UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Sviluppo di una metodologia predittiva semplificata per l'analisi ambientale ed economica del ciclo di vita di un veicolo elettrico

Development of a simplified predictive methodology for the environmental and economic analysis of the life cycle of an electric vehicle

Relatore:

Prof. Ing. **Michele Germani**

Tesi di Laurea di:

Luca Manuguerra

Correlatore:

Dott. Ing. **Marta Rossi**

Anno accademico 2020/2021

Sommario

INTRODUZIONE 3
1 La mobilità elettrica 4
1.1 Panoramica veicoli elettrici 4
1.1.1 Confronto motore elettrico e termico 5
1.1.2 Tipologie veicoli elettrici 7
1.2 Analisi componenti dei veicoli elettrici 9
1.2.1 Batteria 10
1.2.2 Inverter 19
1.2.3 Motore elettrico 19
1.2.4 KERS 20
2 Stato dell'arte LCA mobilità elettrica 21
2.1 Introduzione 21
2.2 Analisi LCA di veicoli elettrici 24
2.3 Analisi LCA batterie di veicoli elettrici 27
2.3.1 Impatto ambientale dei materiali di una batteria Li-Ion 28
2.3.2 Fine vita di una batteria Li-ion 29
2.3.3 Confronto risultati analisi LCA di diverse batterie Li-ion 33
3 Stato dell'arte LCC mobilità elettrica 35
3.1 Introduzione 35
3.2 Analisi LCC di veicoli elettrici 35
4 Metodologia predittiva semplificata per analisi ambientale di veicoli elettrici 40
4.1 Scopo 40
4.2 Linee guida modellazione 40
4.2.1 Modello Fase Material 42
4.2.2 Modello Fase d'uso 45
4.2.3 Modello Fase Manutenzione 59
4.2.4 Modello Fase Fine Vita 59
4.3 Software di modellazione 59
4.3.1 SimaPro 60
4.3.2 FASTSim 60
5 Metodologia predittiva semplificata per analisi economica di veicoli elettrici 62
5.1 Scopo 62

5.2 Linee guida modellazione 62
5.2.1 Modello Fase Material 62
5.2.2 Modello Fase di Utilizzo 63
5.2.3 Modello Fase Manutenzione 63
5.2.4 Modello Fase Fine Vita 64
6 Case study: Analisi LCA/LCC predittiva semplificata del ciclo di vita di una navetta elettrica 65
6.1 Progetto Emobots 65
6.2 Analisi LCA predittiva semplificata 66
6.2.1 Descrizione dell'analisi 66
6.2.2 Life Cycle Inventory (LCI) 67
6.2.3 Valutazione degli impatti (VdI) 75
6.2.4 Interpretazione dei risultati 87
6.3 Analisi LCC predittiva semplificata 98
6.3.1 Descrizione dell'analisi 98
6.3.2 Life Cycle Costing Inventory (LCCI) 98
6.3.3 Valutazione dei costi (VdC) 99
6.3.4 Interpretazione dei risultati 108
Conclusione 116
Appendice 118
Bibliografia 124

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni si sta assistendo ad un graduale passaggio dall'auto tradizionale (a gasolio, gas o benzina) all'alimentazione elettrica. Questo principalmente perché le auto elettriche offrono una mobilità pulita a emissioni zero con la possibilità di essere ricaricate mediante fonti rinnovabili oltre al fatto di avere una meccanica nettamente più semplice rispetto alle auto tradizionali che si traduce in una riduzione dei costi di manutenzione. I veicoli elettrici a batteria vengono indicati come una soluzione per ridurre le emissioni di gas a effetto serra e per diminuire la dipendenza dai combustibili fossili, dato che fanno affidamento su un vettore energetico, l'elettricità, che può aiutare a disaccoppiare il trasporto dal consumo di petrolio. Questi sono in genere indicati come veicoli a zero emissioni perché eliminano l'inquinamento dei fumi di scarico. Tuttavia, come con altre politiche di decarbonizzazione per il settore dei trasporti, è necessaria un'analisi del ciclo di vita per comprendere l'effettiva mitigazione raggiunta, poiché le emissioni non vengono eliminate, ma piuttosto spostate a monte nel ciclo del carburante (alla centrale elettrica) e potenzialmente aumentati nella catena di fornitura di produzione dei veicoli.

Il risparmio sui costi di esercizio, determinato dal minor prezzo dell'energia elettrica rispetto ai combustibili liquidi, non è ritenuto un incentivo sufficiente per l'adozione. Inoltre, le ulteriori incertezze della nuova tecnologia sono spesso responsabili di costi imprevisti durante il ciclo di vita del veicolo. Poiché la società moderna è diventata progressivamente avversa ai costi e al rischio, un vantaggio netto poco chiaro dell'adozione di veicoli elettrici ne ostacolerebbe ulteriormente la popolarità. Per quantificare sia i risparmi sui costi che i costi aggiuntivi attribuiti ai veicoli elettrici, è necessario condurre un'analisi del costo del ciclo di vita. Ciò consente di identificare i parametri di input chiave che rendono i veicoli elettrici meno competitivi rispetto ai motori a combustione interna convenzionali. Questo può quindi essere utilizzato per concentrare gli sforzi di ricerca futuri nel tentativo di migliorare l'efficienza di questi componenti e determinare l'entità degli interventi governativi necessari per consentire la fattibilità dei veicoli elettrici.

Lo scopo del presente lavoro è quello di proporre una metodologia predittiva semplificata per l'analisi ambientale ed economica del ciclo di vita di un veicolo elettrico, in modo tale da fornire in fase di progettazione al progettista un'indicazione dell'impatto ambientale ed economico.

Nello specifico, verrà applicato questo metodo ad una navetta elettrica con l'obiettivo di ottenere diversi risultati legati ai differenti scenari riguardo al carico, al ciclo guida e alla fonte energetica.

1 La mobilità elettrica

Una soluzione per ridurre le emissioni di gas a effetto serra e per diminuire la dipendenza dai combustibili fossili è stata individuata nei veicoli elettrici a batteria (Battery Electric Vehicle — BEV) anche perché caratterizzati dalla possibilità di essere ricaricati mediante fonti rinnovabili. Grazie alla capacità di eliminare l'inquinamento dei fumi di scarico i BEV vengono chiamati anche veicoli a zero emissioni (Zero Emission Vehicle — ZEV).

1.1 Panoramica veicoli elettrici

La prima auto elettrica nasce agli anni '30 dell'Ottocento, quando l'imprenditore scozzese Robert Anderson ideò la prima vera e propria carrozza senza cavalli: la prima carrozza elettrica (1832-1839). Negli stessi anni, più precisamente nel 1835, il Professore olandese Sibrandus Stratingh iniziò a progettare il primo modello di auto elettrica, di seguito realizzato dal suo collaboratore Cristopher Becker. In seguito ai tentativi di Anderson e Becker, tra gli anni '60 e '70 del XIX secolo, fu portata avanti una sperimentazione costante sulle batterie dei veicoli elettrici dagli ingegneri francesi Gaston Planté e Camille Faure: grazie a queste innovazioni, le nuove vetture elettriche realizzate al termine dell'Ottocento risultarono particolarmente competitive se paragonate ai modelli tradizionali a benzina o a vapore. Infatti, se le auto a vapore e a benzina mostravano diverse problematiche in merito all'avviamento del motore, al surriscaldamento e all'emissione eccessiva di fumi e rumori sgradevoli, le macchine elettriche risultavano molto più comode e pratiche grazie alla semplicità di guida e all'assenza di rumori. Uno dei più grandi traguardi raggiunti in questo periodo di ricerca fu ottenuto nel 1899 dal francese Camille Jenatzy che a bordo del suo veicolo elettrico, la "Jamais Contente", riuscì a superare la velocità di 100 km/h. Le nazioni maggiormente attive nella produzione e commercializzazione delle prime auto elettriche furono Inghilterra e Francia, seguite dagli Stati Uniti che nel 1900 registravano circa 1/3 delle auto circolanti a New York e Chicago ad alimentazione elettrica. Con l'avvento della Seconda Rivoluzione Industriale, lo sviluppo delle auto elettriche fu destinato a subire un brusco rallentamento, in favore delle vetture a benzina con motore a combustione interna. Durante gli anni del grande boom industriale le prestazioni delle auto a benzina furono migliorate in modo significativo portando questi veicoli a diventare leader di mercato in pochi anni. A partire dagli anni '20 del Novecento la continua innovazione tecnologica e la scoperta di nuovi giacimenti petroliferi (con conseguente abbassamento del prezzo della benzina) portò alla ribalta i veicoli a benzina. In seguito, le auto a benzina registrarono un ulteriore sviluppo positivo grazie all'introduzione del motore a scoppio e alla produzione in serie. Dopo questi sviluppi, le auto elettriche non riuscirono più a competere con le prestazioni di quelle a benzina e divennero veicoli "di nicchia": infatti, la macchina elettrica era utilizzata per lo più all'interno di settori particolari nei quali la velocità non risultava

prioritaria (carrelli elevatori, movimento nelle stazioni ferroviarie e veicoli per servizi porta a porta).

Figura 1. Manifesto pubblicitario del 1912 Detroit Electric

Le auto elettriche tornano sulla scena internazionale negli anni '60-'70 del Novecento grazie alle sempre più assidue battaglie dei movimenti ecologisti e grazie alla crisi petrolifera che portò all'aumento dei prezzi della benzina. Proprio per questo, le principali case automobilistiche internazionali iniziarono a lavorare al miglioramento delle vetture elettriche. Ma, il problema della scarsa autonomia delle batterie non permise alle macchine elettriche di mettere in discussione il primato di quelle a combustione interna. Anche negli anni '90 la mobilità elettrica risultò protagonista di molte iniziative in quanto la crisi petrolifera costante e il cambiamento climatico (causato anche dall'emissione eccessiva di CO2 dalle auto) furono temi particolarmente caldi. L'interesse per la mobilità sostenibile ed elettrica fu rinnovato in modo importante all'inizio degli anni 2000: infatti, durante il nuovo millennio le tematiche climatiche hanno ricoperto un ruolo sempre più centrale a causa dei danni causati all'ambiente da combustibili fossili e gas serra. Proprio per questo, la maggior parte delle case automobilistiche internazionali lavora costantemente allo sviluppo di nuove tecnologie in grado di ottimizzare i trasporti sostenibili. L'autonomia delle batterie delle auto elettriche viene quotidianamente testata e ottimizzata: infatti, negli ultimi anni, grazie alle batterie al litio, le auto elettriche risultano in grado di percorrere anche tragitti particolarmente ampi senza il bisogno di alcuna ricarica.

1.1.1 Confronto motore elettrico e termico

Nel corso degli ultimi anni si sta assistendo ad un graduale, seppur ancora lento, passaggio dall'auto tradizionale (a gasolio, gas o benzina) all'alimentazione elettrica. Un importante aspetto è il comfort legato alla silenziosità del motore. Questi vantaggi presentati a favore dell'auto elettrica portano ad affrontare un confronto con le auto tradizionali. I motori a

combustione interna hanno raggiunto elevati livelli di efficienza, ma un combustibile, qualunque sia la sua origine, oltre a fornire energia al motore, in uscita presenta i fumi di scarico che inquinano l'ambiente, ambiente che invece risulta maggiormente tutelato dall'elettrico. Elettricità e combustibili fossili sono due fonti energetiche molto diverse tra loro, che si confrontano su diversi parametri come: il consumo, le prestazioni energetiche, le capacità di accumulo di energia e il costo dell'energia per chilometro percorso. Come qualsiasi altro veicolo, un'auto elettrica accumula energia (in una batteria, mentre un veicolo a combustione interna lo fa in un serbatoio di carburante) e la utilizza per trasformarla in movimento. Il confronto è reso complesso dalle differenti unità di misura tra l'elettrico e i motori a combustione (km/l per i veicoli a combustione interna; kWh/km, per l'elettrico), mentre sono allineati sul valore assoluto della potenza, espressa sempre in kilowatt (kW). I combustibili fossili, dunque, hanno un rapporto molto efficiente tra energia sviluppata, massa e volume che occupano, infatti consentono di immagazzinare molta energia in uno spazio piccolo e relativamente leggero, motivo della grande diffusione nell'automotive. L'accumulo di elettricità, invece, è un processo molto più complesso, che richiede una batteria per immagazzinare l'energia, e attualmente la batteria agli ioni di litio rappresenta una tecnologia all'avanguardia. Un'auto elettrica, infatti, può immagazzinare meno energia rispetto ad un veicolo a combustione interna, ma gliene occorre anche meno per muoversi, in virtù della maggiore efficienza specifica. I motori a benzina più efficienti al mondo hanno un'efficienza energetica di circa il 40%, (45% sul diesel), trasformando cioè meno della metà dell'energia consumata in movimento, mentre il resto viene disperso in calore. Un motore elettrico, invece, ha un'efficienza più che doppia, superiore al 90%. Le auto a combustione interna immagazzinano, dunque, circa 8 volte più energia, ma consumano anche circa 3,5 volte di più. Di conseguenza, si nota che in media l'autonomia di veicolo a combustione interna è più del doppio di un veicolo elettrico. Per quello che riguarda il costo, l'elettrico risulta essere il più vantaggioso, considerando un costo a kWh di 0,2 euro per la ricarica domestica e di 0,45 per quella effettuata presso le colonnine pubbliche in corrente alternata, ricaricare completamente una vettura di medie-piccole dimensioni può costare tra 10 e 22,5 euro. Perché l'elettrico possa confermarsi come la propulsione più idonea alla mobilità futura però è necessario mettere in bilancio anche altri parametri, che vanno dalla attuale capillare diffusione dei punti rifornimento per carburanti termici rispetto al numero di colonnine pubbliche di ricarica, anche se queste sono in continuo aumento, alla considerazione dei tempi necessari a "fare il pieno" di energia elettrica, misurabile in ore. Riempire il serbatoio di benzina, gasolio, GPL, o metano, invece, richiede pochi minuti. Quello dell'autonomia e dei tempi di ricarica sono delle criticità oggetto di ricerca delle principali case automobilistiche, e attraverso i dati ottenuti dalle ultime ricerche si cerca di ottenere dei risultati sempre più confrontabili con quelli delle auto tradizionali.

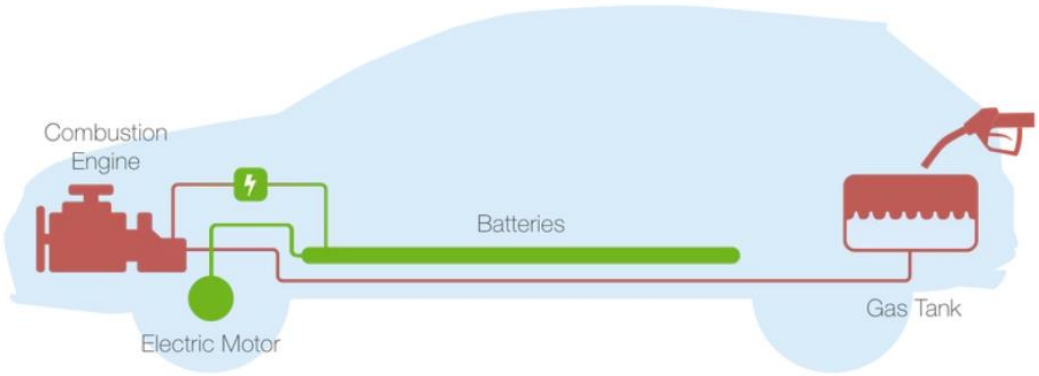


Figura 2. Confronto trazione elettrica/termica

1.1.2 Tipologie veicoli elettrici

I veicoli elettrici possono essere classificati in: veicoli ibridi elettrici (Hybrid Electric Vehicles — HEV), veicoli ibridi plug-in (Plug-in Hybrid Electric Vehicle — PHEV) e veicoli elettrici a batteria (Battery Electric Vehicle — BEV).

I veicoli ibridi elettrici sono dei veicoli a propulsione ibrida, cioè dotati di un sistema di propulsione a due o più componenti, in questo caso motore elettrico con motore termico, che lavorano in sinergia fra di loro. Il maggior vantaggio dei veicoli ibridi elettrici è l'eliminazione dei difetti insiti nella necessità di partenza da fermo, infatti i due propulsori sono adatti a coesistere in quanto hanno caratteristiche complementari: alle basse velocità è più efficiente l'elettrico, alle alte l'endotermico. Il loro duplice aspetto garantisce di poter sfruttare la silenziosità e il basso impatto ambientale dell'elettrico nelle strade urbane e utilizzare il termico nei tragitti extra-urbani. Esistono varie tipologie di veicoli ibridi che in base al grado di ibridazione, ovvero la potenza della trazione elettrica rispetto alla potenza totale generata e alla capacità del motore ibrido di immagazzinare energia, si classificano in: full hybrid (ibridazione piena), mild hybrid (ibridazione leggera) e minimal hybrid (ibridazione minima).

Figura 3. Veicolo ibrido elettrico

I veicoli ibridi plug-in sono un tipo di veicolo le cui batterie possono essere ricaricate collegandole a una fonte esterna di energia elettrica, anche senza l'ausilio del relativo motore a combustione interna. Tali veicoli condividono le caratteristiche delle soluzioni elettriche ibride tradizionali (HEV). I veicoli PHEV possono essere della tipologia di trasmissione in serie e parallela, differendo dagli HEV per la presenza del caricabatterie che, attraverso l'ausilio del BMS (Battery Management System), provvede alla corretta ricarica della batteria. Quindi mentre un veicolo HEV carica la batteria solo dal suo motore a combustione interna, un ibrido plug-in può ottenere da fonti esterne l'energia necessaria alla ricarica.

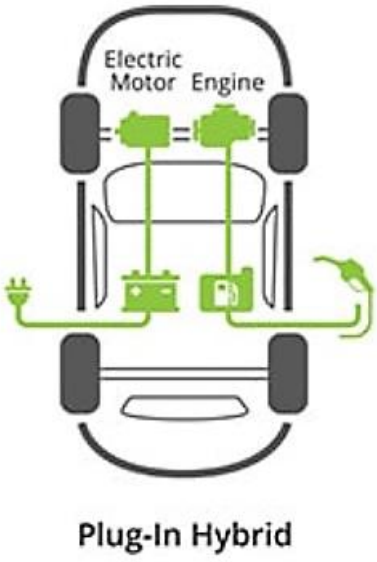


Figura 4. Veicolo ibrido Plug-in

I veicoli elettrici a batteria (BEV) sono veicoli con motore elettrico che utilizza come fonte di energia primaria l'energia chimica immagazzinata in una o più batterie ricaricabili e resa disponibile da queste al motore sotto forma di energia elettrica.

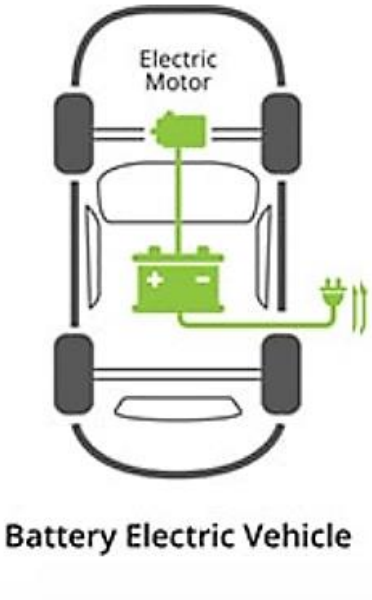


Figura 5. Veicoli elettrici a batteria

1.2 Analisi componenti dei veicoli elettrici

In questo capitolo verranno brevemente richiamati quelli che sono i principali componenti che caratterizzano le auto elettriche.

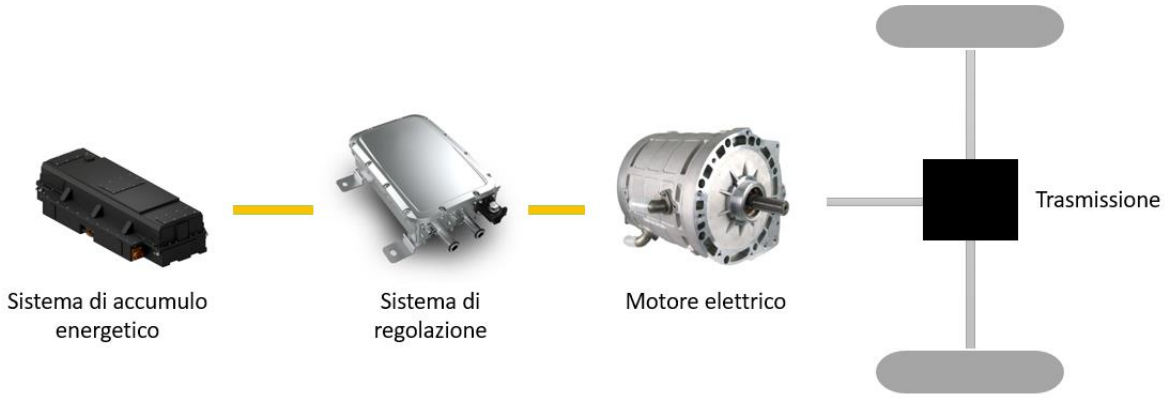


Figura 6. Componenti principali veicoli elettrici

1.2.1 Batteria

Una batteria per veicoli elettrici o batteria da trazione è una batteria utilizzata per alimentare la propulsione dei BEV. Le batterie dei veicoli sono generalmente batterie ricaricabili che differiscono dalle batterie di avviamento, illuminazione e accensione perché sono progettate per fornire energia per periodi di tempo prolungati. Le batterie di trazione devono essere progettate con una capacità di ampere-ora elevata e sono caratterizzate da un rapporto potenza-peso relativamente elevato: batterie più piccole e leggere riducono il peso del veicolo e ne migliorano le prestazioni. Rispetto ai carburanti liquidi, la maggior parte delle tecnologie di batteria attuali hanno un'energia specifica molto più bassa, e ciò influisce spesso sull'autonomia massima completamente elettrica dei veicoli.

I valori che caratterizzano una batteria sono:

- Tensione nominale: si esprime in Volt e indica il lavoro che può compiere l'unità di carica elettrica nel passare dal polo positivo a quello negativo.
- Capacità nominale: si esprime in Ah e rappresenta, in maniera semplificata, il numero di ampere che la batteria può erogare per un'ora di seguito.
- Scarica massima: si esprime in Ampere ed è la corrente massima che la batteria può erogare per pochi secondi.
- Tecnologia utilizzata: è indicata con sigle come Pb, Li, ecc.
- Misure geometriche: sono importanti quando l'alloggiamento, come nell'auto, ha una grandezza obbligata.

Quando una singola batteria ha caratteristiche insufficienti per l'utilizzo richiesto è necessario effettuare assemblaggi di più batterie. L'utilizzo di più batterie contemporaneamente si fa con un allestimento in serie o in parallelo. Connettendo opportunamente gli elementi si possono costruire pacchi di batterie adatti a una larga serie di applicazioni (Figura 7).

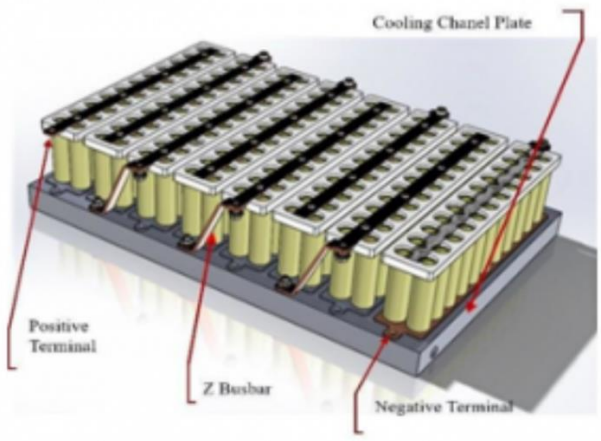


Figura 7. Sotto-moduli, costituiti da celle, collegati in serie in un pacco batteria

1.2.1.1 Pacco batteria

Un pacco di batterie è costituito da vari componenti: le celle elementari, un contenitore, un sistema elettronico di supervisione e controllo chiamato "Battery Management System" (BMS), fusibili, morsetti e cavi di connessione, un sistema di raffreddamento, un sistema di comunicazione dei dati. Di seguito evidenziamo i componenti più importanti:

- Cella elementare: per le batterie da autotrazione si usano in genere celle al litio-ione. Esistono altri tipi di celle sempre a base di litio.
- Cavi di connessione: sono di rame, possono essere cavi flessibili o piattine rigide. Servono a collegare tutte le celle.
- Cavi di segnale: servono a portare le misure di tensione, corrente e temperatura da ogni cella fino al BMS.
- Moduli principali e secondari del BMS: è l'elettronica del pacco. Effettua controlli per la sicurezza, per la conoscenza della carica residua, per l'ottimizzazione delle prestazioni.
- Cavi della corrente di trazione: cavi in rame di grosse dimensioni. Portano la corrente dalle batterie all'azionamento elettrico (inverter e motore).
- Interfaccia di comunicazione con il veicolo: le informazioni provenienti dalla batteria sono immesse nel sistema di comunicazione CAN del veicolo. Le tipiche informazioni inviate sono: quantità di carica disponibile, autonomia prevista, temperatura, allarmi vari.
- Misuratore di corrente: strumento per la misura e il controllo dell'erogazione di corrente.
- Misuratore dell'isolamento: strumento che verifica la sicurezza elettrica.
- Relè principale: è un interruttore automatico di manovra e di sicurezza. Separa le batterie dal resto della vettura.

Figura 8. Pacco batteria

1.2.1.2 Cella elementare

La cella è l'elemento costruttivo elementare delle batterie. È il dispositivo minimo che converte l'energia chimica, contenuta nei materiali attivi, direttamente in energia elettrica, mediante reazioni elettrochimiche di ossidoriduzione. Una cella comprende due piastre (elettrodi) che si caricano positivamente e negativamente, immerse in un liquido (elettrolito o anche elettrolita). Reazioni diverse avvengono su ognuna delle due piastre, sia in fase di carica che in fase di scarica.

La fase di carica è la fase durante la quale l'elettrodo positivo viene ossidato. Gli ioni Li+ sono sottratti dall'ossido di litio, passano attraverso l'elettrolita e la membrana e si collocano tra gli strati di grafite dell'elettrodo negativo con la reazione di riduzione di questo. La fase di scarica è la fase durante la quale avviene una ossidazione dell'elettrodo negativo. Gli ioni Li+ sono strappati da questo e migrano attraverso l'elettrolita, per installarsi nell'elettrodo positivo. Un numero equivalente di elettroni viaggia attraverso il circuito esterno producendo la corrente utile (per convenzione la corrente è intesa come flusso di cariche positive, per cui il verso è contrario a quello degli elettroni che sono carichi negativamente).

Durante la carica le reazioni convertono l'energia elettrica fornita dall'esterno in potenziale chimico. Il contrario durante la scarica. La cella presenta i seguenti componenti:

- L'anodo: durante la scarica l'anodo, polo negativo, fornisce elettroni al circuito esterno. Il litio si ossida. In genere è costituito per la maggior parte di grafite.
- Il catodo: durante la scarica il catodo, polo positivo, accetta elettroni dal circuito esterno. Il litio è soggetto alla reazione di riduzione. È composto da un ossido di litio. L'intera tipologia della cella prende il nome dal materiale usato per il catodo.
- L'elettrolita: è un conduttore di ioni (particella carica), ma un isolante per gli elettroni. Separa i due elettrodi e fornisce il mezzo per il trasferimento degli ioni tra anodo e catodo. Nelle batterie al litio l'elettrolita è un solvente inorganico contenente sali di litio. Un setto poroso separa elettricamente i due elettrodi ma permette il transito degli ioni da un elettrodo all'altro.

- Un elemento importante è il contenitore delle celle, il quale serve a tenere insieme i componenti, ma dalla sua scelta ne segue una netta caratterizzazione della cella.
- Prismatiche: un contenitore prismatico di alluminio o di acciaio sottile è tipico delle celle del tipo Li-ioni. La costruzione permette alta densità di energia, ottima dissipazione del calore, ottimo impacchettamento e sfruttamento dello spazio.
- Cilindriche: celle cilindriche di piccole dimensioni sono molto diffuse ed utilizzate nei pacchi batteria. Vengono spesso indicate con questa nomenclatura che dipende dalle

dimensioni: 18650, 26650, 38120, 38140, 40160, dove 18 sta per il diametro in mm e 65 la lunghezza, sempre in mm.

- A busta: le celle sottili a busta fanno il miglior uso dello spazio. Non hanno contenitore rigido, per cui anche il peso è molto ridotto. Possono essere costruite in varie forme, anche su ordinazione. Utilizzano la tecnologia Litio polimero; si stanno molto diffondendo come alternativa a quelle prismatiche, specialmente per le auto elettriche. L'elettrolita è un polimero, per cui non ci sono perdite di liquidi. Il raffreddamento è facile in virtù delle ampie superfici. Va comunque evidenziata la bassa resistenza meccanica, che richiede un sistema di impacchettamento idoneo.

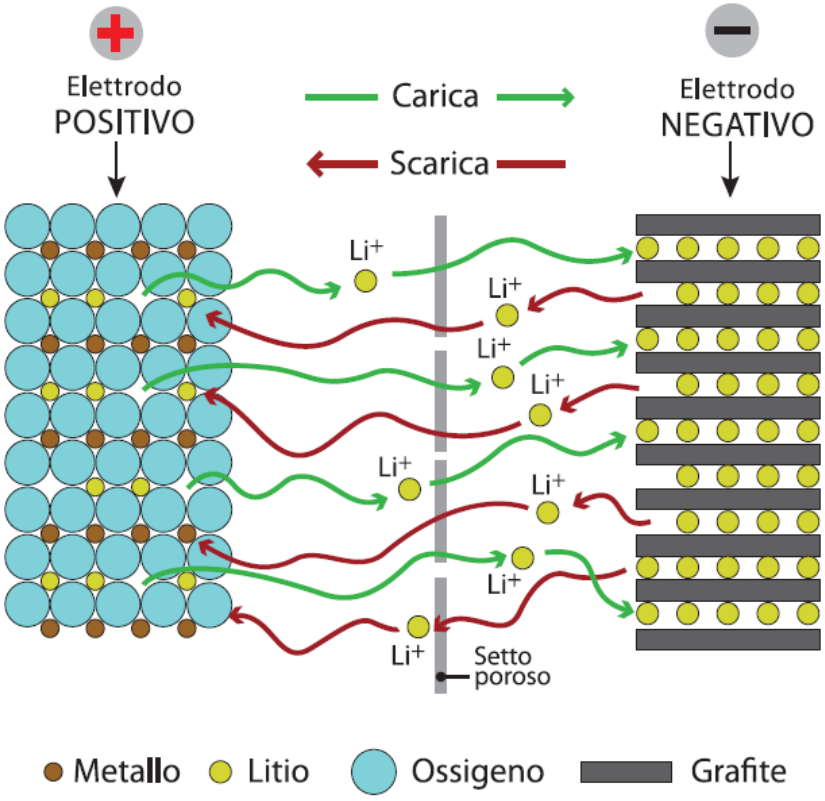


Figura 9. Schema di funzionamento della cella

1.2.1.2.1 Cella cilindrica

Le celle cilindriche sono estremamente diffuse in commercio perché sono facili da realizzare e da assemblare insieme, la loro struttura cilindrica può sopportare pressioni interne senza deformarsi e garantiscono un'elevata sicurezza durante il loro funzionamento. Rispetto alle altre celle, questa tipologia presenta una densità di energia molto elevata, una vita in termini di numero di cicli altrettanto elevata, inoltre sono economiche ma come svantaggio presentano capacità modeste (1,1÷5 Ah). Nel seguito si descrivono i componenti interni e i dispositivi di sicurezza, presenti all'interno della cella cilindrica.

L’elettrodo positivo (catodo) è costituito da un foglio di alluminio ricoperto da un determinato materiale. I materiali di rivestimento più usati in comune sono il litio-ossido di cobalto ($LiCoO_2$), litio-ossido di magnesio ($LiMnO_2$), litio- fosfato di ferro ($LiFePO_4$). L’elettrodo negativo (anodo) è invece costituito da un foglio di rame rivestito con un altro materiale. La grafite è uno dei materiali più usati come rivestimento. Al fine di evitare cortocircuiti interni, viene posto fra i due elettrodi uno strato poroso di plastica (separator). Questo strato permette grazie alla sua porosità, di far passare gli ioni di litio e allo stesso tempo impedisce il passaggio della corrente fra i due elettrodi.

Nella cella cilindrica sono presenti dei connettori, i quali essendo costituiti da materiale conduttivo, consentono il passaggio della corrente da un dispositivo all’altro.

- Terminale positivo: è un materiale conduttore che consente la connessione fra il terminale positivo della cella con quello del dispositivo ad esso collegato. La maggior parte di questi terminali è realizzata in acciaio inossidabile ed è sempre locata nella parte alta della cella cilindrica.
- Terminale negativo: è un materiale conduttore che connette insieme il terminale negativo della cella con quello del dispositivo ad esso collegato. Anche in questo caso il terminale è realizzato in acciaio inossidabile. Il terminale negativo è sempre locato nella parte bassa della cella.
- Tra i dispositivi di sicurezza, i quali sono fondamentali per l’utilizzo della cella cilindrica, dato che al suo interno sono presenti dei materiali con elevata densità energetica e inoltre l’elettrolita risulta essere infiammabile, menzioniamo il case, cioè il contenitore che protegge da urti e pressioni esterne, evitando danni e deformazioni.

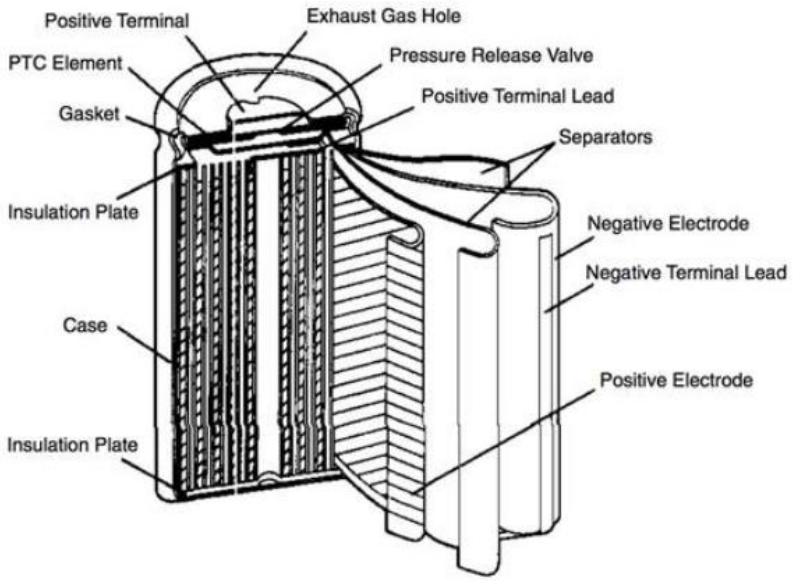


Figura 10. Struttura interna batteria cilindrica 1865

1.2.1.3 Chimica della cella

Le batterie attualmente utilizzate nei veicoli elettrici sono principalmente di 4 tipi:

- Nichel-Metallo Idruro (NiMH): sono l'evoluzione delle tradizionali batterie Nichel-Cadmio (Ni-Cd) impiegate in molti settori industriali nel formato stilo; una batteria NiMH ha una capacità di due o tre volte superiore ad una batteria NiCd di uguali dimensioni; hanno una buona capacità e velocità di ricarica.
- Piombo-gel: in questo tipo di batterie l'elettrolita non è acido allo stato liquido ma è gelatinoso e sono in grado di sopportare cicli di carica/scarica molto profondi; questi accumulatori sono esenti da manutenzione e privi di rischio di sversamento accidentale di acido.
- Litio-Ioni: sono le batterie più utilizzate in campo automobilistico, industriale, militare e aerospaziale; sono leggere, hanno un'alta capacità di carica, elevato numero di cicli, basso impatto sull'ambiente e alta potenza. Esse contengono un elettrolita infiammabile che può provocare esplosioni o incendi nel caso in cui queste venissero danneggiate o caricate in modo errato.
- Litio-Polimero: in questo caso le batterie hanno il vantaggio che il polimero solido non è infiammabile a differenza dell'accumulatore ione-litio; non hanno bisogno di contenitori in metallo quindi la batteria risulterà più leggera, esse hanno inoltre una densità energetica maggiore delle litio-ione e delle NiCd e NiMH.

