

Auto nuova o auto usata?

Benedetti Chiara, Chiarani Sara, Daldoss Giada, Donati Noemi, Ferrari Irene, Girardi Alex, Lucchi Leonardo, Marcabruni Elia, Merli Sofie, Nodari Alice Quaglia Daniel, Rosa Virginia e Sartori Gianna

Abstract

This paper is about a research on the main differences between electric and traditional cars. To perform the task we were helped by professor Andrea Dorigato from the Department of Industrial Engineering of the University of Trento. The investigation was conducted in order to answer the questions posed by the citizen Mara Postral, who asked how polluting it is to build a new electric car and whether she would pollute more by keeping her 10-year-old car (she drives about 15000 km/year) or by buying a new one.

Since we were not able to answer the questions in an exhaustive way, we set the work considering the main impact categories in order to find out the level of the overall pollution. In particular this research is focused on the materials that are used in the production of cars and on the carbon footprint, an indicator of carbon dioxide emissions. These two aspects are part of the LCA inventory analysis phase.

1 Introduzione

Per questa ricerca si è innanzitutto cercato di capire cosa significhi effettuare un'analisi del ciclo di vita dell'auto (**LCA**). Facendo ciò ci si rende conto della complessità e della vastità di questa ricerca e nel nostro caso abbiamo quindi deciso di focalizzare l'attenzione su due aspetti che ci sono sembrati significativi per poter rispondere alla domanda della cittadina e che, considerando l'LCA, fanno parte della fase di analisi dell'inventario.

Per prima cosa il presente lavoro si occupa dei **materiali** impiegati nella produzione di un'auto, approfondendo le loro caratteristiche meccaniche e le problematiche relative al loro reperimento. In seguito si dedica all'analisi della **carbon footprint** e dopo aver scelto due modelli di automobile presenta i calcoli necessari al confronto tra le loro emissioni di CO₂.

- L'analisi del ciclo di vita (LCA, life-cycle assessment) è un metodo strutturato e standardizzato a livello internazionale che permette di quantificare i potenziali impatti sull'ambiente e sulla salute umana associati a un bene o a un servizio, a partire dal rispettivo consumo di risorse e dalle emissioni.
- Nell'analisi dei materiali che compongono un'automobile è stata posta attenzione alla loro provenienza, all'utilizzo di materie prime a rischio, e in particolare alla batteria, in quanto è la componente caratteristica "nuova" delle auto elettriche. È stata inoltre evidenziata l'esigenza di alleggerire i nuovi veicoli elettrici per aumentarne le prestazioni, menzionando alcune innovazioni sia a livello di materiali sia di riciclo delle batterie.

- La carbon footprint misura le emissioni di CO₂ dell'intera vita dell'automobile, strettamente collegate alla provenienza dell'energia necessaria nelle fasi di produzione, utilizzo e smaltimento. Nel calcolo abbiamo confrontato due automobili, una tradizionale a benzina e una elettrica.

Infine alla luce delle analisi fatte e delle informazioni trovate con le nostre ricerche abbiamo tentato di capire dal punto di vista dell'impatto ambientale quale tipologia di macchina inquinava meno.

2 Life Cycle Assessment

2.1 Introduzione

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una procedura standardizzata che permette di mettere in relazione un prodotto con le sue conseguenze ecologiche attraverso l'analisi di tutti i danni ambientali che si hanno nelle fasi di estrazione della materia prima, produzione, consumo e smaltimento del prodotto.

Per realizzare un LCA secondo le normative ISO della serie 14040 bisogna seguire quattro fasi (vedi figura 1):

1. definizione di ambito e obiettivo
2. analisi dell'inventario
3. stima dell'impatto
4. interpretazione

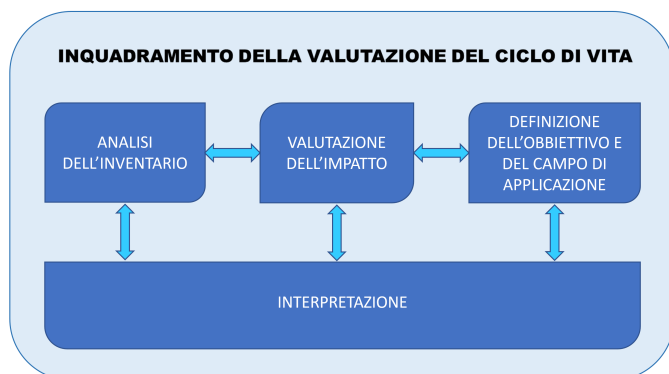


Figura 1: Schema LCA

2.2 Definizione di ambito e obiettivo

La definizione degli ambiti e degli obiettivi che saranno presi in considerazione è una fase fondamentale per decidere il livello di approfondimento del lavoro, in cui si esplicitano:

- i confini del sistema, che comprendono aspetti temporali e spaziali (il contesto) oltre che pratici e tecnici. Vanno quindi esplicitati i dati necessari all'indagine (di cui bisogna indicare disponibilità, qualità e tipologia) e i mezzi e le procedure utilizzabili per raggiungere l'obiettivo;
- parametri che saranno presi in considerazione
- interessi specifici e scopo dell'analisi
- gruppi di persone a cui è indirizzata l'indagine
- domande per cui l'LCA può essere preso in considerazione
- eventuali collegamenti con altre analisi appartenenti a diversi ambiti

Per quanto riguarda i confini del sistema bisogna tenere conto di tre aspetti fondamentali:

1. definizione dei limiti del sistema: si limitano i dati ad un campo d'indagine specifico, tralasciando quelli che influenzano in maniera trascurabile il lavoro e il cui contributo è inferiore ad una soglia minima stabilita a priori.
2. definizione delle procedure di allocazione e ripartizione dei prodotti accoppiati (sostanze secondarie prodotte che possono essere utilizzate in altre fasi della produzione; i rifiuti non rientrano in questa categoria).
3. definizione delle funzioni o benefici dei sistemi esaminati e delle loro unità funzionali: si dichiara la quantità di materia per cui verranno studiati gli effetti ambientali in modo da permettere il confronto dell'oggetto dell'indagine con altri simili.

2.3 Analisi dell'inventario

Nell'analisi dell'inventario, i flussi di materiali ed energia devono essere descritti quantitativamente e registrati in dettaglio, considerando l'intera vita del prodotto da esaminare. Il risultato dell'inventario è la stesura di una **tabella d'inventario** che mostra tutti gli usi delle risorse, le emissioni associate all'unità funzionale, comprese, ad esempio, tutte le sostanze e i composti chimici utilizzati.

Per descrivere tali flussi, vengono utilizzati i due principi fondamentali della fisica:

- principio di conservazione della massa
- principio di conservazione dell'energia

In un primo momento vengono determinati i confini del sistema, affinché si abbia un supporto per unire tutti i dati. Successivamente, per tutti i processi inclusi nel confine del sistema è necessario raccogliere i dati relativi a:

- flussi elementari in ingresso e in uscita (risorse ed emissioni)
- flussi di prodotto in ingresso e in uscita (beni e servizi)
- flussi di rifiuti (acque reflue, rifiuti solidi e liquidi)

Si ottiene quindi un diagramma di flusso che è un modello, seppur approssimato, della realtà e che rappresenta, nel modo più fedele possibile, gli scambi tra i singoli processi all'interno del confine del sistema. Si calcolano quindi i risultati dell'analisi di inventario, ovvero la combinazione di tutti gli input e gli output. Infine, tutti i flussi di materiale ed energia che sorpassano i confini in precedenza stabiliti, vengono annotati quantitativamente (come unità di misura si usano quelle impiegate nel Sistema Internazionale (SI)), riferendosi sempre all'unità funzionale.

