P.; Cerdas, F.; Barke, A.; Thies, C.; Spengler, T. S.; Herrmann, C. (2021). Life cycle engineering of future aircraft systems: The case of eVTOL vehicles.
113. Swaminathan, N.; Reddy, S. R.; Rajashekara, K. & Haran, K. S. (2022). Flying Cars and eVTOLs - Technology Advancements, Powertrain Architectures and Design. Transactions on Transportation Electrification.
114. Clarke, M.; Smart, J.; Botero, E. M.; Maier, W.; Alonso, J. J. (2019). Strategies for Posing a Well-Defined Problem for Urban Air Mobility Vehicles.
115. Pradeep, P.; Wei, P. (2019). Energy-efficient arrival with rta constraint for multicopter evtol in urban air mobility.
116. Chauhan, S. S.; Martins, J. R. R. A. (2020). Tilt-Wing eVTOL Takeoff Trajectory Optimization.
117. Nathen, P.; Strohmayer, A.; Miller, R.; Grimshaw, S.; Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take- off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.
118. Ullman, D.; Homer, V.; Horgan, P. (2017). Comparing electric sky taxi visions.
119. Nathen, P.; Strohmayer, A.; Miller, R.; Grimshaw, S.; Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take- off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.
120. Bacchini, A.; Cestino, E. (2019). Electric VTOL Configurations Comparison.
121. Takacs, A.; Haidegger, T. (2022). Infrastructural Requirements and Regulatory Challenges of a Sustainable Urban Air Mobility Ecosystem.
122. Thipphavong, D. P.; Apaza, R.; Barmore, B.; Battiste, V.; Burian, B.; Dao, Q.; Feary, M.; Go, S.; Goodrich, K. H.; Homola, J.; Idris, H. R.; Kopardekar, P. H.; Lachter, J. B.; Neogi, N. A.; Ng, H. K.; Oseguera-Lohr, R. M.; Patterson, M. D.; Verma, S. A. (2018). Urban air mobility airspace integration concepts and considerations.
123. Kasliwal, A. F. (2019). Role of flying cars in sustainable mobility.
124. Sheikh Shahriar Ahmed, G. F. (2021). An exploratory empirical analysis of willingness to hire and pay for flying taxis and shared flying car services. Journal of Air Transport Management.
125. McKinsey (2023). The future of mobility. McKinsey Quarterly.
126. McKinsey (2020). To take off, flying vehicles first need places to land.
127. EASA (2022). EASA issues world's first design specifications for vertiports. Tratto da: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-issues-worlds-first-design-specifications-vertiports>

128. Rothhaar, P. M.; Murphy, P. C.; Bacon, B. J.; Gregory, I. M.; Grauer, J. A.; Busan, R. C.; Croom, M. A. (2014). NASA Langley distributed propulsion VTOL tiltwing aircraft testing, modeling, simulation, control, and flight test development.
129. EASA (2021). Air Taxis as urban transport. Tratto da: <https://www.easa.europa.eu/it/light/topics/air-taxis-urban-transport>
130. Boesl, D. B.; Haidegger, T.; Khamis, A.; Mai, V.; M'orch, C.; Rao, B.; Jacobs, A.; Vanderborght, B. (2021). Automating the Achievement of SDGs: Robotics Enabling & Inhibiting the Accomplishment of the SDGs.
131. Takacs, A.; Haidegger, T. (2022). Infrastructural Requirements and Regulatory Challenges of a Sustainable Urban Air Mobility Ecosystem.
132. European Union Aviation Safety Agency (2020). Civil Drones (Unmanned Aircraft).
133. Singh, J. (2020). Next-generation solid-state batteries.
134. Nathen, P.; Strohmayer, A.; Miller, R.; Grimshaw, S.; Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take- off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.
135. Lilium completes final audit in major step towards achieving EASA Design Organization Approval (2023). Tratto da: <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-completes-final-audit-achieving-easa-design-organization-approval>
136. Tratto da: <https://lilium.com/company>
137. Lilium and UrbanV to collaborate on vertiports in Italy, the French Riviera and beyond (2023). Tratto da: <https://www.urbanv.com/en/lilium-and-urbanv-to-collaborate-on-vertiports-in-italy-the-french-riviera-and-beyond/>