1.2.1.3.1 Batteria Li-Ion

La tecnologia agli ioni di litio usa un anodo di grafite e vari componenti per il catodo. L'elettrolita è un sale di litio sciolto in un solvente organico anidro. Gli studi attuali si concentrano sulla struttura del catodo. La tecnologia dei primi modelli prevedeva il catodo in litio metallico. Questo era soggetto a una implicita instabilità chimica, durante la fase di ricarica poteva incorrere in surriscaldamenti che portavano alla fusione del litio e a una ossidazione veloce e incontrollabile. A seguito di questi inconvenienti la produzione di batterie si è concentrata sulla sostituzione del catodo a litio metallico con un catodo a litio non metallico, in particolare verso il catodo a ioni di litio dispersi in una matrice cristallina di un ossido stabile.

- Litio - Cobalto ($LiCoO_2$): è il tipo più diffuso per la costruzione del catodo. Ovviamente il cobalto utilizzato è l'isotopo non radioattivo. È tuttora usato per i computer portatili e per i cellulari. Soffre ancora di problemi di riscaldamento, come pure di qualche instabilità in caso di perforazione del contenitore. Per questi motivi è il meno adottato per la trazione elettrica.
- Litio-Ferro-Fosfato ($LiFePO_4$): possiede una stabilità termica superiore. Il litio fosfato è incombustibile e sotto corto circuito non si decompone. Permette una vita ciclica alta (2000-

3000 cicli). Queste batterie hanno energia più bassa di quelle Litio–Cobalto, ma potenza superiore. Sono comunque superiori per sicurezza, costo e tossicità.

- Litio-Ossido di Manganese ($LiMn_2O_4$ - LMO): offre una alta tensione di cella e stabilità termica, ma una energia un po' minore delle altre. Il costo è basso e i materiali non sono tossici. Buone prestazioni ad alta temperatura.
- Litio-Nichel-Cobalto-Manganese ($LiNi_xCo_yMn_zO_2$ - NCM): rappresentano un buon compromesso tra le varie caratteristiche delle tecnologie.
- Litio-Ossido di Titanio ($Li_4Ti_5O_{12}$ - LTO): queste celle rimpiazzano l'anodo di grafite con uno di titanato di litio. Questo è in genere usato in accoppiamento con un catodo a base di manganese. Offrono caratteristiche elettriche soddisfacenti ed evitano i pericoli di combustione della grafite.

1.2.1.4 Produzione di una Batteria Li-ion

La fabbricazione industriale su larga scala di una batteria litio-ione viene suddivisa in tre fasi: fabbricazione degli elettrodi, assemblaggio e finitura della cella. Per i dettagli dei vari passaggi verrà seguita la descrizione fornita dall'Università Tecnica di Aquisgrana in collaborazione con l'Associazione di Ingegneria Meccanica Tedesca (VDMA).

1.2.1.4.1 Fabbricazione degli elettrodi

Il primo step è la miscelazione dei materiali attivi degli elettrodi con leganti ed additivi: inizialmente si esegue una miscelazione a secco (dry mixing), per poi aggiungere il solvente (wet mixing). Solitamente, per la miscelazione vengono impiegati shear mixers, come i mixers planetari o le turbine Rushtone. I tempi di miscelazione vanno da 15 minuti a 5 ore, con temperature di lavoro tra 20° a 40°C. L'impasto ottenuto, approssimabile ad una sospensione colloidale, viene fatto rivestire su di un foglio di collettore di corrente (allumino/rame per catodo/anodo). Il rivestitore maggiormente impiegato è lo slot-die coater e si opera con una velocità di 35-80 m/min. Alla fine del processo, il rivestimento è controllato tramite calibrazione laser e radiografia a raggi X. Il foglio rivestito va successivamente essiccato per allontanare il solvente di miscelazione. Il processo di essiccamento avviene in continuo, con il foglio di rivestito trasportato attraverso una serie di forni a diversa temperatura (50°-60°C) tramite rulli o galleggiamento su flussi di aria calda. In seguito, dopo aver scaricato staticamente l'elettrodo, si passa alla fase di calandratura, dove il foglio rivestito viene pressato tramite una coppia di rulli rotanti per ottenere lo spessore desiderato, il quale viene controllato a fine processo tramite calibrazione laser. La compressione dell'elettrodo serve inoltre a ridurre la perdita di capacità ed a diminuire la resistenza ohmica. Eseguita la calandratura, i fogli vengono tagliati tramite lamine rotanti in fogli più piccoli, chiamati rotoli "figlia". Quest'ultimi vengono poi puliti con

spazzole e getti d'aria, arrotolati e posti per 12-30 ore in forni sottovuoto tra i 50-150°C per un'ultima essiccazione.

1.2.1.4.2 Assemblaggio della cella

Questa fase del processo dipende dalla geometria della cella. Nel caso delle celle "a sacchetto", i rotoli "figlia" vengono separati in lamine sottili tramite punzoni taglienti della forma desiderata. Le lamine vengono poi impilate all'interno del separatore, il quale è un lungo nastro, a cui viene data la forma di Z e nelle cui anse vengono inserite le lamine di elettrodo (Z-folding). Per una singola cella sono necessari all'incirca due minuti. Successivamente, le estremità dei collettori di corrente vengono saldate in due linguette (i poli della batteria) e la cella viene posta nel rivestimento, solitamente un film di alluminio, poliammidi o polipropilene. Il rivestimento viene sigillato solo su tre lati, poiché dal quarto lato verrà inserito l'elettrolita. Il riempimento della cella con l'elettrolita avviene con un ago per dosaggi ad alta precisione e, tramite l'applicazione di basse pressioni con gas inerte e/o sottovuoto, si sfrutta la capillarità dell'elettrolita per un riempimento omogeneo della cella. Nel caso di celle prismatiche e cilindriche, invece, i rotoli "figlia" non vengono tagliati, ma avvolti assieme a due nastri di separatore attorno ad un mandrino (celle prismatiche) o un perno centrale (celle cilindriche). Le celle avvolte vengono poi inserite in contenitori metallici della forma opportuna, e le linguette dei collettori di corrente vengono saldate ai poli della batteria. Successivamente, tramite ago ad alta precisione, viene inserito l'elettrolita, lo si distribuisce omogeneamente tramite basse pressioni e/o vuoto e il rivestimento viene chiuso ermeticamente.

1.2.1.4.3 Finitura della cella

Le celle assemblate devono essere caricate e rese funzionanti. Per le celle "a sacchetto" è possibile una fase di pressatura tramite rulli, che evita la formazione di zone elettrochimicamente inattive e permette il raggiungimento della massima capacità di cella. Successivamente tutte le celle vengono poste in appositi scaffali e collegate alla rete elettrica tramite perni di tensione a molla. In questa fase avvengono le prime fasi di carica/scarica, e la cella viene portata ad uno stato di carica intorno all'80%. Il processo può durare fino a 24 ore ed è di fondamentale importanza per la formazione dell'interfase solida tra elettrolita ed elettrodo (SEI). Le celle "a sacchetto", durante le prime fasi di carica/scarica, sono soggette ad un forte sviluppo di gas interno. Quest'ultimo viene raccolto in apposite sacche del rivestimento, chiamata "gas bag", la quale vengono bucate in una camera sottovuoto ed il gas viene aspirato via. Le sacche vengono rimosse e le celle vengono nuovamente sigillate. Eventuali estremità sporgenti vengono ripiegate ed incollate per ridurre le dimensioni della cella. In seguito tutte le celle vengono poste in apposite torri di invecchiamento per un periodo che può arrivare alle tre settimane, dove vengono monitorate e controllate le caratteristiche e prestazioni delle celle. Se

non si hanno grosse variazioni nelle proprietà, le celle si considerano completamente funzionanti e possono essere vendute, trasportate e/o assemblate in moduli.

1.2.1.5 Battery Management System (BMS)

Il battery management system (BMS) è un sistema elettronico che gestisce una batteria ricaricabile (cella o pacco batteria), ad esempio proteggendo la batteria dal funzionamento al di fuori della sua area operativa sicura, monitorandone lo stato, calcolando i dati secondari, segnalando tali dati, controllandone l'ambiente, autenticarla e/o bilanciarla.

Un pacco batteria costruito insieme a un sistema di gestione della batteria con un bus dati di comunicazione esterno è un pacco batteria intelligente. Un pacco batteria intelligente deve essere ricaricato da un caricabatterie intelligente.

Il BMS monitora lo stato della batteria, il quale è rappresentato da vari elementi, come ad esempio:

- tensione: tensione totale e tensioni delle singole celle;
- temperatura: temperatura media, temperatura di assunzione del refrigerante, temperatura di uscita del refrigerante o temperature delle singole celle;
- flusso di refrigerante: per batterie raffreddate ad aria o fluido;
- corrente: corrente all'interno o all'uscita dalla batteria.
- Il BMS controlla anche la ricarica della batteria reindirizzando l'energia recuperata (cioè dalla frenata rigenerativa) nel pacco batterie.
- Inoltre, un BMS può calcolare valori come:
- tensione: tensione minima e massima delle celle;
- stato di carica (State of Charge — SOC) o profondità di scarica (Depth Of Discharge — DOD), per indicare il livello di carica della batteria;
- stato di salute (State of Health — SOH), una misurazione variamente definita della capacità residua della batteria in % della capacità originale;
- stato di alimentazione (SOP), la quantità di energia disponibile per un intervallo di tempo definito dato il consumo corrente di energia, la temperatura e altre condizioni;
- stato di sicurezza (SOS);
- corrente di carica massima come limite di corrente di carica (CCL);
- corrente massima di scarica come limite di corrente di scarica (DCL);
- energia [kWh] erogata dall'ultimo ciclo di carica;
- impedenza interna di una cella (per determinare la tensione del circuito aperto);
- carica [Ah] (a volte questa funzione è chiamata contatore Coulomb);
- energia totale erogata dal primo utilizzo;

- tempo di funzionamento totale dal primo utilizzo;
- numero totale di cicli.
- Il tipo di batteria più comune nelle moderne auto elettriche è la batteria agli ioni di litio, per via della sua elevata densità energetica rispetto al loro peso.

1.2.2 Inverter

Un inverter in elettronica è un apparato elettronico di ingresso/uscita in grado di convertire una corrente continua in ingresso in una corrente alternata in uscita e di variarne i parametri di ampiezza e frequenza. Esso è funzionalmente il dispositivo con la funzione inversa rispetto a un raddrizzatore di corrente.

All'inverter arriva, oltre alla corrente DC continua dalla batteria dell'auto, il segnale dal pedale dell'acceleratore e la posizione del rotore rispetto allo statore in base alla quale determina l'orientamento da dare al campo magnetico. Con questi parametri l'inverter regola frequenza e intensità della corrente da inviare allo statore.

Quindi l'inverter ha il compito di controllare la velocità e la coppia della macchina convertendo la corrente continua dalla batteria in corrente alternata con valori di intensità e frequenza ideali per le esigenze di carico e velocità richieste durante la normale guida.

Quando il veicolo è in decelerazione, quindi in fase di recupero di energia, c'è il raddrizzatore che, lavorando al contrario, converte la corrente alternata prodotta dal motore in corrente continua, la stessa che va a caricare la batteria agli ioni di litio.

Figura 11. Schema funzionamento inverter

1.2.3 Motore elettrico

La batteria cede energia all'inverter che la converte da continua in alternata e la invia al motore; l'energia elettrica accumulata viene quindi trasformata in energia meccanica che movimenta il veicolo.

Un motore elettrico è composto essenzialmente da due parti: lo statore ed il rotore che generano due campi magnetici la cui interazione produce la coppia motrice. Lo statore rappresenta la parte fissa mentre il rotore la parte rotante.

I motori elettrici sono costruiti per funzionare in corrente continua (DC) o in corrente alternata (AC).

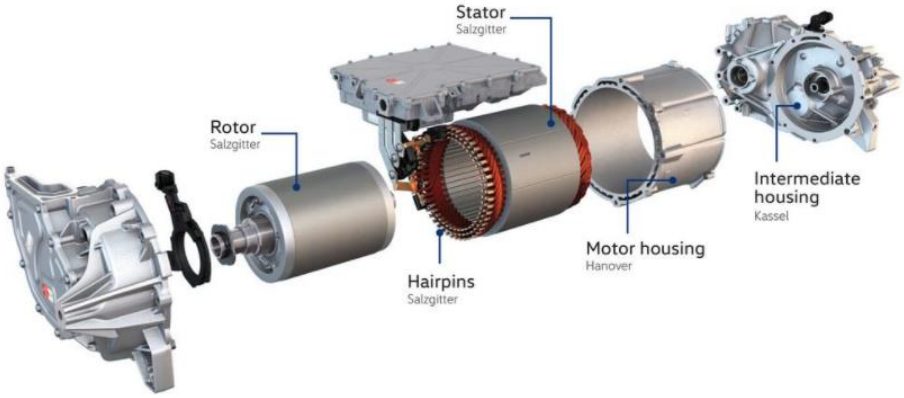


Figura 12. Componenti motore elettrico

Il motore utilizzato sulle auto elettriche è solitamente un motore sincrono. Il motore sincrono è un tipo di motore elettrico in corrente alternata la cui velocità di rotazione è sincronizzata con la frequenza elettrica. È costituito da un rotore (parte rotante solidale all'albero) su cui sono presenti diversi poli magnetici di polarità alterna creati da magneti permanenti e da uno statore su cui sono presenti gli avvolgimenti del circuito di alimentazione. Le espansioni polari dello statore creano un campo magnetico rotante che trascina le espansioni polari del rotore. L'interazione dei campi magnetici dello statore e del rotore producono la coppia motrice che permette il movimento dell'auto.

1.2.4 KERS

Il KERS (Kinetic Energy Recovery System) è un dispositivo elettromeccanico atto a recuperare parte dell'energia cinetica di un veicolo durante la fase di frenata e a trasformarla in energia meccanica o elettrica, nuovamente spendibile per la trazione del veicolo o per l'alimentazione dei suoi dispositivi elettrici. Durante la frenata di un veicolo, l'energia cinetica che deriva da tale decelerazione è dispersa in calore per attrito del sistema frenante. Tale energia può essere recuperata da un meccanismo ad alto momento di inerzia come un volano oppure immagazzinata in un accumulatore o una batteria e venire impiegata in un secondo momento, per esempio in fase di accelerazione del veicolo o quando si ha bisogno di una riserva di energia per aumentare le prestazioni del mezzo. Il KERS è un dispositivo che determina un minor consumo energetico e di conseguenza una riduzione di CO_2.

2 Stato dell'arte LCA mobilità elettrica

2.1 Introduzione

L'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment - LCA) è una metodologia che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo, o attività. L'LCA prende in esame l'intero ciclo di vita di un prodotto "dalla culla alla tomba" e il potenziale impatto ambientale in termini di uso e consumo delle risorse naturali (trattamento e lavorazione delle materie prime) e di conseguenze ambientali dei rilasci dovuti alla produzione, al trasporto, all'uso e alla manutenzione, fino al riciclo e alla collocazione finale.

L'analisi LCA è un mezzo che esprime in termini numerici il potenziale d'impatto ambientale sui diversi macrosistemi terrestri attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia e delle emissioni nell'ambiente e permette di confrontare in modo quantitativo prodotti simili e di individuare e valutare le opportunità per diminuire gli impatti. L'analisi LCA può essere effettuata in qualunque fase del ciclo di vita, ma la sua utilità è predominante nella fase iniziale di progettazione.

Le normative di riferimento sono: la ISO 14040 del 2006 [1], che contiene informazioni su concetti e procedure dell'LCA e la normativa ISO 14044 sempre del 2006 [2], che definisce nel dettaglio la procedura da seguire per svolgere un'analisi LCA.

LCA può aiutare a:

- identificare opportunità per migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti in vari punti del loro ciclo di vita;
- informare il progettista riguardo alle decisioni da prendere (ad esempio ai fini della pianificazione strategica, definizione delle priorità, progettazione o riprogettazione di prodotti o processi);
- selezionare gli indicatori pertinenti delle prestazioni ambientali, comprese le tecniche di misurazione, o nel marketing (ad esempio, implementare uno schema di etichettatura ecologica, presentare una dichiarazione ambientale o produrre una dichiarazione ambientale di prodotto).
- L'elenco seguente riassume alcune delle caratteristiche fondamentali della metodologia di valutazione del ciclo di vita:
- l'LCA esamina in modo sistematico gli aspetti ambientali e gli impatti dei sistemi di prodotto, dall'acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale, in conformità all'obiettivo e al campo di applicazione definiti;
- I risultati che si ottengono dall'LCA sono legati all'unità funzionale definita, dall'obiettivo e dai confini del sistema impostati;

- il grado di dettaglio e l'arco temporale dell'LCA possono variare ampiamente, in funzione della definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione;
- la metodologia dell'LCA è aperta ad accogliere le nuove conoscenze scientifiche e lo stato dell'arte della tecnologia;
- requisiti specifici sono applicati all'LCA, destinati ad essere usati per effettuare asserzioni comparative divulgate al pubblico;
- non esiste un unico metodo per condurre I'LCA;
- l'LCA tratta i potenziali impatti ambientali; I'LCA non prevede impatti ambientali assoluti o precisi a causa di:
    - l'espressione relativa dei potenziali impatti ambientali a un'unità di riferimento;
    - l'integrazione dei dati ambientali nello spazio e nel tempo;
    - l'incertezza intrinseca nella modellazione degli impatti ambientali;
    - il fatto che alcuni possibili impatti ambientali sono chiaramente impatti futuri;
- la fase di *valutazione dell'impatto* (Life Cycle Impact Assessment — LCIA), unitamente ad altre fasi LCA, fornisce una prospettiva a livello di sistema dei problemi ambientali e delle risorse per uno o più sistemi di prodotto;
- l'LCIA assegna i risultati della fase di *analisi di inventario* (Life Cycle Inventory — LCI) alle categorie di impatto; per ogni categoria è selezionato un indicatore di categoria di impatto del ciclo di vita ed è calcolato il risultato di tale indicatore (risultato dell'indicatore); la raccolta dei risultati degli indicatori (risultati di LCIA) o il profilo LCIA fornisce le informazioni sui problemi ambientali associati agli elementi in ingresso e in uscita del sistema di prodotto;
- non esistono basi scientifiche per la riduzione dei risultati dell'LCA a un singolo punteggio o numero complessivo, poichè la ponderazione richiede la scelta di valori;
- l'interpretazione del ciclo di vita richiede l'uso di un procedimento sistematico per identificare, qualificare, verificare, valutare o presentare le conclusioni sulla base dei risultati dell'LCA, allo scopo di soddisfare i requisiti descritti nell'obiettivo e nel campo di applicazione definiti nella fase iniziale dello studio;
- l'interpretazione del ciclo di vita richiede l'uso di un procedimento iterativo sia per la fase di interpretazione e sia per le altre fasi dell'LCA;
- l'interpretazione del ciclo di vita prevedo l'individuazione dei collegamenti tra I'LCA e altre tecniche di gestione ambientale, sottolineando i punti di forza e i limiti dell'LCA in relazione alla definizione del suo obiettivo e campo di applicazione.
- La metodologia dell'LCA definisce le quattro fasi di seguito specificate.

1. **Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione**: si definisce, in primo luogo, lo scopo dell'analisi (come ad esempio il carico ambientale di un determinato ecosistema,

valutazione di emissioni di Co2 ecc..); si definisce poi l'unità funzionale, ovvero l'azione che sarà soggetta all'analisi. La funzione è dotata di unità di misura ed è il parametro di riferimento su cui si basa tutta l'analisi. In questa fase poi definisco le categorie di impatto ambientale, le metodologie di calcolo degli impatti, qualità dei dati e assunzioni fatte. Come ultimo definisco i confini del sistema, ovvero le fasi che verranno incluse nell'analisi.

I confini del sistema possono comprendere:

- Fase Material: estrazione e processazione dei materiali;
- Fase Produzione: lavorazione dei materiali per produrre i componenti e il loro assemblaggio;
- Fase d'Uso: utilizzo del prodotto che permette di valutare oltre l'eventuale manutenzione, anche l'impatto ambientale derivante dal consumo energetico richiesto;
- Fase Fine Vita: questa fase comprende gli scenari che si intendono attuare per il corretto smaltimento del prodotto, che riguardano sia gli open-loop scenario (incenerimento o deposito in discarica), sia i closed-loop scenario (riutilizzo, rigenerazione e riciclo); le operazioni di disassemblaggio sono introdotte in questa fase.

2. **LCI (life cycle inventory)**: costituisce la fase di reperimento di tutti i dati necessari per lo svolgimento dell'analisi a seconda dell'obiettivo precedentemente definito.

   Questa fase è la fase che richiede più attenzione perché ne dipende l'accuratezza dell'analisi stessa, possiamo identificare alcuni passi principali:

   - Considerazione dell'obiettivo.
   - Preparazione della raccolta dati.
   - Collezionare i dati (dall'azienda, dai clienti, dai fornitori, da letteratura).
   - Validare i dati.
   - Relazionare i dati all'unità funzionale.
   - Raffinare, se necessario (ad esempio per mancanza dati) i confini del sistema.
   - Revisionare e ripetere se necessari alcuni passi.

3. **Valutazione degli impatti**: si determinano gli impatti ambientali dell'oggetto di valutazione. Questa fase è solitamente accompagnata da software commerciali. I risultati devono essere presentati in maniera pertinente e comprensibile.
4. **Interpretazione dei risultati:** si analizzano i risultati finali anche attraverso confronti con risultati presenti in letteratura, in modo tale da redigere raccomandazioni indirizzate al progettista o in generale perseguire l'obiettivo per cui è stata svolta l'analisi.

   Si sottolinea che il compito dell'analisi LCA non è dare soluzioni al problema, il quale viene lasciato alla capacità del progettista, ma ha come obiettivo quello di analizzare le criticità di carattere ambientale del ciclo vita del prodotto e, alla luce dei risultati, proporre dei consigli.

2.2 Analisi LCA di veicoli elettrici

In letteratura, le analisi LCA di veicoli elettrici di solito sono accompagnate da confronti con analisi LCA di veicoli a combustione interna. Lo studio condotto in Lituania da K. Petrauskienè et al. [3], confronta il Nissan Leaf 2018, modello ACENTA, con i Fiat 2018, modello TIPO sia a benzina e sia diesel. Per comprendere i risultati dell'analisi è importante sottolineare che:

- l'unità funzionale è la "distanza di guida di 1 km";
- si presume che i veicoli elettrici abbiano una durata media di 14,1 anni con un chilometraggio totale di circa 150.000 km;
- non sia necessaria la sostituzione della batteria;
- i risultati dell'LCA sono presentati in tre fasi: produzione, uso e smaltimento.
- il metodo di calcolo di impatti più utilizzato è il ReCiPe [9] ;
- le categorie di impatto ambientale sono il cambiamento climatico, la tossicità umana, le radiazioni ionizzanti, l'esaurimento dei metalli e l'esaurimento dei fossili.

Parameter	Default value
Car body	Hatchback
Length	4490 mm
Width	1788 mm
Height	1530 mm
Vehicle weight without battery	1249 kg
Battery weight	296 kg
Battery capacity	40 kWh
Range (WLTP)	270 km
Vehicle energy consumption (WLTP)	0.206 kWh/km

Figura 13. Caratteristiche tecniche veicolo elettrico

La massa totale del veicolo elettrico è di 1.545 kg, il consumo nominale del veicolo è di 0,206 kWh per 1 km di guida. Questo valore è stato valutato dal laboratorio Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP), che utilizza il test per misurare il consumo di carburante e le emissioni di CO2 delle autovetture. Pertanto, 0,206 kWh includono le perdite di carica. Questo valore porta ad un'autonomia di circa 270 km, con la massa della batteria agli ioni di litio di 296 kg.

Parameter	Default value	Default value
Fuel	Petrol	Diesel
Engine	1.3 T4	1.3 MultiJet
Car body	Hatchback	Hatchback
Length	4265 mm	4265 mm
Width	1796 mm	1796 mm
Height	1495 mm	1495 mm
Kerb weight	1395 kg	1395 kg
Fuel consumption (urban)	7.4 l/100 km	5.2 l/100 km
Fuel consumption (extra urban)	5.4–5.9 l/100 km	3.5–4 l/100 km
Fuel consumption (combined)	6.1–6.5 l/100 km	4.2–4.6 l/100 km
Emission standard	EURO 6	EURO 6

Figura 14. Caratteristiche tecniche veicoli a combustione interna

L’analisi (Figura 15) mostra che durante l’intero ciclo di vita BEV del 2015 il mix di elettricità è avvantaggiato nelle radiazioni ionizzanti e nell’esaurimento dei fossili, mentre entrambi i veicoli con motore a combustione interna (Internal Combustion Engine Vehicle — ICEV) hanno avuto un impatto inferiore sul cambiamento climatico, la tossicità umana e l’esaurimento dei metalli. L’impatto del BEV sul cambiamento climatico è del 26% e del 47% maggiore di quello degli ICEV alimentati rispettivamente a benzina e gasolio. Questo perché la fase di funzionamento del BEV ammonta al 70% del carico totale, dove l’energia elettrica (utilizzata per ricaricare la batteria) del 2015 è stata prodotta con gas naturale (41,7%) e petrolio (5%), che verranno eliminati per i successivi scenari. Inoltre, la tossicità umana del BEV è la più alta in tutti gli scenari di mix energetico e questo indicatore è associato alla produzione di un’auto elettrica e di una batteria agli ioni di litio, che rappresentano rispettivamente il 36% e il 31% dell’impatto totale. Inoltre, è stato identificato che le emissioni di gas a effetto serra (Greenhouse Gases - GHG) del BEV sarebbero inferiori a quelle degli ICEV negli scenari 2020, 2025, 2030 e 2035. Questo perché l’energia eolica e le biomasse sono le principali fonti di produzione di energia elettrica e l’utilizzo di gas naturale è diminuito di circa 4 volte in questi anni. Successivamente, il BEV nello scenario 2050 ha valori più bassi in quasi tutte le categorie rispetto allo scenario 2015. Inoltre, la fase di utilizzo dovrebbe ridursi del 64% e del 73% rispettivamente in termini di cambiamento climatico ed esaurimento dei fossili. Inoltre, la fase di utilizzo del BEV (mix energetico 2050) emetterà rispettivamente il 31% e il 56% di emissioni di GHG in meno rispetto a ICEV-diesel e ICEV-benzina. Questo perché il mix energetico del 2050 si prevede sarà composto dalle principali fonti e solare (45,6%) ed eolica (33,6%). Infine, l’indicatore di esaurimento dei metalli è considerevolmente significativo per BEV negli scenari di mix energetico attuali e futuri poiché questo indicatore è correlato alla produzione della batteria e rappresenta il 75% di questo impatto. Inoltre, i risultati spiegano come le diverse proporzioni di fonte di energia rinnovabile integrate nel mix energetico forniscano diversi impatti sull’ambiente durante l’analisi e il confronto della fase operativa del BEV.

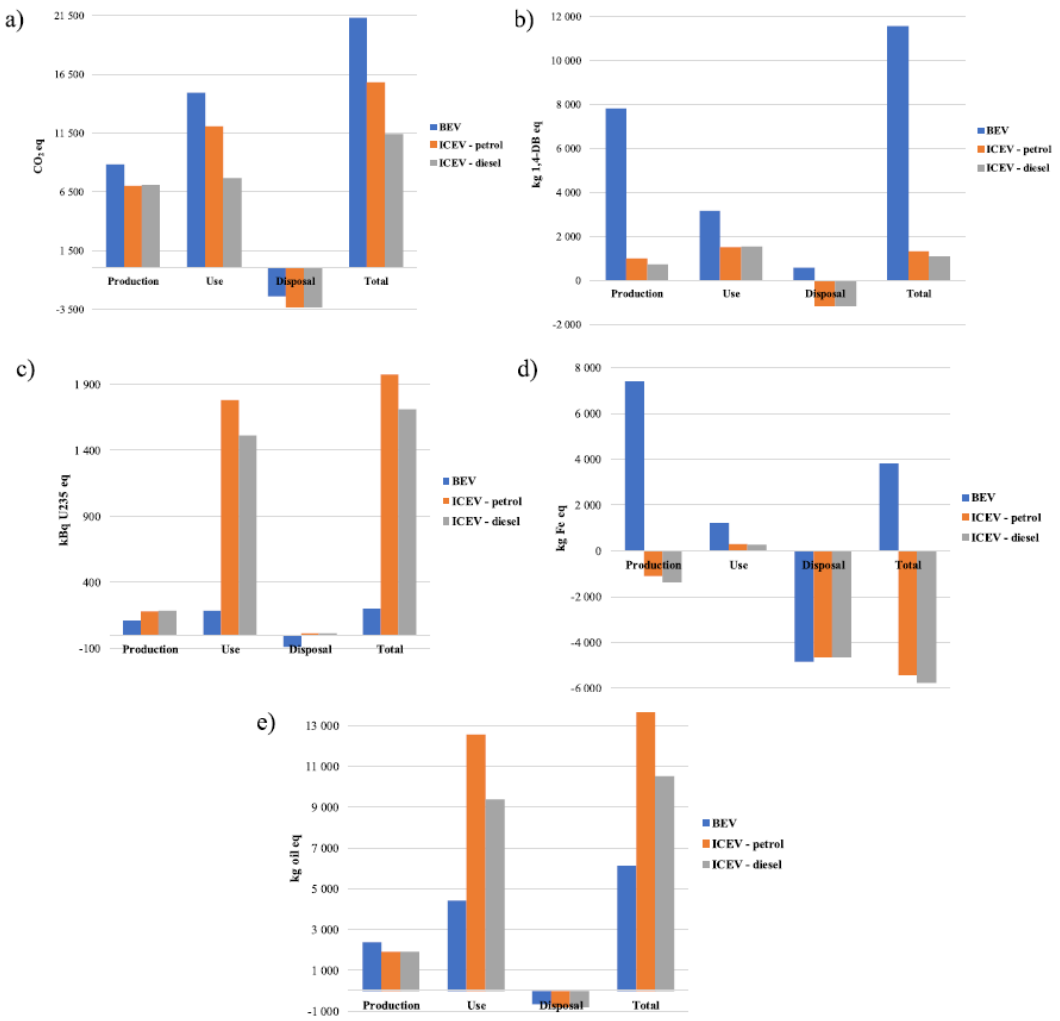
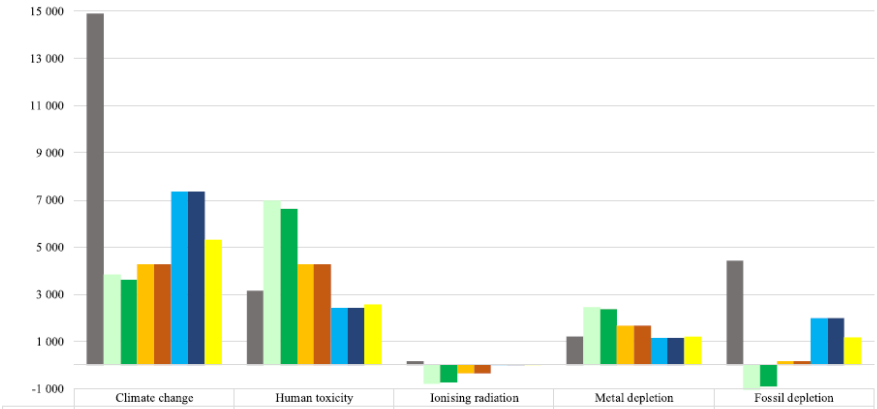


Figura 15. Valutazione BEV (mix energetico del 2015) e ICEV di questi indicatori ambientali: a) cambiamento climatico; b) tossicità umana; c) radiazioni ionizzanti; d) esaurimento del metallo; e) fossile esaurimento.



	Climate change	Human toxicity	Ionising radiation	Metal depletion	Fossil depletion
BEV, 2015	14 907	3 165	185	1 224	4 420
BEV, 2020	3 850	6 979	-770	2 465	-1 029
BEV, 2025	3 624	6 625	-723	2 384	-893
BEV, 2030	4 291	4 292	-354	1 683	183
BEV, 2035	4 291	4 292	-354	1 683	183
BEV, 2040	7 361	2 418	33	1 163	2 004
BEV, 2045	7 361	2 418	33	1 163	2 004
BEV, 2050	5 322	2 585	4	1 210	1 195

Figura 16. Risultati della fase d'uso del veicolo elettrico in Lituania negli anni dal 2015-2050

Per il confronto dei risultati con quelli ottenuti da altri autori si sottolinea che le categorie di impatto più significative e ampiamente analizzate sono il cambiamento climatico e la tossicità umana. Come sottolinea K. Petrauskienè et al. [3] il confronto dei risultati dell'LCA effettuato da vari ricercatori rivela che i risultati dell'LCA avranno sempre un valore diverso. Ciò può essere spiegato dal fatto che ogni ricercatore crea un inventario dei dati diverso, utilizza software o database diversi. Quando si esegue un confronto tra l'LCA di ICEV e BEV, le caratteristiche tecniche dei veicoli, in particolare il peso a vuoto e il peso della batteria BEV, sono tra i fattori importanti quando si analizza l'impatto ambientale nella fase di produzione. Successivamente, quando si analizza la fase di utilizzo degli ICEV, i fattori principali sono il tipo di carburante e il consumo medio di carburante. Inoltre, anche l'anno di produzione dell'auto gioca un ruolo importante, poiché più nuovo è il modello di auto, minore sarà il consumo di carburante. Inoltre, per la valutazione del funzionamento dei BEV è importante quale sia la fonte o la tecnologia del combustibile per la generazione di elettricità, poiché il mix di elettricità influenza l'impatto sull'ambiente quando viene caricata la batteria di un'auto elettrica. Molti scienziati utilizzano il mix di elettricità medio della regione nella loro LCA se vogliono mostrare l'inquinamento complessivo di un'auto elettrica in quella regione. Inoltre, le fonti di generazione di elettricità cambiano di anno in anno, poiché i paesi sono incoraggiati a passare a una produzione di energia più pulita e ad aumentare la quota di risorse energetiche rinnovabili nella generazione di elettricità. È importante far notare che il risultato della fase di utilizzo dei veicoli elettrici è diverso da Paese a Paese perché influenzato dal Mix energetico.

2.3 Analisi LCA batterie di veicoli elettrici

Per calcolare gli effetti sull'ambiente della produzione di batterie agli ioni di litio (Lithium Ion Battery — LIB) bisogna tener conto di molte variabili. Infatti, il processo produttivo di una LIB richiede l'utilizzo di una ventina di materiali differenti, i quali hanno bisogno di vari processi di raffinazione e trattamenti ad hoc per l'impiego elettrochimico. A parità di fonte di energia, un'elevata influenza sull'impatto ambientale è data dalla geometria e dalla composizione della cella. Differenti configurazioni, infatti, portano ad una quantità di emissioni di gas serra per kWh diverse, con le celle "a sacchetto" meno impattanti rispetto a celle cilindriche della medesima composizione. Anche le caratteristiche della batteria, come durata, efficienza e densità di carica, hanno effetti sulla quantità di emissioni di gas serra. Infatti si evidenzia come una durata elevata della batteria sia un fattore essenziale per una bassa impronta ecologica. La scelta del mix energetico utilizzato nel processo produttivo è un fattore determinante per l'impatto ambientale di una LIB, il quale dipende a sua volta dal Paese di produzione: più inquinante è la produzione di energia, maggiore sarà l'impatto ambientale della batteria. Ad esempio, la produzione di batterie in Paesi dove l'energia proviene principalmente da combustibili fossili è molto più inquinante rispetto alla produzione delle medesime batterie in

Paesi che utilizzano fonti alternative. Si nota invece che nei Paesi dove le fonti energetiche sono meno impattanti, l'influenza maggiore deriva dai materiali utilizzati.