2.4 Stima dell'impatto ambientale

Lo scopo della stima dell'impatto ambientale è valutare, tenendo conto di specifici parametri

ambientali, i flussi di materiale e di energia calcolati nell'analisi dell'inventario. Questa stima serve quindi ad analizzare e quantificare i possibili effetti ambientali e permette di valutarli. Le principali categorie di impatto da considerare con le rispettive unità di misura sono:

- **Riscaldamento globale** (GWP - $\text{kgCO}_2\text{-eq}$)
- **Riduzione dell'ozono presente nella stratosfera** (ODP - kgCFC-11-eq)
- **Formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera** (POCP - kg ethene-eq): Reazione di composti specifici, come ossidi di azoto e composti organici volatili, con l'ossigeno e con le specie chimiche già presenti nell'aria. Queste reazioni danno origine all'ozono e ad altri prodotti dello smog fotochimico.
- **Eutrofizzazione** (NP- $\text{kgPO}_4^{3-}\text{-eq}$): Fenomeno di arricchimento delle sostanze nutritive in laghi, stagni e, in genere, corpi idrici a debole ricambio; è dovuto all'erosione dei fertilizzanti usati nella coltivazione delle terre circostanti o all'inquinamento organico prodotto dalle attività umane o a prodotti di rifiuto industriali. Provoca le cosiddette fioriture del fitoplancton che, abbassando il tasso di ossigeno, rendono l'ambiente inadatto per altre specie (per es., pesci).
- **Acidificazione** (AP $\text{kgSO}_2\text{-eq}$): L'acidificazione degli oceani è il nome dato alla decrescita del valore del pH oceanico, causato dalla assunzione di anidride carbonica di origine antropica dall'atmosfera. Circa un quarto della CO_2 presente nell'atmosfera va a finire negli oceani dove si trasforma in acido carbonico (3CO_2).
- **Tossicità per l'uomo** (HTP - 1,4-DCB-eq)
- **Eco-tossicità** (ETP -1,4-DCB-eq): L'ecotossicologia valuta gli effetti tossici degli agenti chimici e fisici sugli organismi viventi, riuniti in comunità all'interno di definiti ecosistemi; essa comprende anche lo studio delle

modalità di diffusione di questi agenti e le loro interazioni con l'ambiente.

• Utilizzo del territorio (m²)

Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente e si differenziano in base alla collocazione spaziale, ovvero se gli effetti sono globali, regionali o locali. Attenendosi alla norma ISO 14044 (2006), la valutazione dell'impatto ambientale è formata da due fasi obbligatorie, la classificazione e la caratterizzazione, e tre fasi opzionali, la normalizzazione, il raggruppamento e la pesatura. Nella fase di classificazione ogni flusso di materiale ottenuto nell'analisi dell'inventario viene assegnato ad una o più categorie di impatto, in base agli effetti che ha sull'ambiente. Durante la fase di caratterizzazione si calcola il potenziale d'impatto, che rappresenta la valutazione quantitativa di un possibile impatto ambientale. Questo procedimento viene svolto per ogni categoria di impatto e i diversi risultati non sempre possono essere direttamente confrontabili fra loro. La fase di normalizzazione consiste nell'esprimere i valori ottenuti nella fase precedente in percentuale rispetto ad un altro valore di riferimento. In questo modo i dati possono essere confrontati fra loro più facilmente. Durante la fase di raggruppamento i vari risultati vengono ordinati tenendo conto del loro impatto, del livello di priorità o di un altro fattore scelto personalmente. La fase di pesatura prevede che gli impatti potenziali relativi a ogni categoria di impatto vengano moltiplicati per un fattore di pesatura, al fine di attribuire un peso a ciascuna categoria. Le modalità di calcolo sono molte e sono collegate a scelte personali che possono quindi portare a risultati molto diversi.

2.5 Interpretazione

L'obiettivo della fase di interpretazione è l'analisi dei risultati ottenuti, ovvero la spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che pongono. I risultati dell'analisi dell'inventario e sulla stima dell'impatto ambientale, devono essere definiti e verificati in base alla loro completezza, sensibilità e consistenza. Solo richiamando in questo passaggio le assunzioni fatte nella fase di definizione dell'obiettivo e dell'ambito dell'a-

nalisi, è possibile trarre delle conclusioni e fornire delle raccomandazioni.

2.6 Il nostro piccolo LCA

Non avendo a disposizione i mezzi per effettuare tutte le procedure previste per la realizzazione di un LCA completo descritte sopra, ci siamo focalizzati sull'analisi dell'inventario. In particolare abbiamo condotto delle ricerche sui materiali con cui vengono costruite le automobili e sulla carbon footprint.

3 Materiali

3.1 Introduzione

In questo capitolo vengono analizzate le caratteristiche dei materiali utilizzati nei veicoli elettrici e nei veicoli tradizionali a benzina o diesel. Studiando le differenze fra questi modelli si osserveranno alcune problematiche, ad esempio il peso maggiore dell'auto elettrica per la presenza della batteria e le soluzioni che le case automobilistiche hanno adottato per alleggerire i veicoli, aumentare le prestazioni e ridurre le emissioni (vedi alcuni esempi in tabella 1). Nel seguente capitolo vengono brevemente illustrate anche le tipologie di batterie che si possono trovare nei veicoli, le criticità di alcuni materiali e dei nuovi componenti delle moderne vetture.

Diventa pertanto un passaggio chiave per migliorare le prestazioni e per ridurre le emissioni di energia incorporata l'alleggerimento dei veicoli elettrici. Per alleggerire i veicoli elettrici è necessario iniziare ad utilizzare materiali più leggeri e sostituire i componenti della batteria con metalli meno pesanti. Nel seguente capitolo vengono brevemente illustrati i materiali principali che si trovano in un'auto, le tipologie di batteria che si possono trovare, quali sono le criticità di alcuni materiali, in particolare di quelle che costituiscono la batteria e di altri componenti del veicolo introdotti nei nuovi mezzi, soprattutto elettrici.

Tabella 1: Confronto tra modelli

MODELLO	Massa (kg)	Potenza massima
Opel Corsa-e	1455	100 kW (136 CV)
Opel Corsa GS Line	1158	96 kW (131 CV)
Renault Nuova Twingo Electric	1037	60 kW (81CV)
Renault Nuova Twingo	865	48 kW (65CV)
FIAT 500 Electric	1290	70 kW (95CV)
FIAT 500	900	51 kW (69CV)

3.2 Materiali utilizzati in un'auto

I materiali principalmente utilizzati nella costruzione di un'automobile negli ultimi anni sono i seguenti:

- **Leghe di ferro: acciai e acciai legati**

L'acciaio è una lega composta da ferro e carbonio in cui la percentuale di carbonio non è superiore al 2,06%. Sono presenti anche elementi leganti come manganese, silicio, nichel, cromo, titanio, rame e alluminio. È un materiale resiliente, economico, modulabile nelle caratteristiche meccaniche e facile da lavorare. Con questo materiale si possono realizzare dalle lamiere per la carrozzeria, ai cerchi, ai componenti strutturali di telaio e sospensioni. Ad esempio Fiat dichiara l'uso di acciai altoresistenziali, cioè acciai con minor percentuale di carbonio ma composti da silicio, fosforo, zolfo, alluminio, titanio e niobio, gli ultimi due presenti anche nella lista dei Critical Raw Material.

