



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE ED AZIENDALI
“M. FANNO”**

CORSO DI LAUREA IN ECONOMIA

PROVA FINALE

**“LE AUTO ELETTRICHE INQUINANO MENO?
VALUTAZIONI BASATE SULL’ANALISI DEL CICLO DI
VITA (LCA)”**

RELATORE:

CH.MO PROF. CESARE DOSI

LAUREANDO: MATTEO SOTTILE

MATRICOLA N. 2001081

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Dichiaro di aver preso visione del “Regolamento antiplagio” approvato dal Consiglio del Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali e, consapevole delle conseguenze derivanti da dichiarazioni mendaci, dichiaro che il presente lavoro non è già stato sottoposto, in tutto o in parte, per il conseguimento di un titolo accademico in altre Università italiane o straniere. Dichiaro inoltre che tutte le fonti utilizzate per la realizzazione del presente lavoro, inclusi i materiali digitali, sono state correttamente citate nel corpo del testo e nella sezione ‘Riferimenti bibliografici’.

I hereby declare that I have read and understood the “Anti-plagiarism rules and regulations” approved by the Council of the Department of Economics and Management and I am aware of the consequences of making false statements. I declare that this piece of work has not been previously submitted – either fully or partially – for fulfilling the requirements of an academic degree, whether in Italy or abroad. Furthermore, I declare that the references used for this work – including the digital materials – have been appropriately cited and acknowledged in the text and in the section ‘References’.

Firma (signature)
Matteo Sotile

Indice	
Introduzione	5
I veicoli elettrici	7
1.1 Storia del veicolo elettrico	7
1.2 Modelli presenti nel mercato	8
1.2.1 Differenze con i veicoli a combustione interna	10
1.3 Il futuro dei veicoli elettrici	12
Analisi del Life Cycle Assessment	15
2.1 Le fasi del processo del LCA	15
2.2 LCA dei veicoli elettrici	17
2.2.1 Fase di produzione.....	18
2.2.2 Fase di utilizzo.....	19
2.2.3 Fase di smaltimento	21
2.3 Risultati.....	23
Le batterie.....	25
3.1 I materiali utilizzati.....	25
3.2 L'estrazione delle risorse.....	26
3.2.1 L'inquinamento prodotto.....	28
3.3 Nuove tecnologie e nuovi materiali.....	30
Considerazioni finali	33
Riferimenti bibliografici	35

Introduzione

Attualmente, l'auto elettrica è un argomento molto discusso, ma il futuro dell'industria automobilistica rimane incerto. La reticenza dei clienti a passare dai veicoli a combustione interna a quelli elettrici può essere attribuita al fatto che l'informazione disponibile su questo argomento è spesso confusa e incompleta. Per quanto riguarda il mercato, le più grandi case automobilistiche come Tesla, Mercedes e il gruppo Stellantis sono state spinte dalla crescente preoccupazione per l'inquinamento che negli ultimi anni sta attanagliando diverse industrie, ad investire nell'auto elettrica e hanno prodotto una serie di veicoli con l'obiettivo di fornire una forma di mobilità "a zero emissioni". I veicoli elettrici hanno mostrato miglioramenti significativi nella fase di utilizzo grazie all'eliminazione dei tubi di scarico e all'utilizzo di energia elettrica ma presentano ancora problemi per quanto riguarda il processo produttivo delle batterie, infatti, concentrarsi esclusivamente sulla fase di utilizzo di questi veicoli potrebbe portare a sottovalutare le importanti variabili che influenzano l'impatto ambientale complessivo. Per avere un'idea più completa dell'auto elettrica, è importante prendere in considerazione anche altri fattori, come la produzione delle batterie, la fonte di energia utilizzata per ricaricare i veicoli, lo smaltimento appropriato delle batterie esauste e lo sviluppo di infrastrutture di ricarica sostenibili.

Per svolgere un'analisi più approfondita, utilizzeremo la metodologia di studio LCA, o valutazione del ciclo di vita del veicolo. Questa metodologia ci consente di valutare gli impatti ambientali correlati a ciascuna fase del ciclo di vita del veicolo. Grazie a questo metodo si possono calcolare i relativi impatti ambientali.

La tesi si svilupperà in tre capitoli. Il primo capitolo si concentrerà sul veicolo elettrico, partendo dalla sua ideazione alla sua quota di mercato attuale, suddividendolo per le varie tipologie di auto elettriche presenti sul mercato, e terminando sulla direzione che le case automobilistiche stanno percorrendo per i loro prodotti futuri.

Nel secondo capitolo, esamineremo i vantaggi e gli svantaggi dei veicoli elettrici in modo qualitativo e quantitativo. Per raggiungere questo obiettivo, utilizzeremo studi di LCA che ci forniranno dati specifici sull'impatto ambientale legato a ciascuna fase del ciclo di vita del veicolo. Ciò ci consentirà di confrontare la trazione elettrica con i motori termici.

Nel terzo capitolo si approfondirà il ruolo fondamentale delle batterie nella supply chain del veicolo elettrico e l'impatto ambientale che ne deriva dalla loro produzione e dal loro smaltimento. Si tratterà infine, lo sviluppo di nuove tecnologie e l'utilizzo di nuovi materiali per ridurre l'inquinamento prodotto.

Capitolo 1

I veicoli elettrici

L'introduzione dei veicoli elettrici ha segnato una svolta epocale nell'industria automobilistica e nella ricerca di soluzioni sostenibili per le sfide energetiche e ambientali contemporanee. Le zero emissioni di gas di scarico dirette di questi veicoli contribuiscono a ridurre l'inquinamento atmosferico e le emissioni di gas serra.

I veicoli elettrici stanno diventando sempre più popolari grazie ai progressi tecnologici e sono diventati un mezzo importante per promuovere una mobilità più sostenibile e affrontare le sfide ambientali.

1.1 Storia del veicolo elettrico

La storia dei veicoli elettrici è affascinante, con oltre un secolo e mezzo di innovazioni tecnologiche e una straordinaria ripresa negli ultimi decenni. Il loro percorso inizia nel lontano XIX secolo quando l'inventore scozzese Robert Anderson creò la prima carrozza elettrica conosciuta nel 1832 e nel 1867 il primo veicolo a trazione elettrica creato dall'inventore tedesco Franz Kavogl venne presentato all'EXPO di Parigi.

Un primo punto di svolta si ebbe nel 1884, quando l'inventore britannico Thomas Parker costruì un veicolo elettrico pratico e utilizzabile. “Questo segnò l'inizio della commercializzazione delle auto elettriche, che divennero popolari tra i cittadini come mezzi di trasporto ecologici e silenziosi” (Wakefield, 1998).

In seguito, nel 1885 il carrozziere Jeantaud fondò una sua azienda omonima la cui attività fu quella di costruire e vendere i primi veicoli elettrici da lui creati, dotati di un'autonomia di trenta chilometri e di una velocità massima di venti chilometri orari.

Nel 1897 vengono introdotti i primi taxi elettrici a New York e Londra, gettonatissimi tra le donne dell'alta borghesia americana e per i piccoli spostamenti vista la loro facilità di guida e per il fatto di emettere odori sgradevoli.

Tuttavia, l'introduzione del motore a combustione interna durante gli anni Venti ha interrotto il loro progresso. Questo nuovo tipo di propulsione ha offerto tempi di

rifornimento più rapidi e maggiore autonomia rispetto alle batterie dell'epoca. Di conseguenza, il mercato automobilistico perse interesse nella produzione delle auto elettriche.

Negli anni Settanta aumentò nuovamente l'interesse per i veicoli elettrici a causa della crescente preoccupazione per l'inquinamento atmosferico e la dipendenza dai combustibili fossili. Tuttavia, l'industria automobilistica non iniziò ad investire significativamente nella tecnologia dei veicoli elettrici fino ai primi anni Duemila.

Una tappa importante si ebbe nel 1997 in occasione della commercializzazione, da parte di Toyota della Prius, “prima auto ibrida di massa”. Nel 2000 venne commercializzata in tutto il mondo ed ottenne un immediato successo.

Nel 2006, l'annuncio della Tesla Roadster, la prima auto elettrica ad alte prestazioni con una notevole autonomia, segnò un punto di svolta. Quest'auto ha cambiato il modo in cui le persone vedono i veicoli elettrici: da veicoli considerati rispettosi dell'ambiente a veicoli ritenuti anche soddisfacenti da guidare. Nel frattempo, seguendo il successo di Tesla, il settore dei veicoli elettrici è progredito rapidamente. Le capacità e il costo delle batterie sono aumentati per via della maggiore richiesta, e i governi di tutto il mondo hanno iniziato a mettere in atto politiche e incentivi per incentivare l'uso dei veicoli elettrici che possano ridurre l'inquinamento prodotto dal settore automobilistico.

1.2 Modelli presenti nel mercato

Il mercato delle auto elettriche sta crescendo rapidamente ed esistono molti modelli disponibili per soddisfare le diverse esigenze dei clienti. La diversità dei veicoli elettrici attualmente disponibili riflette le esigenze e le preferenze di una gamma di consumatori e offre soluzioni adatte a diverse situazioni di guida e stili di vita.

Verranno esaminate le principali differenze e caratteristiche dei vari modelli di auto elettriche in questo paragrafo.

Per muoversi, un veicolo elettrificato (EV) utilizza uno o più motori ed azionamenti elettrici e immagazzina l'energia necessaria in batterie.