2.3.1 Impatto ambientale dei materiali di una batteria Li-Ion

È importante scegliere una chimica dell'elettrodo in grado di sopportare un determinato tipo di applicazione, di seguito vengono riportate quelle che sono le considerazioni da Casals et al. [4], dove si affronta un'indagine su quali sono le chimiche dei catodi e anodi migliori a seconda del tipo di utilizzo. È ben noto che gli elettrodi di grafite possono facilmente formare dendriti di litio a velocità di scarica elevate o quando raggiungono una bassa tensione di scarica. L'uso di elettrodi di grafite per applicazioni con grande ampiezza di tensione promuoverà ulteriormente la formazione di dendriti e porterà a un decadimento più rapido della capacità della batteria. Per questo, non è consigliabile utilizzare la grafite come anodo ma un altro materiale che presenta un voltaggio più elevato, come il litio-titanato (Lithium Titanate Oxide — LTO). In effetti, questo materiale mostra una migliore stabilità durante la scarica poiché la sua elettrochimica limita la tensione a 1,55 V, che è sufficientemente alta da impedire il deposito di litio. Tuttavia, l'uso di LTO come anodo ridurrà la densità di energia della batteria e avrà sicuramente conseguenze sui costi per il consumatore. Sul lato catodico, qualsiasi chimica può essere considerata poiché ognuna di esse presenta pro e contro. Una scelta consolidata non può essere definita così facilmente come per gli anodi. In termini di sicurezza, sarebbe preferibile utilizzare catodi LMO o LFP in quanto presentano una migliore stabilità rispetto all'NMC; tuttavia, la riduzione più rapida della capacità di LMO sarà molto probabilmente un importante svantaggio per l'uso di seconda vita. Nei casi in cui si prevede che la batteria venga raramente caricata o scaricata completamente, è importante focalizzare la chimica della batteria verso materiali che consentano una buona capacità di ciclaggio (carica e scarica) ma scartando le proprietà alla fine della carica e della scarica. Secondo questi vincoli, sia LTO che grafite possono essere presenti nell'anodo. Il minor costo della grafite sarà chiaramente un vantaggio della scelta e poiché la scarica completa della batteria non è prevista regolarmente, il degrado dell'elettrodo dovuto al rivestimento al litio sarà limitato. Lato catodo, l'alta tensione delle batterie LMO o di quelle al litio vanadio fosfato (Lithium Vanadium Phosphate — LVP) sarà un vantaggio in quanto ridurrà la profondità di scarica e l'assenza di nichel riduce il costo della batteria.

Allo stato attuale, la grafite è comunemente usata come anodo tra le case automobilistiche a causa del suo basso costo e delle buone prestazioni elettrochimiche. Tuttavia, questo materiale presenta importanti meccanismi di degradazione come il rivestimento al litio. Altri anodi come LTO potrebbero anche essere candidati al materiale dell'elettrodo nell'uso di seconda vita, ma la sua alta tensione impedisce il suo sviluppo nelle batterie EV. Sul lato catodico, gli ossidi e i fosfati sono ampiamente utilizzati e rivelano una buona stabilità durante il ciclo. Il materiale LFP presenta una buona stabilità del ciclo mentre gli elettrodi a base di manganese soffrono di

una degradazione più rapida che potrebbe essere sfavorevole per l'uso di seconda vita. Abbiamo osservato che è necessario selezionare la chimica della batteria in base all'applicazione secondaria della batteria EV. Queste applicazioni sono direttamente correlate alla fonte di energia e influenzeranno le condizioni di carica e scarica della batteria: cicli di carica-scarica completi che consumano rapidamente la durata della batteria e cicli di carica-scarica parziale che prolungano la durata della batteria.

2.3.2 Fine vita di una batteria Li-ion

Le batterie agli ioni di litio (LIB) svolgono un ruolo fondamentale con la rapida espansione di una realtà sempre più elettrificata con continue innovazioni tecnologiche. Molti veicoli elettrici sono equipaggiati o alimentati direttamente da LIB. Questo aumento dell'utilizzo di LIB nei veicoli introdurrà una grande quantità di LIB spesi in un arco di 8-10 anni, per questo motivo è richiesta una gestione corretta delle LIB del veicolo a fine vita (End Of Life — EOL) prendendo in considerazione più opzioni. Di seguito presentiamo le considerazioni affrontate dallo studio di Chen et al. [22].

Ci sono tre possibili opzioni per il fine vita delle batterie di un EV, a seconda del loro design, qualità, e stato di salute (SOH): rigenerazione, riutilizzo e riciclo. La rigenerazione e il riutilizzo estendono l'utilizzo delle LIB, mentre il riciclo chiude il ciclo. Per catturare il valore massimo delle LIB, lo scenario ideale comporterebbe prima la rigenerazione o la riconversione, seguita dal riciclo. La rigenerazione è lo scenario EOL più desiderabile in termini di massimizzazione del valore e riduzione al minimo del consumo energetico e delle emissioni del ciclo di vita; tuttavia, questa opzione è la più rigorosa in termini di requisiti di qualità della batteria. Passare direttamente dal primo utilizzo al riciclo è meno desiderabile dal punto di vista del ciclo di vita, a causa dei benefici insufficienti, dell'incertezza sulle prestazioni e delle inevitabili perdite di materiale ed energia che si verificano nel processo. Tuttavia, il riciclo è vantaggioso perché le LIB diventano parte dell'economia circolare invece di diventare rifiuti. Il riciclo restituisce materiali preziosi nella catena del valore, mitigando parzialmente la necessità di estrazione di nuove risorse. Il riutilizzo delle batterie per un uso non automobilistico (seconda vita) si trova tra questi due scenari. Anche se le batterie vengono prima rigenerate o riutilizzate, alla fine verranno riciclate. Le prime due opzioni ritardano solo l'orizzonte del riciclo.

2.3.2.1 Rigenerazione

La rigenerazione si riferisce al ricondizionamento delle batterie dei veicoli elettrici e al loro utilizzo nelle loro applicazioni originali (automobilistiche). Per questo fine però è necessario che le batterie dei veicoli elettrici abbiano uno stato di salute accettabile e che soddisfino tutti i requisiti decisi dall'azienda fornitore in termini di alimentazione, energia, durata del ciclo, ecc. Secondo l'Advanced Battery Consortium (USABC) degli Stati Uniti, le batterie non sono

generalmente adatte all'uso di veicoli elettrici quando la capacità o la potenza di una cella, un modulo o un pacco è inferiore all'80% del valore nominale originale. L'idea alla base della rigenerazione è sostituire le celle o i moduli inferiori nei pacchi e restituire i pacchi batteria rigenerati per l'uso nei veicoli elettrici. La rigenerazione delle LIB implica la diagnosi, lo smontaggio parziale dei pacchi batteria, la sostituzione di celle o moduli danneggiati all'interno dei pacchi batteria e quindi il riassemblaggio in nuovi pacchi batteria

2.3.2.2 Riutilizzo

Il riutilizzo è un'altra opzione per il fine vita delle batterie, in base alla quale le batterie vengono riconfigurate per un uso di "seconda vita" in applicazioni meno stressanti (come lo stoccaggio fisso), estraendo così più valore estendendo la loro durata utile oltre la loro "prima vita" automobilistica. Nel caso in cui un pacco batteria a fine della prima vita ha subito un degrado tale che non permette di ottenere la capacità desiderata, ad esempio, la rigenerazione sembra economicamente sfavorevole, allora il riutilizzo diventa un percorso praticabile. La riconfigurazione non richiede solo la sostituzione di celle o moduli danneggiati, ma richiede anche la riconfigurazione dei moduli o dei pacchetti, inclusa la creazione di un nuovo sistema di gestione della batteria (BMS), per adattarsi a un'applicazione non per veicoli. Il riutilizzo deve affrontare numerose sfide, tra cui la classificazione affidabile dei pacchetti o dei moduli EOL, la gestione dei molti diversi design e metriche delle prestazioni, responsabilità e costo della riconfigurazione, che deve competere con batterie nuove e più economiche. I test, la classificazione e il riconfezionamento sono i principali fattori che contribuiscono ai costi per il riutilizzo delle batterie, e i costi potrebbero essere ridotti al minimo sfruttando tecnologie più avanzate. Le batterie riutilizzate possono essere impiegate in vari sistemi di secondo utilizzo, come peak shaving, backup, regolazione della frequenza, integrazione delle energie rinnovabili e ricarica dei veicoli elettrici.

2.3.2.3 Riciclo

Il riciclo è la terza opzione, che può e deve ospitare pacchi batteria di tutti i modelli e stati di salute. La molteplicità dei materiali chimici utilizzati nelle odierne LIB per EV aumenta la complessità del riciclo, presentando alcuni ostacoli tecnici ed economici che devono essere affrontati per consentire un riciclo efficiente e su larga scala delle batterie per autoveicoli. I pacchetti LIB sono strutture complesse, composte da più moduli, in cui numerose celle a sacchetto, prismatiche o cilindriche sono collegate in una varietà di configurazioni in serie parallela. Le rispettive architetture di pacchetti LIB, moduli e celle variano in modo significativo da produttore a produttore. All'interno delle celle, anche la composizione chimica dei materiali attivi varia tra i produttori e continua ad evolversi, infatti i produttori si stanno muovendo sempre più verso sostanze chimiche con nichel più elevato e cobalto inferiore, in risposta alle

preoccupazioni in termini di costi e disponibilità. Questo porta a un indebolimento dei modelli di business di riciclo delle batterie esistenti, che dipendono in gran parte dal recupero di cobalto di alto valore. Il materiale catodico rappresenta il valore più alto nella LIB e, come tale, il recupero del catodo come output finale del processo di riciclo è economicamente richiesto. Ovviamente, riciclare più materiali della batteria come l'anodo, i fogli e l'elettrolito aumenta ulteriormente i margini del processo di riciclo, migliorando così la sostenibilità dell'ecosistema di riciclo. Analizzando il riciclo del catodo notiamo che almeno cinque diverse sostanze chimiche catodiche vengono ampiamente utilizzate nelle LIB commerciali, con molte batterie EV che utilizzano anche catodi misti (una miscela di due o tre materiali catodici in una singola cella). Le tre diverse tecnologie di riciclo delle batterie sono:

- processi pirometallurgici;
- processi idrometallurgici;
- processi di riciclo diretto.

Si anticipa che i primi due metodi conoscono applicazioni su scala industriale, mentre il terzo è attualmente su scala di laboratorio e pilota.

Processo pirometallurgico

Il processo pirometallurgico è un processo di fusione ad alta temperatura, che di solito comporta due passaggi. Innanzitutto, i LIB vengono bruciati in uno smelter, dove i composti vengono scomposti e i materiali organici, vengono bruciati. Quindi, nuove leghe vengono generate attraverso la riduzione del carbonio. Nelle fasi successive (spesso idrometallurgiche), le leghe metalliche vengono ulteriormente separate per recuperare materiali puri. In questo processo, solo i metalli costosi (cobalto (Co), nichel (Ni) e rame (Cu)) vengono recuperati con la massima efficienza. L'anodo, l'elettrolita e la plastica vengono ossidati e forniscono energia per il processo. Il litio viene trascinato nella frazione delle scorie e può essere recuperato con una lavorazione aggiuntiva (che comporta costi ed energia associati) e il recente aumento di valore del litio ha reso il suo recupero fattibile per alcuni riciclatori. L'alluminio funge da riducente nel forno e riduce la necessità di carburante. I processi pirometallurgici hanno generato fino ad oggi modelli di business relativamente di successo, a causa dell'alto contenuto di cobalto delle LIB utilizzate nell'elettronica portatile. A causa del fatto che le batterie per EV tendono verso un contenuto di cobalto inferiore, i modelli di business diventeranno meno attraenti. I principali vantaggi dei processi pirometallurgici sono:

- un processo semplice e affermato;
- lo smistamento e la riduzione delle dimensioni non sono necessari - una miscela di batterie LIB e NiMH può essere riciclata;

- l’output è costituito da "mattoni" elementari che possono essere utilizzati per sintetizzare nuovi materiali catodici di molte diverse sostanze chimiche.
- I principali svantaggi sono:
- la generazione di CO2 e l’elevato consumo di energia durante il processo di fusione;
- la lega richiede un’ulteriore lavorazione, il che aumenta il costo totale di riciclo;
- molti dei materiali in LIB non vengono recuperati (ad esempio, plastica, grafite e alluminio): il processo recupera Co e Ni dai materiali catodici e Cu dal collettore di corrente anodica, che rappresentano solo il 30% in peso in LIB per l’elettronica;
- il modello di business potrebbe non funzionare bene per le batterie EV, a causa della bassa concentrazione di Co. Inoltre, l’industria si sta muovendo verso materiali catodici a ridotto contenuto di cobalto o, in ultima analisi, privi di cobalto.

Processo idrometallurgico

In questo processo, il recupero del materiale viene ottenuto utilizzando la chimica acquosa, tramite lisciviazione in acidi (o basi) e successiva concentrazione e purificazione. Per le LIB, gli ioni in soluzione sono separati con varie tecnologie (scambio ionico, estrazione con solvente, precipitazione chimica, elettrolisi, ecc.) e precipitati come composti diversi. I principali vantaggi del processo idrometallurgico sono:

- i materiali ad alta purezza possono essere generati;
- la maggior parte dei costituenti LIB può essere recuperata;
- funzionamento a bassa temperatura;
- minori emissioni di CO2 rispetto al processo pirometallurgico.
- I principali svantaggi dei processi idrometallurgici includono:
- la necessità di smistamento, che richiede maggiore spazio di archiviazione e aumenta i costi e la complessità del processo;
- la sfida di separare alcuni elementi (Co, Ni, Mn, Fe, Cu e Al) nella soluzione, a causa delle loro proprietà simili, possono portare a costi più elevati;
- la spesa per il trattamento delle acque reflue e i costi associati.

Processo di riciclo diretto

Il riciclo diretto è un metodo di recupero proposto per raccogliere e recuperare direttamente i materiali attivi dei LIB, pur mantenendo la loro struttura composta originale. In questo processo, i componenti della batteria vengono separati, principalmente utilizzando metodi di separazione fisica, separazione magnetica e un trattamento termico moderato, al fine di evitare la degradazione chimica dei materiali attivi, che sono il principale obiettivo del recupero. I materiali attivi vengono purificati e sia i difetti superficiali che quelli voluminosi vengono

riparati mediante litiazione o processi idrotermali. Tuttavia, i catodi possono essere una miscela di più di un materiale attivo e separarli potrebbe non essere fattibile economicamente o tecnicamente. Inoltre, gli input contenenti più chimiche NMC non possono ancora essere separati e quindi presentano sfide di smistamento significative. I principali vantaggi dell'approccio al riciclo diretto includono:

- un processo relativamente semplice;
- i materiali attivi potrebbero essere riutilizzati direttamente dopo la rigenerazione;
- emissioni significativamente inferiori e minore inquinamento secondario, rispetto alla pirometallurgia e all'idrometallurgia.
- I principali svantaggi del processo di riciclo diretto includono:
- richiede una selezione / pre-elaborazione rigorosa, basata sull'esatta chimica del materiale attivo;
- garantire un'elevata purezza costante e una struttura cristallina incontaminata, che potrebbe non soddisfare i rigorosi standard richiesti dall'industria delle batterie;
- una tecnologia non provata che, finora, esiste solo su scala di laboratorio;
- sensibilità significativa alle variazioni del flusso di input;
- un processo inflessibile: il processo potrebbe non essere appropriato per soddisfare la realtà tecnologica del cambiamento della chimica del catodo (i materiali attivi recuperati all'EOL saranno "vecchia tecnologia" e potrebbero non essere più rilevanti).

A breve termine, è più probabile che questa tecnologia venga adottata dai produttori di batterie per il riciclo dei rottami di elettrodi, dove la chimica è nota e attuale.

2.3.3 Confronto risultati analisi LCA di diverse batterie Li-ion

Gli studi condotti da Raugei et al. [5] [8] mettono a confronto i risultati ottenuti dal suo caso studio con quelli selezionati da letteratura di pacchi batteria commerciali basati sulle tre più comuni chimiche agli ioni di litio (LMO, NMC e LFP), andando ad individuare le ragioni dei differenti risultati. Il confronto è limitato all'indicatore Global Warming Potential (GWP). La prima caratteristica di questo confronto è l'enorme gamma di risultati. Il motivo è dovuto a una serie di fattori: in primo luogo, c'è una variabilità intrinseca nella dimensione fisica e nella struttura dei pacchi batteria analizzati, che porta ad ampie variazioni nelle presunte quote di massa relativa dei componenti non elettrochimici (BMS, sistema di raffreddamento, imballaggio esterno, ecc.), e quindi sugli impatti calcolati per kWh di capacità energetica della batteria. In secondo luogo, molti degli autori hanno dovuto fare affidamento su "stime di esperti", "estrapolazioni basate su valori di ricerca e sviluppo", "stime top-down", ecc., che potrebbero aver influito sull'accuratezza dei loro risultati. Inoltre, data la domanda di materiali ad alta intensità energetica per la produzione delle celle, il presunto mix di reti elettriche di fondo e le

loro intensità di carbonio associate hanno un effetto potenzialmente grande sui risultati finali, dove vengono calcolati valori di emissioni di GHG significativamente inferiori nell'ipotesi alternativa che la produzione possa avvenire negli USA, invece che in Cina. Si nota però che la composizione del catodo sembra avere un effetto distintivo sul risultato. All'interno di ogni "famiglia" di chimica catodica, vi è qualche indicazione di una tendenza generale al ribasso nel tempo. In figura riportiamo un grafico con i risultati di quest'analisi.

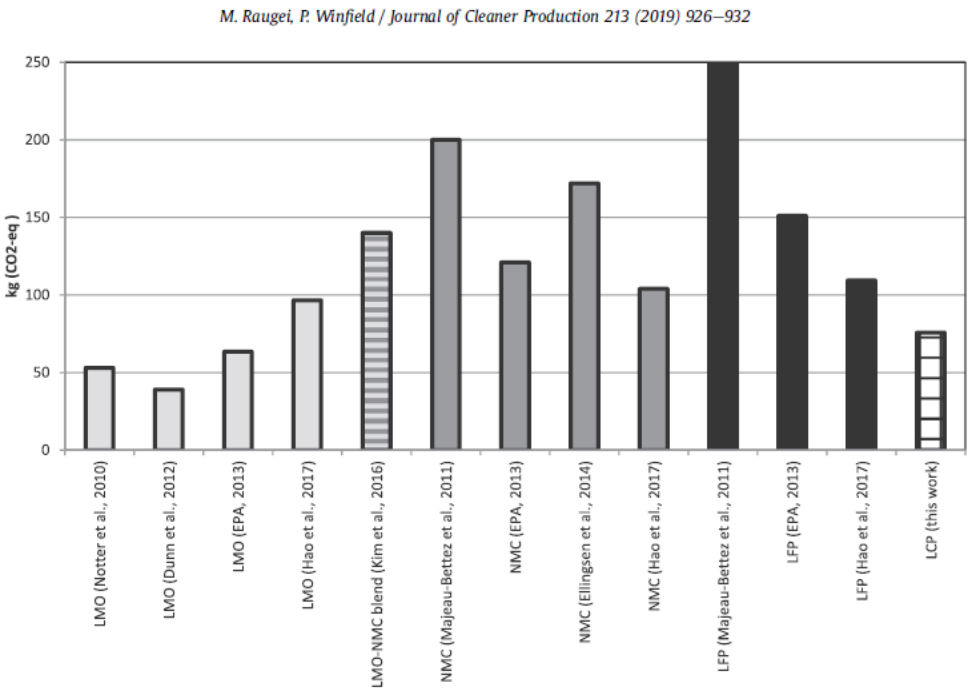


Figura 17. Confronto emissioni di kg CO2 eq di diverse batterie

3 Stato dell'arte LCC mobilità elettrica

3.1 Introduzione

L'analisi dei costi del ciclo di vita (Life Cycle Costing — LCC) è una metodologia che permette di valutare il costo di un bene / servizio, considerando un orizzonte temporale esteso al periodo di utilizzo, successivo alla produzione, fino la dismissione del bene, consentendo quindi una valutazione delle implicazioni più generali, relative agli effetti, nocivi o benefici, che ricadono sul sistema complessivo in cui la realizzazione ha luogo e vita.

3.2 Analisi LCC di veicoli elettrici

Di seguito vengono riportate alcune considerazioni e risultati presi dallo studio condotto da Sami Kara et al. [10] riguardo un LCC di un veicolo elettrico utilizzato in Australia.

Il costo del ciclo di vita è spesso definito come la somma di tutti i costi sostenuti durante la vita utile di un bene. Per un'automobile standard, l'LCC può essere definito come:

$$LCC\ totale = Costo\ di\ acquisizione + \sum_{i=1}^{n} (Costo\ operativo\ per\ un\ dato\ anno_i + Costi\ manutenzione\ programmata_i + Costo\ manutenzione\ non\ programmata_i) + Costo\ di\ smaltimento$$

La categoria "Costi di manutenzione non programmati" a causa della disponibilità limitata di dati di prima mano che limita l'accuratezza della previsione dei tempi e dei costi, viene in molti casi trascurata. La maggior parte degli studi condotti sui costi del ciclo di vita dei veicoli elettrici evidenzia il costo della batteria come il fattore che contribuisce maggiormente al prezzo elevato dei veicoli elettrici. Il costo al dettaglio di una tipica batteria agli ioni di litio per veicoli elettrici è stimato a 300 A$/kWh (A$ - dollari australiani). Per la batteria da 24 kWh della Nissan Leaf, questo ammonta a 7.200 A$, che è un costo significativo. I costi di produzione delle batterie sono però attualmente in diminuzione in concomitanza con l'aumento dell'energia specifica delle batterie. Si spera che, poiché i veicoli elettrici diventano sempre più popolari a causa delle crescenti preoccupazioni ambientali ed energetiche, l'elevato volume di produzione di batterie ridurrà ulteriormente i costi per unità in linea. La Nissan Leaf 2011 rappresenta il veicolo completamente elettrico di maggior successo oggi sul mercato e come tale è ritenuto il più appropriato per rappresentare un veicolo elettrico per passeggeri di piccole e medie dimensioni in questo studio. Le specifiche principali sono elencate in Figura 18.

Table 1. 2011 Nissan Leaf Specifications

Country of Origin	Japan
Motor	80kW AC Synchronous
Battery	24kWh Lithium Ion
Battery Weight	294kg
On Board Charger	3.3kW
Kerb Weight (Max)	1541kg
Max Pay Load	395kg
Overall Dimensions (L x W x H)	4445mm x 1770mm x 1550mm
Rated Range per Charge	175km
Electricity Consumption	150Wh/km [13] 30kWh/100miles [14] 289Wh/mile [11] 108-240Wh/km [15]

Figura 18. Specifiche Nissan Leaf

In questa analisi, l'unità funzionale è di 1 km guidata dalla Nissan Leaf del 2011 nella regione metropolitana del Nuovo Galles del Sud (NSW), in Australia. Questa analisi utilizza un approccio "dalla culla alla tomba" che includerà tutti i costi associati all'acquisto, al funzionamento e allo smaltimento del veicolo. Si presume che la vita utile della Nissan Leaf 2011 sia di 200.000 km, o più specificamente di 20 anni con un chilometraggio annuo di 10.000 km. Questa ipotesi si basa sulle statistiche australiane secondo cui un veicolo immatricolato medio ha un'età di 10 anni e un chilometraggio annuo di 14.000 km. Con un costo di sostituzione di circa 7.300 dollari australiani, si presume che la sostituzione della batteria sarebbe economicamente fattibile per i proprietari di veicoli selezionati. Dal momento che il veicolo è stato acquistato nel 2014, tutti i prezzi sono stati espressi in dollari australiani 2014. Sulla base della guida del Dipartimento del Tesoro e delle Finanze del NSW, in questo studio è stato applicato un tasso di interesse del 7%. Questo studio presuppone che il consumo di energia durante la fase di funzionamento sia di 0,137kWh/km per semplicità. Inoltre, è stata presa in considerazione la necessità in ricarica di un ulteriore 20% di energia a causa delle perdite associate al metodo di carica unico ipotizzato.

Sulla base dell'ambito e delle ipotesi di cui sopra, la Figura 19 illustra la struttura del modello LCC del consumatore del caso base per questo studio.

Con Acquisition phase si intende il costo di acquisizione della Nissan Leaf, il quale è stato composto da tre componenti. In primo luogo, è stato ottenuto il prezzo al dettaglio suggerito dal produttore (MSRP) del veicolo studiato, poi il prezzo di un caricabatterie autonomo di livello 2, inclusa l'installazione e la garanzia utente di 3 anni ed infine la registrazione, l'assicurazione di responsabilità civile obbligatoria (CTP) e le tasse di bollo, le quali sono state incluse come da regolamento in Australia e sono state estratte dal sito Web Roads and Maritime Services (RMS).

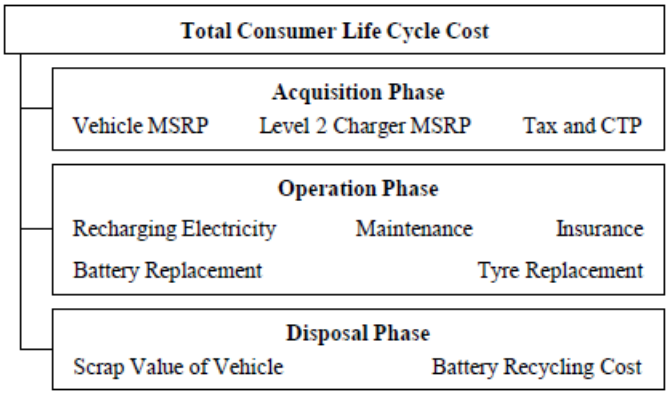


Figura 19. Modello LCC

Con Operation phase sono stati considerati tutti i costi relativi alla fase d'uso, ovvero il consumo di corrente elettrico legato alla fase di ricarica del veicolo, la manutenzione, l'assicurazione, la sostituzione della batteria e la sostituzione dei pneumatici.

Il Disposal phase analizza i costi del fine vita del veicolo, in particolare costo del trattamento di riciclo delle batterie Li-ion e il valore di rottamazione dei veicoli elettrici.

Per verificare il rapporto costo-efficacia del Nissan Leaf 2011, viene fatto un confronto con un ICEV comparabile che per questo studio è il modello Toyota Corolla Ascent Sport Hatch 2014 Per la fase operativa, l'ICEV consuma 9,4 l/100 km su terreno australiano. I costi di manutenzione dell'ICEV sono superiori di circa il 30~35% rispetto ai veicoli elettrici. Il costo di sostituzione dei pneumatici è stato ipotizzato uguale a quello dei veicoli elettrici. Infine, la tecnologia matura degli ICEV consente di ridurre i costi assicurativi a causa di minori incertezze in caso di guasti e riparazioni.

Al fine di convalidare i risultati finanziari di questo studio, è stato innanzitutto effettuato un confronto con i risultati complessivi di altra letteratura disponibile, come mostrato in Figura 20. Per rendere il confronto più significativo, i risultati degli studi comparativi dovevano essere convertiti in valori rappresentativi dell'unità funzionale del presente studio, A$/km. I costi operativi sono stati convertiti nell'equivalente di una durata di 200.000 km. Inoltre, a causa delle diverse località e periodi di tempo degli studi comparativi, anche i risultati associati sono stati convertiti in una valuta comune, il dollaro australiano e adeguati alle variazioni dell'inflazione. Il costo totale di proprietà della Nissan Leaf calcolato in questo studio è stato di 0,46 A$/km. Ciò comprende i costi relativi all'acquisizione del veicolo, al suo funzionamento e allo smaltimento. Il veicolo ICEV convenzionale utilizzato per il confronto aveva un costo totale di proprietà equivalente a 0,37 A$/km, che si traduce in un sovrapprezzo di 0,09 A$/km per l'utilizzo della Nissan Leaf in Australia. Con l'eccezione dell'EPRI, questo modello del

vantaggio di costo del veicolo convenzionale è coerente in tutti gli studi precedenti con il premio sul costo del ciclo di vita di un veicolo elettrico che va da 0,04 A$/km a 0,09 A$/km.

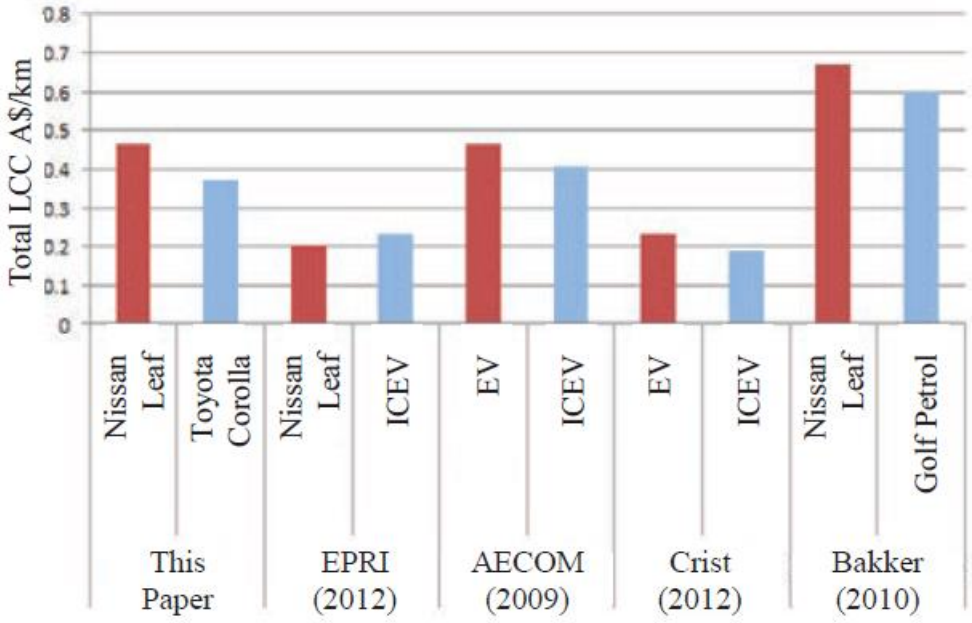


Figura 20. Confronto LCC con altri studi

La ragione della diversa conclusione nello studio EPRI risiede nelle ipotesi del modello, che hanno favorito in modo significativo lo scenario dei veicoli elettrici. In primo luogo, lo studio presuppone un periodo di "vita utile" di 8 anni, eliminando così la necessità di sostituire la batteria, un costo significativo associato all'uso di veicoli elettrici. In definitiva, i prezzi significativamente più bassi dell'elettricità rispetto alla benzina negli Stati Uniti, combinati con l'omissione dell'aumento dei prezzi dell'energia, amplificano ulteriormente i vantaggi della Nissan Leaf. Per confrontare gli impatti economici nelle diverse fasi del ciclo di vita del veicolo, il maggiore è attribuibile alla fase operativa. Il contributo di costo della fase di acquisizione è decisamente al secondo posto, con una riduzione solo marginale in ampiezza. È anche chiaro che gli impatti economici della fase di smaltimento del ciclo di vita del veicolo sono insignificanti, il che corrobora la decisione presa in studi precedenti per la loro esclusione. Questa minimizzazione dei costi attribuibili alla fase finale del ciclo di vita potrebbe essere ulteriormente migliorata in futuro, poiché il costo del riciclaggio delle batterie al litio diminuisce ulteriormente. La ripartizione delle fasi di acquisizione e operazione presentata in Figura 21, indica che il prezzo di acquisto (MSRP) e i costi di assicurazione del veicolo sono i componenti maggiormente responsabili del costo totale del ciclo di vita.

Il risultato principale di questo studio è che il veicolo elettrico selezionato, Nissan Leaf 2011, ha prestazioni peggiori in termini di costo totale del ciclo di vita rispetto al suo equivalente Toyota Corolla.

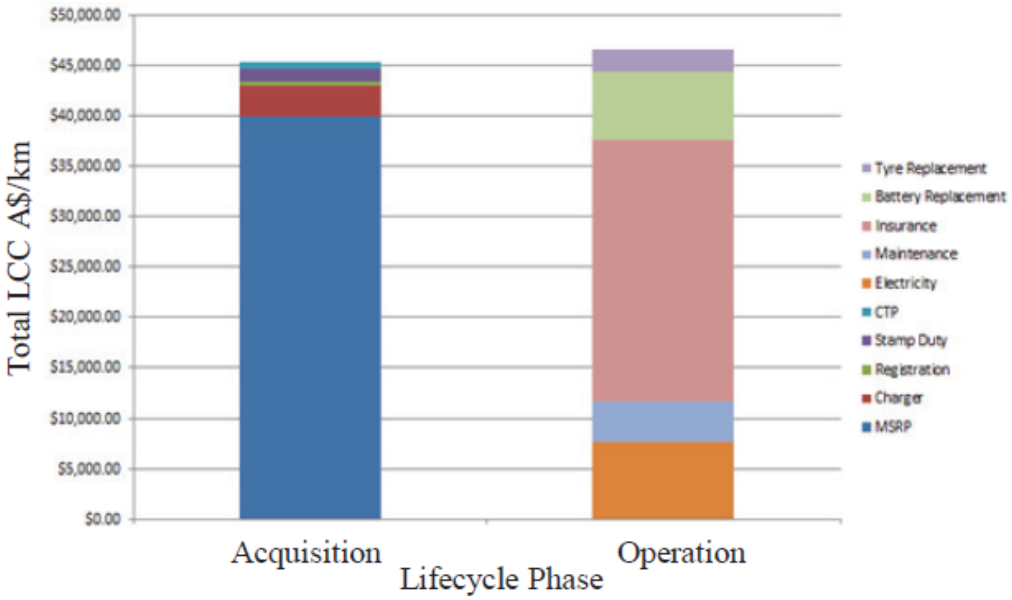


Figura 21. Impatto individuale dei singoli componenti di costo sul totale del ciclo vita

Il contributo principale al costo del ciclo di vita è la fase operativa, seguita dalla fase di acquisizione. Le unità di costo di maggior influenza sono state identificate come:

1) Il prezzo consigliato del veicolo,

2) Costo dell'assicurazione,

3) Costo dell'elettricità,

4) Sostituzione delle batterie.

Pertanto, sembra che il mercato dei veicoli elettrici in Australia possa esistere solo per i primi utilizzatori della tecnologia "verde". Per raggiungere la competitività dei veicoli elettrici con la popolazione generale, le alleanze tra produttori di automobili e governi dovranno affrontare il principale ostacolo alla loro accettazione, l'alto prezzo di acquisto dei veicoli.

4 Metodologia predittiva semplificata per analisi ambientale di veicoli elettrici

4.1 Scopo

La fase di progettazione rappresenta la fase più importante nella realizzazione di un prodotto perché le scelte prese in questo primo periodo andranno a caratterizzare non solo i costi di produzione ma anche altri aspetti del ciclo vita come ad esempio lo scenario di fine vita, la manutenzione. In fase di progettazione, per tenere in considerazione tutte le caratteristiche del prodotto, viene condotta un'analisi multi-obiettivo che, oltre agli aspetti di carattere tecnico ed economico, tenga conto anche dell'impatto ambientale che è stato uno dei temi introdotto negli ultimi anni, in particolare attraverso l'*ecodesign*. L'ecodesign è la pratica di integrazione sistematica di considerazioni ambientali nel corso della progettazione per tutto il ciclo di vita di un prodotto, mantenendone inalterate le prestazioni. Il suo contributo può essere molto rilevante in fase iniziale di progettazione come strumento di supporto al progettista per evidenziare l'impatto delle diverse scelte. Molto spesso però, a causa delle poche informazioni anche di carattere tecnico che si hanno a disposizione, si preferisce svolgere l'analisi al termine della progettazione, in modo tale da ottenere anche dei valori oggettivi e corretti. In questo modo però l'analisi LCA viene depotenziata, perché privata dell'aspetto di strumento di supporto alla fase di decisionale e la si usa solo per la valutazione delle scelte ormai prese.

L'obiettivo è quello di sviluppare un metodo semplificato e flessibile di analisi LCA, al fine di utilizzare al meglio i risultati di questa per operare delle modifiche e ottimizzare degli aspetti critici, quando è ancora possibile. Così, lo strumento si propone di fornire supporto al progettista e, nonostante l'esigua quantità di dati a disposizione inizialmente, ha la capacità di adattarsi all'aumentare delle informazioni, in modo tale da raffinare l'esito dell'analisi.