La ghisa è una lega di ferro e carbonio (superiore al 2,06%) come l'acciaio, si differenzia da quest'ultimo per il suo comportamen-

to fragile. Offre un comportamento molto più rigido e lavora meglio ad alta temperatura; per questo viene utilizzata nella realizzazione di componenti di motore e trasmissione e nei freni.

- **Leghe di alluminio**

L'alluminio può sostituire, in dipendenza dal tipo di lega, sia l'acciaio in telaio e carrozzeria che la ghisa nei motori. Viene spesso adottato quando si cercano maggiori prestazioni in quanto è più leggero e più costoso dell'acciaio. È anche meno resistente però, per questo motivo il suo impiego deve essere ben valutato in quanto un pezzo in alluminio rispetto a uno in acciaio dev'essere più grande.

- **Leghe di magnesio**

Le leghe di magnesio hanno il migliore rapporto resistenza-peso tra tutti i metalli di più comune uso strutturale, un'eccezionale stabilità dimensionale e alta resistenza a impatto e ad ammaccature; per la loro bassa inerzia rappresentano inoltre un'ottima scelta per quelle parti meccaniche che subiscono frequenti e improvvisi cambi di direzione ad alta velocità. Recentemente il progresso fatto nello studio delle leghe di alluminio, insieme alla maggiore diffusione dei compositi, le hanno però rese poco conveniente in termini di costi di produzione relegandole ad un utilizzo di nicchia in favore di altri materiali. Il magnesio fa parte dei Critical Raw Materials.

- **Materie plastiche e loro leghe, anche rinforzate**

I materiali plastici presenti in maggiori quantità nelle automobili sono poliuretano, che rappresenta circa il 19% in peso di tutta la plastica; polipropilene (15% in peso), polietilene, poliestere, PVC (polivinilcloruro), e ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene). Componenti in plastica sono il paraurti, ma anche le luci hanno delle coperture in plastica, il cruscotto, le cinture di sicurezza, l'airbag, la tappezzeria ed altri elementi.

- **Resine termoindurenti con fibra di vetro o carbonio**

La vetroresina è una plastica rinforzata con vetro, usata in particolare nella carrozzeria. Grazie alla sua leggerezza e alla semplicità di lavorazione oggi ci sono auto con la carrozzeria quasi interamente realizzata in vetroresina.

La fibra di carbonio è un materiale molto sottile utilizzato in genere nella realizzazione di una grande varietà di “materiali compositi”, ovvero costituiti da due o più materiali, che in questo caso sono le fibre di carbonio e una cosiddetta matrice, in genere di resina la cui funzione è quella di tenere in “posa” le fibre resistenti, di proteggere le fibre ed inoltre di mantenere la forma del manufatto composito. Tra i vantaggi di questo materiale ci sono l’elevata resistenza meccanica, la bassa densità, l’elevato isolamento termico, la resistenza a variazioni di temperatura mentre lo svantaggio principale è il fatto che il materiale presenta una spiccata anisotropia, ovvero valore di una grandezza fisica come ad esempio la resistenza alla rottura, non è uguale in tutte le direzioni della sostanza. Inoltre il processo di lavorazione, molto elaborato, determina un costo elevato per il carbonio, che attualmente viene utilizzato solo su veicoli di alta gamma. Le applicazioni più frequenti riguardano prevalentemente la carrozzeria, i componenti aerodinamici, gli inserti decorativi per gli interni e i freni.

3.3 Altri componenti nell’auto elettrica

Un altro importante aspetto da tenere presente riguardo all’inquinamento prodotto da un’auto è sicuramente il particolato, dannoso per l’ambiente, emesso dalle pastiglie dei freni. Le auto elettriche moderne adottano un sistema di frenata piuttosto innovativo nel sistema automobilistico; la frenata rigenerativa. Semplificando la descrizione di questo processo, la frenata rigenerativa si attiva quando viene rilasciato il peda-

le dell’acceleratore, così facendo il motore va in qualche modo ad “invertire” il suo funzionamento e l’auto inizia a frenare, recuperando energia dal naturale moto delle ruote (energia che altrimenti andrebbe sprecata, come di fatto succede con le macchine tradizionali). In questo modo, visto che la frenata è generata dal motore stesso, si va ad usare molto meno il pedale del freno vero e proprio risparmiando sulle pastiglie, che quindi sono state innovate per un nuovo uso che la macchina ne fa. Queste pastiglie sono anche più ecosostenibili, per seguire il percorso intrapreso dall’immissione di auto elettriche sul mercato, ovvero quello di annullare l’inquinamento dovuto alle automobili. Infatti queste innovative pastiglie dei freni rilasciano molto meno particolato nocivo nell’ambiente.

Un esempio di questa nuova tecnologia sono le pastiglie freni Hella Pagid, nate dalla collaborazione tra TMD Fiction e Hella, prive di rame e forti nelle alte prestazioni. Anche ZF Aftermarket ha presentato la linea di pastiglie dei freni Electric Blue, che consente sia di ridurre il rumore, sia di eliminare l’emissione di particolato generato dalla polvere dei freni. Quest’ultimo aspetto è pericoloso per l’ambiente e per i bambini più piccoli. Secondo TRW, importante società statunitense di ingegneria nell’aerospazio e automotive, a dicembre 2018, il 97% delle auto elettriche montava queste pastiglie freni nel proprio sistema, quindi è evidente anche il continuo miglioramento delle auto elettriche, affinché quest’ultime siano completamente eco-friendly. Inoltre questa linea di pastiglie (Electric Blue) hanno ricevuto anche l’importante riconoscimento “Premio Innovazione” alla fiera internazionale Equip Auto a riprova di quanto le autovetture elettriche possano davvero contribuire a combattere l’inquinamento e a riprova che il settore è in continuo miglioramento per perseguire quest’obiettivo.

3.4 Batterie nelle auto

La batteria è un oggetto in grado di accumulare energia chimica e di rilasciare quest’energia sotto forma di elettricità. Sulle auto elettriche o ibride questa energia elettrica viene trasferita al motore elettrico responsabile del movimento del-

l'auto. Alla base del funzionamento della batteria c'è un processo chimico che genera un flusso di elettroni da una sostanza che li cede, tramite ossidazione, a una che li riceve, tramite riduzione. Questo flusso di elettroni, grazie a una struttura ordinata e a strati all'interno della batteria, si muove all'interno di una terza sostanza, chiamata elettrolita, che può essere liquida o solida, generando corrente continua.

- **Batterie al piombo**

Con questo nome ci si riferisce a quelle batterie definite “accumulatori al piombo acido”. Rappresentano il primo tipo di batterie ricaricabili e sono state realizzate per la prima volta nella seconda metà dell'800. L'anodo e il catodo sono immersi in una soluzione contenente acido solforico. Oggi solo mezzi non autorizzati alla circolazione su strada usano ancora batterie al piombo.