I modelli attualmente sul mercato comprendono: i modelli ibridi (HEV) senza ricarica, gli ibridi plug-in (PHEV) con ricarica esterna e quelli esclusivamente elettrici (BEV).

Il veicolo elettrico più comune è il "veicolo elettrico a batteria" o anche detto BEV, che è alimentato esclusivamente da batterie elettriche, questo rappresenta il tipo di auto elettrica più comune. È alimentato da una batteria agli ioni di litio, che alimenta il motore elettrico (Unione Petrolifera, 2023). Questo modello è caratterizzato dalla capacità di immagazzinare energia all'interno di batterie all'interno del veicolo e di muoversi esclusivamente con motori elettrici; quindi, senza un motore che produce combustione interna. Per il funzionamento necessita di una fonte di ricarica che può essere di vari tipi, a seconda della potenza e della velocità di ricarica desiderate. Attualmente esistono quattro modi di ricarica, in ordine crescente di complessità e potenza sono:

La modalità più semplice è quella che utilizza una presa domestica comune per la ricarica in corrente alternata (AC). La capacità di carica è limitata a 3,7Kw. È adatta a veicoli leggeri, come moto elettriche.

La seconda modalità è simile alla prima, ma ha un dispositivo di protezione integrato (ICCB) sul cavo di ricarica. L'ICCB monitora i parametri di sicurezza e regola la potenza.

La terza modalità impiega una stazione di ricarica fissa che si collega direttamente al veicolo. La stazione di ricarica controlla la potenza di ricarica e le funzioni di protezione. Questa modalità consente alla macchina di ricaricare in corrente alternata (AC) fino a 44 kW.

Con la quarta modalità, la stazione di ricarica fissa fornisce corrente continua (CC). La stazione di ricarica fornisce maggiore potenza e svolge funzioni di controllo e protezione. Questa viene utilizzata principalmente in contesti pubblici o semipubblici e consente ricariche ad alta velocità fino a 170 kW di potenza.

Si entra poi nel mondo dei veicoli ibridi ovvero auto dotati di due motori: uno tradizionale (benzina o diesel) e uno elettrico. Il motore elettrico, che ha una spinta superiore a quella di un veicolo convenzionale, immagazzina l'energia mentre frena o accelera e aiuta il motore a combustione a consumare meno carburante.

La tecnologia *Mild Hybrid Electric Vehicle* (MHEV), nota anche come ibrido leggero, utilizza la frenata rigenerativa e l'energia cinetica per supportare un motore tradizionale. L'energia accumulata viene utilizzata in molte circostanze, principalmente per sostenere la trazione durante le accelerazioni standard. Sebbene con questa varietà non si possa guidare completamente in maniera elettrica, abbassa comunque i consumi e le emissioni di CO₂.

Un'altra tipologia di ibrido sono le vetture che utilizzano la tecnologia *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), nota anche come *Full Hybrid*. Questa è molto simile ai MHEV. Anche in questo caso, la frenata rigenerativa e il motore a combustione interna alimentano il motore elettrico. Tuttavia, le auto *Full Hybrid* si possono guidare in modalità completamente elettrica in alcune circostanze, come brevi tragitti e a basse velocità.

L'altra grande categoria è la tecnologia *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) che utilizza un motore a combustione e un motore elettrico contemporaneamente. Nonostante ciò, la batteria può essere caricata sia internamente utilizzando l'energia cinetica generata durante le fasi di frenata, veleggio e decelerazione; oppure può essere caricata tramite una presa esterna, ovvero collegando l'auto a un sistema di ricarica domestico o ad una stazione di ricarica pubblica. Un veicolo ibrido plug-in ha la capacità di raggiungere velocità superiori e percorrere distanze più lunghe utilizzando esclusivamente l'elettricità rispetto ad un veicolo ibrido completo.

1.2.1 Differenze con i veicoli a combustione interna

I veicoli a combustione interna (ICE) e i veicoli elettrici (EV) sono due tecnologie di propulsione diverse tra loro, le loro più grandi differenze riguardano la tecnologia, le prestazioni alla guida, l'impatto sull'ambiente e le spese dalla nascita del veicolo alla sua fine vita.

In termini di tecnologia, la grande differenza è ovviamente la forma di alimentazione.

I veicoli ICE sono alimentati da un motore a combustione interna che brucia combustibili fossili come benzina e diesel. Al contrario, come già scritto in precedenza, i veicoli elettrici (EV) sono alimentati da un motore elettrico che utilizza l'energia accumulata in una batteria.

La resa energetica è un'altra differenza significativa, poiché i veicoli elettrici convertono una percentuale significativamente maggiore dell'energia delle batterie nel movimento delle ruote, e perciò essi utilizzano l'energia in modo più efficiente rispetto ai veicoli a combustione interna (Environmental Science & Technology). In termini di prestazioni però, le autovetture ICE accelerano più velocemente dei veicoli elettrici. Mentre i motori elettrici devono passare da una marcia all'altra per accelerare, i motori a combustione interna non lo fanno, inoltre la velocità massima raggiungibile da una macchina a

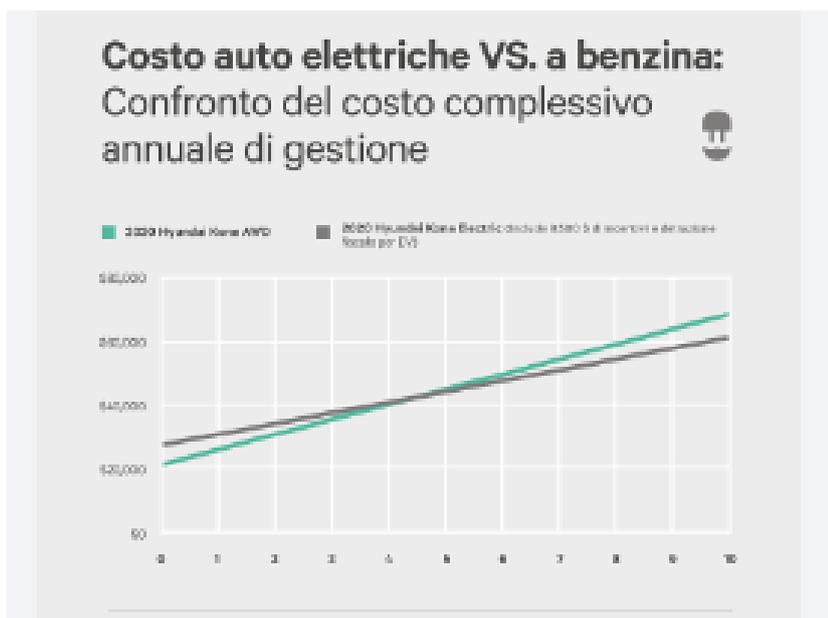
combustione interna è maggiore. Ciò è dovuto al fatto che i motori a combustione interna hanno una coppia più elevata rispetto ai motori elettrici. La coppia è una grandezza fisica che indica la capacità di ripresa di un motore. L'unità fisica che si utilizza per misurarla è il newton metro (Nm).

“Nelle auto con motore endotermico, l'obiettivo è raggiungere una coppia elevata il più velocemente possibile a regimi bassi” (Nils Arnold, 2023).

Per quanto riguarda l'impatto ambientale durante l'uso, i veicoli ICE sono peggiori poiché emettono polveri sottili, ossidi di carbonio, ossidi di azoto e altri inquinanti. Invece, i veicoli elettrici sono ad emissioni zero, il che significa che contribuiscono a ridurre l'inquinamento atmosferico e i cambiamenti climatici (ACI, 2021).

Per i costi, i veicoli a combustione interna sono meno costosi dei veicoli EV, ma i costi di esercizio per l'utilizzatore sono più alti a causa del prezzo dei combustibili fossili necessari per il rifornimento rispetto all'elettricità. In aggiunta i veicoli elettrici richiedono meno manutenzione rispetto ai veicoli ICE.

Figura 1 – Confronto del costo complessivo di un'auto elettrica e una a benzina



Fonte: Wallbox, 2021.

Nella figura 1 viene mostrata un'analisi di costi di un Honda Kona elettrica (linea nera) e di un Honda Kona a benzina (linea verde). L'analisi è fatta per un totale di dieci mesi in cui si può notare come il costo dell'auto elettrica passa da costo più alto inizialmente,

dovuto al maggior costo di vendita ad uno più basso, dovuto al minor costo necessario per rifornimenti e manutenzione.

1.3 Il futuro dei veicoli elettrici

L'aumento del mercato delle auto elettriche, spinto dai provvedimenti e dalle regolamentazioni adottati dai paesi più industrializzati e dall'obiettivo dell'Unione europea di fermare la produzione di auto a motore termico entro il 2035, comporterà anche un aumento significativo dei componenti essenziali per questo tipo di veicoli. Un rapporto di Goldman Sachs lo afferma. Secondo la banca d'affari americana, entro il 2040 i veicoli elettrici raggiungeranno il 61% del totale. Di conseguenza, gran parte della crescita del mercato automobilistico sarà occupata dai veicoli elettrici. Nel 2020, il quantitativo di profitti generato dal segmento era di soli due miliardi di dollari, con una variazione del 6550%, e si prevede che nel 2030 crescerà fino a 133 miliardi di dollari (Camera M., 2023).

Figura 2 – Prospettive per le vendite globali



Fonte: Deloitte, 2020.