4.2 Linee guida modellazione

Il modello nasce dalle considerazioni fatte da M. Held et al.[13], i quali propongono una metodologia LCA semplificata per la stima degli impatti ambientali della produzione e del fine vita (End of Life — EoL), dal momento che nessuna casa automobilistica è stata direttamente coinvolta nel loro studio per lo scambio di dati di inventario specifici sui componenti del veicolo e del gruppo propulsore.

L'approccio che viene proposto è un quadro flessibile, il quale si adatta al livello di dettaglio e della qualità dei dati di input disponibili. Il modello infatti permette di considerare i dati di processo, delle miscele di materiali e delle tecnologie, nonché una LCA semplificata dei veicoli che utilizzano moduli preconfigurati. Questi sono regolati in base alle principali specifiche

tecniche del veicolo e dei componenti del gruppo propulsore (ad esempio la massa totale del sistema di batterie, la tecnologia delle batterie utilizzate, i tipi di celle, la chimica dei materiali attivi, la densità energetica e la capacità energetica dei sistemi di batterie).

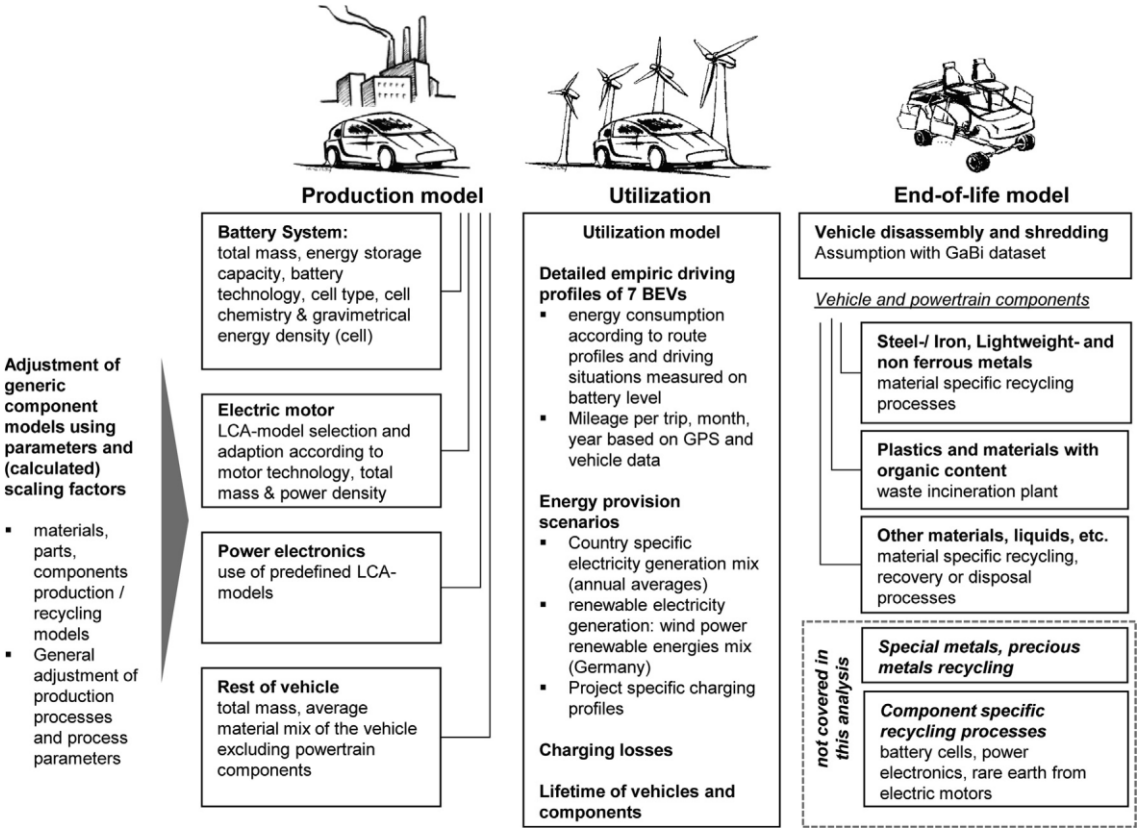


Figura 22. Modello analisi semplificata LCA

Questo approccio viene scelto poiché il fulcro dell'analisi risiede nell'influenza dell'utilizzo e nella mancanza di un LCI dettagliato. Sulla base delle informazioni disponibili, come componenti, tecnologie e dati sulle prestazioni, i moduli generici vengono scalati e regolati in base a parametri calcolati e fattori di scala. Si fa notare che l'autore specifica che i risultati non rappresentano risultati LCIA specifici di specifici modelli BEV, ma forniscono una stima affidabile delle prestazioni ambientali dei veicoli con specifiche tecniche e dimensioni comparabili. Quest'ultima considerazione è molto importante perché fa comprendere come questa metodologia sia adatta a una situazione iniziale di progettazione.

Il metodosi divide in tre parti, le quali fanno riferimento ai diversi modelli che vengono utilizzati per descrivere le diverse fasi dei confini del sistema dell'analisi (Figura 22):

1) Modello Fase Material;
2) Modello Fase d'Uso;
3) Modello Fase Fine Vita.

La Fase d'Uso è definita come la somma di tre diversi aspetti, che sono: il consumo del vettore energetico (elettricità), la manutenzione e le emissioni di particolato legate al consumo di ruote, strada e freni. La Fase Manutenzione in questo studio si preferisce separarla dalla Fase d'Uso, perché per i veicoli elettrici assume un ruolo rilevante quando interessata dalla sostituzione del pacco batteria. Per questo motivo in questo studio si infividuano queste quattro fasi:

1) Modello Fase Material;
2) Modello Fase d'Uso;
3) Modello Fase Manutenzione;
4) Modello Fase Fine Vita.

Tutti i modelli verranno implementati in Simapro, che rappresenta il software che viene scelto per la valutazione degli impatti, mentre per la valutazione del consumo energetico si utilizzano modelli realizzati in Excel.

4.2.1 Modello Fase Material

Come indicato da H. Ambrose, et al.[12], la modellazione del veicolo elettrico deve essere divisa in due macrogruppi:

a) Assieme Telaio;
b) Assieme Elettronica.

Per fare una divisione dei componenti da assegnare ai due assiemi si segue il metodo che viene proposto da M. Held et al. [13], che in primo luogo decide di descrivere l'Assieme Elettronica, costituito da moduli e componenti spesso presenti nei principali database degli strumenti LCA, che sono parametrizzati rispetto alla massa. L'Assieme Telaio è descritto come l'insieme di tutte le parti e i materiali che non sono stati definiti nell'Assieme Elettronica; non si indicano solo la parte strutturale del veicolo ma anche tutte le componenti che appartengono alla dinamica, aerodinamica e interni del veicolo.

4.2.1.1 Modello Assieme Elettronica

I componenti principali dell'Assieme Elettronica sono il pacco batteria e il motore elettrico, il resto dei componenti (inverter, cavi, ecc.) viene di solito indicato in un unico gruppo indicato in modo generico come "Componentistica elettronica". A parte il pacco batteria, il resto dei componenti, compreso il motore elettrico, si preferisce sceglierlo dal database. Per individuare gli impatti di ciascun componente è importante definire la massa di ognuno; queste informazioni sono ottenibili dai cataloghi. L'approccio per la modellazione del pacco batteria è diverso in base alle informazioni che si hanno a disposizione, si elencano tre livelli di dettaglio:

- 1º livello: nel caso in cui si abbia a disposizione soltanto il valore della massa, si consiglia di scegliere il pacco batteria presente nel database, coerente alla chimica della cella di riferimento.
- 2º livello: nel caso in cui invece si abbiano informazioni riguardo ai componenti interni del pacco batteria, come ad esempio il numero delle celle, la chimica della cella, il materiale e la massa del case, si consiglia di modellare il pacco batteria in Simapro scegliendo i componenti interni nel database.
- 3º livello: nel caso in cui si abbiano a disposizione informazioni inerenti alla chimica del catodo della cella si consiglia di modellare la cella nei suoi componenti interni scegliendo i materiali presenti nel database.

Il metodo migliore è il secondo, perché le batterie presenti nel database possono essere dei modelli standard e quindi prive di quelle parti o materiali aggiunti per rispettare le normative e le condizioni della mobilità elettrica. La differenza di errore percentuale che si commette tra il secondo e il terzo livello di dettaglio riguarda solo la definizione della cella e vale il 5% del risultato finale. Si preferisce il terzo livello solo quando viene richiesto un confronto tra diverse chimiche per la scelta del catodo. In generale si può concludere che il pacco batteria può essere diviso i quattro macro-gruppi:

- Celle:
  - la tipologia della cella, quali agli ioni di litio (Li-Ion) o al piombo-gel;
  - nel caso delle batterie agli ioni di litio per individuare la corretta tipologia di batteria è utile indicare anche la chimica del catodo (se il dato non è disponibile utilizzare la batteria Li-Ion standard presente nel database);
  - il numero delle celle nel pacco batteria;
  - la massa della cella;
  - il modello della cella.
- Case esterno:
  - la massa;
  - il materiale.
- BMS (Battery Management System): rappresenta una parte dell'elettronica del pacco batteria.
- Altro: in questo gruppo si inseriscono i cavi, materiale elettronico generico, plastica e acciaio, questi ultimi due materiali servono per la realizzazione della struttura a sostegno delle celle.

Di solito nel catalogo viene indicata la massa totale e l'ingombro del pacco batteria, questi due dati sono utili per verificare che le stime delle masse dei gruppi siano corrette. In generale possiamo dire che la massa delle celle rappresenta il 50-70% del totale della massa.

Nella situazione in cui non si abbia a disposizione il numero delle celle o la massa della cella, si può ovviare a questo problema scegliendo una cella tipo presa da catalogo, dello stesso modello di quelle utilizzate nel pacco batteria; in base alle caratteristiche di voltaggio e capacità del pacco batteria e di quelle delle celle si può stimare un numero complessivo di celle che è necessario mettere in serie e in parallelo per ottenere le caratteristiche del pacco batteria.

4.2.1.2 Modello Assieme Telaio

Per la modellazione dell'assieme telaio si segue quelle che sono le indicazioni proposte da H. Ambrose, et al. [12]. Si definiscono i materiali e la loro percentuale in massa. Per trovare la massa totale dell'assieme telaio al quale faranno riferimento le percentuali definite in precedenza, si sottrae alla massa a vuoto del veicolo, la massa media del conducente e la massa dell'Assieme Elettronica. In questo modo si hanno a disposizione tutte le informazioni necessarie per fare una valutazione della fase Material all'interno di Simapro, scegliendo i materiali da database. Questo modello presenta un limite importante poiché non viene presa in considerazione la fase di produzione del veicolo, ovvero l'insieme dei processi che trasformano i materiali nei componenti poi assemblati del veicolo, come mostrato in Tabella 1.

Questo limite non preoccupa la bontà del risultato finale per due motivi:

- In fase iniziale di progettazione, non si ha ancora a disposizione nel dettaglio la definizione di tutti i processi produttivi.
- Una definizione nel dettaglio di tutti processi produttivi per ciascun componente presente nel veicolo può rappresentare un lavoro molto dispendioso che può non essere rilevante ai fini del risultato finale.

Soltanto nel caso in cui si hanno anche a disposizione le informazioni inerenti alla catena dei processi produttivi è consigliabile valutare soltanto quelli che richiedono un elevato consumo energetico e che quindi di conseguenza hanno un impatto ambientale non trascurabile. L'analisi che si propone è semplificata e quindi, almeno inizialmente, non viene richiesto un elevato livello di dettaglio.

	EOV	PLS	PSUV	Leaf (2012)
Steel	54.25%	21.0%	21.0%	66.0%
Cast Iron	4.24%	3.0%	3.0%	2.0%
Wrought Aluminum	2.12%	26.0%	26.0%	1.5%
Cast Aluminum	8.50%	17.0%	17.0%	5.0%
Copper/Brass	7.63%	6.0%	6.0%	5.5%
Glass	4.24%	4.0%	4.0%	3.0%
Average Plastic	13.56%	15.0%	15.0%	12.0%
Rubber	2.54%	2.6%	2.6%	2.0%
Glass Fiber-Reinforced Plastic	0.00%	2.5%	2.5%	0.0%
Others	3.0%	2.9%	2.9%	3.0%
Glider Mass (lbs)	2,609	3,505	4,043	2,785

Tabella 1. Esempio modellazione assieme telaio per quattro diversi tipi di veicolo[1]

4.2.2 Modello Fase d'uso

Il modello di consumo energetico ha come obiettivo quello di ottenere un risultato medio dei kWh consumati per km percorso (kWh/km). Moltiplicando questo valore con i km totali percorsi nell'intera vita del veicolo permette di ottenere il consumo energetico complessivo che in Simapro permetterà di valutare l'impatto ambientale dell'energia elettrica consumata. Il modello energetico si basa sui metodi proposti da B. Marmiroli, et al.[14], M. Hernandez et al., [15], e Schücking et al.[11], Faria et al. [6][23] . Tutti questi articoli concordano nel realizzare un modello cinematico, dato che le emissioni e i consumi dei veicoli sono caratteristiche che dipendono in larga misura dalla tipologia del veicolo e dallo stile di guida. Per valutare lo stile di guida, il quale influenza le prestazioni, sono stati analizzati diversi cicli di guida, considerando diverse percentuali di carico. Una volta determinato il consumo medio, per individuare il consumo energetico totale è necessario specificare la distanza percorsa durante la vita utile del veicolo. La distanza percorsa può essere individuata in due modi:

- La distanza viene stimata considerando che il veicolo durante la sua vita utile non sostituisce il pacco batteria;
- Si indica la distanza che si desidera il veicolo percorra durante la sua vita e si stima il numero di sostituzioni del pacco batteria necessari.

[1] EOV= Efficiency-Oriented compact Vehicle
PLS = High Performance Luxury Sedan
PSUV= High Performance SUV
Leaf = Nissan Leaf

La distanza stimata nel primo modo può essere anche interpretata come la previsione della distanza che il veicolo può percorrere prima che il pacco batteria venga sostituito, quindi è una stima che deve essere realizzata anche nel secondo caso perché necessaria per comprendere il numero di sostituzione del pacco batteria. La valutazione avviene attraverso le curve di perdita di capacità.

4.2.2.1 Ciclo Guida

Con ciclo guida si intende un modello di utilizzo di veicolo che esprime la velocità raggiunta dal veicolo durante il suo utilizzo su un percorso scelto, con risoluzione temporale pari a un secondo. Il ciclo guida può essere personale, cioè specifico del proprio caso studio e quindi stimato in base al percorso oppure può essere scelto tra quelli proposti in letteratura o da organizzazioni internazionali che li realizzano per valutare le emissioni di CO2. I cicli guida consigliati in questo studio fanno parte della *procedura di prova per veicoli leggeri armonizzata a livello mondiale* (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure — WLTP) che definisce una norma globale per determinare i livelli di inquinanti ed emissioni di CO2, consumo di carburante o di energia, e gamma di veicoli elettrici leggeri (autovetture e furgoni commerciali leggeri).

I *cicli di prova per veicoli leggeri armonizzati a livello mondiale* (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles — WLTC) sono prove su banco dinamometrico per la determinazione delle emissioni e del consumo di carburante dei veicoli leggeri. I test sono stati sviluppati dal gruppo UN ECE GRPE (Working Party on Pollution and Energy)[16]. I cicli WLTC fanno parte delle procedure di prova dei veicoli leggeri armonizzate a livello mondiale (WLTP), pubblicate come regolamento tecnico globale UNECE n. 15 (GTR 15). Sebbene gli acronimi WLTP e WLTC siano talvolta usati in modo intercambiabile, le procedure WLTP definiscono una serie di altre procedure, oltre ai cicli di prova WLTC, necessarie per l'approvazione del tipo di un veicolo.

Il WLTP sostituisce la procedura europea basata sul NEDC per le prove di omologazione dei veicoli leggeri, con la transizione da NEDC a WLTP avvenuta nel periodo 2017-2019 il WLTP viene introdotto anche per la certificazione dei veicoli in Giappone.

Le procedure WLTP includono diversi cicli di prova WLTC applicabili a categorie di veicoli con diverso rapporto potenza-massa (Power-to-Mass Ratio - PMR). Il parametro PMR è definito come il rapporto tra potenza nominale espressa in Watt [W] e la massa a vuoto espressa in chilogrammi [kg]. La massa in ordine di marcia indica la massa a vuoto, escluso il conducente, come definito in ECE R83. Il ciclo NEDC è costituito da due parti: ciclo guida urbano e ciclo guida extraurbano. A differenza del ciclo NEDC, i cicli WLTC vengono assegnati in base alle caratteristiche del veicolo. Ciascun ciclo WLTC è sostanzialmente diviso in quattro parti (Low, Medium, High e Extra-High) che a secondo del ciclo WLTC scelto e del veicolo possono essere

presenti o escluse. Ogni parte del ciclo fa riferimento a differenti situazioni di stress, rappresentate attraverso variazioni di velocità.

Category	PMR, W/kg	v_max, km/h	Speed Phase Sequence
Class 3b	PMR > 34	v_max ≥ 120	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3
Class 3a		v_max < 120	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3
Class 2	34 ≥ PMR > 22	-	Low 2 + Medium 2 + High 2 + Extra High 2
Class 1	PMR ≤ 22	-	Low 1 + Medium 1 + Low 1

Figura 23. WLTC cicli guida

Il nuovo standard è stato progettato per essere più rappresentativo delle condizioni di guida reali e moderne. Per perseguire questo obiettivo, il suo profilo di velocità è più dinamico, consistente in accelerazioni più veloci seguite da freni corti, in più comprende una più ampia gamma di condizioni di guida (urbano, suburbano, stradale principale, autostradale). Ma a differenza del NEDC che valutava singolarmente le condizioni di guida, nel WLTP sono analizzate nel complesso permettendo un'analisi realistica. Le definizioni del ciclo possono anche dipendere dalla velocità massima, che è la velocità massima del veicolo dichiarata dal costruttore (ECE R68) e non da qualsiasi restrizione d'uso o limitazione basata sulla sicurezza (Figura 23). Le modifiche al ciclo sono consentite per veicoli con rapporti potenza/massa vicini ai valori limite o con velocità massime inferiori alla velocità massima richiesta dal ciclo.
Si vedono ora nel dettaglio i diversi cicli[2]:

- **Ciclo Classe 3:** Con il più alto rapporto potenza-massa, la Classe 3 è rappresentativa dei veicoli guidati in Europa e Giappone. I veicoli di Classe 3 sono suddivisi in 2 sottoclassi in base alla loro velocità massima: Classe 3a con v_max <120 km/h e Classe 3b con v_max ≥ 120 km/h (Figura 24,Figura 25). I veicoli di riferimento di questi cicli sono le automobili.

Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	*s*	*m*		*km/h*	*km/h*	*km/h*	*m/s²*	*m/s²*
Class 3b (v_max ≥ 120 km/h)									
Low 3	589	156	3095	26.5%	56.5	25.7	18.9	-1.47	1.47
Medium 3-2	433	48	4756	11.1%	76.6	44.5	39.5	-1.49	1.57
High 3-2	455	31	7162	6.8%	97.4	60.8	56.7	-1.49	1.58
Extra-High 3	323	7	8254	2.2%	131.3	94.0	92.0	-1.21	1.03
Total	**1800**	**242**	**23266**						
Class 3a (v_max < 120 km/h)									
Low 3	589	156	3095	26.5%	56.5	25.7	18.9	-1.47	1.47
Medium 3-1	433	48	4721	11.1%	76.6	44.1	39.3	-1.47	1.28
High 3-1	455	31	7124	6.8%	97.4	60.5	56.4	-1.49	1.58
Extra-High 3	323	7	8254	2.2%	131.3	94.0	92.0	-1.21	1.03
Total	**1800**	**242**	**23194**						

Figura 24. Ciclo WLTC Classe 3 parametri di riferimento

[2] https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php

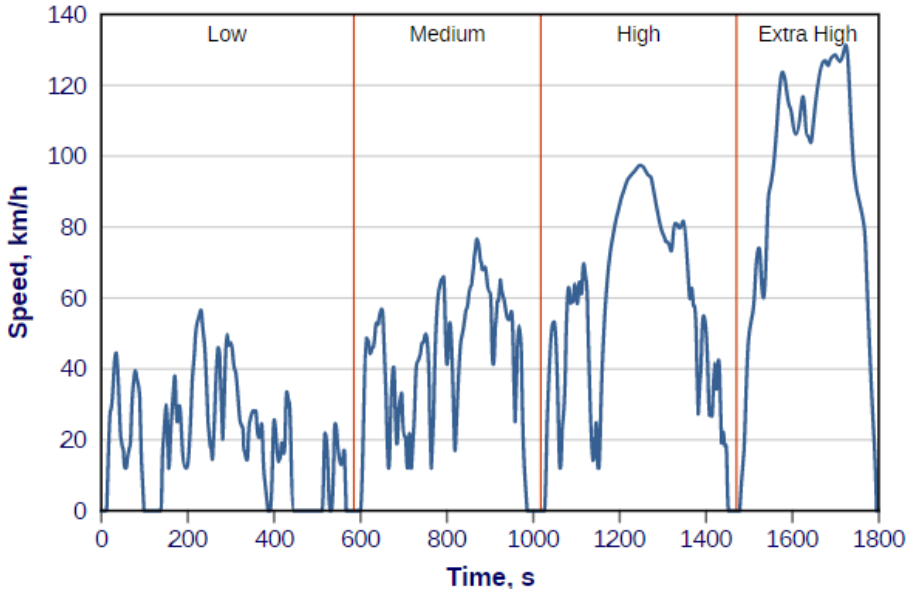


Figura 25. Ciclo WLTC Classe 3 b

- **Ciclo Classe 2:** La classe 2 è rappresentativa dei veicoli guidati in India e dei veicoli (autobus) a bassa potenza guidati in Giappone e in Europa. I veicoli a cui fanno riferimento le caratteristiche di questa classe sono gli autobus e furgoni (Figura 26,Figura 27).

Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	*s*	*m*		*km/h*	*km/h*	*km/h*	*m/s²*	*m/s²*
Low 2	589	155	3101	26.3%	51.4	25.7	19.0	-0.94	0.90
Medium 2	433	48	4737	11.1%	74.7	44.3	39.4	-0.93	0.96
High 2	455	30	6792	6.6%	85.2	57.5	53.7	-1.11	0.85
Extra-High 2	323	7	8019	2.2%	123.1	91.4	89.4	-1.06	0.65
Total	**1800**	**240**	**22649**						

Figura 26. Ciclo WLTC Classe 2 parametri di riferimento

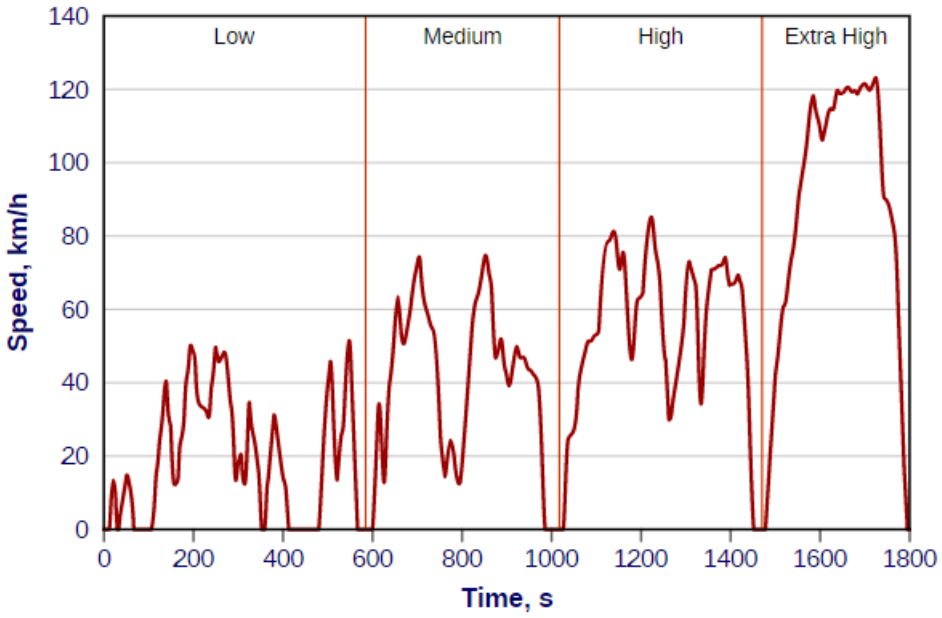


Figura 27. Ciclo WLTC Classe 2

- **Ciclo Classe 1**: Con il rapporto potenza-massa più basso, la Classe 1 è rappresentativa dei veicoli guidati in India.

  La classe 1 fa riferimento a piccoli veicoli come mini-bus e veicoli a guida autonoma (AGV) (Figura 28, Figura 29).

Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	*s*	*m*		*km/h*	*km/h*	*km/h*	*m/s²*	*m/s²*
Low 1	589	154	3330	26.1%	49.1	27.6	20.4	-1.00	0.76
Medium 1	433	48	4767	11.1%	64.4	44.6	39.6	-0.53	0.63
Low 1	589	154	3330	26.1%	49.1	27.6	20.4	-1.00	0.76
Total	**1611**	**356**	**11428**						

Figura 28. Ciclo WLTC Classe 1 parametri di riferimento

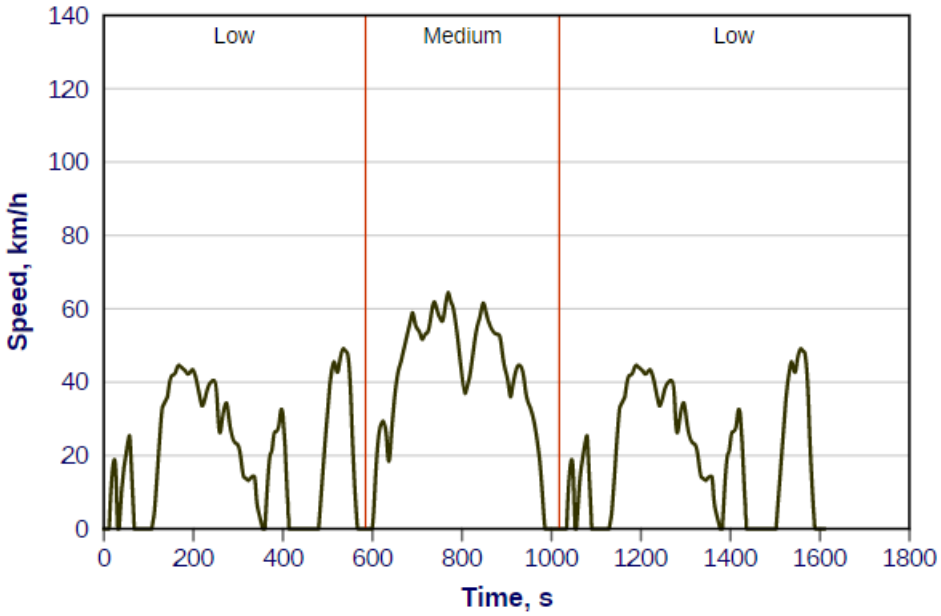


Figura 29. Ciclo WLTC Classe 1 b

Per motivi che saranno più chiari a termine di questo paragrafo, questo ciclo guida viene rinominato Ciclo WLTC Classe 1 b per distinguerlo da un'altra variante della Classe 1 ovvero il Ciclo WLTC Classe 1 a, il quale sarà presentato a termine di questo paragrafo e in modo più approfondito in Appendice.

Per alcuni veicoli, potrebbe non essere possibile seguire i requisiti di velocità / tempo del ciclo. Le ragioni di ciò sono:

- I veicoli con rapporti potenza / massa vicini al confine tra i veicoli di Classe 2 e di Classe 3 o i veicoli a potenza molto bassa della Classe 1 potrebbero non essere in grado di raggiungere le accelerazioni necessarie per mantenere la velocità del ciclo. In questi casi, è possibile applicare una procedura di riduzione dei tassi di accelerazione massimi per migliorare la guidabilità. Una conseguenza di questa procedura è una riduzione delle velocità massime del ciclo.
- Alcuni veicoli possono avere una velocità massima limitata a un valore inferiore alla velocità massima del ciclo ridotto. In questi casi, il veicolo deve essere guidato alla sua velocità massima nei periodi di ciclo in cui la velocità del ciclo è superiore alla velocità massima del veicolo. Un esempio di veicoli per i quali ciò si applica sono i veicoli di Classe 3a nella fase Extra-High 3.
- Alcuni veicoli potrebbero non essere in grado di seguire la traccia della velocità del ciclo ridotto entro la tolleranza richiesta per periodi specifici. In questi casi il veicolo deve essere guidato con il comando dell'acceleratore completamente attivato durante questi periodi. In questi casi, sono consentite le violazioni delle tracce di guida.

Il WLTP include disposizioni speciali per i test di varie categorie di veicoli ibridi-elettrici ed elettrici: OVC-HEV (veicoli elettrici ibridi a ricarica fuori dal veicolo); NOVC-HEV (veicoli elettrici ibridi non ricaricabili fuori dal veicolo); e PEV (veicoli elettrici puri).

Tutti gli OVC-HEV, NOVC-HEV e PEV sono classificati come veicoli di Classe 3. Le emissioni e una serie di altri parametri vengono testati nel rispettivo ciclo di Classe 3 (Classe 3a o Classe 3b), in entrambe le modalità di riduzione della carica e di mantenimento della carica. Inoltre, alcuni parametri vengono testati sui cicli urbani WLTC, composti solo dalle fasi di bassa e media velocità. Si scelgono i cicli guida proposti dal WLTP perché forniscono un esempio realistico del funzionamento di un veicolo, anche se sembrano essere più adatti a rappresentare il funzionamento di veicoli a combustione interna. Ricordiamo che l'obiettivo è quello di valutare un consumo medio del veicolo in funzione dello stile di guida e del carico, senza altri fini di valutazione di carattere tecnico, quindi anche se lo stile di guida può non essere perfettamente uguale allo stile di guida di un veicolo elettrico, il valore medio di consumo energetico finale può essere ritenuto realistico. Utilizzare un ciclo guida personale, sviluppato in modo specifico del proprio caso studio, sicuramente porta con sé molti vantaggi, perché permette di valutare specificatamente anche quello che riguarda le variazioni della massa dell'autoveicolo e della pendenza del percorso durante il tragitto. Si consiglia in ogni caso affiancare al ciclo guida personale anche quello standard WLTP, perché è modello di carattere generale che esplora diverse situazioni di funzionamento.

Oltre ai cicli guida indicati precedentemente, per aumentare i diversi veicoli rappresentabili e le diverse condizioni di guida possibili, sono stati introdotti altri cicli guida WLTC:

- WLTC Classe 3 v5 a : fa riferimento alla versione 5, da utilizzare quando PMR > 34 e v_max < 135 km/h;
- WLTC Classe 3 v5 b : fa riferimento alla versione 5, da utilizzare quando PMR > 34 e v_max >= 135 km/h;
- WLTC Classe 2 v1.4 a : fa riferimento alla versione 1.4, da utilizzare quando 22 < PMR <= 34 e v_max <= 90 km/h;
- WLTC Classe 2 v1.4 b : fa riferimento alla versione 1.4, da utilizzare quando 22 < PMR <= 34 e v_max > 90 km/h;
- WLTC Classe 1 a : fa riferimento alla versione 1.4, da utilizzare quando PMR <= 22 e v_max <= 70 km/h.

Questi cicli guida permettono di rappresentare con maggior accuratezza anche veicoli di piccole dimensioni come ad esempio AGV.

Questi cicli guida vengono rappresentati nel dettaglio in Appendice.

4.2.2.2 Modello consumo energetico del veicolo elettrico

Il modello energetico utilizza un approccio cinematico del veicolo, dove le condizioni di funzionamento del sistema e le variabili di controllo sono ottenute dallo stato cinematico del sistema stesso. Questo approccio è stato sviluppato in foglio di calcolo in Excel, in modo da facilitare le modifiche. La richiesta di potenza per il gruppo propulsore è stata calcolata dai modelli di velocità del veicolo, che sono stati considerati come input per il modello cinematico, considerando la catena di efficienza della trasmissione e l'efficienza di ciascuna macchina (batteria, DC/AC Converter, motore elettrico, trasmissione). La potenza totale richiesta a livello di gruppo propulsore è la somma di diversi componenti: resistenza al rotolamento, resistenza alla pendenza e resistenza aerodinamica.
La potenza richiesta alle ruote viene calcolata per ogni fase temporale del ciclo di guida, utilizzando le seguenti equazioni:

$$Resistenza\ al\ pendenza:\ \ F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad [N] \tag{1}$$

$$Resistenza\ al\ rotolamento:\ \ F_{roll} = m \cdot g \cdot C_r \cdot cos(\alpha) \quad [N] \tag{2}$$

$$Resistenza\ aerodinamica:\ \ F_{ad} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_F \cdot V^2 \quad [N] \tag{3}$$

$$Forza\ richiesta\ dall'accelerazione:\ \ F_{acc} = m \cdot a \quad [N] \tag{4}$$

Dove, m: massa del veicolo (kg), g: accelerazione di gravità (m / s^2), alfa α : angolo di inclinazione, a: accelerazione (m / s^2), C_r: coefficiente di resistenza al rotolamento, ro ρ: densità dell'aria (kg / m^3), C_d: coefficiente di resistenza aerodinamica, A_F: area frontale del veicolo (m^2), v: velocità del veicolo (m / s).

La forza richiesta dall'accelerazione può essere sia positiva che negativa, questo aspetto sarà analizzato in seguito.

Bisogna sottolineare che i valori delle forze verranno analizzate secondo per secondo, le quali varieranno in funzione della velocità nel ciclo guida, che porta di conseguenza variazioni dell'accelerazione. A seconda delle richieste e dei dati a disposizione si può realizzare un modello fedele alla realtà per quello che riguarda la variazione del carico (m) e dell'inclinazione del percorso (α). Nel caso non si disponesse di informazioni di questo tipo si consiglia di considerare il percorso in piano e di calcolare il consumo medio in funzione di diversi carichi medi standard (0%, 25%, 50%, 75%, 100%).

$$Forza\ totale:\ F_{tot} = F_g + F_{roll} + F_{ad} + F_{acc} \quad [N] \tag{5}$$

$$Potenza\ richiesta\ alle\ ruote:\ P_{wheel} = F_{tot} \cdot V \quad [W] \tag{6}$$

Per ottenere la potenza richiesta al pacco batteria è necessario applicare dei filtri e considerare i corretti rendimenti riferiti al gruppo propulsore.

In primo luogo si calcola la potenza richiesta alla batteria. Per fare questo bisogna filtrare i risultati ottenuti dal calcolo della potenza richiesta alle ruote:

$$P_{wheel} \geq 0$$

I valori della potenza richiesta alla batteria devono essere maggiori o uguali a zero perché i risultati del calcolo di P_{wheel} possono essere negativi, questo è dovuto alle fasi di decelerazione. I dati che saranno minori di zero verranno posti uguali a zero.

Quindi con i risultati filtrati ($P_{wheel.fp}$) otteniamo la potenza richiesta da parte del ciclo guida:

$$P_{el.supply} = \frac{P_{wheel.fp}}{(\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_c \cdot \eta_b)} + P_{aux} \quad [W] \tag{7}$$

Con P_{aux} si intende la potenza richiesta dagli ausiliari; η_t è il rendimento della trasmissione; η_m è il rendimento del motore; η_c esprime il rendimento del DC/AC in(?)verter; η_b è il rendimento della batteria.