- **Batterie al nichel-metallo idruro**

Nelle batterie al nichel-metallo idruro (che viene abbreviato in NiMH) l'anodo è composto da una lega metallica, mentre il catodo è in nichel. Oggi sono state quasi completamente sostituite dalle batterie agli ioni di litio, perché più efficienti. Purtroppo con ricariche parziali si riduce progressivamente la capacità di ricarica e quindi anche l'autonomia della vettura. Rispetto ad altre batterie, però, quelle NiMH possono contare su un ciclo di vita abbastanza lungo anche di 8 o 10 anni.

- **Batterie agli ioni di litio**

Le batterie agli ioni di litio hanno un anodo in litio e un catodo in carbonio. Le batterie agli ioni di litio (spesso abbreviate in Li-ion) godono di una densità energetica molto elevata. Il che significa che batterie relativamente compatte e leggere generano maggiori quantità di energia elettrica rispetto ai tipi di batterie elencati in precedenza. Tra gli altri vantaggi c'è il fatto che possono essere ricaricate spesso e parzialmente senza perdere il loro potenziale. Tra i contro, però, si deve elencare la poca vita utile, al massimo

8 anni anche se non utilizzate. Infine, oltre ad essere altamente infiammabili, lavorano correttamente soltanto in un range ristretto di temperature che va da -10° a $+30^{\circ}$ C. Al di fuori di questa forbice si degradano velocemente.

- **Batterie allo stato solido**

Le batterie allo stato solido sfruttano una sostanza solida anziché liquida come elettrolita. Questa soluzione aumenta la densità energetica della batteria, incrementandone di conseguenza la capacità di generare energia rispetto alle dimensioni. Quindi l'auto può percorrere lo stesso numero di chilometri con batterie più piccole o con batterie meno cariche. Questo tipo di batterie è molto meno infiammabile.

- **Batterie a ricarica liquida**

Questa batteria si chiama Nessox ed è una batteria che si ricarica “facendo il pieno” proprio come su un'auto a benzina o a gasolio. La differenza è che il liquido utilizzato è quello utilizzato per avviare la produzione di energia elettrica.

Il tipo di batteria più comune nelle moderne auto elettriche è la batteria agli ioni di litio e ai polimeri di litio, per via della loro elevata densità energetica rispetto al loro peso.

3.5 Materiali nelle batterie al litio

Attualmente le batterie agli ioni di litio sono le più diffuse ed il motivo principale è che offrono prestazioni costanti nell'erogazione dell'energia e che non hanno l'“effetto memoria” (cioè la perdita di capacità nel tempo e di ricarica). La loro produzione dipende principalmente da materie prime, come litio, grafite, manganese, cobalto, nichel, rame, ferro e alluminio. Per il motore vengono invece utilizzati neodimio, disprosio e praseodimio.

Con il ritmo attuale la produzione annua di litio, per soddisfare il fabbisogno di batterie, supera circa i 3 milioni di tonnellate, cosa che in tempi recenti ha causato impennate dei prezzi. Utilizzare il litio come materia prima, quindi estrar-

lo, oggi è più semplice e conveniente che riciclarlo. Questo però potrebbe cambiare grazie allo sviluppo delle nuove tecnologie.

Le riserve di litio sono concentrate in pochi Paesi. I maggiori giacimenti sono situati sotto i laghi salati di Bolivia, Cile e Argentina. Il Sudamerica assicura oltre l'80% della produzione annua mondiale di litio; negli ultimi anni sono stati scoperti nuovi giacimenti in Africa e Asia.

La produzione applicata alle batterie e in particolare modo di quelle per auto, è situata in Asia, dove sono concentrate la maggior parte delle principali industrie specializzate, in modo particolare tra Giappone e Corea del Sud.

Accanto al litio, l'altro componente fondamentale è il cobalto (Critical Raw Material), un elemento indispensabile per determinare la capacità di accumulo di una batteria (basti pensare che in quelle dei nostri smartphone se ne trovano fino a 20 g, mentre in quelle per le auto elettriche si può arrivare a sfiorare i 15 kg). Il cobalto è un elemento più raro del litio e le riserve sono per lo più concentrate nei fondali degli oceani, infatti viene estratto in piccole quantità.

Disprosio, neodimio e praseodimio sono a forte rischio di reperibilità. Per quanto concerne l'industrializzazione, questa è invece nelle mani della Cina, che possiede il maggior numero di impianti per il raffinamento e la trasformazione. Alcune case automobilistiche stanno investendo per eliminare la dipendenza da queste tre ultime sostanze e dal cobalto.[28]

4 Valutazione di impatto ambientale: la Carbon footprint

4.1 Che cos'è la carbon footprint?

La carbon footprint è una misura che esprime in “CO₂ equivalente” il totale delle emissioni di gas ad effetto serra associate direttamente o indirettamente ad un prodotto, un'organizzazione o un servizio.

In conformità al Protocollo di Kyoto (accordo internazionale entrato in vigore il 16 febbraio 2005), i gas ad effetto serra da includere sono:

anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido d'azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFCs), esafluoruro di zolfo (SF₆) e perfluorocarburi (PFCs).

La tCO₂e (tonnellate di CO₂ equivalente) permette di esprimere l'effetto serra prodotto da questi gas in riferimento a quello prodotto dalla CO₂, considerato pari a 1 (ad esempio il metano ha un potenziale serra 25 volte superiore rispetto alla CO₂, e per questo una tonnellata di metano viene contabilizzata come 25 tonnellate di CO₂ equivalente). La misurazione della carbon footprint di un prodotto o di un processo richiede in particolare l'individuazione e la quantificazione dei consumi di materie prime e di energia nelle fasi selezionate del ciclo di vita dello stesso. Nel nostro caso è quindi necessario tenere conto delle emissioni di gas serra prodotte durante tutto il ciclo di vita dell'automobile per quantificare i carichi ambientali complessivi.

Le fasi che prenderemo in considerazione per i calcoli sono la produzione e l'utilizzo. Un discorso a parte va dedicato allo smaltimento dell'automobile, nello specifico allo smaltimento e/o al riciclo della batteria dell'auto elettrica.

4.2 Da dove proviene l'energia che alimenta un'auto elettrica?

La provenienza dell'energia che alimenta una macchina e impiegata nella produzione dei componenti elettrica è un aspetto fondamentale che la nostra analisi tiene in considerazione perchè il livello di emissioni dei veicoli elettrici varia a seconda di come viene prodotta l'elettricità. Un'automobile prodotta, alimentata e smaltita con elettricità proveniente da fonti rinnovabili ha minore impatto ambientale e contribuisce in minor misura all'emissione di CO₂ in atmosfera rispetto a un'automobile che utilizza energia prodotta con combustibili fossili.

Analisi situazione in Italia (anno 2018) - fonte dei dati Annuario Statistico 2018 - Ufficio statistico di Terna [9]

Nel 2018 la richiesta di energia elettrica è stata di 321,4 miliardi di kWh (sostanzialmente invariata rispetto all'anno precedente). L'86,3% della richiesta è stato soddisfatto da produzione nazionale, per un valore pari a 277,5 miliardi di kWh,

la restante quota di questo fabbisogno, il 13,7% corrispondente a 43,9 miliardi di kWh, dalle importazioni nette dall'estero (aumentate queste del 16,3% rispetto al 2017).