Nella figura 2 del report di Deloitte possiamo notare la crescita dei volumi di vendita fino al 2030 dei veicoli elettrici e ibridi in contrapposizione a quelli a benzina e diesel, con le relative previsioni future. Dall'istogramma possiamo notare come la quota di mercato dei veicoli EV ha continuato ad aumentare negli anni e riuscirà a raggiungere più di un 25% del totale nel 2030.

Per quanto riguarda le tendenze future, tra i nuovi modelli di cui già si parla e di cui sono già stati creati i primi prodotti destinati alla vendita ci sono:

Veicoli elettrici che funzionano a batteria con autonomia estesa. Queste auto sono ideali per viaggi lunghi perché hanno un'autonomia di oltre 500 chilometri.

Veicoli elettrici a celle combustibili o *fuel cell*. Sebbene i costi di acquisto e manutenzione siano ancora elevati, questi veicoli avranno un'autonomia simile a quella dei veicoli a benzina o diesel. Queste auto sono chiamate anche ad idrogeno. I modelli sviluppati sono pochi per via appunto dei costi elevati ma tra i modelli già in commercio possiamo contare la Toyota Mirai, la Hyundai Nexa o la Hydrogen7 di BMW.

L'ultimo e forse il più discusso riguarda i veicoli elettrici autonomi. “Caratteristica su cui le case automobilistiche stanno investendo per queste auto sarà la maggior sicurezza di guida nonostante non sia necessaria la presenza di un conducente” (McKinsey & Co., 2023).

Per quanto riguarda le batterie che andremo poi ad approfondire nel terzo capitolo si stanno sviluppando delle nuove componentistiche e nuove metodologie per rendere l'auto più autonoma e in fase di assemblaggio più economica.

Secondo Goldman Sachs, infatti il futuro dei veicoli elettrici riguarderà appunto l'uso di batterie a stato solido diverse dalla maggior parte di batterie utilizzate nel mercato che hanno una maggiore densità di energia, sono più sicure e si ricaricano più velocemente.

Capitolo 2

Analisi del Life Cycle Assessment

Dopo aver acquisito un quadro generale e riassuntivo del settore dei veicoli elettrici, ci si può concentrare sull'argomento da analizzare. Si analizzerà l'impatto che questi veicoli hanno sull'ambiente durante il loro ciclo di vita e cercheremo di sottolineare i problemi relativi alle varie fasi del processo, come la produzione, l'utilizzo e lo smaltimento.

2.1 Le fasi del processo del LCA

L'impatto ambientale di un veicolo elettrico non può essere determinato solo in base alle emissioni e ai consumi generati durante la fase di utilizzo del veicolo. Per una valutazione completa, è necessario prendere in considerazione l'intero ciclo di vita del veicolo, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, all'utilizzo e allo smaltimento.

Per poter fare quest'analisi si deve utilizzare la valutazione del ciclo di vita (LCA), questa è appunto la migliore tecnica per valutare l'impatto ambientale di un sistema o di un prodotto. L'LCA tiene conto di ogni fase del processo che ha un impatto significativo sull'ambiente. In questo caso, infatti, si terranno in considerazione le emissioni che si ottengono sull'ambiente partendo dall'estrazione delle materie prime per la fabbricazione dei componenti delle auto fino all'esaurimento del prodotto, il suo fine vita.

Dall'insieme di queste informazioni, è possibile valutare l'impatto di un prodotto nel suo insieme e determinare dove migliorare, mantenere e riprogettare.

Le norme ISO della serie 14040 disciplinano la metodologia LCA e richiedono: definizione dell'obiettivo e campo di applicazione dell'analisi (ISO 14041), compilazione del registro degli input e degli output di un sistema specifico (ISO 14041), la valutazione delle possibili conseguenze ambientali associate a tali input e output (ISO 14042) e analisi dei risultati (ISO 14043) (Temporelli, 2020).

L'analisi però ha dei limiti, i principali riguardano la variazione nei confini del sistema, l'utilizzo di mix energetici diversi e il fattore di non disponibilità dei dati.

Andando per ordine il primo problema riguarda i diversi confini del sistema. Il confine del sistema è la zona in cui vengono presi in considerazione gli input e gli output del sistema. Un esempio sono gli studi che considerano come fase di utilizzo solo l'impatto ambientale che si ottiene nel periodo di funzionamento. "Questi studi non sono completi poiché tralasciano le fasi di estrazione e produzione di materie prime e lo smaltimento del prodotto" (Messagie, 2014).

Per quanto riguarda i confini di sistema esistono due metodi d'approccio: l'approccio *well-to-wheel* (WTW) e l'approccio LCA completo.

La strategia WTW analizza il ciclo di vita dei generatori di energia, ovvero delle forme di carica, carburanti per i veicoli ICEV e l'elettricità per i veicoli EV. È suddivisa in due fasi:

1. *Well-to-tank* (WTT): analizza i costi energetici associati all'estrazione, la lavorazione e il trasporto dei materiali che sono necessari per produrre il carburante.
2. *Tank-to-wheel* (TTW): Considera quanto carburante viene utilizzato nel motore del veicolo.

L'approccio WTW è utile per fare comparazioni tra varie tecnologie propulsive e carburanti. Tuttavia, non tiene conto dell'impatto che la produzione del veicolo ha sull'ambiente (ENEA, 2017).

L'altro approccio è il metodo del LCA completo.

Questo approccio include l'analisi degli impatti ambientali e dei costi energetici relativi alla produzione dei componenti del veicolo. In questo caso, oltre ai costi produttivi relativi alla produzione di carburante, si aggiungono i costi produttivi per ogni singolo componente della macchina, portando di fatto un'analisi più approfondita.

Il secondo problema principale è riuscire a fare un'analisi corretta considerando le diverse tipologie di energie utilizzate per ricarica e produzione, in questo caso delle batterie.

Il terzo grande problema sono i dati non disponibili poiché molti dati relativi alla produzione dei veicoli sono privati. La comparazione dei risultati di diversi studi LCA può essere difficile a causa di ciò. Ad esempio, le aziende automobilistiche raramente forniscono dati sulla composizione chimica delle batterie utilizzate nei veicoli elettrici. La valutazione dell'impatto delle batterie sull'ambiente richiede però queste informazioni (Messagie, 2014).

Dopo aver spiegato cos'è e come funziona l'analisi del ciclo di vita si andrà ad approfondire l'LCA dei veicoli elettrici.

2.2 LCA dei veicoli elettrici

Dato il mix elettrico medio in Europa, le emissioni di CO₂ di un veicolo elettrico sono del 55% inferiori a quelle di un veicolo endotermico alimentato a benzina e del 47% inferiori a quelle di un veicolo diesel.

In uno scenario in cui la generazione elettrica da fonti rinnovabili aumenta, queste differenze aumentano ulteriormente: Al 2030, le emissioni dovrebbero essere ridotte del 72%. In uno scenario in cui il riscaldamento globale dovrebbe rimanere entro 1,5 gradi dai livelli preindustriali entro il 2050, la riduzione sarà dell'80% (ANSA, 2023).

Lo studio di Transport and Environment (T&E) nel 2022 smentisce la falsa notizia popolare secondo cui le emissioni di un'auto a motore endotermico sarebbero inferiori a quelle di un'auto elettrica durante il suo ciclo di vita, che include la produzione e lo smaltimento, non solo l'utilizzo.

La falsa convinzione deriva dal fatto che l'estrazione dei materiali per la costruzione delle batterie di trazione effettivamente emette molta CO₂, specialmente in Cina, dove l'elettricità è fornita in gran parte dal carbone. La nazione del Dragone produce molte auto elettriche, e anche in questo caso, la combinazione di elettricità "sporca" durante la costruzione produce forti emissioni.

Una ricerca condotta nel 2022 dalla Fondazione Caracciolo (il centro studi dell'Acì) e dall'Università Guglielmo Marconi afferma che le auto elettriche prodotte in Cina hanno un'impronta carbonica superiore del 35% rispetto a quelle prodotte in Europa, dove viene utilizzata più energia verde. Nonostante ciò, le auto elettriche hanno comunque emissioni inferiori rispetto alle auto a motore endotermico, secondo la stessa ricerca.

Parlando di emissioni in generale, le emissioni di CO₂ *"well to-wheel"* di un veicolo elettrico sono fino al 25% inferiori rispetto a un veicolo ibrido plug-in e fino al 75% inferiori rispetto a un veicolo analogo a combustione interna alimentato con carburanti fossili. Il consumo di un'auto elettrica è fino a quattro volte inferiore a quello di un veicolo a combustione interna di pari potenza e dimensioni e fino al doppio di quello di un veicolo

ibrido plug-in. In altre parole, un veicolo elettrico percorre quattro volte la distanza percorsa da un veicolo a benzina a parità di energia consumata.

I veicoli elettrici e i prodotti per l'energia sostenibile hanno un impatto ambientale molto migliore rispetto alle alternative a base di combustibili fossili. “Questo impatto aumenta solo quando si considera l'intero ciclo di vita: l'estrazione delle materie prime, l'uso del prodotto e lo smaltimento” (Tesla, 2022).

2.2.1 Fase di produzione

Il momento di produzione di un'auto elettrica è il momento più incisivo per quanto riguarda l'analisi del ciclo di vita poiché è in questa fase che vengono raggiunti i livelli massimi di inquinamento prodotto dal veicolo EV.

In questa fase viene tenuto conto delle materie prime che vengono estratte e dei processi energeticamente intensivi per la loro estrazione e lavorazione.