Questo risultato però deve essere filtrato, perché quando il ciclo guida utilizzato non è stato formulato in modo da essere adattato al veicolo ma viene invece scelto tra quelli standard, può accadere che venga richiesta al motore una potenza che non è in grado di erogare:

$$P_{el.supply} \leq P_{peak}$$

Con P_{peak} si intende il picco di potenza che il motore elettrico riesce a raggiungere. I valori superiori al picco verranno posti uguali al picco, in modo tale che il veicolo riesca, per quello che gli è possibile, a seguire il ciclo. Con questo filtro otteniamo i valori che identifichiamo come $P_{el.supply.eff.}$

Di solito i veicoli elettrici sono dotati di sistema di recupero dell'energia cinetica (Kinetic Energy Recovery System — KERS), perché rappresenta un componente fondamentale per il miglioramento dell'efficienza del consumo energetico e che di conseguenza influenza in modo positivo l'impatto ambientale del veicolo. Per valutare il beneficio introdotto dal KERS bisogna filtrare i dati per valutare solo quelli negativi:

$$P_{wheel} \leq 0$$

Con i dati che otteniamo dal filtro ($P_{wheel.fn}$) andiamo a valutare la potenza che potenzialmente possiamo recuperare:

$$P_{el.recover} = P_{wheel.fn} \cdot (\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_c \cdot \eta_b) \cdot \eta_K \quad [W] \tag{8}$$

Dove η_K rappresenta il rendimento del KERS.

I risultati ottenuti devono essere filtrati considerando il valore massimo della potenza di ricarica $P_{rec.standard}$. Dato che i dati che stiamo trattando sono negativi, è necessario cambiare il segno della potenza di ricarica massima:

$$P_{el.recover} \leq P_{rec.standard}$$

Quindi considerando la convenzione presa per il segno esprimiamo che i valori di potenza che sono inferiori alla potenza di carica verranno sostituiti con il valore della potenza di carica stessa perché rappresenta il limite minimo di potenza in grado di assorbire. I valori che si ottengano vengono indicati come $P_{el.recover.eff}$.

Per ciascun time step consideriamo:

$$P_{tot} = P_{el.recover.eff} + P_{el.supply.eff} \ [W] \quad (9)$$

$$L = P_{tot} * t_{step} \ [J] \quad con \quad t_{step} = 1 \ [s] \quad (10)$$

Dove t_{step} è il time step che in un ciclo guida equivale sempre ad un secondo.

$$L_{tot} = 10^{-3} \cdot \sum_{i}^{T} L_i \quad [kJ] \quad (11)$$

$$E = 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot L_{tot} \quad [kWh] \quad (12)$$

$$Cm = \frac{E}{d} \left[\frac{kWh}{km}\right] \quad (13)$$

Dove L_{tot} è il lavoro totale richiesto durante il ciclo guida; E è il consumo energetico totale; Cm è il consumo medio al km; d è la distanza del percorso del ciclo guida.

4.2.2.3 Modello previsione vita della batteria

In letteratura esistono numerosi modelli in grado di stimare la vita di un pacco batteria, i quali però si basano su formule empiriche che valgono però per il modello, la marca e la chimica specifica della batteria esaminata. Le formule individuano dei parametri di riferimento ed in questo modo trasformano il modello in una blackbox. Molti studi si stanno compiendo nel campo dell'intelligenza artificiale, sfruttando reti neurali, ma non si dispone ancora di risultati robusti.

In questo paragrafo vengono presentati due modelli empirici che sono stati individuati in letteratura, che fanno riferimento in particolare alle batterie agli ioni di litio, e poi viene proposto un metodo molto semplificato, che non utilizza formule empiriche ma si basa unicamente su quelle che sono le informazioni comunicate nei cataloghi dei pacchi batteria dei produttori. Si anticipa che nel caso in cui la batteria del proprio veicolo non è agli ioni di litio si preferisce fare affidamento al metodo semplificato perché è un approccio di carattere generale il cui

risultato si avvicina molto a quelli dei metodi empirici. I modelli empirici necessitano di un'approfondita ricerca in letteratura per ottenere un risultato che comunque presenta un'elevata incertezza e che quindi non giustifica l'elevato consumo di tempo e di risorse. Questo perché i modelli empirici sono realizzati attraverso test su specifiche batterie, ovvero una chimica del catodo della cella specifica e un modello e forma specifica della cella. Al momento trovare il modello specifico per la propria batteria è molto difficile; per questo quello che è stato fatto in questo lavoro è considerare dei modelli di batterie paragonabili alla propria, adattandoli alle informazioni presenti nel catalogo, in modo tale da ottenere dei risultati plausibili, sebbene si introduce un maggior livello di incertezza.

La sostituzione di un pacco batteria avviene quando la sua capacità scende al di sotto di valore di minimo stabilito. Lo standard statunitense Advanced Battery Consortium (USABC) per i veicoli elettrici suggerisce la sostituzione della batteria quando la capacità raggiunge l'80% [17]. Al contrario, alcune case automobilistiche raccomandano la sua sostituzione al 70% della capacità. Si decide di utilizzare lo standard statunitense perché più restrittivo ed anche perché spesso i cataloghi delle batterie fanno riferimento a questo standard.

Modello empirico

Il primo modello che in analisi è quello di Wang et al. [18], dove la formulazione deriva dall'osservazione dei risultati dell'analisi di dissolvenza della capacità di una cella agli ioni di litio, modello 26650, con LiFePO4 come chimica del catodo. La formula finale che si ottiene è:

$$Q_{loss} = A \cdot \exp\left[\frac{-31700 + 370.3 \cdot C_{Rate}}{RT}\right](A_h)^{0.55} \tag{14}$$

Dove A è un coefficiente tabulato che dipende dal valore di C_rate riportato in Tabella 2; ad esempio nel caso studio che verrà presentato dato che per semplicità C_rate = 1C, A viene valutato interpolando i valori presenti in Tabella; R è la costante universale dei gas; T è la temperatura del test; C_Rate è la capacità media della cella (C) valutata per un determinato tasso (rate), ad esempio nel caso studio presentato per semplicità si sceglie 1C (questo è un parametro presente nei cataloghi delle cella del pacco batteria) e Ah rappresenta la quantità di carica erogata dalla batteria durante il ciclaggio (carica e scarica).

C-rate	C/2	2C	6C	10C
A values	31,630	21,681	12,934	15,512

Tabella 2. Tabella coefficiente B

Invece di usare il tempo, si è scelto Ah come parametro per la modellazione della vita. Ah è direttamente proporzionale al tempo; tuttavia, il merito dell'utilizzo di Ah è che consente di quantificare e correlare i comportamenti di dissolvenza della capacità per diversi tassi di capacità nominale della cella (Cc).

$$A_h = n_{cicli} \cdot DOD \cdot C_c \tag{15}$$

Dove con n_{cicli} è il numero dei cicli di carica e scarica della batteria per quell'istante del ciclaggio, DOD è la profondità di scarica, e Cc è la capacità nominale della cella.

Il secondo modello è quello di Cui et al. [19] considera uno studio per una batteria agli ioni di litio, prismatica e con LiCoO2 come chimica del catodo. Il modello presenta le seguenti equazioni:

$$Q_{loss}(T, Rate, DOD, V_t, n) = A(DOD, Rate, V_t) \cdot \exp\left(-\frac{E_a(Rate)}{8.134T}\right) {A_h}^{0.740} \tag{16}$$

$$A(DOD, Rate, V_t) = -157.671 + 3.624DOD + 14.190Rate + 2.721\exp(0.938V_t) \tag{17}$$

$$E_a(Rate) = 2.330 \cdot 10^3 \exp(1.337Rate) + 1.353 \cdot 10^4 \tag{18}$$

Dove Vt è il voltaggio nominale della cella; Rate è il tasso scelto per C, (ad esempio per semplicità si può scegliere 1).

Quindi, bisogna indicare per ciascun ciclo:

$$Q_i = Q_0 - Q_c \cdot \frac{Q_{loss}}{100} \quad [Ah] \tag{19}$$

Dove Qi è la capacità attuale, Q_0 è la capacità iniziale della cella, Qc è la capacità specifica a quella percentuale di scarica della cella.

$$E_i = Q_i \cdot \frac{V_t}{1000} \qquad [kWh] \tag{20}$$

Dove E_i è l'energia attuale posseduta dalla cella, V è il voltaggio nominale della cella [V].

$$Ebat_i = E_i \cdot n_{celle} \cdot n_{batt} \qquad [kWh] \tag{21}$$

Dove $Ebat_i$ rappresenta l'energia attuale totale della batteria per lo specifico ciclo i-esimo, n_{celle} è il numero totale delle celle della singola batteria; n_{batt} è il numero di batterie presenti nel pacco batteria.

$$P_i = \frac{Ebat_i}{Cm} \qquad [km] \tag{22}$$

Dove Pi esprime il percorso attuale compiuto sfruttando l'energia messa a disposizione dal ciclo i-esimo; ricordiamo che Cm rappresenta il consumo medio [kWh/km].

$$P_{tot} = \sum_{i}^{n(Q(80\%))} Pi \qquad [km] \tag{23}$$

Dove Ptot rappresenta la sommatoria dei percorsi attuali sfruttando tutti i cicli fino a quando non si raggiunge il ciclo in corrispondenza del quale la capacità è scesa all'80% del totale. Il numero dei cicli che si hanno quando si raggiunge l'80% è indicato di solito dal catalogo.

$$A = \frac{P_{tot}}{P_m \cdot G_a} \qquad [anni] \tag{24}$$

Dove A è il numero di anni di vita della batteria, Pm è il percorso medio compiuto ogni giorno [km/gg] e Ga è il numero di giorni in un anno in cui il veicolo viene utilizzato [gg/aa].

Modello semplificato

Il modello semplificato non utilizza una curva ma esprime una relazione lineare in cui ad una retta che parte dalla capacità iniziale del pacco batteria, viene imposto che la capacità sia dell'80% del totale quando si raggiunge un certo numero dei cicli. Per i cicli compresi in questo intervallo viene valutata l'energia totale a disposizione.

$$E_i = E_{nb} + \frac{n_{cicli}(E_{nb} \cdot E_{\%s} - E_{nb})}{n_{tot}} \tag{25}$$

Dove E_{nb} è l'energia nominale della singola batteria; $E_{\%s}$ è la percentuale di energia nominale in corrispondenza della quale deve avvenire la sostituzione della batteria (ad esempio l'80%); n_{tot} è il numero di cicli in corrispondenza della quale avviene la sostituzione della batteria.

$$Ebat_i = E_i \cdot n_{batt} \qquad [kWh] \tag{26}$$

Attraverso le eq. (22), (23), (24) si ottiene il numero di anni di utilizzo prima di dover sostituire la batteria.

4.2.2.4 Modello Mix Energetico

Definito il consumo totale di energia elettrica, per valutare l'impatto ambientale, è necessario definire il Mix Energetico di riferimento. Il Mix Energetico è l'insieme di fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica fornita dalle imprese di vendita ai clienti finali. Dalla Figura 30 si può notare come energia elettrica prodotta dal nucleare sia pari a zero, dato che in Italia non ci sono centrali nucleari, ma nella voce altro si tiene conto dell'energia elettrica di importazione, cioè quella acquistata da altri paesi in particolare Francia

dove la maggior parte dell'energia è prodotta da fonte nucleare, questo fa si che la valutazione dell'impatto relativo al mix energetico italiano tenga conto anche di questo aspetto.

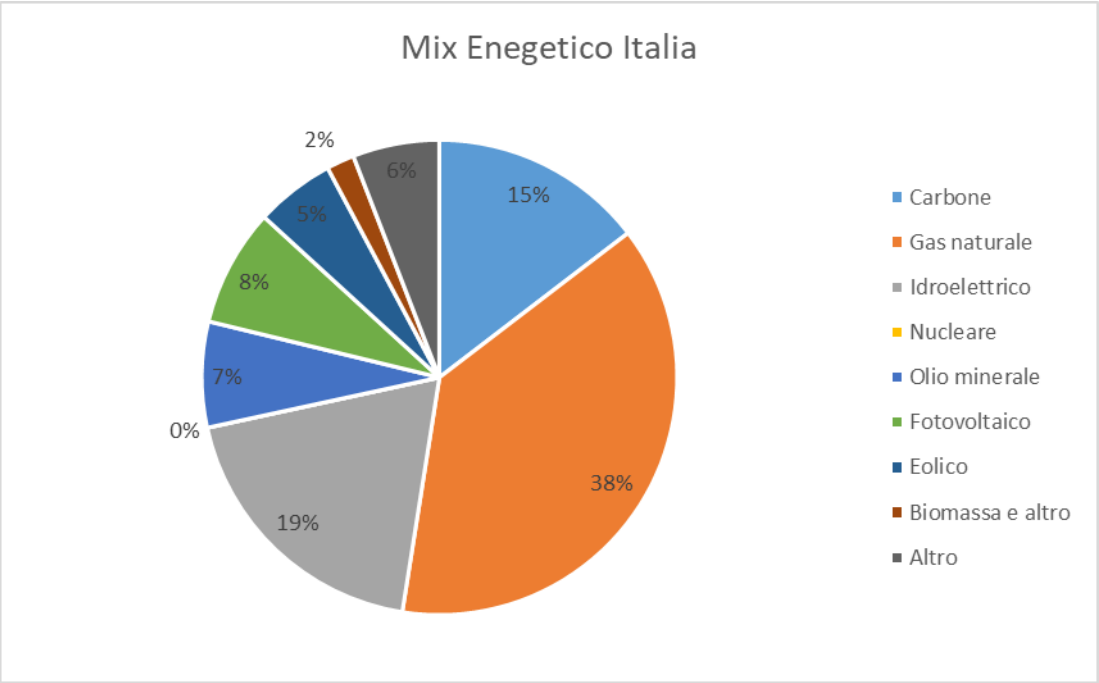


Figura 30. Mix Energetico Italia

In alcuni casi le aziende hanno a disposizione un impianto fotovoltaico privato per la produzione di energia elettrica. Questo ovviamente va a mitigare il consumo dalla rete nazionale e di conseguenza anche l'impatto finale. Quindi per una valutazione corretta dell'impatto è necessario distinguere la quantità di energia elettrica consumata dalla rete nazionale e quella invece consumata dal proprio impianto fotovoltaico. Per rendere i risultati di impatto più identificabili con la propria fase d'uso, è preferibile modellare il mix energetico sulla base del mix energetico reso disponibile dal proprio fornitore di energia.

4.2.2.4 Emissioni particolato

Una valutazione completa dell'impatto della fase d'uso coinvolge anche la considerazione nel totale anche dell'emissioni di particolato legate al consumo di pneumatici, strada e freni. Rispetto alle altre categorie è quella meno rilevante, ma comunque si ritiene importante analizzarla ai fini di un'analisi completa. L'analisi viene condotta attraverso il programma SimaPro. La libreria di veicoli presenti nel database permettono di scegliere tra diverse tipologie di veicoli, nel caso in cui si scelga un auto elettrica, il calcolo verrà fatto in funzione dei km percorsi mentre se si sceglie un camion, la scelta verrà fatta in base al carico massimo trasportabile ed input bisogna fornire le tonnellate di carico trasportato per i km percorsi.

4.2.3 Modello Fase Manutenzione

La Fase di Manutenzione può essere considerata una parte della Fase d'Uso, ma in questo studio si preferisce considerarla separatamente perché nel caso dei veicoli elettrici assume un ruolo rilevante quando si prevede la sostituzione del pacco batteria durante la vita utile del veicolo. La Fase di Manutenzione relativa alle operazioni che avvengono sul veicolo viene affrontata attraverso le valutazioni fatte da SimaPro e presenti nel database. Queste operazioni sono operazioni standard fatte su un veicolo elettrico, nelle quali non è prevista la sostituzione del pacco batteria. L'analisi relativa alla sostituzione del pacco batteria viene affrontata separatamente ed attraverso la valutazione dei km che possono essere percorsi dal pacco batteria prima di essere sostituito, valutazione fatte nel paragrafo 4.2.2.3 Modello previsione vita della batteria. In base anche alla distanza totale percorsa durante la vita utile, sarà possibile comprendere il numero di volte che avverrà la sostituzione. Dato che il pacco batteria per la sostituzione, viene prodotto per questo scopo è corretto attribuire nella valutazione del suo impatto, la Fase Material e la Fase di Fine vita. Nonostante venga prevista la rivendita del pacco batteria sostituito, che quindi verrà utilizzato per una seconda vita, l'impatto ambientale del pacco batteria sostituito è totalmente a carico della sua prima vita [7]. Il Fine Vita del pacco batteria per la sostituzione viene valutato nella Fase Manutenzione e non nella Fase del Fine Vita dell'intero veicolo perché questo pacco batteria viene introdotto a seguito della manutenzione e si ritiene corretto valutare il suo fine vita in questa fase. Lo stesso concetto vale per la Fase Material.

4.2.4 Modello Fase Fine Vita

La modellazione della Fase del Fine Vita consiste nell'assegnare a ciascun materiale e componente lo specifico trattamento. Anche in questo caso la modellazione viene fatta attraverso SimaPro assegnando per ciascun materiale o componente la percentuale di massa che verrà inviata a quel trattamento; il resto del materiale viene inviato in discarica. Per quanto riguarda i materiali si assegna un trattamento che consiste in un processo di riciclo, mentre per quanto riguarda i componenti si assegna un trattamento specifico per quel componente presente nel database.

4.3 Software di modellazione

La procedura presentata è stata riportata in Excel, realizzando un unico file che presenta un foglio iniziale, il quale va completato riportando tutti i dati richiesti in modo da completare un analisi che restituisce i seguenti risultati:

- la massa dei componenti e dei materiali relativi alla Fase Material
- la valutazione del consumo su distanza percorsa relativa al ciclo guida indicata
- la distanza prevista prima della sostituzione del pacco batteria

Questi risultati costituiscono gli input del progetto in SimaPro, che permette di concludere la valutazione degli impatti del ciclo vita del veicolo elettrico.

4.3.1 SimaPro

SimaPro aiuta ad applicare efficacemente al proprio progetto i temi relativi alla sostenibilità, per aiutare a prendere decisioni solide, cambiare in meglio i cicli di vita dei prodotti. SimaPro è la soluzione software LCA leader, con una reputazione di 30 anni nell'industria e nel mondo accademico in più di 80 paesi.

È stato progettato per essere una fonte di informazioni scientifiche, fornendo piena trasparenza ed evitando processi black-box. È in grado di far prendere decisioni consapevoli durante l'analisi, per garantire l'accuratezza dei risultati.

SimaPro è lo strumento professionale per raccogliere, analizzare e monitorare i dati di performance di sostenibilità dei prodotti e servizi delle aziende. Il software può essere utilizzato per una varietà di applicazioni, come il reporting di sostenibilità, l'impronta di carbonio e idrica, la progettazione del prodotto, la generazione di dichiarazioni ambientali di prodotto e la determinazione di indicatori chiave di prestazione.

Con SimaPro si può:

- Modellare e analizzare facilmente cicli di vita complessi in modo sistematico e trasparente.
- Misurare l'impatto ambientale dei prodotti e servizi in tutte le fasi del ciclo di vita.
- Identificare i punti critici in ogni anello della catena di approvvigionamento, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, distribuzione, utilizzo e smaltimento.

4.3.2 FASTSim

Il Future Automotive Systems Technology Simulator (FASTSim) è stato creato per supportare l'analisi del gruppo propulsore di alto livello. Sebbene modelli più dettagliati siano in grado di rispondere a quasi tutte le domande, questi richiedono dati dettagliati e conoscenze specialistiche per funzionare correttamente. Per molti tipi di analisi, tuttavia, i dettagli possono essere semplificati e fornire comunque risultati accurati. FASTSim ha adottato questo approccio, che rende la ricerca degli input, l'esecuzione del modello e l'interpretazione dei risultati più semplici, veloci e meno soggetti a errori.

FASTSim è stato sviluppato per essere uno strumento accessibile, efficiente, accurato e robusto per il confronto dei propulsori dei veicoli. I componenti del veicolo sono modellati al livello più alto possibile pur rimanendo accurati. Sono simulati attraverso cicli di guida tempo-velocità. L'esecuzione dei cicli di guida a risparmio di carburante standard in città e in autostrada richiede

meno di un secondo per la maggior parte dei veicoli. I risultati di alto livello includono efficienza, prestazioni e costi. Sono stati convalidati per centinaia di veicoli diversi e per la maggior parte delle opzioni di trasmissione esistenti. FASTSim ha un'interfaccia utente grafica (GUI) che passa attraverso i processi di selezione del veicolo da guidare, scelta dei cicli di guida da simulare e visualizzazione dei risultati. La versione beta si è dimostrata robusta con oltre 1.800 download unici e nessun rapporto di errori o imprecisioni. Sebbene molte simulazioni non lo richiedano, l'approccio open source di FASTSim consente la personalizzazione per acquisire caratteristiche dipendenti dalla temperatura, variazioni legate alla velocità dei componenti e altri aspetti dettagliati [20].

FASTSim è stato utilizzato in fase iniziale di studio relativo alla creazione del modello della Fase d'Uso per la valutazione del consumo del veicolo, presentato nel paragrafo 4.2.2.2 Modello consumo energetico del veicolo elettrico. Il suo approccio è stato ripreso in questo studio anche se ripensato in maniera semplificata.

5 Metodologia predittiva semplificata per analisi economica di veicoli elettrici

5.1 Scopo

La necessità di fare un'analisi economica in fase iniziale di progettazione nasce per l'esigenza legata a comprendere la sostenibilità del progetto e comprendere nel dettaglio quali componenti, materiali e fasi richiederanno maggior attenzione. Come già presentato per l'analisi ambientale anche per l'analisi economica il miglior strumento per condurre questo tipo di studio è il Life Cycle Costing (LCC).

5.2 Linee guida modellazione

Come già visto in precedenza nello studio presentato da Sami Kara et al. [10] riguardo un LCC di un veicolo elettrico utilizzato in Australia, il costo del ciclo di vita è spesso definito come la somma di tutti i costi sostenuti durante la vita utile di un bene, quindi per un'automobile standard, l'LCC può essere definito considerando il costo di acquisizione, il costo operativo in per un dato anno, il costo di manutenzione programmata e di quella non programmata e il costo di smaltimento. La categoria "Costi di manutenzione non programmati" a causa della disponibilità limitata di dati di prima mano che limita l'accuratezza della previsione dei tempi e dei costi, viene in molti casi eliminata.

Da questo si comprende come la metodologia alla base dello sviluppo del Life Cycle Cost presenta molte analogie con quella utilizzata per LCA. Il metodo utilizzato per il LCC, così come nell'analisi LCA, si divide in quattro parti, le quali fanno riferimento ai diversi modelli che vengono utilizzati per descrivere le diverse fasi dell'analisi:

1. Modello Fase Material
2. Modello Fase di Utilizzo
3. Modello Fase Manutenzione
4. Modello Fase Fine Vita

I modelli di seguito presentati sono stati inseriti e sviluppati all'interno di un file excel.

5.2.1 Modello Fase Material

Come già espresso, per LCA, la modellazione del veicolo elettrico deve essere divisa in due macrogruppi:

- Assieme Telaio
- Assieme Elettronica

Per la valutazione dei costi dei componenti dell'assieme elettronica, si utilizza la lista presentata nell'LCA, dove è stato indicato che i componenti principali dell'Assieme Elettronica sono il pacco batteria, il motore elettrico e la componentistica elettronica (un macrogruppo che raccoglie Vehicle control system, Charger, Inverter, Batteria 12V, materiale elettronico generico e i cavi). Il costo dei singoli componenti viene valutato attraverso analisi dei prezzi di mercato, dato che sono prodotti che non verranno realizzati internamente in azienda ma saranno acquistati.

L'assieme Telaio presentato nell'LCA riporta la lista delle masse dei materiali utilizzati nel veicolo, questi dati possono essere utilizzati per una valutazione del costo totale delle materie prime. Per valutare il costo di produzione, e quindi delle lavorazioni, è necessario avere a disposizione il foglio di ciclo del veicolo che però in fase iniziale di progettazione può non essere presente o incompleto. Per sopperire a tale mancanza si può agire con dati e valutazioni presenti in letteratura, ad esempio J. Hellgren et al. [21], che indica il costo di produzione dell'assieme telaio sia per un auto (800 kg, 7000€) che per un autobus di grandi dimensioni (11000 kg, 100000€), in questo modo si può avere una valutazione qualitativa ma molto incerta. Un altro modo può essere quello di utilizzare i costi di produzione valutati in azienda per prodotti simili già realizzati, questa è la soluzione migliore per avere una valutazione attendibile.

5.2.2 Modello Fase di Utilizzo

La fase di utilizzo presente nell'LCA ha valutato quelli che sono i consumi del veicolo. Queste informazioni vengono sfruttate per considerare il costo legato al consumo di elettricità durante la fase di utilizzo. Un risultato corretto deve considerare i diversi scenari legati al differente costo dell'energia elettrica per la fase di ricarica perché la differenza è notevole se la ricarica avviene internamente all'azienda o presso le colonnine pubbliche gestite da distributori commerciali.

5.2.3 Modello Fase Manutenzione

Come affermato per LCA, la Fase di Manutenzione può essere considerata una parte della Fase d'Uso, ma in questo studio si preferisce considerarla separatamente perché nel caso dei veicoli elettrici assume un ruolo rilevante quando si prevede la sostituzione del pacco batteria durante la vita utile del veicolo. Il costo relativo alle operazioni standard fatte su un veicolo elettrico esclude il costo relativo alla sostituzione del pacco batteria, che viene analizzato separatamente perché molto rilevante. L'analisi viene affrontata attraverso la valutazione dei km che possono essere percorsi dal pacco batteria prima di essere sostituito, valutazione fatte nel paragrafo 4.2.2.3 Modello previsione vita della batteria. In base anche alla distanza totale percorsa durante la vita utile, sarà possibile comprendere il numero di volte che avverrà la sostituzione. Al termine della sua vita utile il pacco batteria sostituito sarà oggetto di due diversi scenari, il primo

è la sua rivendita mentre il secondo è l'invio ad un trattamento di fine vita che prevede il suo riciclaggio. Il costo relativo al riciclaggio viene valutato solo nel secondo caso mentre nel primo caso sarà compito del secondo proprietario preoccuparsi del fine vita, salvo se gli accordi di vendita prevedono un ritorno in fabbrica del pacco batteria a fine della sua seconda vita, in quel caso sarà compito dell'azienda preoccuparsi del suo riciclo, ma questa terza alternativa non è stata valutata in questo studio. La rivendita del pacco batteria usato è possibile perché questo a fine vita ha ancora a disposizione l'80% di energia nominale, questo permette di essere sfruttato per una seconda vita come impianti di storage domestici o industriali [4][7]. È importante sottolineare che in caso di questa ipotesi bisogna prima però realizzare dei modelli di business che analizzino nel dettaglio i vantaggi e gli svantaggi. L'impatto economico del Fine Vita del pacco batteria per la sostituzione viene valutato nella Fase Manutenzione e non nella Fase del Fine Vita dell'intero veicolo perché questo pacco batteria viene introdotto a seguito della manutenzione e si ritiene corretto valutare il suo fine vita in questa fase. Lo stesso concetto vale per la Fase Material.

5.2.4 Modello Fase Fine Vita

La modellazione della Fase Fine Vita consiste nel valutare i costi sostenuti dall'azienda per tutta la vita utile del veicolo. Per fare una corretta valutazione bisogna considerare separatamente il pacco batteria dal resto del veicolo. Per quanto riguarda il veicolo senza il pacco batteria, il costo di rottamazione viene stimato come lo 0,3% del suo valore iniziale [10]. Per il pacco batteria sono possibilie i due scenari di fine vita precedentemente esposti.. Per il primo il costo del riciclaggio delle batterie è stato approssimato utilizzando processi consolidati agli ioni di litio presso la Toxco Incorporation, che ha un costo di US$5/kg (4,24 €/kg) (anno valutazione 2017) [10]. Per il secondo scenario considerando che il pacco sostituito ancora possiede l'80% di energia nominale, che il costo di un pacco batteria, nel mercato aggiornato al 2021 viene valutato come 200 €/kWh, il costo di fine vita avrà un valore negativo, in quantol'azienda avrà un ritorno economico dalla vendita del pacco batteria. Per avere un risultato credibile nella valutazione del prezzo di vendita si introduce in questo studio un tasso di svalutazione del pacco batteria del 20% dato che trattasi di un pacco batteria di seconda mano.

6 Case study: Analisi LCA/LCC predittiva semplificata del ciclo di vita di una navetta elettrica

6.1 Progetto Emobots

Il progetto Emobots (electric MObility roBOT & Shuttle) sviluppato da Tekne, in collaborazione con Joytek, ha come obiettivo quello di superare lo stato dell'arte, che prevede AGV controllati da un sistema di controllo centrale, a favore di una maggiore autonomia ed efficienza. L'uso di sistemi AGV presenta una serie di benefici come la possibilità di personalizzazione, la produzione ininterrotta e la copertura di aree di produzione vaste. Viene prevista anche la realizzazione di una navetta elettrica (Shuttle) per il collegamento intraziendale tra due siti produttivi, sia per trasporto persone che per logistica (magazzino distribuito tra i due siti). La ragione principale per la realizzazione di una navetta elettrica è la sua sostenibilità: permetterà infatti di risparmiare sui costi di gestione delle movimentazioni, sfruttando anche la disponibilità di generatori elettrici fotovoltaici per la ricarica delle batterie. Viene prevista la collaborazione tra l'AGV e lo Shuttle per: operazioni automatiche di carico/scarico merci e il trasporto dello stesso AGV da un sito all'altro. La navetta e l'AGV dovranno essere modellati ed ottimizzati in termini di uso di componenti in comune (batterie, motorizzazione ecc.) in modo da ottimizzare la logistica e la manutenzione, e in generale la sostenibilità della soluzione proposta. Il progetto di ricerca e sviluppo e-MOBOTS ha infine l'obiettivo di definire e sperimentare un processo sostenibile di utilizzo dei veicoli elettrici per applicazioni Industria 4.0, identificando un certo numero di casi d'uso, inter ed intra-aziendali, con la possibilità di valutare durante il progetto altri casi d'uso di particolare interesse ambientale, anche al di fuori dell'ambito industriale (per esempio ambito cittadino, portuale ecc.).

Figura 31. Logo progetto e-MOBOTS

6.2 Analisi LCA predittiva semplificata

6.2.1 Descrizione dell'analisi

Definizione dell'obiettivo

L'obiettivo dell'analisi è quello di valutare l'impatto ambientale del ciclo di vita di una navetta (Shuttle), in maniera semplificata e anticipatamente rispetto alla sua fase di produzione e utilizzo.

Confini del sistema

I confini del sistema comprendono:

- Fase Material
- Fase d'Uso
- Fase Manutenzione
- Fase Fine Vita

La fase di produzione riferita all'assieme telaio, nella quale si vanno a specificare i singoli processi, non viene presa in considerazione a causa delle poche informazioni che si hanno in fase iniziale di progettazione.

Unità funzionale

L'unità funzionale consiste nel trasportare passeggeri per 5 giorni alla settimana per 8 anni di servizio.

Categoria di impatto

Le categorie di impatto scelte sono:

- Climate change [kg CO2 eq];
- Human toxicity [kg 1,4-DB eq];
- Ionizing radiation [kBq U235 eq];
- Metal depletion [kg Fe eq];
- Fossil depletion [kg oil eq].

Calcolate con il metodo ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / Europe Recipe H.

La scelta di queste categorie di impatto nasce dalla ricerca di diversi lavori scientifici che consigliano questi indici come i più rappresentativi nell'analisi di veicoli elettrici [3].

Limiti della trattazione

Il seguente studio presenta dei limiti dovuti alla mancanza di una collaborazione con l'azienda fornitrice del pacco batteria e dei componenti elettronici del pacco batteria. Alcune delle

informazioni sono state reperite da letteratura o ipotizzate, coerentemente con altre informazioni fornite da cataloghi e dall'azienda produttrice del veicolo.

6.2.2 Life Cycle Inventory (LCI)

6.2.2.1 LCI: Fase Material

Dai dati forniti da Cataloghi e dall'azienda produttrice del veicolo è stato possibile collezionare dati che sono stati raccolti in un serie di tabelle, utili poi per la fase di valutazione. Come già anticipato, il veicolo viene analizzato dividendolo in due grandi macrogruppi (Assieme Telaio e Assieme Elettronica), quindi anche i dati verranno riorganizzati in questo modo.

Assieme Elettronica

Per prima cosa si analizza l'Assieme Elettronica, elencando tutti i componenti e valutandone la massa in kg (Tabella 3), necessaria per il calcolo degli impatti in SimaPro.

ASSIEME ELETTRONICA				
Massa totale		344	kg	
COMPONENTI		NUMERO	MASSA SINGOLO [kg]	MASSA TOTALE [kg]
Pacco batteria		2	130	260
Motore		1	55	55
Componentistica elettronica	Vehicle control system	1	3,5	3,5
	Charger	1	7,5	7,5
	Inverter	1	1,5	1,5
	Batteria 12V	1	1,5	1,5
	Altri (Materiale elettronico)	1	5	5
	Altri (Cavi)	1	10	10

Tabella 3. LCI Assieme Elettronica

Dato che è interesse di questo studio analizzare nel dettaglio l'impatto relativo al pacco batteria, il quale è un cluster costituito da due batterie, si analizza nel dettaglio la composizione di una batteria. Come già affrontato nella metodologia presentata al paragrafo 4.2.1.1 Modello Assieme Elettronica, si sceglie il secondo livello di dettaglio (Tabella 4).

BATTERIA				
Massa Totale		130	kg	
COMPONENTI		MASSA SINGOLO [kg]	NUMERO	MASSA TOTALE [kg]
Cella		0,048	1512	73
BMS		5	1	5
Case		24	1	24
Altro	Cavi	7	1	7
	Materiale elettronico	7	1	7
	Plastica	7	1	7
	Acciaio	7	1	7

Tabella 4. LCI Batteria

I dati forniti dall'azienda produttrice del pacco batteria non sono stati sufficienti per poter analizzare nel dettaglio i suoi singoli componenti; laddove non disponibili, si sono fatte delle ipotesi plausibili. In particolare si tratta di una batteria agli ioni di litio, modello 18650 (cella cilindrica), non sono però note la chimica del catodo e la massa della cella. Per questo motivo è stata scelta una cella come quella in Figura 32, presente in commercio e di solito utilizzata per la realizzazione di un pacco batteria, che rispetta le indicazioni prese dal catalogo del produttore del pacco batteria e che fornisce ulteriori indicazioni necessarie per completare la modellazione.

BAK N18650CL 3.6V 2900mAh

Rated capacity(Minimum):2750 mAh @ 1 C
Nominal capacity(Typical):2900 mAh @ 0.2 C
Nominal capacity(Minimum):2800 mAh @ 0.2 C
Nominal voltage:3.6 V
Charge voltage:4.20 V
Discharge cut-off voltage:2.50 V

Product details

Rated capacity(Minimum):2750 mAh @ 1 C
Nominal capacity(Typical):2900 mAh @ 0.2 C
Nominal capacity(Minimum):2800 mAh @ 0.2 C
Nominal voltage:3.6 V
Charge voltage:4.20 V
Discharge cut-off voltage:2.50 V
Energy density:213 Wh/Kg (1C)
225 Wh/Kg (0.2C)
Max charge current:1C (2750 mA) 25 oC (not for cycle life)
Max discharge current:3C (8250 mA) 25 oC (not for cycle life)
Storage temperature: 1 year: -20~25 oC
3 months: 25~45 oC
1 month: 45~60 oC
Humidity range:0~60% RH (non-condensing)
Internal resistance:≤ 35 mΩ (AC Impedance, 1000 Hz)
Cell dimension:
Height: 64.85±0.25 mm
Diameter: 18.35±0.15 mm
Weight:≤ 48 g
Cycle life:1000
Application:avarietyofelectricalappliances
Battery cell is complying, UL and IEC and RoHS Directive-compliant
All kind of OEM battery pack is available, kindly contact us for further information
Shenzhen BAK technology is a professional battery manufacturer for all kind rechargeable battery pack, power bank as well as battery cells

Figura 32. Cella tipo

Il numero delle celle è stato valutato considerando il voltaggio e la capacità nominale della singola cella rispetto a quella della batteria e considerando quante celle fossero necessarie in serie e in parallelo. La massa del case è stata valutata facendo riferimento all'ingombro della batteria, si nota che il catalogo specifica che il case è in alluminio rinforzato e sottolinea l'importanza della presenza di un case dato che la batteria è prodotta ai fini dell'utilizzo di un veicolo elettrico. Una volta valutati i tre componenti principali di una batteria è stata considerata necessaria la presenza di una categoria "Altro" nella quale introdurre una serie di materiali presenti al suo interno. La loro massa è stata scelta dividendo equamente la massa sottratta al totale dei tre componenti principali. Per l'analisi di questo studio la cella agli ioni di litio viene presa dal database di SimaPro ed ha Litio-Ossido di manganese come chimica del catodo.