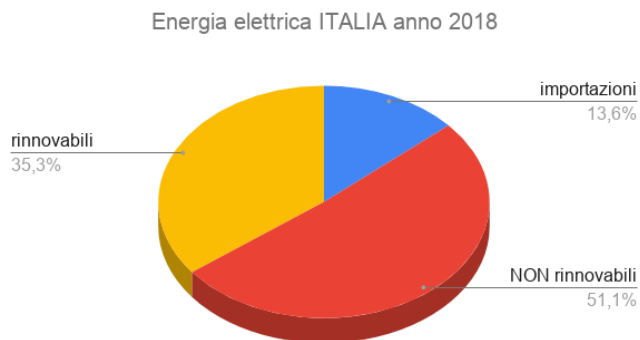


Figura 2: Fonte dei dati: Annuario Statistico 2018 - Ufficio statistico di Terna [9]

Nel 2018 la produzione nazionale netta ha raggiunto un valore di 279,8 miliardi di kWh, i dati confermano una sempre minore dipendenza del sistema italiano dalle fonti di energia non rinnovabili, con un incremento relativo alla fonte idroelettrica (+32,9%) ed un decremento del termoelettrico tradizionale (-8,0%) rispetto al 2017. La produzione da fonti rinnovabili (idrica, eolica, fotovoltaica e geotermica) è complessivamente aumentata del 10,1%, attestandosi a un valore di 114,4 miliardi di kWh e con una incidenza sul consumo interno lordo di energia elettrica ad un valore pari al 34,5% (nel 2017 era il 31,3%).

Volendo provare a confrontare in particolare i dati sulle fonti rinnovabili possiamo osservare alcuni dati di confronto con la situazione Europea, relativi allo stesso anno il 2018.

Questi dati sono pubblicati nel rapporto statistico "Sviluppo e diffusione delle fonti rinnovabili di energia in Italia e in Europa - anno 2018" pubblicato da GSE S.p.A.- Gruppo Servizi Gestore dei servizi energetici, società per azioni italiana, interamente controllata dal Ministero dell'economia e delle finanze. [10]

	Italia	Europa (UE28)
Quota FER sui consumi energetici totali	17,8%	18,0%
Quota FER nel settore trasporti	7,7%	8,1%
Quota FER nel settore elettrico	33,9%	32,1%
Quota FER nel settore termico	19,2%	19,7%

Figura 3: Fonte dei dati: Sviluppo e diffusione delle fonti rinnovabili di energia in Italia e in Europa - anno 2018" pubblicato da GSE S.p.A [10]

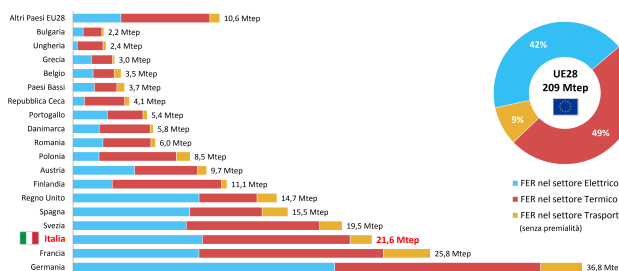


Figura 4: Dati espressi in Mtep (Megatone) megatonnellate di petrolio [10]

4.3 Scelta dei modelli da confrontare

La scelta del modello di auto è stata motivata in primo luogo dalla domanda della cittadina, che ha proposto un confronto tra la sua automobile con cui percorre circa 15 000 km/anno e un'automobile elettrica nuova. In secondo luogo abbiamo optato per una casa automobilistica italiana e in particolare per due modelli specifici di Fiat 500 con caratteristiche simili, in modo tale da poterli confrontare più facilmente.

Tabella 2: Le due auto a confronto

	FIAT 500 1.2 lounge (benzina) [12]	FIAT 500 la prima (elettrica) [13]
modello	berlina 3 porte 4 posti	berlina 3 porte 4 posti
Anno di immatricolazione	2007	2019

dimensioni	149x163x355 cm	153x168x363 cm
bagagliaio	185 185 dm^3	185 550 dm^3
passo	230 cm	232 cm
coppia	102 Nm	220 Nm
potenza omologata	51 kW (69 CV) 5500 giri/min	43 kW (58 CV)
potenza in picco / boost		87 kW (118 CV)
Peso lordo (compreso il conducente 75kg)	940 kg	1365 kg
serbatoio / batteria	35 L	42 kWh
Emissioni di CO ₂ durante l'utilizzo	115 grammi/km	-
autonomia dichiarata dalla casa	814 - 546 Km	313 Km
consumo medio dichiarato dalla casa	urbano: 6.4L/100km extraurbano: 4.3 L/100km misto: 5.1L/100km	14.4 kWh / 100 Km
velocità massima	160 Km/h	150 Km/h
accelerazione 0-100 km/h	12.9 sec.	9 sec.

Nella ricerca si è deciso di utilizzare una vettura a benzina e una elettrica di un modello molto simile, dal design esterno e dai materiali per gli interni uguali. Per questo motivo si terranno in considerazione solo le effettive emissioni causate dai fattori energetici e dal veicolo durante l'utilizzo, ipotizzando che il processo produttivo della carrozzeria e degli interni delle due vetture non presentino differenze significative, e quindi si possano semplificare i calcoli.

4.4 Analisi d'impatto delle due auto

Per calcolare le emissioni di CO₂ prodotte dalle due automobili prese in considerazione, si è deciso di utilizzare come riferimento l'indice “**Well-to-Wheel**” (tradotto “dal pozzo alla ruota”).

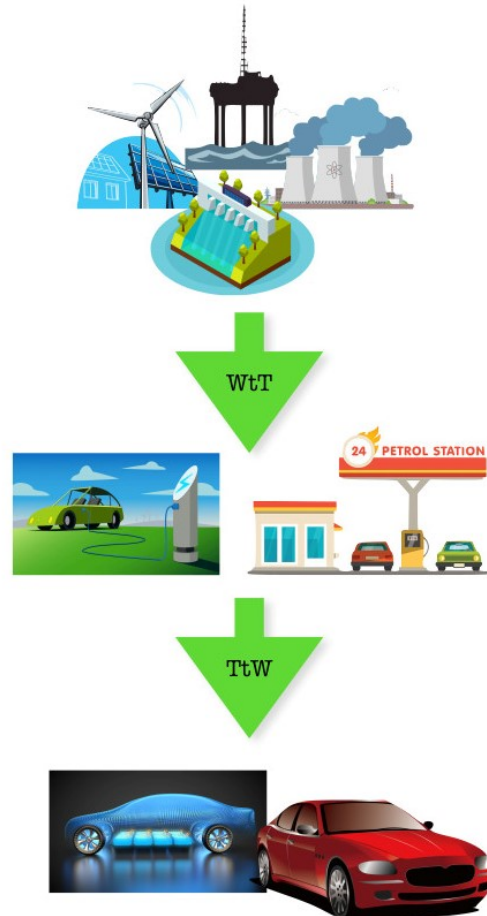


Figura 5: Schema indice WtW

Il principale obiettivo dell'indice WtW è quello di paragonare tra di loro differenti tecnologie propulsive, come il tradizionale e l'elettrico, carburanti e vettori energetici, offrendo un valido strumento di valutazione dell'impatto energetico delle tecnologie e dell'impatto ambientale causato dalle emissioni di gas serra. Il confronto avviene relazionando l'efficacia del mezzo, la prestazione della tecnologia che consente di ottenere il carburante e il vettore energetico utilizzato sia per trasportarlo che per stoccarlo. Il WtW non considera le emissioni riguardanti la produzione del veicolo e gli aspetti dello smaltimento.