Tra le materie prime indispensabili per la produzione delle batterie di un'auto elettrica, ovvero l'elemento che contraddistingue i veicoli EV dagli ICEV, contiamo nichel, litio, manganese, cobalto e grafite come componenti fondamentali che verranno approfonditi successivamente nel terzo capitolo.

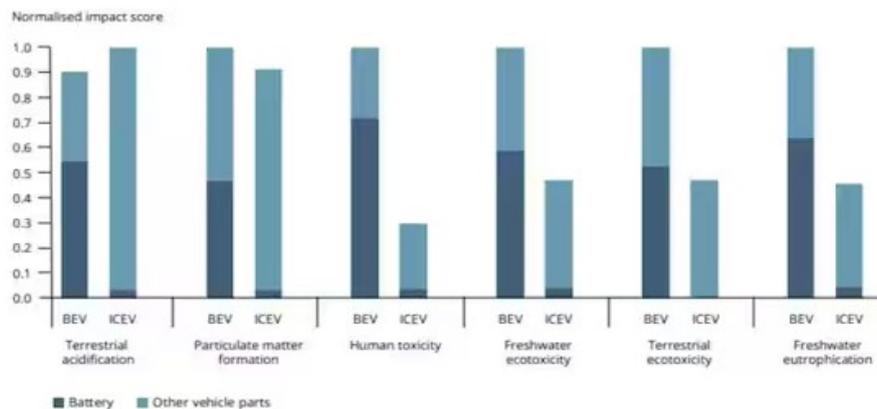
Due dati sono necessari per stimare le emissioni delle auto elettriche: il consumo medio di elettricità per chilometro percorso e le emissioni di CO₂ necessarie per produrre e distribuire energia elettrica.

I seguenti inquinanti costituiscono la maggior parte delle conseguenze ambientali, sia per quanto riguarda i veicoli elettrici che non: il riscaldamento globale (global warming GWP), l'acidificazione terrestre (terrestrial acidification TAP), la formazione di particolato (*particulate matter formation* PMFP), formazione di ossidazione fotochimica (*photochemical oxidation formation* PQFP), tossicità umana (*human toxicity* HTP), tossicità nell'acqua (*freshwater eco-toxicity* FETP), la tossicità ambientale terrestre (*terrestrial eco-toxicity* TETP), l'eutrofizzazione delle acque dolci (*freshwater eutrophication* FEP), l'esaurimento delle risorse minerali (*mineral resource depletion* MDP) e l'esaurimento delle risorse fossili (*fossil resource depletion* FDP).

Il maggior fattore impattante, per quanto riguarda questa prima fase, è il GWP. Un veicolo elettrico, infatti, produce tra gli 87 e 95 grammi di diossido di carbonio per chilometro,

quasi il doppio di un veicolo a combustione interna. Altro inquinante maggiore negli EV è l'HTP sia nella fase di produzione che in quella di utilizzo, questo perché le batterie hanno necessità di materie prime come rame e nichel che sono elementi molto tossici per l'uomo. Altro inquinante di maggior impatto rispetto gli ICEV è l'MDP, questo dovuto al maggior bisogno di risorse minerarie (Gandelli, 2021).

Figura 3 – Confronto tra veicoli elettrici e ICEV



Fonte: Gandelli, 2021.

Nella figura 3 viene proposto un confronto tra l'impatto inquinante delle batterie dei veicoli BEV e ICEV. Essa dimostra quanto incida la fabbricazione delle batterie in varie tipologie di inquinamento.

I risultati di questa prima fase, quindi, vedono un maggior impatto inquinante da parte delle auto elettriche dovuto al bisogno di estrarre materie prime per le batterie, ma la situazione sta migliorando. Ciò è dovuto alle nuove tecniche di estrazione e i nuovi processi di fabbricazione delle batterie meno inquinanti.

2.2.2 Fase di utilizzo

Ora passiamo alla prossima fase dell'analisi, la fase di utilizzo del veicolo da parte del consumatore.

I consumi energetici che si hanno durante la fase d'uso della batteria sono relativi al consumo di elettricità da parte del veicolo e alla perdita di energia dovuta all'efficienza della batteria.

Per determinare i livelli di emissioni dei veicoli e quindi confrontarli, le auto a gasolio e benzina analizzano le emissioni derivanti dalla marmitta durante l'utilizzo, mentre le auto elettriche analizzano il modo in cui viene generata l'elettricità necessaria per ricaricarle. Una parte importante dell'analisi delle emissioni complessive è la fonte di elettricità utilizzata per ricaricare i veicoli elettrici. Il mix energetico utilizzato può influenzare notevolmente i risultati. I principali mix energetici sono:

1. Mix di elettricità globale: una rappresentazione media dell'approvvigionamento globale di elettricità da tutte le fonti disponibili. È composto da una vasta gamma di fonti, come gas naturale, gas nucleare, idroelettrico, solare ed eolico. L'impatto ambientale varia notevolmente a livello globale in base alla composizione di questo mix.
2. Mix di elettricità europea: questo mostra il mix energetico comune utilizzato in Europa per produrre elettricità. Per quanto riguarda l'Europa, l'utilizzo di fonti rinnovabili come l'energia eolica e solare è più diffuso rispetto ad altre aree, il che può avere un impatto positivo sull'ambiente dei veicoli elettrici.
3. Combinazione di elettricità prodotta da fonti rinnovabili: dato che l'elettricità viene fornita solo da fonti rinnovabili come energia solare, eolica e idroelettrica, questo mix è il più rispettoso dell'ambiente. La combinazione di questo mix riduce notevolmente le emissioni causate dalla ricarica dei veicoli elettrici.

È importante tenere presente che il mix energetico può variare notevolmente da un luogo all'altro; quindi, l'impatto effettivo dei veicoli elettrici dipende dalla fonte di energia locale. È possibile ridurre l'impatto ambientale complessivo degli EV promuovendo una maggiore adozione di fonti rinnovabili.

Utilizzando uno studio di Hawkins et al. (2012) si possono osservare le seguenti situazioni.

Quando il mix utilizzato è quello europeo l'impatto sul GWP, rispetto ai veicoli ICEV a benzina, è ridotto del 20% al 24% e del 10% al 14% rispetto ai diesel.

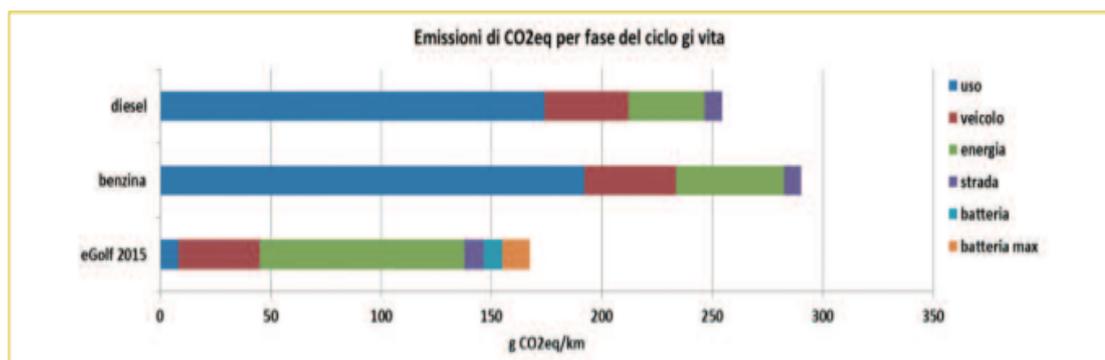
Quando vengono utilizzati gas naturali per la produzione di energia elettrica allora la diminuzione dei *greenhouse gases* che si ha rispetto ai veicoli a benzina è del 12%.

Quando invece l'energia prodotta viene dal carbone, come avviene per la maggior parte dei casi in Cina, allora si ottiene un maggior inquinamento da parte dei veicoli EV con un aumento del 27% in relazione ai veicoli a benzina e del 17% a quelli diesel.

L'ultima grande differenza da analizzare è in base allo stile di guida e dove viene usata la vettura. Quindi si considera l'ambiente cittadino urbano, extraurbano e misto.

In quanto la velocità aumenta l'efficienza e aumenta la quantità di energia assorbita dal propulsore elettrico, i veicoli elettrici sono più efficienti nelle aree urbane, mentre il consumo è sempre più basso rispetto ai veicoli ICEV nelle aree extraurbane e miste.

Figura 4 – Emissioni legate alla batteria dell'auto elettrica.



Fonte: Girardi P., Brambilla C., 2018.

Nella figura 4, prendendo come caso un veicolo che realizza 15.000 km annui, si possono vedere le emissioni di CO2eq/km di tre veicoli diversi e come questi inquinano nella loro fase di utilizzo. Da questo grafico si nota, in questo caso il modello scelto è una eGolf del 2015, che l'auto elettrica è quella che produce le minori emissioni durante l'uso con poco più di 150g di CO2eq/km.

2.2.3 Fase di smaltimento

Come scritto in precedenza la batteria, solitamente al litio, è l'elemento fondamentale per le autovetture elettriche perché fornisce potenza al motore elettrico e migliora le prestazioni dell'auto. Questo elemento contraddistingue il processo di smaltimento dei veicoli EV.

La produzione delle batterie aumenta circa del 25% all'anno. Di conseguenza, il problema dello smaltimento delle batterie diventerà sempre più importante nei prossimi 20 anni (Autoscout24, 2022). A differenza delle batterie tradizionali, le batterie moderne

contengono elementi inquinanti come il manganese, il nichel e il cobalto, che sono materiali difficili da smaltire.