Assieme Telaio

Dai dati forniti, viene specificato che il veicolo ha una massa a vuoto di 5000 kg. Per conoscere la massa totale dell'Assieme Telaio si sottraggono alla massa a vuoto, la massa dell'elettronica e la massa dell'autista (75 kg). Conoscendo la massa dell'Assieme Telaio è possibile conoscere nel dettaglio la massa dei materiali del telaio attraverso le percentuali di ciascuno di essi rispetto al totale fornite dall'azienda (Tabella 5).

ASSIEME TELAIO		
Massa totale	4581	kg
MATERIALI	VALORE	MASSA [kg]
Acciaio	60%	2748,6
Legno	2%	91,6
Plastica	3%	137,4
Vetro	28%	1282,7
Vetroresina	2%	91,6
Gomma	2%	91,6
Alluminio	3%	137,4

Tabella 5. LCI Assieme Telaio

6.2.2.2 LCI: Fase d'Uso

I dati raccolti riguardo la Fase d'Uso sono stati utilizzati per la modellazione del veicolo e la scelta dei cicli adatti alle condizioni di guida che si vogliono analizzare.

Modello veicolo

DATI MODELLO VEICOLO		
area frontale del veicolo	5	m^2
Massa media persona	75	kg
Massa carico max	1920	kg
massa veicolo	5000	kg
Numero posti	24	
Carico medio trasportabile da ogni persona	5	kg
rendimento batteria	0,98	EV Powertrain
rendimento DC/AC Converter	0,95	0,76
rendimento motore	0,85	
rendimento trasmissione	0,94	
Potenza richiesta dagli ausiliari	400	W
KERS (% di energia recuperabile in frenata/decelerazione per autobus)	40%	
Potenza di ricarica	22000	W
Peak Power Motore	90000	W

Tabella 6. LCI Modello veicolo

I dati presentati nella Tabella 6 rappresentano le informazioni necessarie da fornire in input al modello presentato al paragrafo 4.2.2.2 Modello consumo energetico del veicolo elettrico per la valutazione del consumo energetico. Alcuni dei dati riportati in tabella sono stati forniti dal produttore del veicolo, altri dai cataloghi dei componenti e altri invece sono stati presi da articoli presenti in letteratura. Si sottolinea però che tutti i dati sono stati poi revisionati dall'azienda per verificare che fossero conformi agli obiettivi costruttivi previsti.

Cicli guida

Per questo studio sono stati scelti come cicli guida di riferimento quelli forniti dal WLTP. Non si ha a disposizione un ciclo guida personalizzato, però l'azienda ha indicato che il veicolo per il progetto ha lo scopo di essere utilizzato in ambito industriale ma con possibilità futura di essere commercializzato anche per uso in ambito cittadino. Per condurre quindi un'analisi ampia si è deciso di scegliere tre cicli guida WLTC:

- WLTC classe 1 b
- WLTC classe 2 v1.4 b
- WLTC classe 2

Il PMR, che per questo veicolo vale 11 W/kg, consiglia solo il WLTC classe 1. Questo ciclo è coerente con lo scopo del veicolo di muoversi in un ambito industriale. Per verificare invece il consumo del veicolo anche per una condizione di guida che prevede anche la presenza di un ambiente urbano si è scelto il WLTC classe 2 v1.4 b. Il WLTC classe 2 lo si è scelto per considerare un utilizzo che prevede anche un ambiente autostradale. Tutti i cicli guida presi dal WLTC sono valutati in piano.

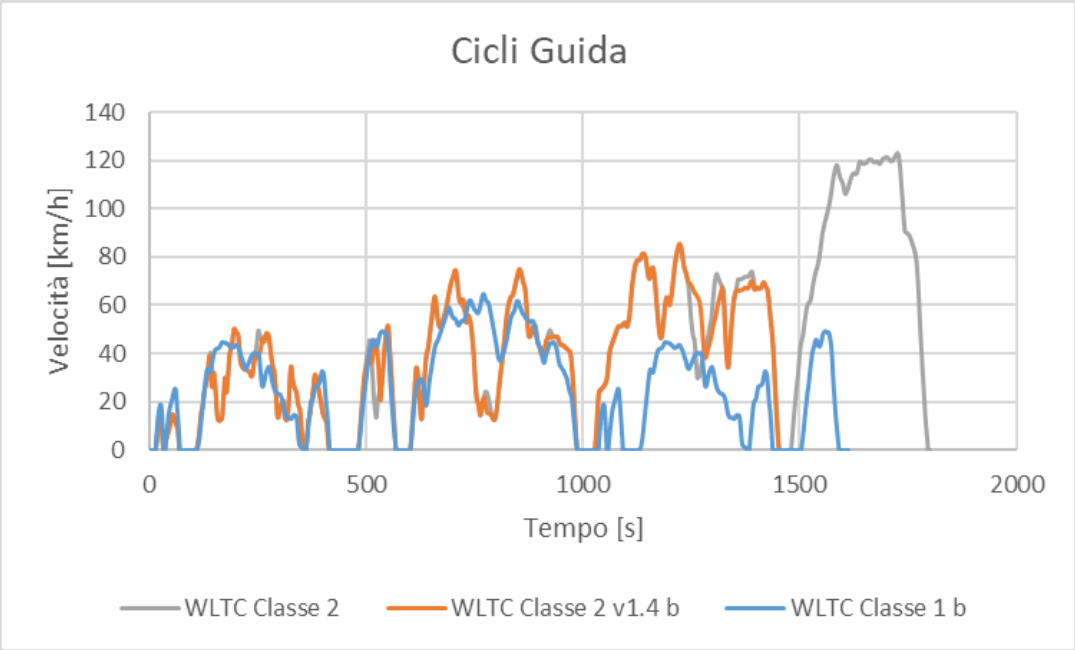


Figura 33. Cicli guida

Si nota come i cicli WLTC Classe 2 e WLTC Classe 2 v1.4 b siano molto simili e in alcuni casi si sovrappongano; appartengono alla stessa classe, e la differenza sostanziale riguarda il fatto che il WLTC Classe 2 prevede anche un'area Extra-High, interpretabile come una condizione di guida autostradale. Il WLTC Classe 1 b invece rispetto agli altri presenta uno stile di guida meno stressante è quindi più adatto ad essere interpretato come condizione di guida di un ambiente industriale.

Consumo energetico medio del veicolo

Attraverso il modello presentato al paragrafo 4.2.2.2 Modello consumo energetico del veicolo elettrico si valuta il consumo medio del veicolo al km (Tabella 8) . La valutazione viene fatta per ogni ciclo guida e andando a parzializzare il carico (Tabella 7).

Carico %	Posti occupati	Carico [kg]
0%	0	0
25%	6	480
50%	12	960
75%	18	1440
100%	24	1920

Tabella 7. Carico

Il consumo medio cresce all'aumentare del carico e con uno stile di guida che richiede delle velocità più elevate. I valori ottenuti dal modello sono conformi a quelli che sono stati trovati in letteratura.

	Carico	Consumo [kWh/km]
WLTC 1 b	0%	0,326
	25%	0,347
	50%	0,369
	75%	0,390
	100%	0,411
WLTC 2 v1.4 b	0%	0,440
	25%	0,465
	50%	0,490
	75%	0,514
	100%	0,537
WLTC 2	0%	0,523
	25%	0,540
	50%	0,556
	75%	0,573
	100%	0,588

Tabella 8. Consumo

Previsione vita della batteria

L'azienda ha specificato che il veicolo verrà utilizzato per turni di 8 ore al giorno per 5 giorni a settimana per 8 anni di vita, durante i quali non è prevista la sostituzione della batteria che terminerà la sua vita insieme al veicolo. Si stima che il veicolo verrà utilizzato per 250 giorni all'anno. In base a queste informazioni per valutare quale può essere la distanza media giornaliera percorsa, in funzione di quello che è il consumo medio, si utilizza la curva di perdita di capacità del pacco batteria, la quale esprime, in funzione del numero dei cicli, quando deve avvenire la sostituzione del pacco batteria.

La USABC (United States Advanced Battery Consortium) stabilisce che il pacco batteria vada sostituito quando l'Energia nominale si riduce fino a raggiungere l'80% del valore iniziale.

Il catalogo afferma che l'80% dell'energia nominale (25 kWh) viene raggiunto a 1500 cicli, con le seguenti condizioni:

- Temperatura 25°C,
- standard discharge 1C

A tutti i modelli empirici viene imposto che l'80% venga raggiunto a 1500 cicli di carica/scarica. I modelli empirici presentati infatti non sono stati forniti dall'azienda produttrice del pacco batteria ma sono stati presi in letteratura e quindi è stato necessario adattarli al proprio caso studio. Per farlo è stata aggiunta una variabile (α) alle formula del Qloss (paragrafo 4.2.2.3 Modello previsione vita della batteria) per entrambi i modelli empirici, e poi è stata fatta una ricerca obiettivo. Questi modelli vengono utilizzati per prevedere la vita in anni della batteria considerando la temperatura e la velocità di carica e scarica costante. Queste sono delle ipotesi molto forti ma ai fini di questo lavoro possono essere accettabili.

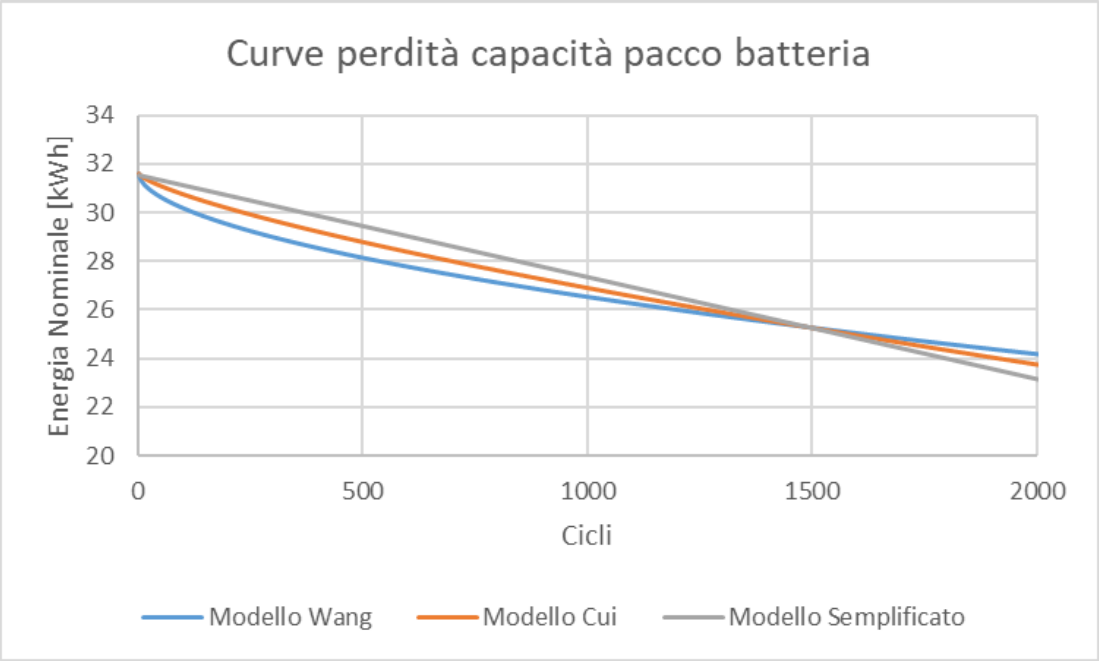


Figura 34. Curve perdita capacità pacco batteria

Per determinare la distanza media percorsa al giorno che rispetti la condizione per cui in 8 anni non avvenga la sostituzione del pacco batteria, si confrontano i risultati dei diversi metodi. Attraverso la ricerca obiettivo si impone che il numero di anni minimo per la sostituzione della batteria sia di 8 anni, andando però a modificare la distanza media percorsa. È ovvio aspettarsi che il valore minimo di anni lo si otterrà per il ciclo guida più stressante, con la percentuale di carico più alta e per il modello di Wang che risulta essere quello con un degrado della capacità maggiore e quindi più cautelativo (Figura 34). Di conseguenza questo permette di individuare la distanza media percorsa al giorno, che vale 35 km al giorno ovvero 70000 km percorsi in 8 anni. Come mostrato in Tabella 9, il valore minimo lo si ha per il metodo Wang in corrispondenza del ciclo WLTC Classe 2 e per il carico del 100%.

Per prima cosa si nota che i metodi per la previsione della vita della batteria permettono di ottenere dei risultati non molto differenti tra loro; di maggior rilevanza è invece il carico e il ciclo guida scelto. La valutazione della distanza media percorsa al giorno, infatti, viene fatta sotto la condizione peggiore, dato che valuta un carico del 100% nell'arco della sua intera vita. Ovviamente scegliendo solo il ciclo guida WLTC Classe 1 b si poteva ottenere un risultato migliore (50 km al giorno ovvero 100000 km in 8 anni); utilizzare però il ciclo WLTC Classe 2 permette di ottenere il risultato più generale possibile dato questo ciclo guida prevede anche una condizione di guida autostradale.

			Anni previsti vita batteria		
	Carico	Consumo [kWh/km]	Metodo Semplificato	Metodo Wang	Metodo Cui
WLTC 1 b	0%	0,326	14,9	14,4	14,7
	25%	0,347	14,0	13,5	13,8
	50%	0,369	13,2	12,8	13,0
	75%	0,390	12,5	12,1	12,3
	100%	0,411	11,8	11,4	11,6
WLTC 2 v1.4 b	0%	0,440	11,0	10,7	10,9
	25%	0,465	10,4	10,1	10,3
	50%	0,490	9,9	9,6	9,8
	75%	0,514	9,5	9,2	9,3
	100%	0,537	9,1	8,8	8,9
WLTC 2	0%	0,523	9,3	9,0	9,2
	25%	0,540	9,0	8,7	8,9
	50%	0,556	8,7	8,5	8,6
	75%	0,573	8,5	8,2	8,4
	100%	0,588	8,3	8,0	8,1

Tabella 9. Confronto metodi previsione vita batteria

6.2.2.3 LCI: Fase Manutenzione

La distanza percorsa in 8 anni senza sostituire il pacco batteria, che quindi raggiungerà l'80% della sua energia nominale, è il valore che verrà utilizzato come riferimento per indicare ogni quanto è necessario sostituire il pacco batteria.

6.2.2.4 LCI: Fase Fine Vita

La Tabella 10 mostra le percentuali scelte di invio al trattamento. Notiamo nel caso dei materiali viene previsto un trattamento di riciclo, mentre invece per i componenti si ha un trattamento di fine vita specifico scelto nel database di SimaPro. Per le celle della batteria non avendo un'indicazione specifica del tipo di trattamento si è deciso di optare per un trattamento sia un mix tra il trattamento idrometallurgico e pirometallurgico (scelta presente nel database di SimaPro). Ciò che rimane e non viene inviato al trattamento, viene inviato in discarica. Tranne per le celle, non si raggiunge mai il 100%; questo perché viene previsto che durante la fase di smontaggio possa esserci perdita del materiale.

Trattamento Fine Vita		
% Acciaio	85%	Riciclo
% Allumino	85%	Riciclo
% Vetroresina	50%	Riciclo
% Vetro	50%	Riciclo
% Plastica	50%	Riciclo
% Gomma	50%	Riciclo
% Motore elettrico	50%	Trattamento fine vita
% Componentistica elettronica	50%	Trattamento fine vita
% Celle Batteria	100%	Trattamento fine vita (50% idrometallurgico e 50% pirometallurgico)
% Case Batteria	85%	Riciclo
% BMS Batteria	50%	Trattamento fine vita
% Altro Batteria	50%	Trattamento fine vita

Tabella 10. Trattemento Fine Vita

6.2.3 Valutazione degli impatti (VdI)

6.2.3.1 VdI: Fase Material

Assieme Elettronica

Dal grafico in Figura 35 si nota come l'impatto maggiore è dovuto al pacco batteria, in particolare si nota come il componente predominante dell'impatto siano le celle (Figura 36).

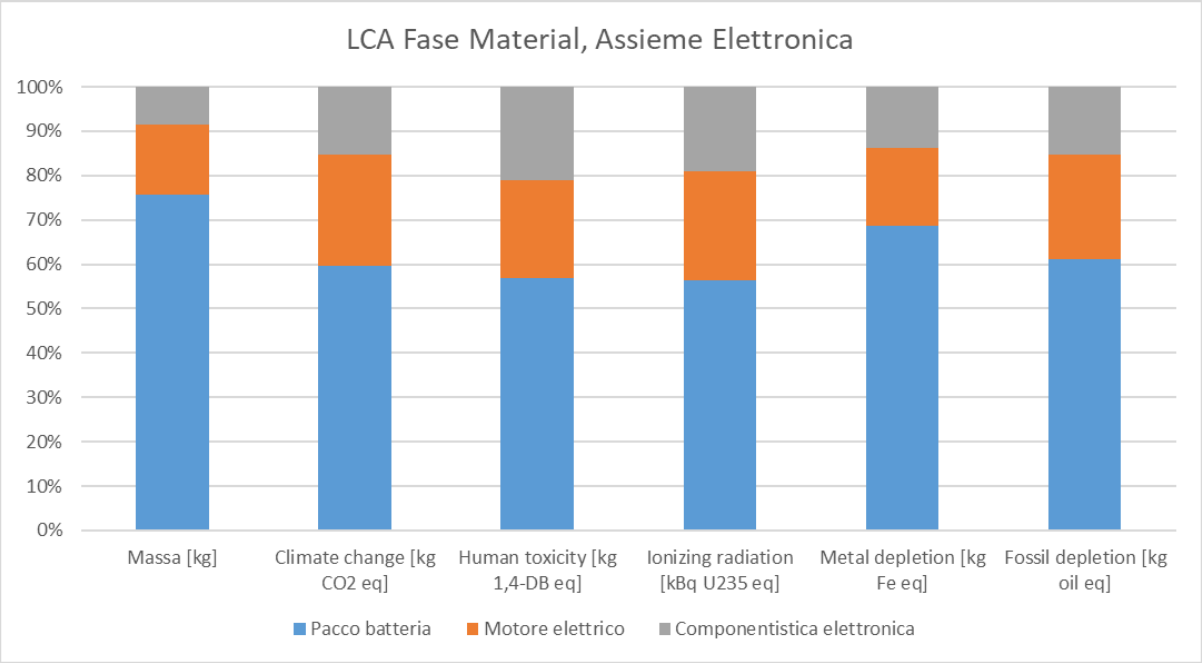


Figura 35. LCA Fase Material, Assieme Elettronica

ASSIEME ELETTRONICA							
Categoria d'impatto	Pacco batteria		Motore elettrico		Componentistica elettronica		TOTALE
	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	260	76%	55	16%	29	8%	344
Climate change [kg CO2 eq]	2463	60%	1041	25%	630	15%	4134
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	11812	57%	4627	22%	4359	21%	20798
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	273	56%	120	25%	92	19%	485
Metal depletion [kg Fe eq]	5129	69%	1322	18%	1028	14%	7480
Fossil depletion [kg oil eq]	666	61%	257	24%	166	15%	1089

Tabella 11. LCA Fase Material, Assieme Elettronica

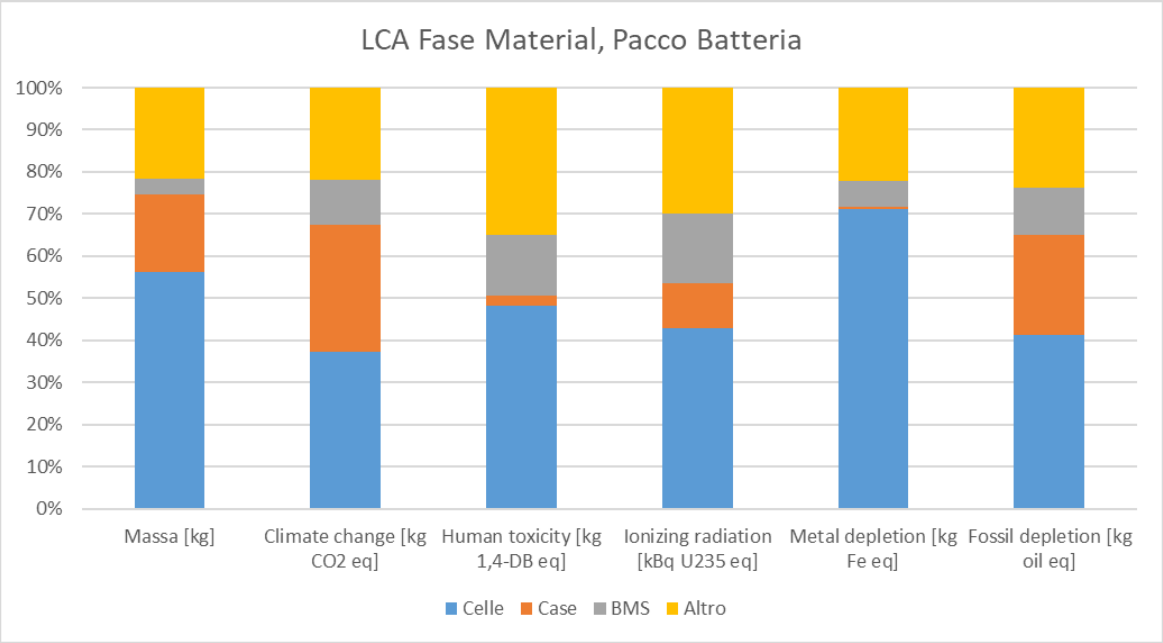


Figura 36. LCA Fase Material, Pacco Batteria

PACCO BATTERIA									
Categoria d'impatto	Celle		Case		BMS		Altro		TOTALE
	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	146	56%	48	18%	10	4%	56	22%	260
Climate change [kg CO2 eq]	919	37%	740	30%	268	11%	536	22%	2463
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	5711	48%	284	2%	1698	14%	4120	35%	11812
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	117	43%	29	11%	46	17%	82	30%	273
Metal depletion [kg Fe eq]	3650	71%	23	0%	326	6%	1131	22%	5129
Fossil depletion [kg oil eq]	276	41%	158	24%	74	11%	159	24%	666

Tabella 12. LCA Fase Material, Pacco Batteria

Assieme Telaio

Dalla Figura 37 si nota come il materiale con impatto maggiore sia l'acciaio, che è anche il materiale presente in maggiore quantità.

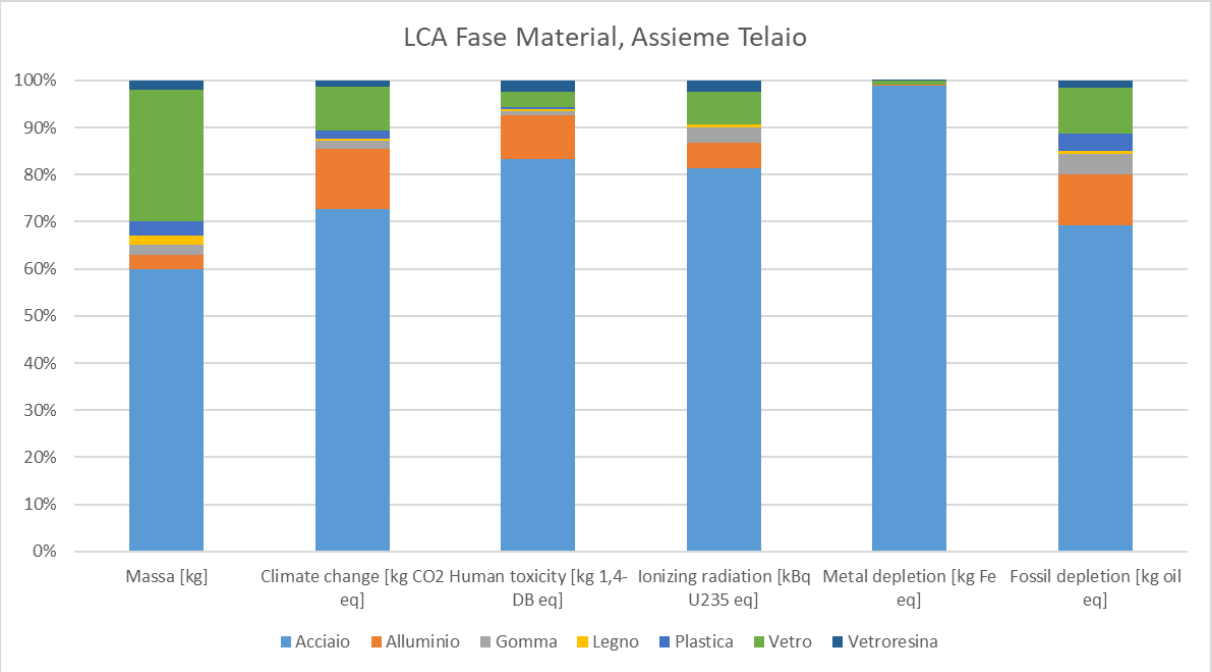


Figura 37. LCA Fase Material, Assieme Telaio

ASSIEME TELAIO															
Categoria d'impatto	Acciaio		Alluminio		Gomma		Legno		Plastica		Vetro		Vetroresina		TOTALE
	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	2749	60%	137	3%	92	2%	92	2%	137	3%	1283	28%	92	2%	4581
Climate change [kg CO2 eq]	12085	73%	2117	13%	279	2%	83	0%	295	2%	1528	9%	237	1%	16625
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	7270	83%	812	9%	72	1%	33	0%	33	0%	292	3%	209	2%	8721
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	1222	81%	83	6%	46	3%	10	1%	2	0%	104	7%	36	2%	1503
Metal depletion [kg Fe eq]	37240	99%	65	0%	16	0%	5	0%	2	0%	305	1%	18	0%	37650
Fossil depletion [kg oil eq]	2898	69%	452	11%	178	4%	28	1%	153	4%	409	10%	69	2%	4186

Tabella 13. LCA Fase Material, Assieme Telaio

Totale

Dalla Figura 38 si nota che è l'Assieme Telaio ad avere un impatto predominante, tranne per l'indice di impatto Human toxicity, dove invece è l'Assieme Elettronica che prevale, questo è legato all'impatto del pacco batteria ed in particolare delle celle.

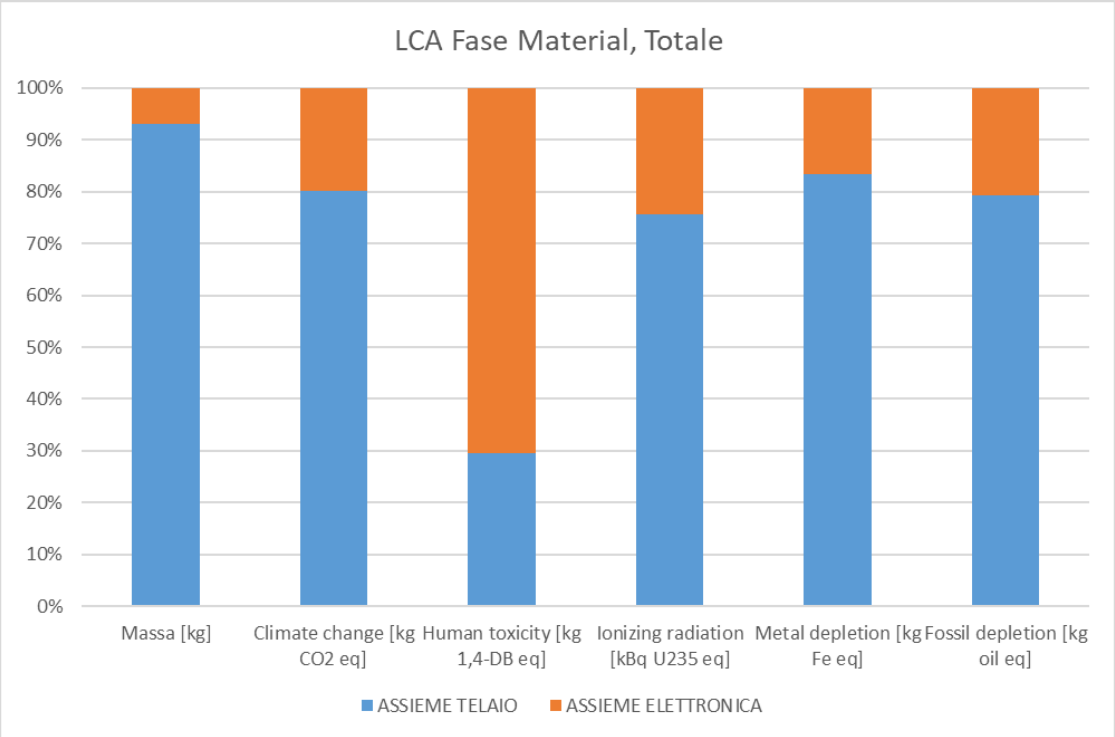


Figura 38. LCA Fase Material, Totale

FASE MATERIAL					
Categoria d'impatto	ASSIEME TELAIO		ASSIEME ELETTRONICA		TOTALE
	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	4581	93%	344	7%	4925
Climate change [kg CO2 eq]	16625	80%	4134	20%	20758
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	8721	30%	20798	70%	29519
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	1503	76%	485	24%	1988
Metal depletion [kg Fe eq]	37650	83%	7480	17%	45131
Fossil depletion [kg oil eq]	4186	79%	1089	21%	5275

Tabella 14. LCA Fase Material, Totale

6.2.3.2 VdI: Fase d'Uso

Dal grafico in Figura 39 notiamo che all'aumentare del consumo medio del ciclo guida aumenta anche l'impatto delle categorie. Le emissioni di particolato (freni, strada e ruote) impattano prevalentemente per la categoria Human toxicity. L'impatto delle emissioni di particolato è uguale per tutti i cicli guida, in quanto in ogni caso percorrono la stessa distanza, invece tendono ad aumentare con l'aumento del carico (Tabella 20). Dal grafico in Figura 39, si può notare come all'aumentare del carico e in condizione di guida più stressanti, l'impatto aumenta dato che è in funzione del consumo medio al km. In questa figura viene riportato solo l'indice di impatto Climate change, ma le stesse considerazioni valgono anche per le altre categorie di impatto. La Tabella 19 riporta i risultati totali in cui all'impatto legato al consumo energetico (Tabella 18) si va a sommare quello legato alle emissioni di particolato legate al consumo di ruote, strada e freni (Tabella 20).

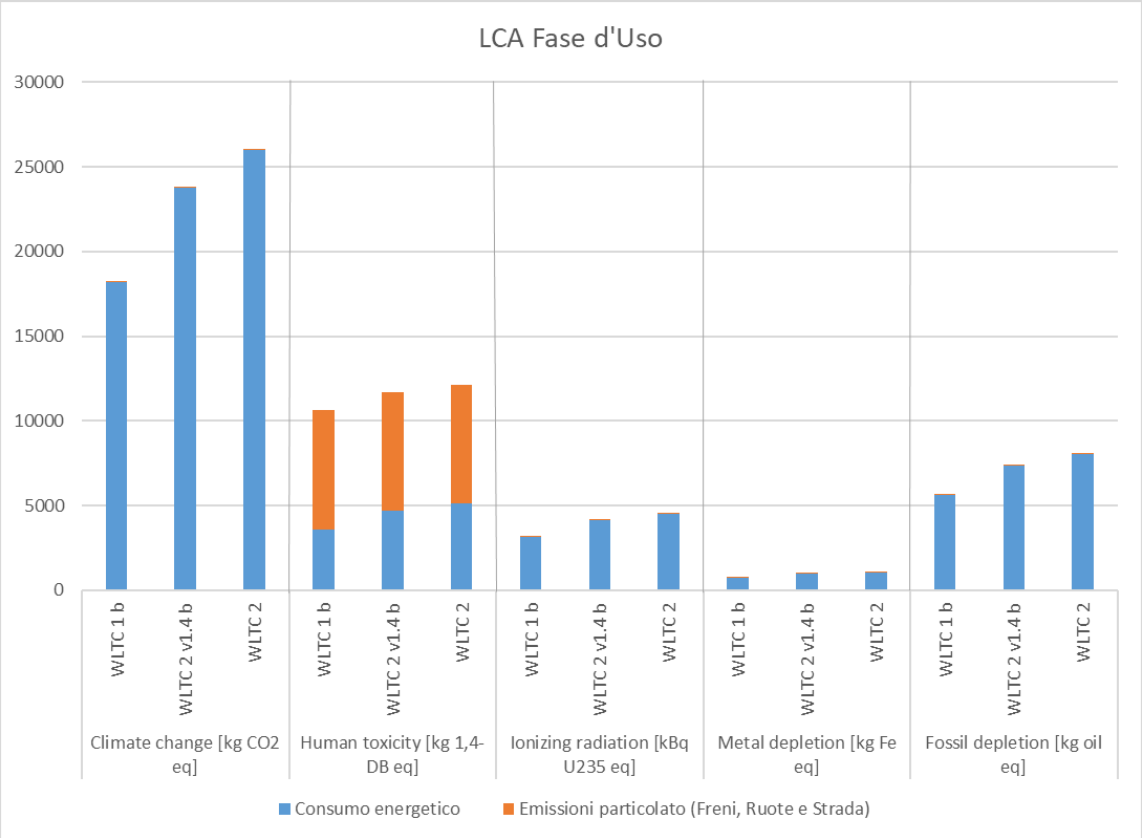


Figura 39. LCA Fase d'Uso

Distanza prevista [km]	70000	
Consumo [kWh/km]	WLTC 1 b	0,411
	WLTC 2 v1.4 b	0,537
	WLTC 2	0,588
Carico	100%	
Mix energetico	Italia	

LCA Fase d'Uso					
Categoria Impatto	Ciclo guida	Consumo energetico	Emissioni particolato (Freni, Ruote e Strada)	Totale	
					%
Climate change [kg CO2 eq]	WLTC 1 b	18176	2	18179	-30%
	WLTC 2 v1.4 b	23738	2	23740	-9%
	WLTC 2	26012	2	26015	
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	WLTC 1 b	3573	7041	10613	-13%
	WLTC 2 v1.4 b	4666	7041	11706	-4%
	WLTC 2	5113	7041	12153	
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	WLTC 1 b	3156	0	3156	-30%
	WLTC 2 v1.4 b	4121	0	4122	-9%
	WLTC 2	4516	0	4517	
Metal depletion [kg Fe eq]	WLTC 1 b	745	0	746	-30%
	WLTC 2 v1.4 b	973	0	974	-9%
	WLTC 2	1067	0	1067	
Fossil depletion [kg oil eq]	WLTC 1 b	5608	1	5609	-30%
	WLTC 2 v1.4 b	7324	1	7325	-9%
	WLTC 2	8026	1	8027	

Tabella 15. LCA Fase d'Uso

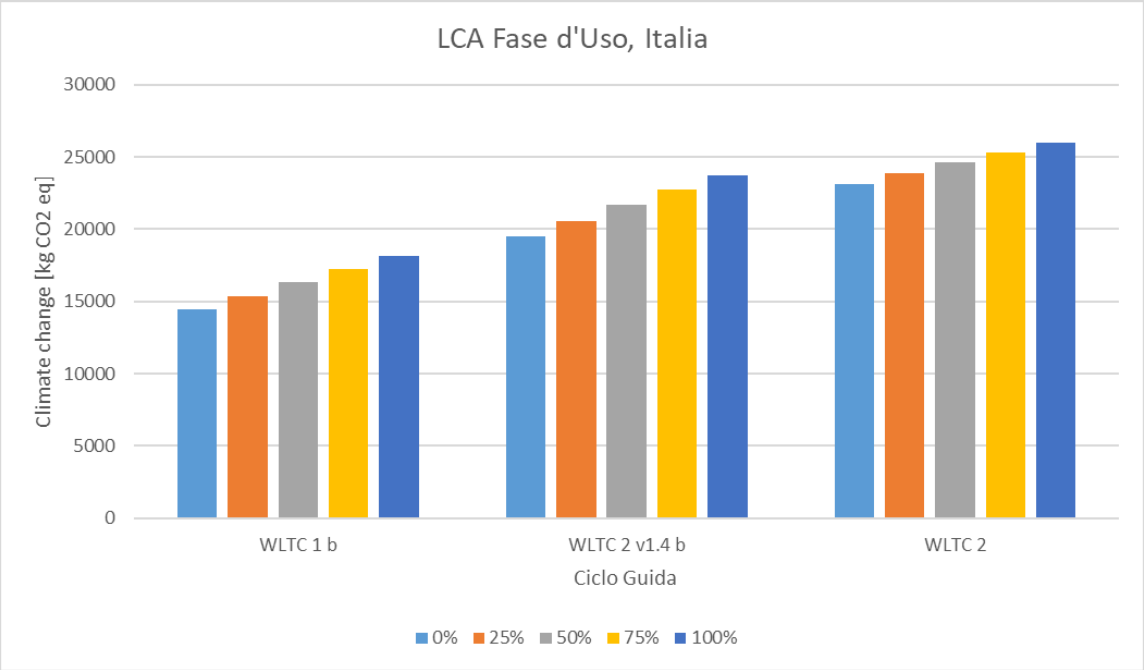


Figura 40. LCA Fase d'Uso, Consumo energetico, Climate Change

Categoria Impatto	Climate change [kg CO2 eq]		
Mix energetico	Italia		
	Ciclo Guida		
Carico	WLTC 1 b	WLTC 2 v1.4 b	WLTC 2
0%	14431	19468	23110
25%	15365	20587	23870
50%	16300	21678	24608
75%	17237	22727	25324
100%	18176	23738	26012

Tabella 16. LCA Fase d'Uso, consumo energetico

			Distanza vita prevista [km]
			70000
			Percorso medio al giorno [km/gg]
			35
	Carico	Consumo [kWh/km]	Consumo energia elettrica [kWh]
WLTC 1 b	0%	0,326	22841
	25%	0,347	24319
	50%	0,369	25799
	75%	0,390	27282
	100%	0,411	28769
WLTC 2 v1.4 b	0%	0,440	30812
	25%	0,465	32585
	50%	0,490	34311
	75%	0,514	35972
	100%	0,537	37571
WLTC 2	0%	0,523	36577
	25%	0,540	37780
	50%	0,556	38949
	75%	0,573	40082
	100%	0,588	41171

Tabella 17. Fase d'Uso, Consumo energetico

		Mix energetico: Italia [Electricity, low voltage {IT}| market for | Alloc Def, S]				
	Carico	Climate change [kg CO2 eq]	Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Ionising radiation [kBq U235 eq]	Metal depletion [kg Fe eq]	Fossil depletion [kg oil eq]
WLTC 1 b	0%	14431	2836	2506	592	4453
	25%	15365	3020	2668	630	4741
	50%	16300	3204	2830	668	5029
	75%	17237	3388	2993	707	5318
	100%	18176	3573	3156	745	5608
WLTC 2 v1.4 b	0%	19468	3826	3380	798	6006
	25%	20587	4046	3574	844	6352
	50%	21678	4261	3764	889	6689
	75%	22727	4467	3946	932	7012
	100%	23738	4666	4121	973	7324
WLTC 2	0%	23110	4542	4012	948	7130
	25%	23870	4692	4144	979	7365
	50%	24608	4837	4273	1009	7593
	75%	25324	4977	4397	1039	7813
	100%	26012	5113	4516	1067	8026

Tabella 18. LCA Fase d'Uso consumo energetico, completo

		FASE D'USO				
		Mix energetico: Italia [Electricity, low voltage {IT}| market for | Alloc Def, S]				
	Carico	Climate change [kg CO2 eq]	Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Ionizing radiation [kBq U235 eq]	Metal depletion [kg Fe eq]	Fossil depletion [kg oil eq]
WLTC 1 b	0%	14431	3101	2506	592	4453
	25%	15365	4979	2668	630	4741
	50%	16301	6856	2830	669	5030
	75%	17239	8735	2993	707	5319
	100%	18179	10613	3156	746	5609
WLTC 2 v1.4 b	0%	19468	4091	3380	798	6007
	25%	20588	6005	3574	844	6352
	50%	21679	7913	3764	889	6689
	75%	22729	9814	3946	932	7013
	100%	23740	11706	4122	974	7325
WLTC 2	0%	23110	4807	4012	948	7130
	25%	23870	6650	4144	979	7365
	50%	24609	8489	4273	1009	7593
	75%	25326	10324	4397	1039	7814
	100%	26015	12153	4517	1067	8027

Tabella 19. LCA Fase d'uso

	EMOBOTS MINIBUS EMISSIONI USO FRENI, RUOTE E STRADA				
Carico	Climate change [kg CO2 eq]	Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Ionizing radiation [kBq U235 eq]	Metal depletion [kg Fe eq]	Fossil depletion [kg oil eq]
0%	0	265	0	0	0
25%	1	1959	0	0	0
50%	1	3653	0	0	0
75%	2	5347	0	0	1
100%	2	7041	0	0	1

Tabella 20. LCA Fase d'Uso, Emissioni particolato

6.2.3.3 VdI: Fase Manutenzione

L'impatto della manutenzione è uguale per tutti i cicli guida e per tutti i carichi in quanto percorrono la stessa distanza.