Il WtW si suddivide in due sotto-indici: il **Well-to-Tank** (WtT, dal pozzo al serbatoio) e il **Tank-to-Wheel** (TtW, dal serbatoio alla ruota).

Il primo sotto-indice (WtT) si riferisce ai costi energetici e le emissioni connesse all'elaborazione della fonte primaria (il carburante), cioè estrazione, lavorazione e trasporto. Il secondo sotto-indice (TtW) rileva il totale di energia utilizzato per muovere il veicolo e si riferisce alle dirette emissioni durante l'utilizzo della vettura, che dipendono dall'unione tra carburante e tecnologia di propulsione in uso.

EMISSIONI MACCHINA A

BENZINA:

Fiat 500 1.2 Lounge

Per calcolare le emissioni di CO₂ dell'auto a benzina, presa in considerazione (Fiat 500 1.2 Lounge), bisogna tenere conto dell'indice sopra citato, il WtW.

Per ottenere il risultato bisogna sommare le emissioni di tipo WtT (500 gCO₂e/l) e quelle TtW (2.3 kgCO₂e/l).

Considerando che quest'auto presenta un consumo di carburante pari a 4.8 l/100 km e supponendo di percorrere annualmente 15 000 km, possiamo dire che le emissioni annuali di CO₂ di una Fiat 500 1.2 Lounge saranno 2200 kgCO₂/yr.

EMISSIONI AUTO ELETTRICA:

Fiat nuova 500 La Prima Berlina

Anche per calcolare le emissioni di CO₂ dell'auto elettrica si utilizza l'indice WTW. In questo modo è possibile fare una valutazione totale delle emissioni di CO₂ di tutto il ciclo di vita dell'automobile.

Le emissioni di gas serra di un veicolo elettrico sono strettamente condizionate dall'indice CI dello Stato da cui viene presa l'energia. Il CI, Carbon Intensity, cioè intensità di carbonio o intensità di emissione è il tasso di emissione di un dato inquinante rispetto all'intensità di una specifica attività, o di un processo di produzione. Il valore è espresso in gCO₂e/kWh.

Nel caso studiato il CI è il valore che indica le emissioni di anidride carbonica dovute alla

produzione dell'energia elettrica con cui viene ricaricato il veicolo. In Europa i valori di CI non sono uniformi, ma variano notevolmente a livello nazionale. Quindi non si può parlare di impatto ambientale di un veicolo elettrico in Europa senza fare delle generalizzazioni. In questo studio si è deciso di prendere l'Italia come paese di riferimento.

L'altro fattore di cui bisogna tenere conto sono le emissioni del BEV, Battery Electric Vehicle, cioè le emissioni di un veicolo a batteria. Il valore BEV indica le emissioni di gas serra per ogni chilometro percorso ed è espresso in gCO₂e/km.

Il veicolo soggetto del nostro studio è la "Fiat nuova 500 La Prima Berlin". Il suo consumo medio è di circa 14.4 kWh/100km, mentre la capacità della batteria è di 42 kWh. Come Paese di provenienza dell'energia elettrica abbiamo scelto l'Italia il cui CI attuale è di 402 gCO₂e/kWh.

Le Emissioni del BEV possono essere determinate moltiplicando tra loro la CI dell'elettricità in Italia e il consumo elettrico del BEV espresso in kWh /100km [riferimento?]:

$$\begin{aligned} \text{Emissioni del BEV} &= \\ 402 \text{ gCO}_2\text{e/kWh} \cdot 14.4\text{kWh}/100\text{km} &= \\ 5788.8 \text{ gCO}_2\text{e}/100\text{km} & \end{aligned}$$

Supponendo di percorrere annualmente 15 000 km si ha

$$\frac{5788.8 \text{ gCO}_2\text{e}}{100 \text{ km}} = \frac{X}{15000 \text{ km}} \text{ da cui}$$

$$X = \frac{5788.8 \text{ gCO}_2\text{e} \cdot 15000 \text{ km}}{100 \text{ km}}$$

che dà $X \simeq 868 \text{ kgCO}_2\text{e}$

Nel calcolo complessivo di emissioni del veicolo a batteria bisogna sommare le emissioni dirette, cioè dovute direttamente al veicolo durante la marcia, e indirette, cioè quelle dovute alla produzione dell'energia e alle perdite durante la trasmissione e la ricarica. Il valore stimato delle emissioni indirette è di 221 KgCO₂e. Facendo la somma si ottiene:

$$\begin{aligned} \text{Emissioni totali} &= (868 + 221) \text{ kgCO}_2\text{e} \\ &= 1089 \text{ KgCO}_2\text{e} \end{aligned}$$

Includendo dunque nel risultato la produzione dell'energia e le perdite durante la trasmissione e la ricarica, la quantità di emissioni risultanti conterà 1090 kgCO₂e/yr.

Come possiamo notare il numero è decisamente minore, meno della metà, delle emissioni causate dall'auto a benzina. Tuttavia il nostro studio non termina qui, infatti deve essere considerato un altro fattore riguardo alla macchina elettrica che determina un'elevata quantità di emissioni: il processo di produzione della batteria.

4.5 La questione della produzione della batteria

Nella fase di produzione dell'automobile la differenza fondamentale tra un'auto elettrica e un'auto a benzina è la batteria agli ioni di litio. Quindi il primo fattore inquinante di cui bisogna tener conto è proprio la produzione della batteria.

Le emissioni di CO₂ diretta ed equivalente per realizzare una batteria sono elevate. Riuscire a calcolare con esattezza le emissioni causate dalla sua produzione è un'impresa estremamente ardua, perché i fattori da considerare sono molti. In primis le componenti della batteria sono costituite da numerosi materiali differenti, ognuno dei quali richiede il proprio processo di raffinazione, in modo da poter essere utilizzato nell'impiego elettrochimico, e già questo rappresenta un vettore altamente inquinante. Inoltre anche qui dobbiamo considerare le emissioni dovute alla fonte energetica impiegata per alimentare i macchinari, e avendo un processo produttivo molto complesso, le fasi di produzione della batteria avvengono in luoghi e stati diversi, quindi risulta difficile individuare il mix energetico a cui fare riferimento. Infatti più è inquinante la produzione dell'energia, maggiore sarà l'impatto ambientale della batteria. Per esempio un Paese dove l'energia proviene principalmente da combustibili fossili produrrà più emissioni di un Paese dove prevalgono le fonti rinnovabili.

Un altro importante fattore di cui tener conto è che la batteria di una macchina elettrica non dura quanto il motore di una macchina tradizionale, questo vuol dire che dopo un certo numero di anni bisogna cambiare batteria o macchina ed entrambe le possibilità hanno un costo significativo per quanto riguarda le emissioni di CO₂.

Per il nostro studio abbiamo scelto di calcolare in modo approssimato (valore non riferito all'Italia) le emissioni dovute alla produzione della batteria affidandoci ad uno studio svedese del 2017 dal titolo “Mapping of lithium-ion batteries for vehicles”, a cura di Lisbeth Dahllöf, Mia Romare and Alexandra Wu. Lo studio ha stimato che la quantità di CO₂ emessa nella produzione della batteria agli ioni di litio è dai 150 ai 200 kg per ogni kWh di potenza. Il veicolo soggetto del nostro studio è dotato di una batteria con capacità 42kWh, quindi per la produzione della batteria la CO₂ emessa è pari a un valore compreso tra 6300 e 8400 Kg.