Le case produttrici di auto seguono un percorso di smaltimento severo per le batterie a litio una volta esaurite: eseguono una modalità di trattamento che evita la contaminazione preservando l'ambiente. Le batterie devono essere smaltite in modo appropriato e in strutture specializzate. Infatti, questi materiali non rappresentano alcun pericolo per l'ambiente o per gli esseri umani se vengono smaltiti correttamente; al contrario, se vengono dispersi, possono causare danni significativi.

Per questo motivo, ci sono aziende specializzate che sono professionalmente attrezzate e utilizzano macchinari progettati per trattare questi prodotti.

Il trattamento termico-chimico delle batterie delle auto elettriche provoca la perdita del litio nella fase iniziale, quando la batteria si scalda, solo materiali come nichel, cobalto, alluminio e rame possono essere recuperati utilizzando questa tecnica: In termini di sforzi necessari per l'estrazione e il riciclo, questi materiali sono i più "costosi". È importante ricordare che si sta lavorando per sviluppare un processo idro-metallurgico che possa recuperare oltre il 90% dei metalli delle batterie a litio (Sorgenia, 2023).

Attualmente, solo pochi Paesi europei, principalmente Germania, Francia, Belgio e Spagna, hanno impianti di smaltimento e riciclo delle batterie a litio. Questo perché lo smaltimento delle batterie delle auto elettriche può essere molto costoso. Nonostante ciò, a seguito della crescita del mercato globale delle auto elettriche, è chiaro che anche altri paesi devono sviluppare stabilimenti per il trattamento e lo smaltimento delle batterie a litio. Ciò è essenziale per affrontare i problemi climatici e ridurre l'impatto ambientale.

La sostituzione delle batterie delle auto elettriche comporta poi costi significativi. La spesa per lo smaltimento delle batterie a litio è di circa 4,00 - 4,50 euro al chilogrammo. quindi una spesa importante.

In genere prendendo come esempio le batterie delle auto Tesla, il peso varia in base a quanta potenza sono in grado di generare. Le batterie variano da 25 kWh a 200 kWh e il loro peso varia a loro volta da 288 a 700 chilogrammi.

Sebbene non sia fisso, l'importo da pagare può cambiare anche in base ad altri fattori, come la variazione del costo della manodopera.

La maggior parte dei paesi, in particolare quelli europei e asiatici, preferisce riutilizzare piuttosto che smaltire le batterie a litio a causa di queste spese significative per lo

smaltimento. In effetti, molte aziende produttrici di auto elettriche hanno deciso di riutilizzare le batterie a litio per scopi alternativi. Questo settore è al momento nelle prime fasi di sviluppo e le filiere si stanno costituendo (Circularmobility, 2023).

Un esempio sono i battelli francesi che navigano sul fiume Senna, questi sono alimentati dalle batterie delle auto elettriche. Le batterie delle auto elettriche sono anche utilizzate per illuminare le strade delle città, principalmente in Giappone.

Con l'approvazione del "Pacchetto Economia Circolare", anche l'Europa si impegna a migliorare le operazioni di riciclo e smaltimento; si tratta di un regolamento che impone a tutti i produttori di auto elettriche in tutta Europa di garantire che le batterie a litio vengano completamente riciclate.

Con le azioni e i provvedimenti in corso, il riutilizzo delle batterie a litio è aumentato a livelli significativi. Attualmente, circa la metà delle batterie a litio vengono riciclate in tutto il mondo. Il riutilizzo aiuta a ridurre le emissioni inquinanti ed evita la dispersione di materiali pericolosi nell'ambiente.

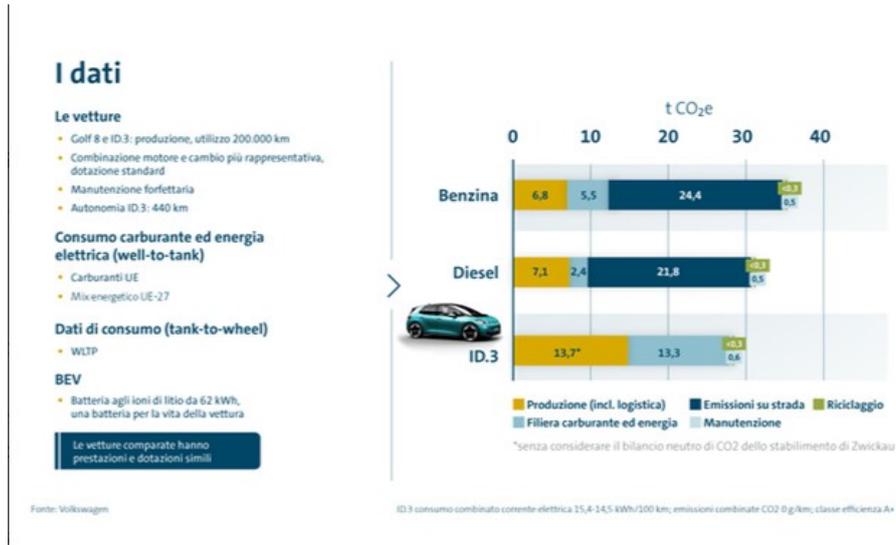
2.3 Risultati

Da ciò che è stato scritto in precedenza si può capire come i veicoli elettrici inquinino meno durante la loro fase di utilizzo.

Nella fase di produzione però, le auto elettriche impattano maggiormente sulle emissioni di CO₂ e quindi sul riscaldamento dell'ambiente, questo è dovuto unicamente al processo di fabbricazione delle batterie, soprattutto per l'estrazione delle materie prime necessarie per esse.

Per la fase finale invece l'impatto ambientale non ha un valore particolarmente rilevante, ma esso dovrebbe ridursi ulteriormente in futuro grazie ai processi di riutilizzo delle batterie in altri mercati con altri sviluppi.

Figura 5 – Confronto delle emissioni



Fonte: Volkswagen AG, 2021.

La figura 5 mostra che i veicoli elettrici a batteria (BEV) ottengono risparmi significativi nelle emissioni su strada, quindi durante l'utilizzo; in questo caso l'analisi è basata su un ciclo di vita di 200.000 km. Ciò è anche vero nonostante le emissioni di CO₂ più elevate nella fase di produzione, che include tutte le emissioni della catena del valore cradle-to-gate, dall'estrazione delle materie prime all'assemblaggio dei componenti e dei prodotti finiti.

Capitolo 3

Le batterie

Come si è potuto capire dai capitoli precedenti, l'evoluzione delle batterie utilizzate nelle auto elettriche ha contribuito a ridefinire i limiti della mobilità sostenibile e a ridurre l'impatto ambientale dell'uso dei veicoli su strada. Per le moderne auto elettriche, questi dispositivi di stoccaggio dell'energia, alimentati principalmente da fonti energetiche che sono considerate rinnovabili, anche se la loro produzione non è priva di emissioni, e non fossili, consentono di percorrere lunghe distanze con una riduzione significativa delle emissioni di gas serra e sostanze inquinanti rispetto ai veicoli tradizionali alimentati da combustibili fossili.

3.1 I materiali utilizzati

I materiali principali che vengono utilizzati per la realizzazione delle batterie elettriche sono prevalentemente tre: litio, manganese e grafite (ENEA, 2017).

Il litio è facilmente accessibile, non è presente in natura allo stato metallico: a causa della sua reattività, è sempre associato ad altri materiali. È presente in minima parte in molte salamoie naturali e in quasi tutte le rocce ignee.

Il carbonato di litio o l'idrossido di litio sono i tipi di materiali utilizzati per produrre il catodo di una batteria. Ad esempio, l'idrossido di litio è utilizzato per le batterie delle *Tesla model S*.

La grafite viene utilizzata nell'anodo delle batterie e può essere sintetica o naturale. Anche se la grafite naturale è migliore, la grafite sintetica primaria può essere utilizzata per gli anodi delle batterie agli ioni di litio, ma il suo prezzo è almeno il doppio di quello della grafite naturale. A volte viene utilizzata per produrre batterie con determinate caratteristiche che richiedono forme ibride realizzate in materiale sintetico. Le batterie al litio di fascia alta, come quelle utilizzate nei veicoli elettrici, sono fatte di grafite sintetica, che offre un vantaggio di qualità controllato.

Il manganese è un metallo che viene prodotto da altri minerali, il più comune dei quali è la pirolusite, che quando viene riscaldata rilascia appunto il manganese. È utilizzata nel catodo della batteria al litio ossido di manganese (LMO).

Altri materiali importanti per la realizzazione delle batterie sono rame, nichel e cobalto. Molto importante è appunto quest'ultimo, soprattutto per la sua estrazione, essendo la sua produzione uno dei principali fattori dell'inquinamento di cui si parlerà in seguito.

A seconda dei materiali utilizzati e delle combinazioni si possono avere diverse tipologie di batterie:

1. Batterie al piombo: sono utilizzate per muletti e transpallet, sono molto più ingombranti e pesanti rispetto ad altre batterie, la ricarica completa richiede circa dieci ore e non supera i 100 km di autonomia.
2. Batterie al nichel-metallo idruro: ora in disuso ma usate in passato poiché offrivano un ciclo di vita che andava da 8 a 10 anni. Il loro rendimento non era dei migliori, ma sono state largamente utilizzate per auto elettriche ed ibride.
3. Batterie agli ioni di litio: sono l'evoluzione rispetto a quelle di nichel-metallo idruro. Attualmente sono le più utilizzate: hanno una densità energetica altissima, sono poi più leggere e compatte. Queste non necessitano di una ricarica completa per funzionare e hanno un'autonomia molto elevata (Sorgenia, 2023).