FASE MANUTENZIONE				
Climate change [kg CO2 eq]	Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Ionising radiation [kBq U235 eq]	Metal depletion [kg Fe eq]	Fossil depletion [kg oil eq]
1811	702	319	157	808

Tabella 21. LCA Fase Manutenzione

6.2.3.4 VdI: Fase Fine Vita

Assieme Elettronica

Il risultato del fine vita dell'Assieme Elettronica è monopolizzato da quello legato al pacco batteria, che riporta un benefit che giustifica la scelta di un trattamento specifico, per tutte le categorie di impatto, tranne che per lo Ionizing radiation, questo risultato è influenzato dal

trattamento di riciclo delle celle (Figura 41). Il benefit legato al pacco batteria è dovuto al riciclo del case in alluminio, infatti il riciclo dell'alluminio ed in generale dei metalli ha un impatto positivo sul fine vita (Figura 42).

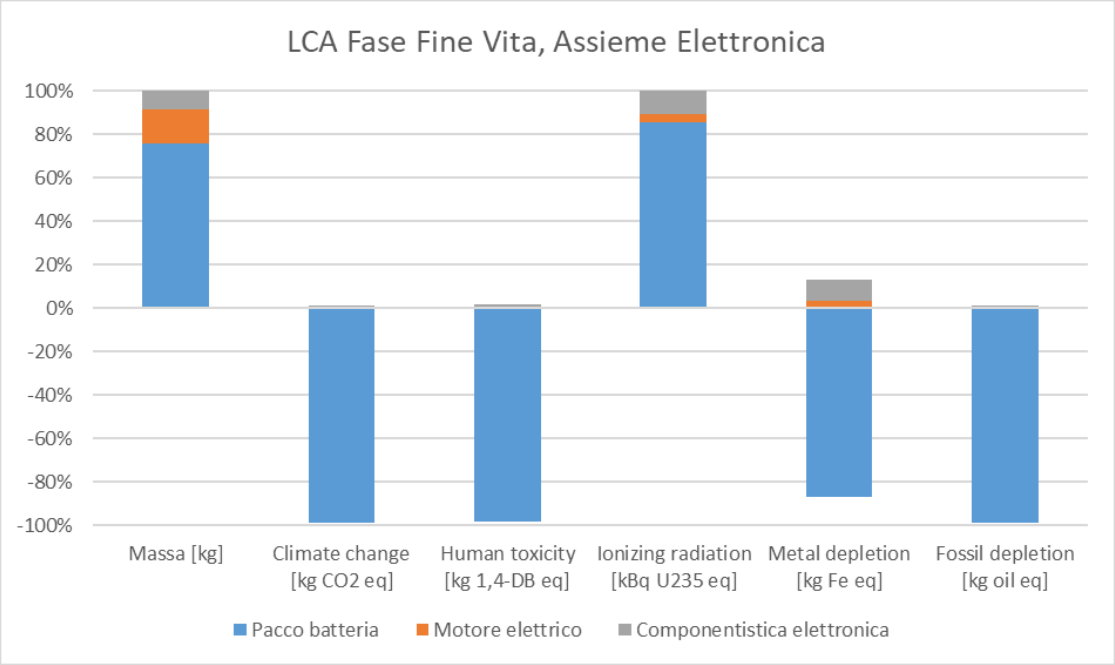


Figura 41. LCA Fase Fine Vita, Assieme Elettronica

FINE VITA ASSIEME ELETTRONICA				
Categoria d'impatto	Pacco batteria	Motore elettrico	Componentistica elettronica	TOTALE
Massa [kg]	260	55	29	344
Climate change [kg CO2 eq]	-631	2	5	-624
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	-204	1	3	-201
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	9	0	1	10
Metal depletion [kg Fe eq]	-3	0	0	-2
Fossil depletion [kg oil eq]	-125	1	1	-123

Tabella 22. LCA Fase Fine Vita, Assieme Elettronica

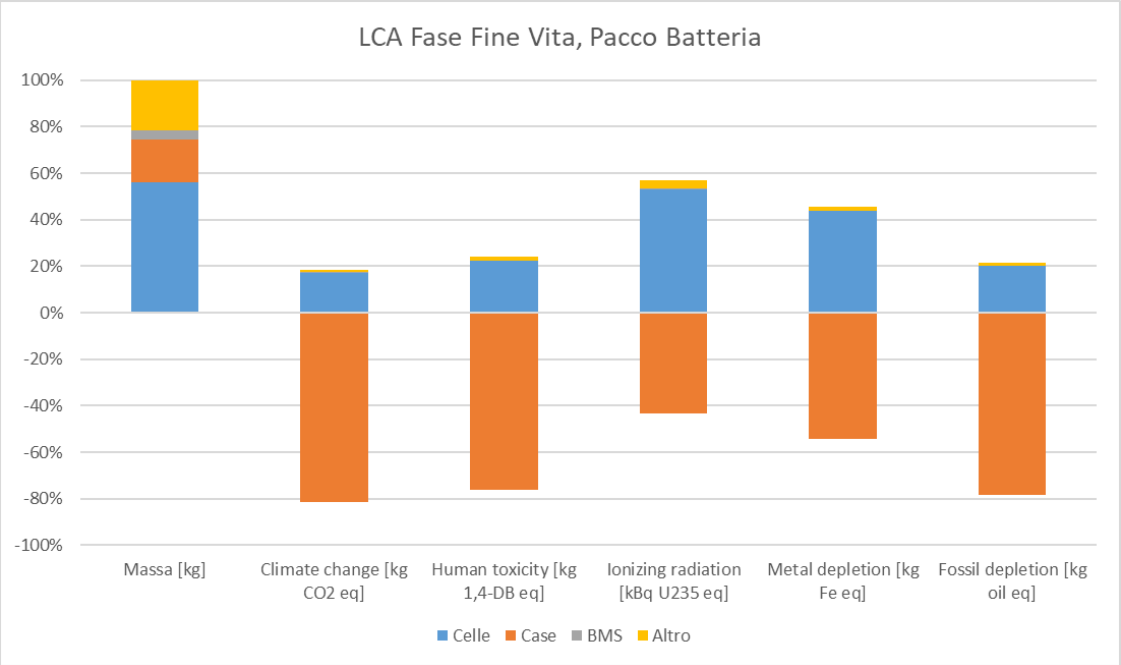


Figura 42. LCA Fase Fine Vita, Pacco batteria

FINE VITA PACCO BATTERIA					
Categoria d'impatto	Celle	Case	BMS	Altro	TOTALE
Massa [kg]	146	48	10	56	260
Climate change [kg CO2 eq]	171	-813	2	10	-631
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	88	-298	0	6	-204
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	34	-28	0	2	9
Metal depletion [kg Fe eq]	13	-16	0	1	-3
Fossil depletion [kg oil eq]	44	-172	0	3	-125

Tabella 23. LCA Fase Fine Vita, Pacco batteria

Assieme Telaio

Il fine vita dell'assieme telaio è influenzato positivamente dal riciclo dei metalli in particolare dell'acciaio, seguito poi dall'alluminio (Figura 43).

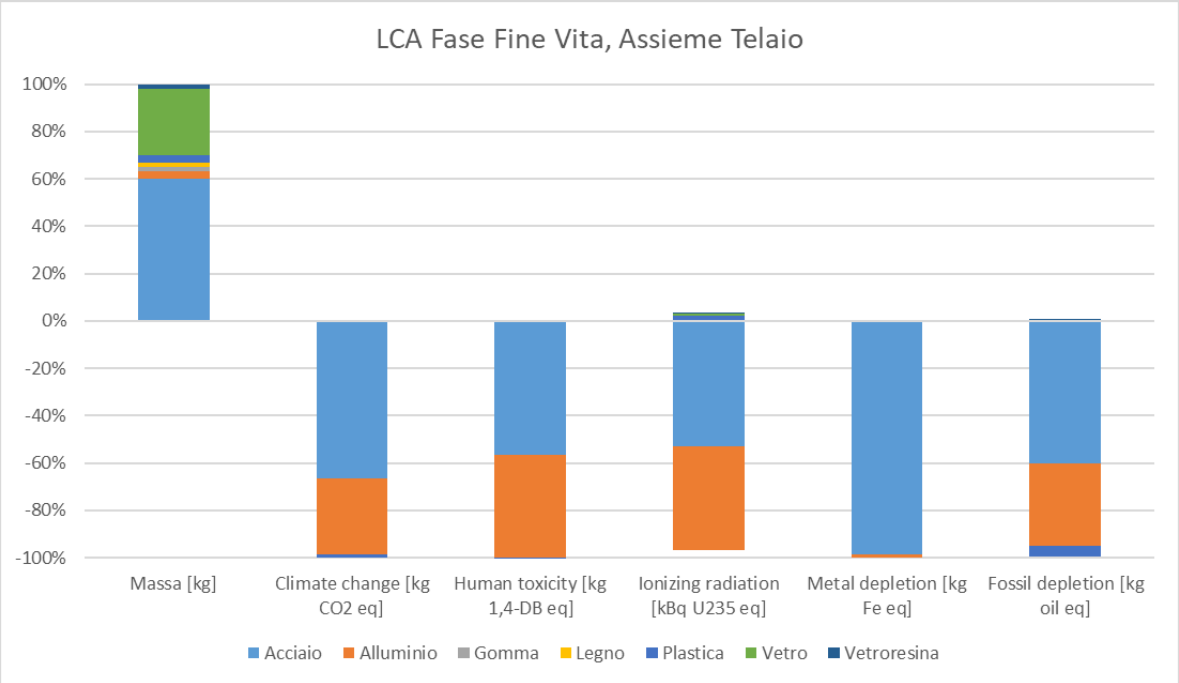


Figura 43. LCA Fase Fine Vita, Assieme Telaio

FINE VITA ASSIEME TELAIO								
Categoria d'impatto	Acciaio	Alluminio	Gomma	Legno	Plastica	Vetro	Vetroresina	TOTALE
Massa [kg]	2749	137	92	92	137	1283	92	4581
Climate change [kg CO2 eq]	-4816	-2328	1	0	-108	11	1	-7240
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	-1123	-854	0	0	-2	2	0	-1976
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	-98	-81	0	0	4	1	0	-173
Metal depletion [kg Fe eq]	-2804	-46	0	0	0	1	0	-2849
Fossil depletion [kg oil eq]	-845	-492	0	0	-64	6	0	-1394

Tabella 24. LCA Fase Fine Vita, Assieme Telaio

Totale

Si può notare come il risultato totale sia fortemente condizionato dal fine vita dell'assieme telaio e quindi dal benefit procurato dal riciclo dei metalli (Figura 44).

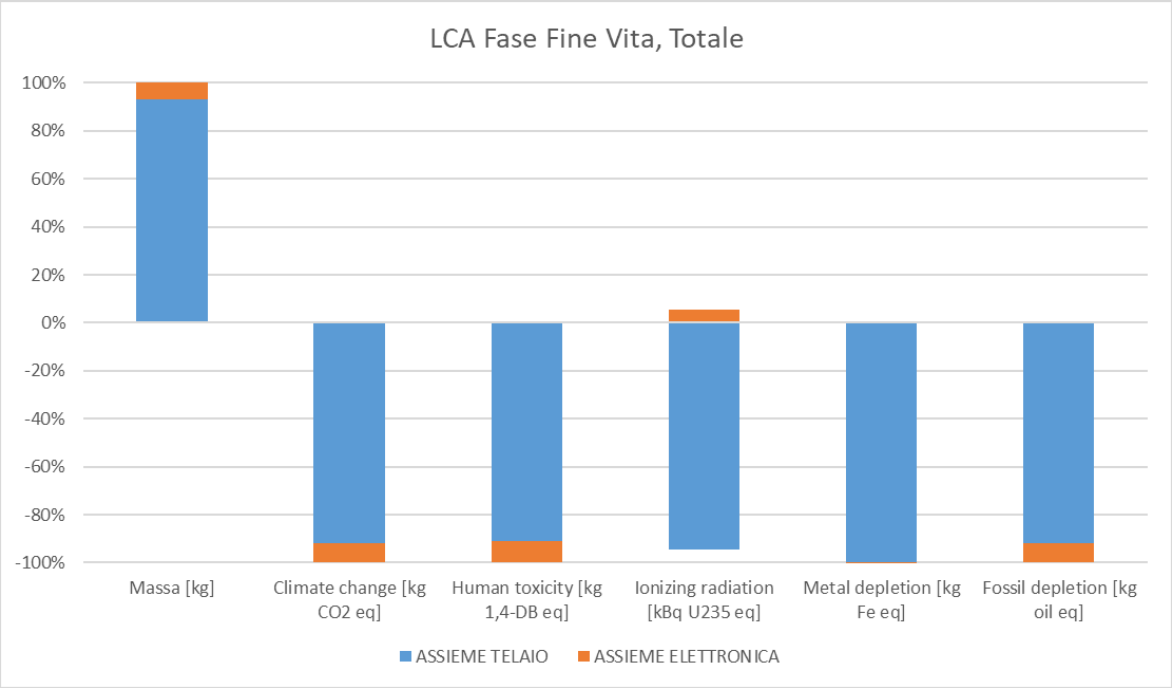


Figura 44. LCA Fase Fine Vita, Totale

FINE VITA FASE MATERIAL			
Categoria d'impatto	ASSIEME TELAIO	ASSIEME ELETTRONICA	TOTALE
Massa [kg]	4581	344	4925
Climate change [kg CO2 eq]	-7240	-624	-7864
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	-1976	-201	-2177
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	-173	10	-163
Metal depletion [kg Fe eq]	-2849	-2	-2851
Fossil depletion [kg oil eq]	-1394	-123	-1517

Tabella 25. LCA Fase Fine Vita, Totale

6.2.3.5 VdI: Complessivo

Dal grafico in Figura 45 possiamo notare come all'aumentare del consumo medio l'impatto aumenta, questo perché in corrispondenza di un ciclo guida più stressante aumenta l'impatto legato alla Fase d'Uso. Dai risultati si può concludere che per le categorie Climate change, Ionizing radiation e Fossil depletion sia la Fase d'Uso ad essere la fase con un impatto maggiore, il motivo è che è influenzata dal Mix energetico. Le categorie Human toxicity e Metal depletion sono invece fortemente influenzate dalla Fase Material.

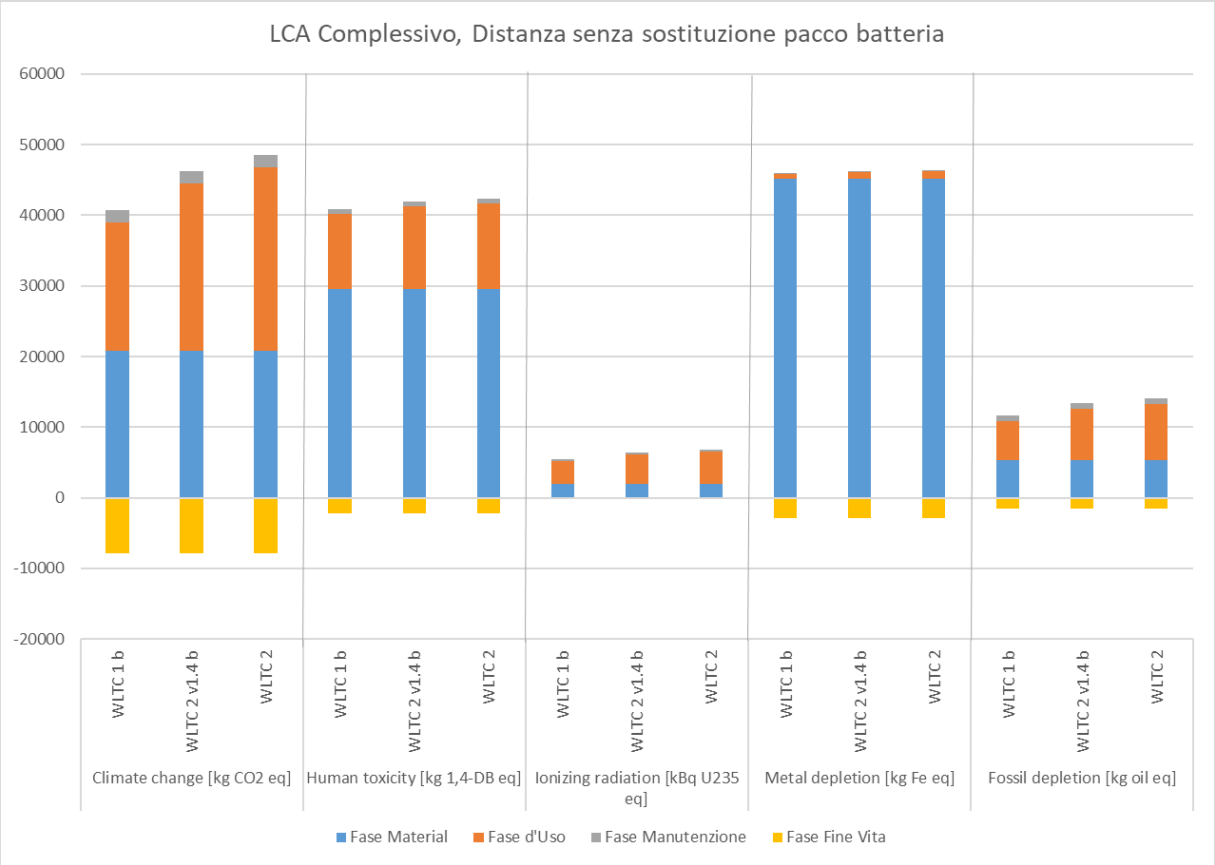


Figura 45. LCA Complessivo, Distanza senza sostituzione del pacco batteria

Distanza prevista [km]	70000	
Consumo [kWh/km]	WLTC 1 b	0,411
	WLTC 2 v1.4 b	0,537
	WLTC 2	0,588
Carico	100%	
Mix Energetico	Italia	

LCA							
Categoria Impatto	Ciclo guida	Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	Totale	
							%
Climate change [kg CO2 eq]	WLTC 1 b	20758	18179	1811	-7864	32884	-19%
	WLTC 2 v1.4 b	20758	23740	1811	-7864	38446	-6%
	WLTC 2	20758	26015	1811	-7864	40720	
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	WLTC 1 b	29519	10613	702	-2177	38657	-4%
	WLTC 2 v1.4 b	29519	11706	702	-2177	39750	-1%
	WLTC 2	29519	12153	702	-2177	40197	
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	WLTC 1 b	1988	3156	319	-163	5300	-20%
	WLTC 2 v1.4 b	1988	4122	319	-163	6266	-6%
	WLTC 2	1988	4517	319	-163	6661	
Metal depletion [kg Fe eq]	WLTC 1 b	45131	746	157	-2851	43182	-1%
	WLTC 2 v1.4 b	45131	974	157	-2851	43410	0%
	WLTC 2	45131	1067	157	-2851	43503	
Fossil depletion [kg oil eq]	WLTC 1 b	5275	5609	808	-1517	10175	-19%
	WLTC 2 v1.4 b	5275	7325	808	-1517	11891	-6%
	WLTC 2	5275	8027	808	-1517	12593	

Tabella 26. LCA Complessivo, Distanza senza sostituzione del pacco batteria

		TOTALE				
	Carico	Climate change [kg CO2 eq]	Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Ionizing radiation [kBq U235 eq]	Metal depletion [kg Fe eq]	Fossil depletion [kg oil eq]
WLTC 1 b	0%	29137	31145	4650	43028	9019
	25%	30071	33023	4812	43066	9307
	50%	31007	34900	4974	43105	9596
	75%	31945	36779	5137	43143	9885
	100%	32884	38657	5300	43182	10175
WLTC 2 v1.4 b	0%	34173	32135	5524	43235	10573
	25%	35294	34049	5719	43281	10919
	50%	36385	35957	5908	43325	11255
	75%	37435	37858	6090	43368	11579
	100%	38446	39750	6266	43410	11891
WLTC 2	0%	37816	32851	6157	43384	11697
	25%	38576	34694	6289	43415	11931
	50%	39315	36533	6417	43446	12159
	75%	40032	38368	6541	43475	12380
	100%	40720	40197	6661	43503	12593

Tabella 27. LCA Complessivo

6.2.4 Interpretazione dei risultati

6.2.4.1 Confronto con altri risultati

A livello qualitativo, confrontando il risultato finale ottenuto in questo studio con quello di K. Petrauskienè et al. [3], si nota che le conclusioni sono le stesse in termini di fasi che impattano maggiormente nella specifica categoria. Bisogna però sottolineare che lo studio preso a riferimento è stato condotto in Lituania (mix energetico diverso), su un'autovettura (massa 1545 kg, consumo medio 0.206 kWh/km) e una distanza totale percorsa pari a 150000 km.

Held M. et al.[13] sostiene che per quanto riguarda le auto, è la fase d'uso ad essere la parte predominante nei risultati finali di impatto ambientale. Queste considerazioni non sono in linea con i risultati sostenuti in questo studio, questo perché in questo studio l'analisi è stata condotta per una navetta elettrica. Infatti rispetto ad un auto che in media ha una massa a vuoto di 1500 kg, ha un consumo medio di 0.150 kWh/km e che in media percorre una distanza totale di 200000 km, una navetta ha invece una massa a vuoto che in media è di 5000 kg, un consumo medio di 0.500 kWh/km e percorre, nel caso del nostro studio, 70000 km. Confrontando i dati di partenza è ragionevole ottenere dei risultati confrontabili tra la fase d'uso e la fase material.

6.2.4.2 Scenario: Mix Energetico

Vengono posti a confronto gli impatti ambientali relativi alla fase d'uso di tre diversi mix energetici: il primo è quello italiano; il secondo è un mix energetico che è formato da un 50% da quello italiano e da un 50% da un impianto fotovoltaico privato; il terzo è il mix energetico norvegese (mix energetico low carbon, dove oltre il 96% della produzione di elettricità proviene da fonti idroelettriche). Un mix energetico che fa affidamento a fonti rinnovabili ha un impatto minore (Figura 46, Figura 47 e Figura 48). In Figura 46 si confrontano gli impatti dei mix energetici prendendo come riferimento il mix energetico Italia, si può evidenziare come il mix energetico con l'impianto fotovoltaico privato riduca l'impatto nelle categorie Climate Change, Ionizing Radiation e Fossil Depletion di circa il 45%; l'impatto superiore nella categoria Metal Depletion di circa il 12% è legato con molta probabilità all'infrastruttura legata all'impianto

fotovoltaico. Il mix energetico norvegese ha un impatti inferiore a quello italiano in tutte le categorie, arriva a toccare una riduzione dell'impatto del 96% sia nella categoria Climate Change che nella categoria Fossil Depletion.

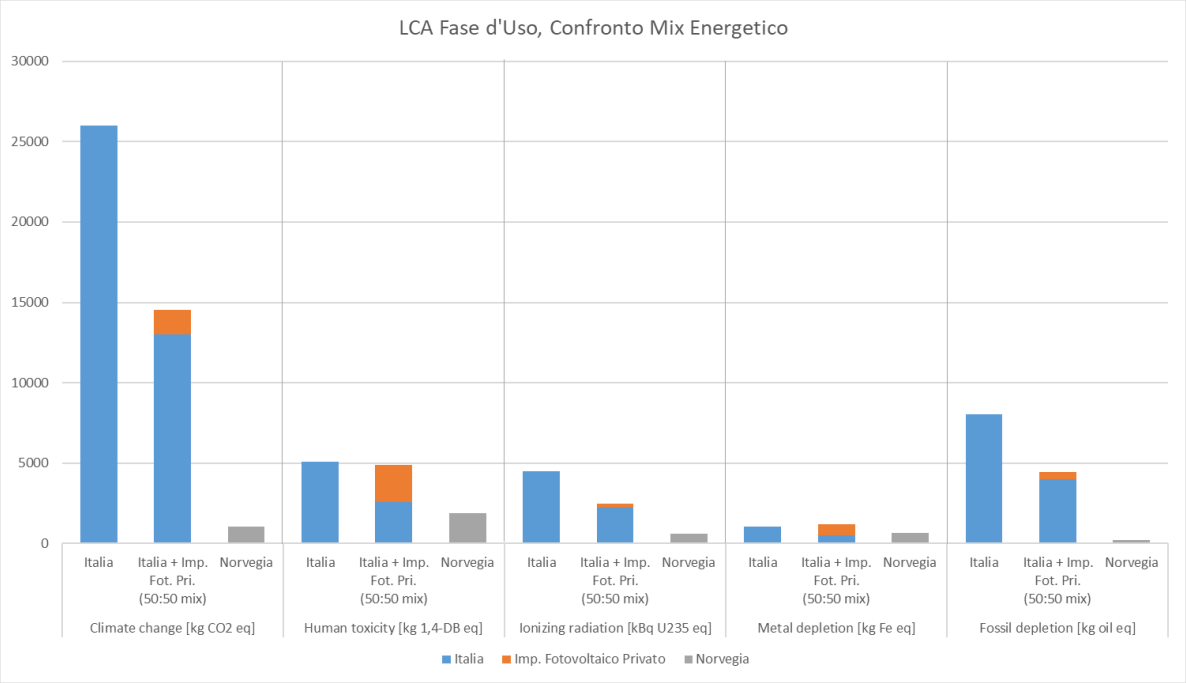


Figura 46. LCA Fase d'Uso, Confronto Mix Energetico

LCA Confronto Mix Energetico						
Distanza prevista [km]	70000					
Consumo [kWh/km]	0,588					
Carico	100%					
Ciclo guida	WLTC 2					
	LCA					
Mix energetico		Italia	Imp. Fotovoltaico Privato	Norvegia	Totale	
						%
Climate change [kg CO2 eq]	Italia	26012	-	-	26012	
	Italia + Imp. Fot. Pri. (50:50 mix)	13006	1530	-	14536	-44%
	Norvegia	-	-	1055	1055	-96%
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Italia	5113	-	-	5113	
	Italia + Imp. Fot. Pri. (50:50 mix)	2556	2335	-	4891	-4%
	Norvegia	-	-	1902	1902	-63%
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	Italia	4516	-	-	4516	
	Italia + Imp. Fot. Pri. (50:50 mix)	2258	247	-	2506	-45%
	Norvegia	-	-	588	588	-87%
Metal depletion [kg Fe eq]	Italia	1067	-	-	1067	
	Italia + Imp. Fot. Pri. (50:50 mix)	533	664	-	1197	12%
	Norvegia	-	-	654	654	-39%
Fossil depletion [kg oil eq]	Italia	8026	-	-	8026	
	Italia + Imp. Fot. Pri. (50:50 mix)	4013	418	-	4431	-45%
	Norvegia	-	-	207	207	-97%

Tabella 28. LCA Fase d'Uso, Confronto Mix Energetico

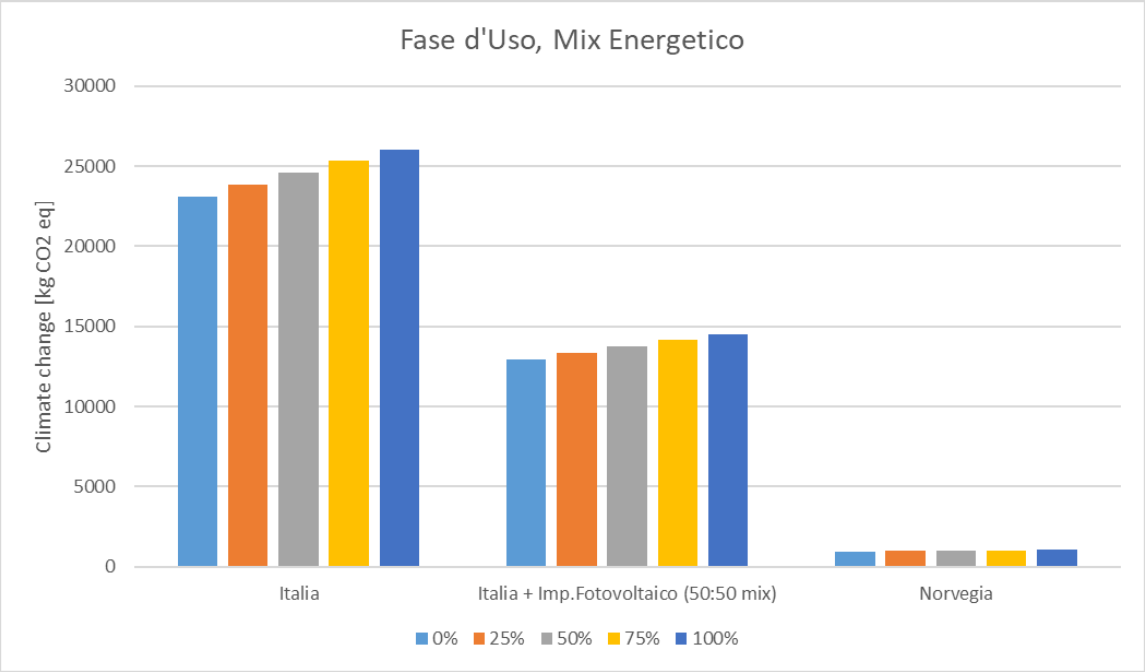


Figura 47. LCA Fase d'Uso, Confronto Mix Energetico (Climate Change, WLTC Classe 2)

Categoria Impatto	Climate change [kg CO2 eq]		
Ciclo guida	WLTC 2		
	Mix energetico		
Carico	Italia	Italia + Imp.Fotovoltaico (50:50 mix)	Norvegia
0%	23110	12914	937
25%	23870	13339	968
50%	24608	13751	998
75%	25324	14151	1027
100%	26012	14536	1055

Tabella 29. LCA Fase d'Uso, Confronto Mix Energetico

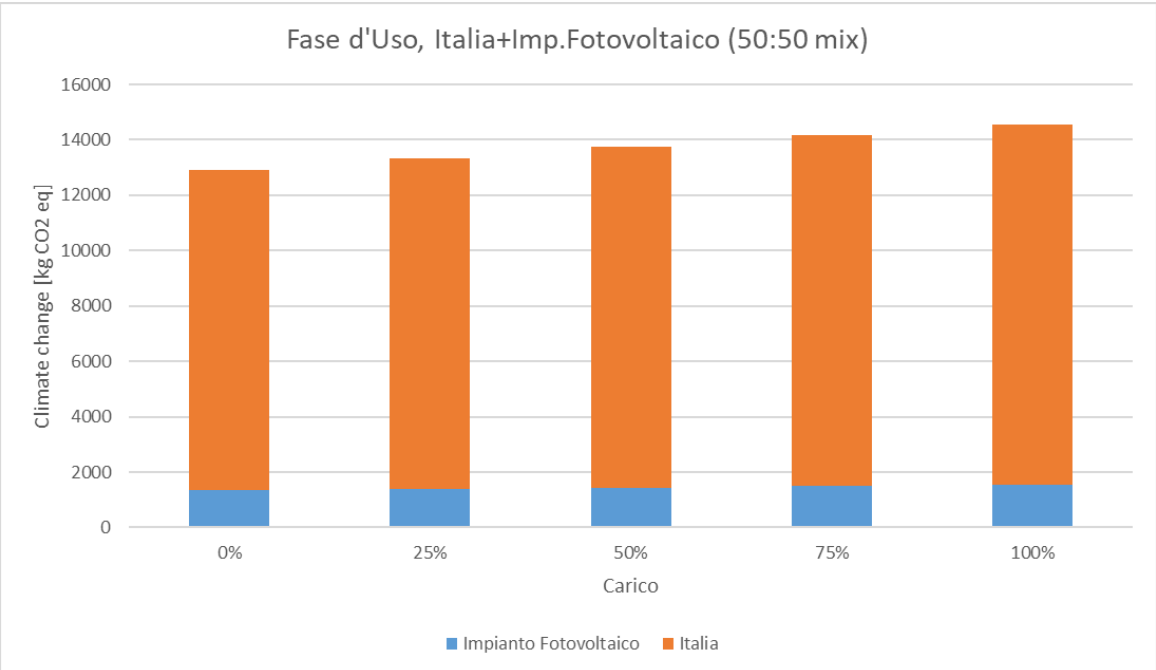


Figura 48. LCA Fase d'Uso, Confronto 50:50 mix (Climate Change, WLTC Classe 2)

Categoria Impatto	Climate change [kg CO2 eq]				
Ciclo guida	WLTC 2				
	Mix energetico				
Carico	Italia		Impianto Fotovoltaico		Totale
	Impatto	%	Impatto	%	
0%	11555	89%	1359	11%	12914
25%	11935	89%	1404	11%	13339
50%	12304	89%	1447	11%	13751
75%	12662	89%	1489	11%	14151
100%	13006	89%	1530	11%	14536

Tabella 30. LCA Fase d'Uso, Confronto 50:50 mix

6.2.4.3 Scenario: Distanza con prevista sostituzione pacco batteria

L'azienda prevede di non sostituire il pacco batteria durante la vita del veicolo. In questo scenario si propone una situazione alternativa in cui al veicolo viene chiesto di percorrere una distanza pari a 200000 km, distanza scelta tipicamente per le auto. Lo scenario proposto porta dei cambiamenti a due fasi del ciclo vita in particolare: Fase d'Uso e Fase Manutenzione. L'impatto della Fase d'Uso ovviamente aumenterà perché aumentando la distanza percorsa aumenta il consumo di energia elettrica. La Fase Manutenzione cambierà accrescendo il suo impatto perché bisogna tener conto della sostituzione del pacco batteria che avverrà ogni 70000 km, quindi per questo scenario sono previsti due sostituzioni del pacco batteria durante il suo ciclo vita. La sostituzione del pacco batteria e il conseguente impatto del fine vita dei pacchi batteria introdotti per la sostituzione, hanno un impatto rilevante ai fini del totale della Fase Manutenzione (Figura 49). Rispetto al totale senza la sostituzione del pacco batteria si riscontra come la Fase d'Uso assuma un ruolo predominante anche in quelle categorie dove in precedenza era la Fase Material a prevalere; anche la Fase Manutenzione assume un ruolo non trascurabile (Figura 50).