Uno studio più recente del 2019 ha stimato che la quantità di CO₂ emessa nella produzione della batteria agli ioni di litio è dai 61 ai 105 kg per ogni kWh di potenza. Utilizzando questo dato si ottiene che la CO₂ emessa nella produzione della batteria è pari a un valore compreso tra 2562 e 4410 kg.

Le ragioni di questo rapido miglioramento sono dovute sia ad un avanzamento a livello industriale e tecnologico, sia di un'efficienza migliorata nella fabbricazione di questi dispositivi, ma anche nel fatto che le aziende manifatturiere cercano di utilizzare sempre più fonti di energia rinnovabile.

4.6 La questione del riutilizzo e dello smaltimento della batteria

Concluso il ciclo di vita di una macchina elettrica uno dei componenti più difficili da trattare sono le batterie. Esse possono essere utilizzate con altre funzioni o essere riciclate.

Un nuovo utilizzo per le batterie sono i magazzini per lo stoccaggio di energia, infatti le batterie agli ioni di litio, finito il loro uso sulle macchine, mediamente mantengono circa il 75% - 80% della loro capacità originaria. Questo utilizzo potrebbe

risultare importante con l'aumento dell'energia da fonti rinnovabili. Grazie a questo utilizzo si calcola un aumento nella durata della vita di una batteria del 72% (10 anni) finendo il proprio ciclo di vita con una capacità di circa il 60% rispetto a quella iniziale, diminuendo l'inquinamento dei gas serra.

Con la crescita del mercato delle macchine elettriche il riciclo delle batterie sarà sempre più fattibile, cosa importante poiché la produzione delle batterie è responsabile per circa la metà delle emissioni del gas serra, mentre un riciclo dei materiali delle batterie avrebbe un'impronta del carbonio significativamente minore. Ad esempio l'alluminio riciclato produce il 95% di emissioni in meno rispetto ad estrarlo. Varie società stanno facendo ricerca e stanno pianificando metodi per riciclare queste batterie. Una delle maggiori difficoltà riscontrate è la loro grandezza.

Volendo citare un esempio la compagnia IVL (Istituto svedese di ricerca ambientale) ha presentato varie metodologie per implementare il riciclo delle batterie, concludendo che si risparmierebbero 1–2.5 kg di CO₂ per kg di batterie, traducendosi in 7%–17% delle emissioni per la produzione della batteria.

In ogni caso, essendo che alcuni metodi per il riciclo richiedono molta energia, dipenderà molto dal luogo e da come viene prodotta, per valutare l'efficacia di queste metodologie di riciclo e la diminuzione dell'impatto ambientale. Pertanto la scelta del metodo più efficace per il riciclo delle batterie è uno degli ambiti più complicati. Attualmente le batterie al litio in Europa finiscono in gran parte in Germania, dove ci sono oltre 15 operatori industriali in grado di recuperare correttamente i componenti e parte dei materiali. Molti dei processi applicati, però, non sono in grado di recuperare correttamente i materiali contenuti nella cosiddetta Black Mass, ossia Litio, Manganese, Cobalto e Nichel. Buona parte della Black Mass viene per questo inviata in Estremo Oriente: principalmente in Corea e nelle Filippine, qui con processi adeguati vengono estratti tutti i materiali. Le aziende cinesi, che sono nell'ordine delle decine, smaltiscono così tutte le batterie del mercato interno e partecipano, direttamente o indirettamente, alle attività economiche che si sviluppano

in altri paesi dell'area.

5 Conclusioni

L'obiettivo del lavoro era tentare di rispondere alla domanda di una cittadina, che richiedeva un confronto tra un'auto tradizionale e un'auto nuova elettrica. Per farlo avremmo dovuto effettuare un'analisi del ciclo di vita di un veicolo da quando viene prodotto in tutte le sue parti a quando viene smaltito. Nell'impossibilità di realizzare, con i mezzi e le conoscenze a nostra disposizione, questo tipo di analisi in modo completo, abbiamo basato il nostro lavoro su studi e pubblicazioni di altre persone o enti competenti nel settore e ci siamo concentrati solo su alcuni aspetti particolari del problema.

Abbiamo dunque voluto focalizzare l'attenzione sul descrivere le fasi essenziali per costruire un'analisi del ciclo di vita di un'auto (LCA), comprendere le problematiche legate ai materiali e realizzare un'analisi d'impatto specifica.

Lo studio di come si dovrebbe fare realizzare un LCA ci ha fatto capire come siano necessarie diverse fasi che prendono in considerazione molteplici fattori, di come siano richieste analisi diverse con passaggi rigorosi, tracciabili e chiari.

L'analisi dei materiali ci ha fatto comprendere come, nella realizzazione di un prodotto, ogni scelta vada ponderata, prediligendo il materiale ottimale per quell'elemento ma tenendo in considerazione la provenienza, la reperibilità, il costo economico ed eventuali impatti su ambiente e salute di quell'elemento. Ad esempio oggi la vera sfida per diffondere e promuovere l'auto elettrica, è la reperibilità di materiali come litio e cobalto, o di come poterli riciclare o riutilizzare.

Nel calcolo delle emissioni abbiamo tenuto conto della carbon footprint e della provenienza dell'energia con cui è alimentata l'auto elettrica, trascurando altre categorie di impatto. Per esempio non abbiamo tenuto conto delle sostanze inquinanti che vengono emesse durante la circolazione del veicolo dovute all'usura dei copertoni e delle pastiglie dei freni.

Tenendo presente i limiti della nostra analisi si possono confrontare le emissioni di una macchina elettrica e una macchina a benzina.