3.2 L'estrazione delle risorse

Dall'estrazione dei materiali citati in precedenza derivano gli impatti ambientali che fanno aumentare le emissioni rendendo i veicoli elettrici da non inquinanti al contrario per via dei processi di lavorazione che si hanno per estrarli.

Partendo dal litio, esistono tre fonti fondamentali da cui estrarlo: dalla salamoia, dai depositi argillosi o dalla roccia dura. I depositi di salamoia rappresentano circa il 66% delle risorse del litio mondiale e si trovano principalmente nelle zone salate del Cile, dell'Argentina, della Bolivia, della Cina e del Tibet (ENEA, 2017). Solo il Salar de Atacama, terzo lago salato più grande al mondo, situato tra Argentina, Bolivia e Cile dispone del 50% delle riserve globali (Pistolessi, 2020). La presenza di queste riserve ha

permesso a molte aziende manifatturiere di investire in questi paesi, soprattutto in Argentina, portando la produzione di litio argentino ad un più 60% dal loro arrivo.

L'Australia ad oggi è il più grande produttore di litio al mondo. La produzione nel 2018 è stata di 51.000 tonnellate, circa il 61% della produzione globale. Altra grande nazione estrattrice di litio è la Cina con una produzione pari al 9% (Dari, 2021).

Essa non è solo una grande produttrice di litio, ma anche una grandissima consumatrice con una crescita della domanda di batterie alimentata anche dall'elettronica di consumo. La maggior parte della produzione proviene dal Tibet, dal Lago Zabuye, un lago salato di montagna. La Cina ormai esporta piccole quantità a cui pone dei dazi, per cui le forniture cinesi sono pressoché bloccate.

I maggiori produttori di grafite sono invece, Cina, India e Brasile. Di grafite naturale ne esistono tre tipi: a fiocchi, amorfa e a vena. Per le batterie delle auto elettriche viene utilizzata la tipologia a fiocchi. L'aumento della richiesta di veicoli elettrici ha fatto registrare un aumento della domanda del 40% solo dal 2014 al 2016. La maggior parte dell'estrazione di grafite viene utilizzata però per il grafene uno strumento che produce luce per schermi flessibili e circuiti elettrici.

Un materiale sostitutivo del manganese è introvabile, perciò la sua domanda è di per sé molto elevata, i suoi giacimenti, che sono relativamente abbondanti sulla crosta terrestre, sono distribuiti in modo irregolare e la sua produzione è principalmente concentrata in una serie di paesi o regioni politicamente instabili.

I maggiori produttori sono il Sud Africa che detiene il 78% delle riserve, la Cina, l'Australia e il Gabon. Il secondo paese con la maggior riserva è l'Ucraina, con un 10%; però esso non sfrutta queste risorse per una serie di combinazioni tra corruzione e cattiva gestione, per cui queste risorse sono per lo più esportate e lavorate da altri paesi come Russia e Turchia.

La produzione di cobalto è molto significativa. Era considerato solo un sottoprodotto dell'estrazione di rame e nichel fino a pochi anni fa, ma ora, sta diventando sempre più importante per l'uso nelle batterie ricaricabili. In effetti, la domanda globale è cresciuta da 90mila a 127mila tonnellate tra il 2016 e il 2019, e si stima che raggiungerà le 185mila tonnellate a fine 2023.

Si stima che la Repubblica Democratica del Congo (RDC) fornisca la maggior parte del cobalto utilizzato nella produzione di batterie, con circa il 60% della produzione nel mondo. (Dari, 2021).

3.2.1 L'inquinamento prodotto

Come già ribadito in precedenza il problema principale dell'inquinamento delle vetture elettriche è essenzialmente la loro fase iniziale di estrazione e produzione per le batterie, necessarie a far funzionare il veicolo.

Questi problemi derivano dalle risorse prime che si utilizzano, specialmente litio e cobalto.

Nel 2020, le riserve mondiali di litio erano circa 14 milioni di tonnellate, 165 volte il volume produttivo del 2018. Secondo lo US Geological Survey, le riserve di metallo attuali ammontano a 21 milioni di tonnellate, il che significa abbastanza da durare fino alla metà del prossimo secolo. Parlare di riserve però è un concetto flessibile perché rappresentano la quantità di una risorsa che può essere estratta economicamente a prezzi correnti e in base ai requisiti normativi e tecnologici attualmente in vigore. Per la maggior parte dei materiali, quando la domanda aumenta, anche le riserve aumentano (Dari, 2021). La sfida consiste nell'aumentare la produzione di litio per soddisfare la domanda man mano che il mercato delle auto aumenta nella vendita dell'elettrico.

L'estrazione del litio non è ad impatto zero. Pertanto, l'estrazione senza freni di esso è estremamente dannosa per l'ambiente e mette a rischio la vegetazione, rendendola soggetta a siccità (Pistolesi, 2020). L'estrazione del litio causa una desertificazione incontrollata, secondo l'Osservatorio plurinazionale di Salares Andinos, che riunisce comunità, organizzazioni e ricercatori provenienti dai Paesi dell'America Latina.

“Il litio non si può considerare una risorsa ecologica perché la sua estrazione sta producendo devastazione e occupazione del territorio” (Balcázar, 2020).

Gli studi dell'Università di Antofagasta in Cile hanno dimostrato che due milioni di litri di acqua sono necessari per ogni tonnellata di minerale estratto. Si stima che vengano estratti duemila litri al secondo, o milioni di litri al giorno, dal salare. Il prosciugamento di fiumi e falde acquifere è il risultato di uno squilibrio idrico. Ciò riguarda gli ecosistemi che ospitano specie endemiche estremamente vulnerabili, molte delle quali sono protette

dalla legge, come i laghi e le zone umide ai margini della distesa di sale e nelle montagne. È poi possibile che le acque utilizzate per i processi di estrazione vengano contaminate, con tutte le conseguenze che ciò avrebbe per la flora, la fauna e le attività agricole.

Quindi oltre ad un aumento delle emissioni di CO₂ che sono destinate a triplicare entro il 2025 è importante considerare anche altri tipi di inquinamenti come ad esempio, in questo caso, l'inquinamento idrico che va ad incidere direttamente sulle condizioni di vita delle persone.

Un simile discorso vale anche per il cobalto, esso, prodotto come detto in precedenza, è estratto in maniera molto elevata nella Repubblica democratica del Congo. Qui la questione inquinamento è molto sentita anche da parte dell'UNICEF per le condizioni di vita dei lavoratori (Del Giudice, 2020).

L'organizzazione ha stimato che circa 40.000 bambini siano impiegati nelle miniere del Katanga meridionale, una regione ricca di cobalto. Il pericolo, oltre che per le condizioni di lavoro e il lavoro minorile, è l'esposizione alle esalazioni tossiche del prezioso minerale in assenza di attrezzature protettive, che si ritiene causino problemi respiratori e problemi cardiaci, nonché malformazioni e aborti spontanei nelle donne incinte che lavorano nelle miniere (Pitzianti, 2022).

Il cobalto è essenziale per la produzione delle batterie, specialmente quelle agli ioni di litio, poiché l'inserimento di questo materiale comporta una durata e una efficienza maggiore.

Esso è in realtà il componente più prezioso delle batterie per i veicoli elettrici attuali. Diversi laboratori hanno eseguito prove su catodi che contengono un basso contenuto di cobalto o che non contengono alcun cobalto. Tuttavia, anche se più della metà degli ioni di litio viene rimossa durante la carica, i materiali catodici devono essere progettati in modo che le loro strutture cristalline non si rompano, abbandonare del tutto il cobalto spesso riduce la densità energetica di una batteria (Manthiram, 2020)

Esistono elementi che possono sostituire il cobalto, come il manganese o dei noduli ricchi di metalli trovati sul fondo del mare, però anche per questi c'è bisogno di trovare delle metodologie di estrazione che incidano in minor modo sull'ambiente.

3.3 Nuove tecnologie e nuovi materiali

L'industria automobilistica si sta muovendo per cercare opzioni da poter utilizzare che abbiano un minor impatto sull'ambiente ma che anche abbattano i costi di produzione, il peso e la grandezza.

In questi ultimi anni sono stati fatti diversi tentativi e ancora se ne stanno facendo per trovare la soluzione migliore per l'inquinamento e per la sicurezza del conducente.

La soluzione che pare la migliore per tutti questi fattori è la batteria allo stato solido. Regaleranno più autonomia, ridurranno i tempi di ricarica e saranno più sicure e longeve. Le batterie allo stato solido e le batterie agli ioni di litio funzionano allo stesso modo. Hanno due elettrodi caricati positivamente e negativamente, c'è un separatore piazzato tra loro e un elettrolita. Ciò consente agli ioni di passare dall'anodo al catodo e viceversa durante le fasi di carica e scarica. La differenza sta appunto nell'elettrolita solido.

I vantaggi sono notevoli, dispongono di maggiore sicurezza e resistenza alle fiamme per la non presenza di liquidi ed elementi volatili, hanno poi una durata maggiore per la stabilità elettrochimica, sono anche più leggere e possono essere ricaricate fino a quattro o sei volte la velocità di una batteria con elettrolita liquida.

Gli svantaggi sono legati esclusivamente ai costi di produzione per via dei processi per realizzarle ancora troppo complessi.

Attualmente, infatti, nessuna casa automobilistica produce o ha in calendario per i prossimi due anni, vetture EV dotate di batteria allo stato solido.

La società più vicina alla commercializzazione era Toyota che aveva segnato una *deadline* per il 2025, posticipata ora al 2027 come per Nissan. Stellantis, invece, punta ad aver disponibile questo tipo di batteria nel 2026 e proprio per questo ha investito nella società Factorial Energy, che sta portando avanti lo sviluppo di questa tecnologia.

Durante il CES 2023 a Las Vegas è stato presentato il primo prototipo di batteria allo stato solido di questa società con celle da 100Ah. Sempre durante questo *keynote*, il CEO di Stellantis ha ribadito che con Factorial, stanno sviluppando una tecnologia che sarà brevettata che utilizzerà meno cobalto. “In arrivo entro il 2026, la batteria a stato solido può fornire una densità di energia fino al 30% superiore rispetto alla tradizionale batteria agli ioni di litio, il che potrebbe consentire un'autonomia di guida ancora più lunga o un peso inferiore” (Tavares, 2023).

Ovviamente se questo strumento sarà realizzato entro due o tre anni, per la produzione di massa ci vorranno molti altri anni, si avrà prima di tutto una fase iniziale in cui le uniche vetture dotate di queste batterie saranno automobili di fascia alta.

Per la promozione dell'uso di auto elettriche, nel corso degli ultimi dieci anni, l'Unione europea ha speso miliardi di euro per la ricerca in merito e sta lavorando per accelerare l'espansione dell'infrastruttura di ricarica. Inoltre, sta investendo ingenti risorse e sviluppando infrastrutture che supportano l'uso di carburanti alternativi, in particolare lungo i principali corridoi di transito in tutta Europa.

Inoltre, poiché il Giappone, la Cina e la Corea del Sud producono attualmente la maggior parte delle batterie per auto elettriche, l'UE sta spingendo a potenziare la produzione di batterie in Europa per ridurre i costi che si avrebbero e il relativo inquinamento per il loro trasporto dall'Asia all'Europa. Infine, l'Unione europea sta lavorando per stabilire standard comuni per i veicoli elettrici e infrastrutture di ricarica per consentire a questi veicoli di circolare liberamente in tutta l'Europa (Unterstaller, 2022).

Considerazioni finali

Nel corso di questo elaborato, abbiamo affrontato una tematica estremamente attuale e rilevante: l'adozione delle automobili elettriche come potenziale soluzione al problema dell'inquinamento atmosferico e del riscaldamento globale. Dai risultati della nostra ricerca, dobbiamo cercare di raccogliere e sintetizzare tutte le informazioni che abbiamo raccolto in modo da poter creare un'analisi definitiva che riassume e dia un senso critico di tutto.

I veicoli elettrici sono ancora una tecnologia in fase di sviluppo che ha molte strade da poter percorrere. Le varietà di modelli attualmente disponibili sul mercato sono esemplificative di processi innovativi che devono ancora essere standardizzati per esprimere al meglio gli obiettivi di efficienza e ambiente.

Per rendere questi veicoli elettrici più competitivi, le case automobilistiche si stanno concentrando su una serie di aspetti importanti. Questi includono l'aumento dell'autonomia in termini di chilometri percorsi con una sola ricarica, lo sviluppo di metodi di ricarica più rapidi e efficaci e una distribuzione più ampia e uniforme delle stazioni di ricarica in tutto il territorio.

Per quanto riguarda l'inquinamento ambientale, i veicoli elettrici sono sicuramente una risorsa che può fornire notevoli vantaggi nella riduzione delle emissioni, che attualmente danneggiano gravemente sia l'ecosistema che la salute umana. Le soluzioni in questo caso, tuttavia, sono più difficili da realizzare.

In questo elaborato abbiamo suddiviso la nostra analisi in tre sezioni principali, ognuna delle quali ha approfondito un particolare aspetto del dibattito.

Nella prima sezione, abbiamo raccontato la storia dell'auto elettrica e sottolineato come la tecnologia sia cambiata e sia sviluppata notevolmente nel corso degli anni. È stato essenziale comprendere il processo attraverso il quale le auto elettriche hanno sviluppato il loro ruolo da alternativa a diventare una parte importante dell'industria automobilistica. Inoltre, abbiamo spiegato le principali differenze tra le auto elettriche (EV) e le auto a combustione interna (ICEV), sottolineando come funzionano e quali vantaggi hanno, in particolare l'assenza di emissioni di CO₂ dirette durante l'uso.

Nel secondo capitolo, abbiamo utilizzato un metodo basato sull'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) per valutare gli impatti ambientali delle automobili convenzionali rispetto alle

automobili elettriche. Questa analisi ha esaminato le emissioni di CO2 in ogni fase del ciclo di vita di un veicolo, dall'estrazione delle materie prime per la produzione, all'uso del veicolo e allo smaltimento.

È stato dimostrato che, sebbene la produzione di batterie e veicoli elettrici abbia un impatto significativo sull'ambiente, l'uso di veicoli elettrici compensa ampiamente queste emissioni durante la loro vita operativa grazie all'assenza di emissioni dirette e all'efficienza energetica migliorata.

Nella terza sezione, ci siamo concentrati sulle batterie, che sono il componente essenziale delle auto elettriche. Abbiamo esaminato come funzionano le batterie, i materiali che vengono utilizzati per produrle e le fonti da cui vengono estratti, dimostrando come la produzione di batterie ad oggi sia tossica per l'ambiente

Tuttavia, si è sottolineato che le aziende automobilistiche stanno cercando di mitigare questo impatto investendo in nuove tecnologie e processi di produzione più rispettosi dell'ambiente. Infine, nell'ultimo paragrafo si è scritto delle prospettive future, guardando alle nuove tecnologie e alle soluzioni che saranno utilizzate per migliorare la sostenibilità e l'efficienza delle batterie.

Questo studio ha dimostrato che c'è molta discussione sulla sostenibilità delle auto elettriche. A causa delle fasi di produzione e dell'estrazione dei materiali dalle batterie, le auto elettriche non emettono emissioni totali molto inferiori rispetto alle auto a combustione interna. Inoltre, poiché le principali case automobilistiche stanno lavorando per ridurre l'impatto di queste tecnologie attraverso la produzione di veicoli elettrici sempre più puliti, il futuro sembra promettente. Questo studio mostra che i veicoli elettrici sono migliori delle alternative a benzina e diesel in molti modi, ma sono anche insoddisfacenti in alcuni casi.

L'impegno per la sostenibilità e l'innovazione potrebbe ridurre significativamente le emissioni di CO2 del settore automobilistico nei prossimi anni, contribuendo in modo significativo alla lotta contro il riscaldamento globale. Tuttavia, è fondamentale continuare a monitorare attentamente i cambiamenti nel settore e adottare leggi che promuovano l'adozione dei veicoli elettrici e tecnologie più sostenibili nel processo di produzione delle auto elettriche.

Riferimenti bibliografici

Ansa, 2023. Auto, da elettrica meno CO2 di benzina sull'intero ciclo vita. *Ansa.it* [online]. Disponibile

su: https://www.ansa.it/canale_ambiente/notizie/mobilita/2023/03/03/autoda-elettrica-meno-co2-di-benzina-sullintero-ciclo-vita_ad3757a8-e84b-4fec-b052-cd25935a55ac.html [Data di accesso: 29/09/2023].

AutoScout24, 2022. Quanto inquina l'auto elettrica? Cosa inquina e confronto con Diesel. *AutoScout24* [online]. Disponibile

su: <https://www.autoscout24.it/informare/consigli/tecnologia-e-ambiente/le-auto-elettriche-inquinano/> [Data di accesso: 29/09/2023].

AutoScout, 2023. Auto idrogeno 2023, i modelli in vendita e i prezzi. *AutoScout24* [online]. Disponibile

su: https://www.autoscout24.it/informare/consigli/scelta-e-acquisto/auto-idrogeno-2023-i-modelli-in-vendita-e-prezzi/?cq_src=google_ads&cq_cmp=20531370631&cq_term=&cq_plac=&cq_net=g&cq_plt=gp&gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxARIsAHkOiu3n9xv9du-Blv7o-hlCk8GSTIJWBamCw5o2KqSWhxWt3_INro3Yx8caAiJuEALw_wcB [Data di accesso: 24/09/2023].

Autosystem, 2023. Consumo auto elettrica: la guida completa. *Auto System* [online].

Disponibile su: <https://www.autosystem.com/qual-e-il-consumo-effettivo-di-unauto-elettrica/> [Data di accesso: 29/09/2023].

Barontini, F., 2023. Batterie allo stato solido: cosa sono, come funzionano, autonomia. *InsideEVs* [online]. Disponibile su: <https://insideevs.it/news/675494/batterie-stato-solido-come-funzionano/> [Data di accesso: 08/10/2023].

Camera, M., 2023. Auto elettrica, per Goldman Sachs vendite su del 30% all'anno fino al 2030. *Verità E Affari* [online]. Disponibile su: <https://www.veritaeaffari.it/in-evidenza/auto-elettrica-mercato-goldman-sachs-controllo-batterie/> [Data di accesso: 24/09/2023].

Castelvecchi, D., 2021. Electric cars and batteries: how will the world produce enough? *Nature* [online]. Disponibile su: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02222-1> [Data di accesso: 07/10/2023].