Confronto emissioni

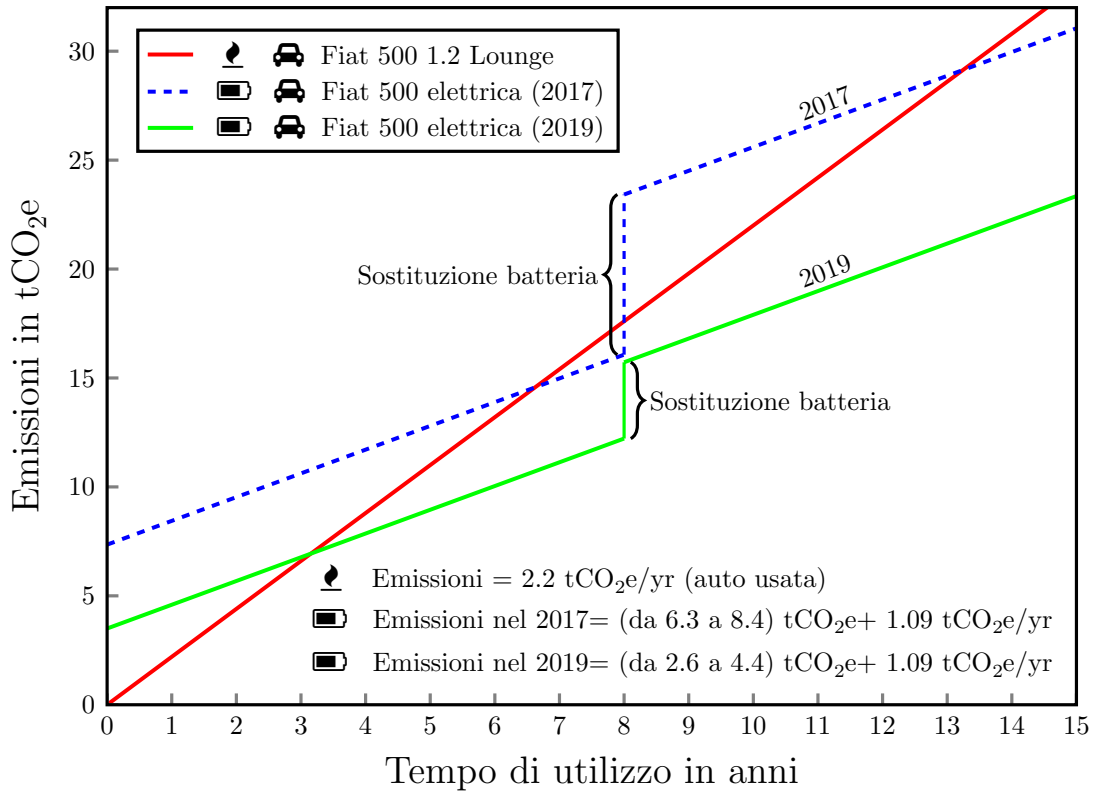


Figura 6: previsione delle emissioni nel tempo; confronto tra motore termico già in possesso e motore elettrico

In Figura 6 abbiamo provato a sintetizzare i nostri risultati. Per la macchina tradizionale, che come dichiarato nella domanda della cittadina è già in uso, non abbiamo considerato il costo di produzione ma solo le emissioni di CO₂ durante l'utilizzo. Nel caso invece della macchina elettrica, che viene acquistata, abbiamo considerato anche la produzione, che è la parte della vita della macchina nella quale viene emessa la maggiore quantità di CO₂, soprattutto per quanto riguarda la batteria. Oltretutto va considerato che quest'ultima dopo circa 8 anni (o un totale di di circa 160.000 Km) va sostituita, pertanto con un ulteriore incremento di quantità di CO₂.

Nonostante questo il grafico mostra che nel tempo la macchina elettrica emette meno CO₂, anche se bisogna tener conto della provenienza dell'energia con la quale viene ricaricata. I dati mostrano che anche nel caso di un mix di elettricità ancora dominato dalle centrali elettriche convenzionali (in questo caso l'Italia), le emissioni aggiuntive per la produzione della batteria so-

no compensate dalle emissioni più basse durante il funzionamento. La macchina elettrica sarebbe ancor più conveniente se il mix energetico fosse completamente, o almeno per la maggior parte, dominato da fonti rinnovabili.

Infine si può sottolineare come riguardo allo smaltimento dei materiali, in particolare delle batterie, in questi ultimi anni ci siano notevoli interessi a migliorare i processi, spinti anche dalle stesse case produttrici, e sembrerebbe plausibile pensare ad un più efficiente riutilizzo o riciclo di questi componenti nei prossimi anni.

Fonti principali

- [1] https://www.oc-praktikum.de/nop/it/articles/pdf/LCAMethod_it.pdf
- [2] <https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/>

- [3] <https://www.arpae.it/motap/ozono/ozono.htm>
- [4] <https://www.treccani.it/enciclopedia/eutrofizzazione/>
- [5] https://it.wikipedia.org/wiki/Acidificazione_degli_oceani
- [6] https://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/educazione-ambientale/coe/Monografia_ecotossicologia.pdf
- [7] https://it.wikipedia.org/wiki/Analisi_del_ciclo_di_vita
- [8] http://www.dichep.unige.it/old_site/consulenza_ambientale/lca-fasi.htm
- [9] www.terna.it
Statistiche - Terna spa: DATI STATISTICI SULL'ENERGIA ELETTRICA IN ITALIA -Terna S.p.A. e Terna Group
- [10] www.gse.it
Sviluppo e diffusione delle fonti rinnovabili in Italia e in Europa 2018 - GSE S.p.A
- [11] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>
Critical Raw Materials Resilience (documento della COMMISSIONE EUROPEA del 3/9/2020)
- [12] <https://www.quattroruote.it/auto/fiat/500-2007-2016/500-12-lounge-075147200707>
- [13] <https://www.quattroruote.it/auto/fiat/nuova-5002/500-la-prima-berlina-136932202008>
- [14] <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/dispacciamento/dati-esercizio>
- [15] <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche>
- [16] <https://www.nexxtlab.lu/co2-emissions-calculator/>
- [17] <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw>
- [18] <https://www.minambiente.it/pagina/cose-la-carbon-footprint>
- [19] <https://motori.virgilio.it/green/analisi-del-carburante-well-to-wheel-significato-misurazione-utilizzo/77080/>
- [20] <https://comunivirtuosi.org/wp-content/uploads/2017/11/Tesi-di-Lurea-Alessio-Taglietti.pdf>
- [21] <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313ST031218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>
- [22] https://www.ffe.de/attachments/article/856/Carbon_footprint_EV_FfE.pdf
- [23] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916307933#t0010>
- [24] <https://www.focus.it/tecnologia/motori/quanto-inquina-davvero-l-auto-elettrica>
- [25] <https://www.ucsusa.org/resources/ev-batteries#:~:text=Most%20electric%20vehicle%20batteries%20are,graphite%20and%20other%20primary%20components.>
- [26] <https://avtotachki.com/it/tehnicheskaya-stat-ya-kakie-materialy-ispol-zuyutsya-v-proizvodstve-kuzovov/#:~:text=Di%20questi%20cinque%20materiali%20per,magnesio%20e%20fibra%20di%20carbonio.>
- [27] <https://it.motor1.com/features/269206/materiali-batterie-auto-elettrica/>

- [28] <https://valori.it/litio-cobalto-co-lauto-elettrica-scatena-la-guerra-dei-metalli/>
- [29] <https://it.motor1.com/features/262506/come-fatta-e-quantitipi-batteria-esistono-auto-elettrica/>
- [30] <https://www.ucsusa.org/resources/afterlife-electric-car-batteries>
- [31] <http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2019/how-electric-cars-can-become-truly-green-once-and-for-all/>
- [32] [https://insideevs.it/reviews/450594/fiat-500-elettrica-piattaforma-batteria-motore-tecnica/#:~:text=L'elettrica%20pesa%20385%20kg,\(3%20cm%20in%20pi%C3%B9\).](https://insideevs.it/reviews/450594/fiat-500-elettrica-piattaforma-batteria-motore-tecnica/#:~:text=L'elettrica%20pesa%20385%20kg,(3%20cm%20in%20pi%C3%B9).)
- [33] <https://insideevs.it/news/402264/fiat-500-elettrica-mini-cooper-seconda-honda/>
- [34] <https://www.automobile.it/magazine/recensioni-modelli/fiat-500-elettrica-25589>
- [35] <https://www.youtube.com/watch?v=CWulQ1ZSE3c>
- [36] <https://www.greenstart.it/tutto-quello-che-manca-auto-elettrica-termica-confronto-11487>
- [37] <https://www.researchgate.net/search?q=inquinamento%20auto%20elettriche>
- [38] <https://copperalliance.org.uk/knowledge-base/education/education-resources/electric-motors/>
- [39] <http://www.trwautoservice.it/blog/pastiglie-freno-electric-blue-trw/>