Circular Mobility, 2023. Riciclo e smaltimento batterie auto elettriche: quali sono le soluzioni più sostenibili? *Circular Mobility* [online]. Disponibile su: <https://www.circularmobility.it/blog/dettaglio/smaltimento-batterie-auto-elettriche> [Data di accesso: 30/09/2023].

Dari, A., 2021. Batterie per auto elettriche: costi, limiti di produzione, durata, smaltimento . . . quale evoluzione. *Ingenio* [online]. Disponibile su: <https://www.ingenio-web.it/articoli/batterie-per-auto-elettriche-costi-limiti-di-produzione-durata-smaltimento-quale-evoluzione/> [Data di accesso: 07/10/2023].

Deloitte, 2020. Setting a course for 2030, Electric Vehicles. *Deloitte* [online]. Disponibile su: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/22869-electric-vehicles/DI_Electric-Vehicles.pdf [Data di accesso: 25/09/2023].

Del Giudice, F., 2020. Ricerca sulle miniere di cobalto nella Repubblica Democratica del Congo. *Amnesty International Italia* [online]. Disponibile su: <https://www.amnesty.it/ricerca-sulle-mini-re-di-cobalto-nella-repubblica-democratica-del-congo-danni-permanenti/> [Data di accesso: 08/10/2023].

Fondazione Filippo Caracciolo, 2021. Per una transizione ecorazionale della mobilità automobilistica italiana, *Fondazione Filippo Caracciolo* [online]. Disponibile su: https://fondazionecaracciolo.aci.it/app/uploads/2022/05/Per_una_transizione_ecorazionale_della_mobilita_automobilistica_italiana_2021.pdf [Data di accesso: 24/09/2023].

Gandelli, S., 2021. Auto a benzina vs elettriche: quale impatta e inquina meno? *Geopop* [online]. Disponibile su: <https://www.geopop.it/auto-a-benzina-vs-elettriche-qual-impatta-e-inquina-meno/> [Data di accesso: 28/09/2023].

Girardi P., Brambilla C., 2018. Auto elettriche e auto tradizionali: un confronto basato sul ciclo di vita dalla city-car due posti al SUV. *RSE* [online]. Disponibile su: <https://emob-italia.it/wp-content/uploads/2019/02/Energia-Elettrica-GIRARDI-STAMPA.pdf> [Data di accesso: 29/09/2023].

Goldman Sachs, 2023. Cars 2025, *Goldman Sachs* [online]. Disponibile su: <https://www.goldmansachs.com/intelligence/technology-driving-innovation/cars-2025/> [Data di accesso: 24/09/2023].

HDmotori.It, 2023. Stellantis, al CES 2023 il prototipo della batteria allo stato solido di Factorial. *HDmotori.it* [online]. Disponibile su: <https://www.hdmotori.it/fca/articoli/n565106/stellantis-batterie-stato-solido-factorial-ces/> [Data di accesso: 09/10/2023].

IEA, 2022. Global EV Outlook 2023. *International Energy Agency* [online]. Disponibile su: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf> [Data di accesso: 07/10/2023].

La Monica, M., Scagliarino C., 2017. Analisi dei flussi e studio dei mercati reali e finanziari delle materie prime presenti negli autoveicoli elettrici e nelle colonnine di ricarica. *Enea* [online]. Disponibile su: https://sostenibilita.enea.it/sites/default/files/allegati/papers/2017_rds_par2016_247.pdf [Data di accesso: 15/10/2023].

Locatelligroup, 2022. Tipologie di auto ibride: differenza tra MHEV, HEV e PHEV – *Locatelligroup* [online]. Disponibile su: <https://www.locatelligroup.eu/tipologie-di-auto-ibride-differenza-tra-mhev-hev-e-phev/> [Data di accesso: 24/09/2023].

Mansueto, L., 2022. L'auto elettrica dall'Ottocento a oggi: una storia piena di ostacoli. *The Map Report* [online]. Disponibile su: <https://www.themapreport.com/2022/08/02/lauto-elettrica-dallottocento-a-oggi-una-storia-colma-di-ostacoli/> [Data di accesso: 23/09/2023].

McKinsey & Company, 2023 Full throttle. *McKinsey & Company* [online]. Disponibile su: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/sustainable-inclusive-growth/chart-of-the-day/full-throttle> [Data di accesso: 24/09/2023].

Messagie M., 2021. Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles. *Transport & Environment* [online]. Disponibile su: <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf> [Data di accesso: 28/09/2023].

Misuraca, L., 2023. Emissioni: da auto elettriche metà CO2 di quelle a benzina, inclusa la produzione del veicolo, *IlSalvagente* [online] Disponibile su: <https://ilsalvagente.it/2023/03/08/emissioni-da-auto-elettriche-meta-co2-di-quelle-a-benzina-inclusa-la-produzione-del-veicolo/> [Data di accesso: 28/09/2023].

Notter D. A., Gauch M., Widmer R., Wäger P., Stamp A., Zah R., & Althaus H., 2010. Contribution of Li-Ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology* [online]. Disponibile su: <https://doi.org/10.1021/es903729a> [Data di accesso: 29/09/2023].

Pistolesi, A., 2020. Batterie al litio, i danni ambientali dietro al simbolo green. *Lavialibera* [online]. Disponibile su: <https://lavialibera.it/it-schede-334-batterie-al-litio-i-danni-ambientali-dietro-al-simbolo-green> [Data di accesso: 08/10/2023].

Pitzianti, E., 2022. Miniere pericolose. Perché il cobalto è così importante per l'ambiente? *Linkiesta* [online]. Disponibile su: <https://www.linkiesta.it/2022/02/perche-cobalto-importante-ambiente/> [Data di accesso: 08/10/2023].

Sorgenia, 2023. Smaltimento batterie auto elettriche: procedura e costi. *Sorgenia* (online). Disponibile su: <https://www.sorgenia.it/guida-energia/smaltimento-batterie-auto#:~:text=Lo%20smaltimento%20delle%20batterie%20delle,comporta%20la%20perdita%20del%20litio> [Data di accesso: 29/09/2023].

Sorgenia, 2023. Batteria auto elettrica: com'è fatta e caratteristiche. *Sorgenia* [online]. Disponibile su: <https://www.sorgenia.it/guida-energia/batteria-auto-elettrica> [Data di accesso: 07/10/2023].

Tesla, 2022. Impact report. *Tesla* [online]. Disponibile su: https://www.tesla.com/ns_videos/2022-tesla-impact-report.pdf [Data di accesso: 25/09/2023].

Untersaller, A., 2022. Veicoli elettrici: una scelta intelligente per l'ambiente. *European Environment Agency* [online]. Disponibile su: <https://www.eea.europa.eu/it/articles/veicoli-elettrici-una-scelta-intelligente> [Data di accesso: 09/10/2023].

Volkswagen AG, 2021. Mobilità elettrica vs tradizionale: i dati della carbon footprint. *MoDo VGI* [online]. Disponibile su: <https://modo.volkswagengroup.it/it/q-life/mobilita-elettrica-vs-tradizionale-i-dati-della-carbon-footprint> [Data di accesso: 29/09/2023].

VP Solar, 2023. Veicoli elettrici e ibridi: cosa significano le sigle EV, BEV, PHEV, HEV. *VP Solar* [online]. Disponibile su: <https://www.vpsolar.com/veicoli-elettrici-e-ibridi-cosa-significano-le-sigle-ev-bev-phev-hev/> [Data di accesso: 23/09/2023].

VP Solar, 2023. Modalità di ricarica di un'auto elettrica. *VP Solar* [online]. Disponibile su: <https://www.vpsolar.com/modalita-ricarica-unauto-elettrica/> [Data di accesso: 24/09/2023].

Wakefield, 1998. History of the electric automobile. *SAE International* [online]. Disponibile su: <https://www.sae.org/publications/books/content/r-187/> [Data di accesso: 23/09/2023].

Wallbox, 2021. Veicoli elettrici e a combustione a confronto. *Wallbox* [online]. Disponibile su: https://wallbox.com/it_it/newsroom/veicoli-elettrici-combustibile-a-confronto.html [Data di accesso: 24/09/2023].

Ringraziamenti

Vorrei esprimere la mia profonda gratitudine a tutti coloro che mi hanno aiutato a raggiungere questo punto della mia vita.

Vorrei iniziare ringraziando il mio relatore, il professor Cesare Dosi, per la sua guida, la sua pazienza e la sua disponibilità in questo percorso accademico e per la stesura di questo elaborato.

I miei genitori, Filippo e Paola, e i miei nonni, Mario e Maria, meritano la mia più grande gratitudine. Grazie di cuore per l'affetto e l'assistenza incondizionata, nonché per essere stati al mio fianco nei momenti più difficili di tutto il mio percorso scolastico.

Sono grato ai miei compagni di università, con cui ho condiviso gioie e difficoltà in questi tre anni, che hanno reso il mio percorso universitario più divertente e piacevole. Vorrei esprimere la mia gratitudine a Tommaso, Paolo, Alberto, Andrea, Eva e Marco e ringraziare in particolar modo anche Paolo e Andrea per avermi accompagnato e aiutato non solo durante l'università ma anche durante gli anni di scuola superiore

Infine, vorrei esprimere la mia gratitudine a tutti i miei amici e familiari che mi hanno sempre sostenuto nel corso di questa esperienza. La vostra fiducia è stata una grande motivazione per non mollare.

Sono grato a tutti voi e a me stesso per aver raggiunto questo traguardo!