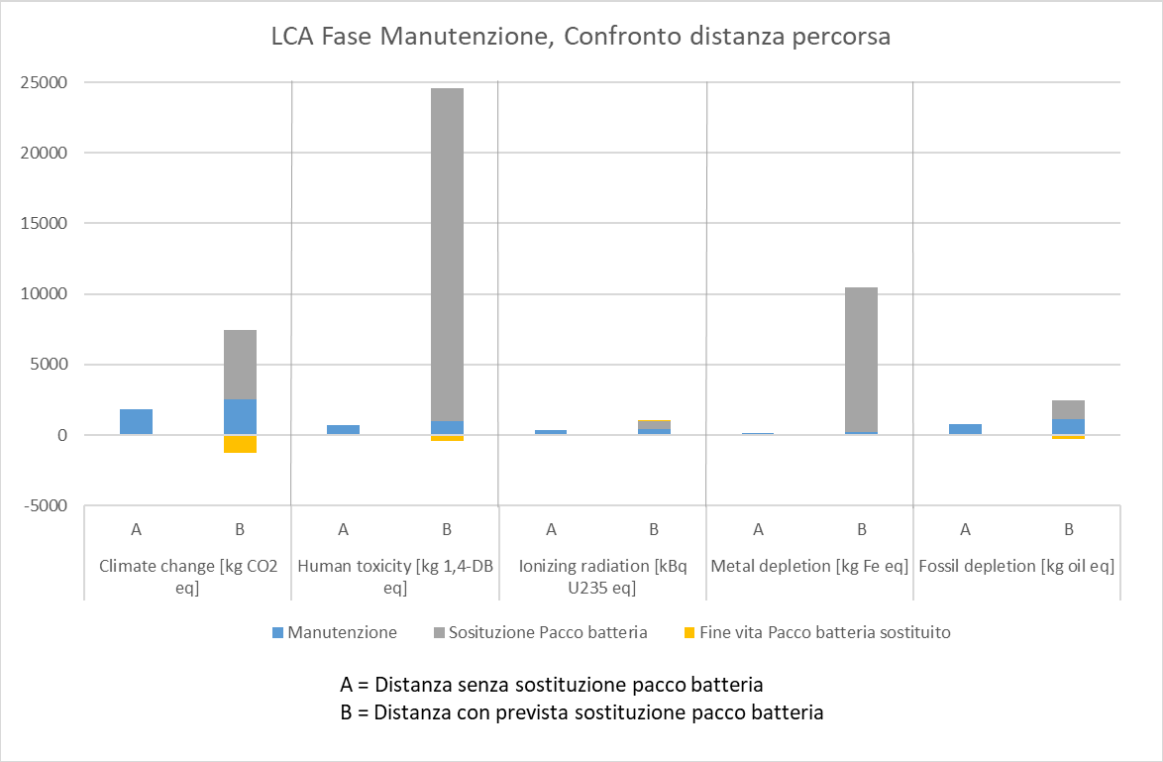


Figura 49. LCA Fase Manutenzione, Confronto distanza percorsa

FASE MANUTENZIONE							
Massa [kg]		5000					
Distanza [km]	A	70000					
	B	200000					
n inverventi sostituzione pacco batteria	A	0					
	B	2					
Categoria d'impatto		Manutenzione	Sosituzione Pacco	Fine vita Pacco	TOTALE		
						%	
Climate change [kg CO2 eq]	A	1811	0	0	1811	-71%	
	B	2499	4926	-1261	6163		
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	A	702	0	0	702	-97%	
	B	968	23624	-409	24183		
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	A	319	0	0	319	-68%	
	B	440	547	18	1005		
Metal depletion [kg Fe eq]	A	157	0	0	157	-99%	
	B	216	10259	-5	10470		
Fossil depletion [kg oil eq]	A	808	0	0	808	-63%	
	B	1115	1332	-250	2197		

Tabella 31. LCA Fase Manutenzione, Confronto distanza percorsa

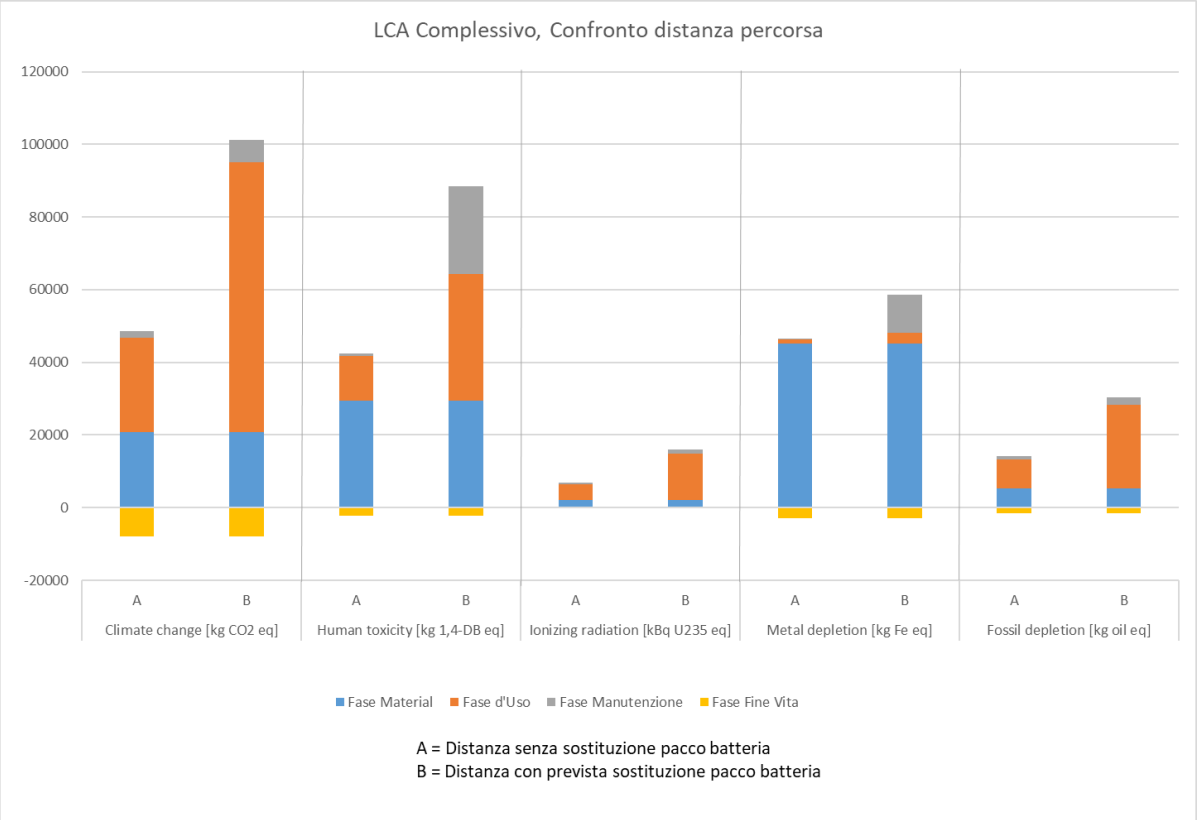


Figura 50. LCA Complessivo, Confronto distanza percorsa

Distanza [km]	A	70000
	B	200000
Consumo [kWh/km]		0,588
Carico		100%
Ciclo Guida		WLTC 2

Ciclo Vita		LCA									
		Climate change [kg CO2 eq]		Human toxicity [kg 1,4-DB eq]		Ionizing radiation [kBq U235 eq]		Metal depletion [kg Fe eq]		Fossil depletion [kg oil eq]	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Fase Material		20758	20758	29519	29519	1988	1988	45131	45131	5275	5275
Fase d'Uso		26015	74327	12153	34724	4517	12904	1067	3048	8027	22933
Fase Manutenzione		1811	6163	702	24183	319	1005	157	10470	808	2197
Fase Fine Vita		-7864	-7864	-2177	-2177	-163	-163	-2851	-2851	-1517	-1517
Totale		40720	93385	40197	86249	6661	15734	43503	55798	12593	28888
	%	-56%		-53%		-58%		-22%		-56%	

Tabella 32. LCA Complessivo, Confronto distanza percorsa

6.2.4.4 Scenario: Alternative materiale telaio

Essendo nella Fase Material, l'Assieme Telaio ad avere il ruolo più impattante e nel particolare il materiale acciaio; questo scenario rappresenta il tentativo di una valutazione di materiali alternativi all'acciaio per la realizzazione della struttura portante del telaio. In particolare è stato scelto l'alluminio (lega di alluminio per scopi automobilistici) e il composito (matrice di resina con rinforzo in fibra di carbonio). Nella Tabella 33 è possibile individuare tutte le ipotesi che sono state fatte per la modellazione di questo scenario. Ovviamente le ipotesi sono state prese con delle valutazioni a livello qualitativo e non scendendo nei dettagli di un'analisi tecnica a livello strutturale. Tranne per la categoria Metal depletion, l'impatto maggiore è dato dal composito, seguito dall'acciaio ed infine dall'alluminio (Figura 51). Il cambiamento del

materiale del telaio influenza tutte le fasi del ciclo vita. Per quanto riguarda la Fase Material è difficile individuare un materiale che primeggia in tutte le categorie, infatti l'alluminio ha l'impatto maggiore nella categoria Climate change, mentre l'acciaio nelle categorie Ionizing radiation e Metal depletion . La riduzione della massa del telaio scegliendo l'alluminio ed il composito porta una riduzione del consumo medio (Tabella 35), di conseguenza l'impatto della Fase d'Uso è sicuramente inferiore (Tabella 36). L'impatto della Fase Manutenzione diminuisce al diminuire della massa del veicolo, quindi l'acciaio prevale in questo caso. Per l'impatto della Fase Fine Vita è l'alluminio a portare un benefit positivo legato al riciclo del materiale, tranne per la categoria Metal depletion.

Alternative acciaio struttura telaio	
Massa [kg]	2748,6
Volume [m^3]	0,348
Densità [kg/m^3]	7900
Composito	
Densità Fibra di carbonio [kg/m^3]	1420
Massa Fibra di carbonio[kg]	225
% in massa Fibra di carbonio	65%
Densità resina [kg/m^3]	1550
Massa resina[kg]	132
% in massa resina	35%
% Volume Pelle	70%
%Volume Honeycomb	30%
Densità Honeycom alluminio	2770
Massa Honycomb	289
Totale Massa	646
Alluminio	
Densità [kg/m^3]	2700
Massa [kg]	939
Alternative materiali telaio	
Acciaio	
Massa [kg]	2749
Composito	
Massa [kg]	646
% Riduzione Massa	-76%
Alluminio	
Massa [kg]	939
% Riduzione Massa	-66%

Tabella 33. Dati alternative materiale telaio

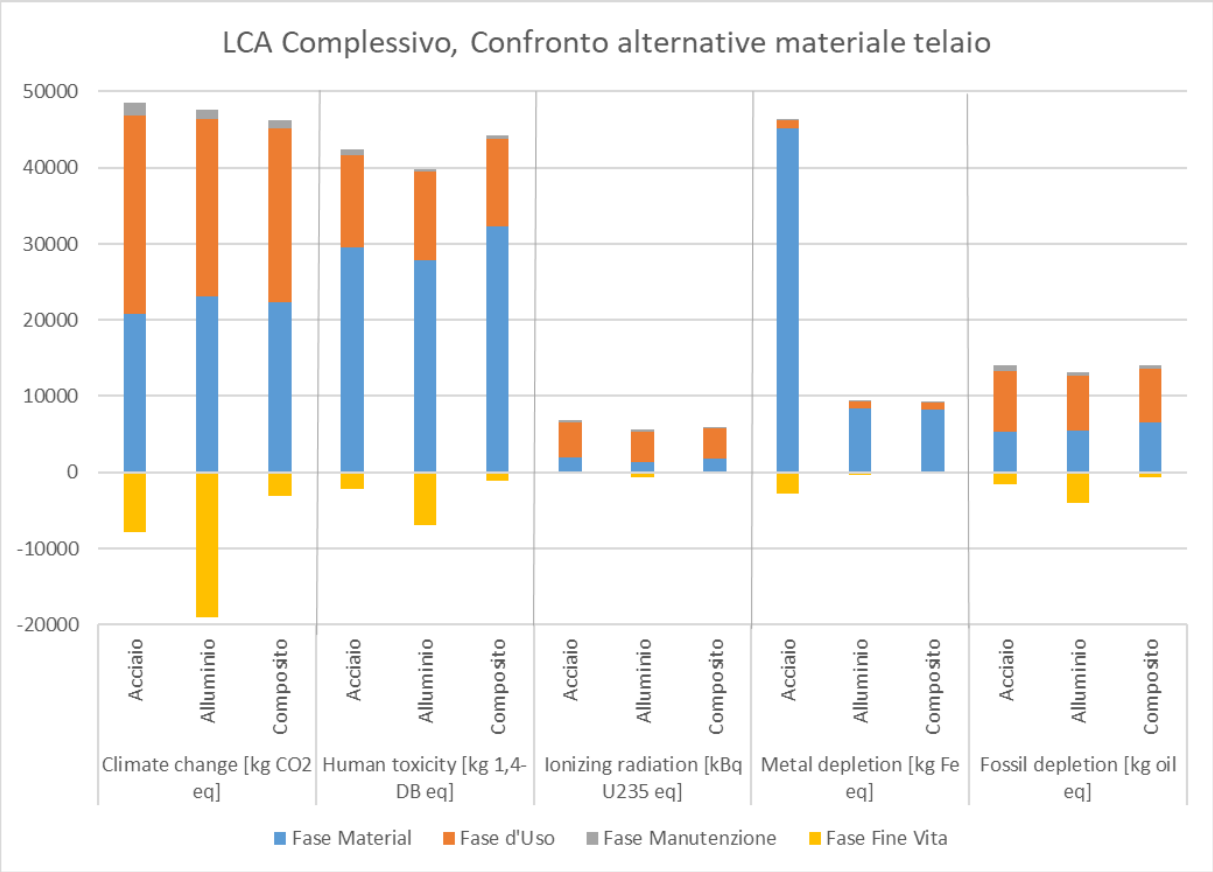


Figura 51. LCA Complessivo, Confronto alternative materiale telaio

Ciclo guida	WLTC 2	
Carico	100%	
Distanza [km]	70000	
Consumo [kWh/km]	Acciaio	0,588
	Alluminio	0,527
	Composito	0,516

		LCA					
Categoria d'impatto	Alternative materiale	Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	Totale	
							%
Climate change [kg CO2 eq]	Acciaio	20758	26015	1811	-7864	40720	
	Alluminio	23150	23290	1132	-18966	28606	-30%
	Composito	22365	22813	1022	-3031	43169	6%
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Acciaio	29519	12153	702	-2177	40197	
	Alluminio	27798	11618	439	-6894	32961	-18%
	Composito	32326	11524	396	-1051	43195	7%
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	Acciaio	1988	4517	319	-163	6661	
	Alluminio	1334	4043	199	-617	4960	-26%
	Composito	1831	3961	180	-62	5909	-11%
Metal depletion [kg Fe eq]	Acciaio	45131	1067	157	-2851	43503	
	Alluminio	8333	955	98	-360	9026	-79%
	Composito	8166	936	88	-46	9144	-79%
Fossil depletion [kg oil eq]	Acciaio	5275	8027	808	-1517	12593	
	Alluminio	5468	7186	505	-4038	9122	-28%
	Composito	6549	7039	456	-663	13380	6%

Tabella 34. LCA Complessivo, Confronto alternative materiale telaio

Alternativa Telaio	Carico	Consumo [kWh/km]
Acciaio	0%	0,523
	25%	0,540
	50%	0,556
	75%	0,573
	100%	0,588
Alluminio	0%	0,453
	25%	0,472
	50%	0,490
	75%	0,509
	100%	0,527
Composito	0%	0,442
	25%	0,460
	50%	0,479
	75%	0,498
	100%	0,516

Tabella 35. Confronto consumi alternative telaio

		FASE D'USO				
		Mix energetico: Italia [Electricity, low voltage {IT}| market for | Alloc Def, S]				
Alternative materiale Telaio	Carico	Climate change [kg CO2 eq]	Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	Ionizing radiation [kBq U235 eq]	Metal depletion [kg Fe eq]	Fossil depletion [kg oil eq]
Acciaio	0%	23110	4807	4012	948	7130
	25%	23870	6650	4144	979	7365
	50%	24609	8489	4273	1009	7593
	75%	25326	10324	4397	1039	7814
	100%	26015	12153	4517	1067	8027
Alluminio	0%	20044	4204	3480	822	6184
	25%	20869	6060	3623	856	6439
	50%	21692	7916	3766	890	6693
	75%	22502	9769	3907	923	6943
	100%	23290	11618	4043	955	7186
Composito	0%	19546	4106	3394	802	6031
	25%	20364	5961	3536	835	6283
	50%	21189	7817	3679	869	6538
	75%	22009	9672	3821	903	6791
	100%	22813	11524	3961	936	7039

Tabella 36. LCA Fase d'Uso, Confronto alternative materiale telaio completo

6.2.4.5 Scenario: Confronto con veicolo motore a combustione interna

In molti articoli viene riportato il confronto tra il veicolo elettrico con uno a motore a combustione interna. Per valutare il consumo medio del veicolo al km, viene utilizzato lo stesso modello introdotto per il veicolo elettrico ma con dati diversi adatti per un veicolo con motore a combustione interna (ICEV) (Tabella 37). Il veicolo che è stato considerato è un veicolo con motore Diesel euro 6. Il vettore energetico per l'ICEV considerato è il gasolio, che fornisce 10,7 kWh/l. La Fase Material ICEV si differenzia dall'EV per l'assenza del pacco batteria e motore elettrico sostituito da un motore a combustione interna. La Fase Manutenzione ICEV è stata valutata attraverso i dati presenti nel database di SimaPro, con i quali è stato possibile analizzare anche il fine vita. Dal totale (Figura 52) si può notare che l'EV rispetto all'ICEV:

- Nella categoria Climate change determina una diminuzione dell'impatto del 44%, soprattutto grazie al contributo della Fase d'Uso che ha un impatto nettamente minore (56%) rispetto all'ICEV.

- Nella categoria Human Toxicity comporta un aumento dell'impatto del 78%, questo è dovuto in primo luogo alla Fase Material, seguito dalla Fase d'Uso.
- Nella categoria Ionizing radiation si ha un aumento del 5%, legato alla Fase d'Uso e quindi al Mix energetico
- Nella categoria Metal depletion in totale si verifica un aumento del 17%, da imputare alla Fase Material.
- Nella categoria Fossil depletion determina una diminuzione del 48%, il motivo principale è la Fase d'Uso; l'utilizzo di energia elettrica come vettore energetico con mix energetico che coinvolge anche fonti rinnovabili comporta una diminuzione nella categoria che riguarda l'impatto di fonti fossili.

Si sottolinea come la Fase Manutenzione per tutte le categorie di impatto comporta una diminuzione rispetto all'ICEV questo perché non avviene la sostituzione del pacco batteria. Se invece si andasse a fare un confronto con uno scenario in cui viene prevista la sostituzione del pacco batteria come quando si percorre una distanza di 200000 km, la Fase Manutenzione assume un ruolo importante nel confronto comportando un aumento rispetto all'ICEV, solo però per le categorie Human Toxity, Ionizing radiation e Metal depletion, ovvero quelle fortemente influenzate dal pacco batteria.

DATI		
coefficiente di resistenza aerodinamica	0,65	
area frontale del veicolo	5	m^2
Massa media persona	75	kg
Massa carico max	1920	kg
massa veicolo	5000	kg
Numero posti	24	
Carico medio trasportabile da ogni persona	5	kg
rendimento batteria	0,87	EV Powertrain
rendimento motore	0,36	0,22
rendimento trasmissione	0,61	
Potenza richiesta dagli ausiliari	400	W
Peak Power	120000	W

Tabella 37. Dati Modello ICEV

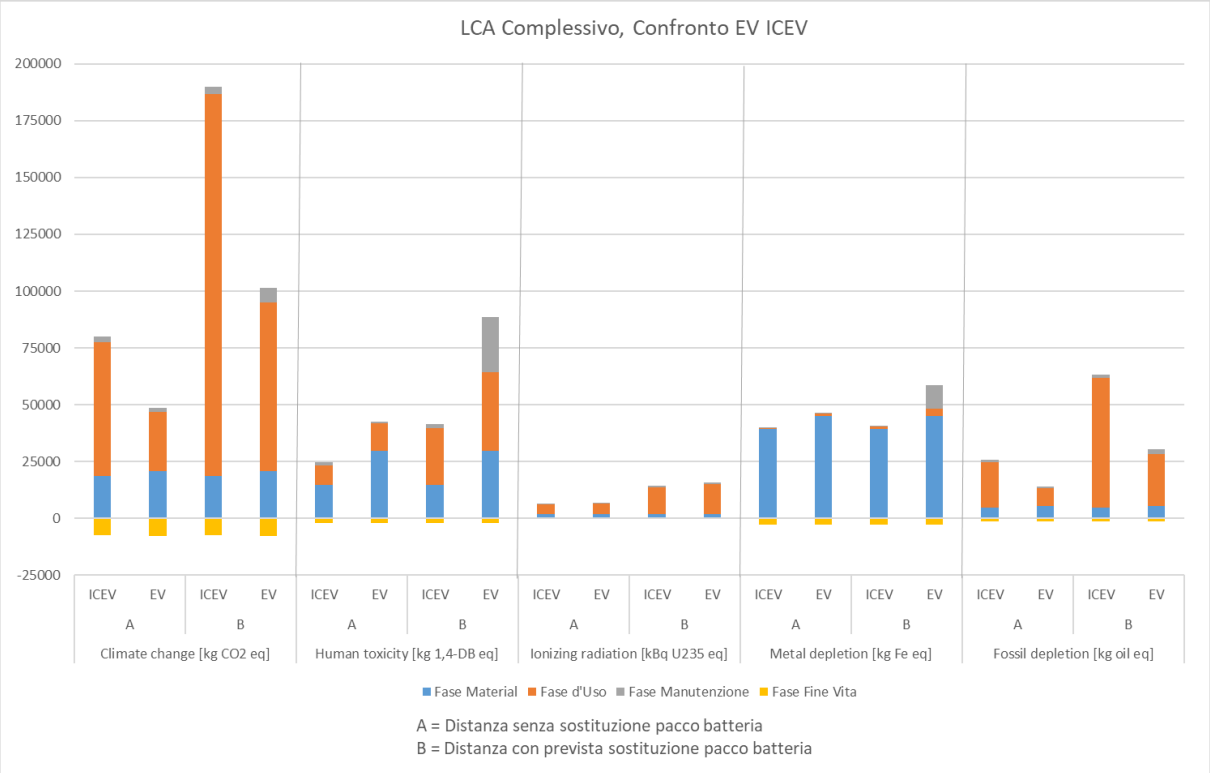


Figura 52. LCA Complessivo, Confronto EV ICEV

LCA			
		EV	ICEV
Distanza prevista [km]	A	70000	70000
	B	200000	200000
Consumo [kWh/km]		0,588	1,304
Carico		100%	100%
Ciclo guida		WLTC 2	WLTC 2

Fase ciclo vita	Categoria impatto																			
	Climate change [kg CO2 eq]				Human toxicity [kg 1,4-DB eq]				Ionizing radiation [kBq U235 eq]				Metal depletion [kg Fe eq]				Fossil depletion [kg oil eq]			
	A		B		A		B		A		B		A		B		A		B	
	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV	ICEV	EV
Fase Material	18714	20758	18714	20758	14556	29519	14556	29519	1821	1988	1821	1988	39433	45131	39433	45131	4743	5275	4743	5275
Fase d'Uso	58818	26015	168052	74327	8833	12153	25237	34724	4197	4517	11991	12904	324	1067	925	3048	20030	8027	57227	22933
Fase Manutenzione	2305	1811	3180	6163	1198	702	1653	24183	491	319	678	1005	236	157	326	10470	849	808	1171	2197
Fase Fine Vita	-7240	-7864	-7240	-7864	-1976	-2177	-1976	-2177	-173	-163	-173	-163	-2849	-2851	-2849	-2851	-1394	-1517	-1394	-1517
Totale	72597	40720	182706	93385	22610	40197	39470	86249	6336	6661	14317	15734	37145	43503	37836	55798	24227	12593	61748	28888
%		-44%		-49%		78%		119%		5%		10%		17%		47%		-48%		-53%

Tabella 38. LCA Complessivo, Confronto EV ICEV

6.3 Analisi LCC predittiva semplificata

6.3.1 Descrizione dell'analisi

Definizione dell'obiettivo

L'obiettivo dell'analisi è quello di valutare l'impatto economico del ciclo di vita di una navetta (Shuttle), in maniera semplificata e anticipatamente rispetto alla sua fase di produzione e utilizzo.

Confini del sistema

I confini del sistema comprendono:

- Fase Material
- Fase d'Uso
- Fase Manutenzione
- Fase Fine Vita

La fase di produzione riferita all'assieme telaio non viene analizzata nel dettaglio a livello dei singoli processi produttivi a causa delle poche informazioni che si hanno in fase iniziale di progettazione, verrà affrontata in modo generico attraverso considerazioni prese da letteratura.

Unità funzionale

L'unità funzionale consiste nel trasportare passeggeri per 5 giorni alla settimana per 8 anni di servizio

Limiti della trattazione

Il seguente studio presenta dei limiti dovuti alla mancanza di una collaborazione con l'azienda fornitrice del pacco batteria e dei componenti elettronici del pacco batteria. Alcune delle informazioni sono state prese da letteratura o ipotizzate basandosi su indagini di mercato. Le informazioni per LCC si basano sulle informazioni ottenute dal LCA.

6.3.2 Life Cycle Costing Inventory (LCCI)

6.3.2.1 LCCI: Fase Material

La lista dei componenti presenti nell'Assieme Elettronica e nell'Assieme Telaio è stata riportata nel paragrafo 6.2.3.1 VdI: Fase Material

6.3.2.2 LCCI: Fase d'Uso

I dati ottenuti al paragrafo 6.2.2.2 LCI: Fase d'Uso verranno utilizzati anche per la valutazione dell'impatto economico.

6.3.2.3 LCCI: Fase Manutenzione

I dati utilizzati per la manutenzione sono stati raccolti dallo studio condotto da Marmiroli B. et al. [14]. Le considerazioni riguardo alla distanza prima che avvenga il cambio del pacco batteria sono stati calcolati al paragrafo 6.2.2.2 LCI: Fase d'Uso.

Operazione manutenzione	Distanza [km]	Costo [€]	n
Cambio liquidi dei freni	60000	150	1
Sostituzione Pneumatici	50000	250	4
Manutenzione auto elettrica	40000	200	1

Tabella 39. Operazioni manutenzione

6.3.2.4 LCCI: Fase Fine Vita

Le considerazioni che si faranno sul Fine Vita per quanto riguarda il pacco batteria consistono nel considerare due scenari:

- Rivendita del pacco batteria il cui prezzo di rivendita viene valutato considerando il prezzo al kWh di energia nominale del pacco batteria sostituito che al momento della rivendita presenta l'80% della sua energia nominale inziale; questo prezzo viene svalutato del 20% perché lo si considera un pacco batteria usato.
- Invio del pacco batteria ad un trattamento di riciclaggio il cui costo è stato approssimato utilizzando processi consolidati agli ioni di litio presso la Toxco Incorporation, che ha un costo di US$5/kg (4,24 €/kg) (anno valutazione 2017) [10].

Nel primo caso abbiamo un ritorno economico dell'azienda che non si occupa del fine vita, mentre invece nel secondo caso è l'azienda a sostenere i costi riguardo il riciclaggio.

Per quanto riguarda il resto del veicolo si fa una valutazione del valore di rottamazione di un veicolo generico che è stato approssimato allo 0,3% del prezzo al dettaglio originale del veicolo [10].

6.3.3 Valutazione dei costi (VdC)

6.3.3.1 VdC: Fase Material

Assieme Elettronica

Dai risultati si nota che che il costo maggiore è quello che si sostiene per l'acquisto del pacco batteria, seguito dal motore elettrico (Figura 53).

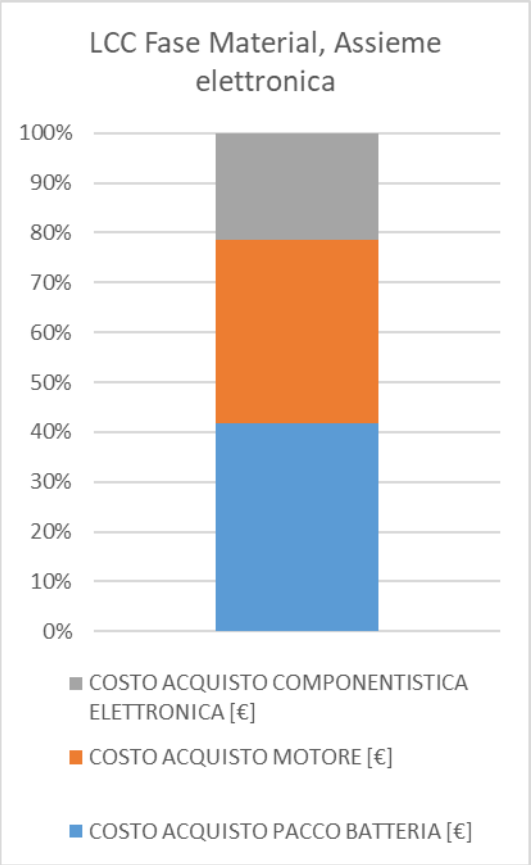


Figura 53. LCC Fase Material, Assieme Elettronica

ASSIEME ELETTRONICA					
COMPONENTI		NUMERO	PREZZO DI ACQUISTO SINGOLO [€/pz.]	COSTO TOTALE [€]	
					%
Pacco batteria		2	3945	7890	42%
Motore		1	7000	7000	37%
Componentistica elettronica	Vehicle control system	1	2000	2000	11%
	Charger	1	500	500	3%
	Inverter	1	1000	1000	5%
	Batteria 12V	1	50	50	0%
	Altri (Materiale elettronico)	1	250	250	1%
	Altri (Cavi)	1	250	250	1%
			TOTALE [€]	18940	

Tabella 40. LCC Fase Material, Assieme Elettronica

Assieme Telaio

Il materiale per il quale si sostiene il costo maggiore è l'acciaio, che è anche il materiale presente in maggiore quantità, anche perché viene utilizzato come struttura portante del telaio (Figura 54). Il costo di produzione dei componenti rappresenta il costo maggiore da sostenere rispetto all'acquisto delle materie prime ed indica il costo da sostenere per realizzare i componenti (Figura 55). Utilizzando i dati relativi al costo dei materiali più quello di produzione dell'assieme telaio sia per un auto (800 kg, 7000€) che per un autobus di grandi dimensioni (11000 kg, 100000€) [21], viene ricavata una funzione che permette di valutare il costo di produzione di un

veicolo in base alla massa. Per ottenere soltanto il risultato relativo al costo di produzione dell'assieme telaio è necessario sottrare quello relativo ai materiali valutato separatamente (Tabella 41).

$$Costo_{patv} = 7000 + \left(\left(\frac{massa_{atv} - 800}{11000 - 800}\right) \cdot (100000 - 7000)\right) - Costo_{matv}$$

Dove $Costo_{patv}$ è il costo di produzione dell'assieme telaio del veicolo, $massa_{atv}$ è la massa dell'assieme telaio del veicolo, $Costo_{matv}$ è il costo dei materiali dell'assieme telaio del veicolo.

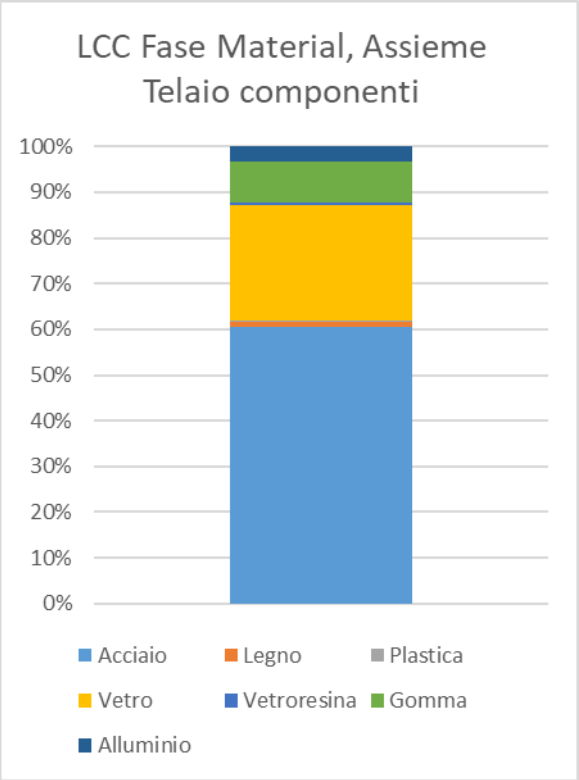


Figura 54. LCC Fase Material, Assieme Telaio componenti

ASSIEME TELAIO				
MATERIALI	MASSA [kg]	PREZZO AL KG [€/kg]	COSTO TOTALE [€]	
				%
Acciaio	2748,6	2,23	6129	61%
Legno	91,6	1,15	105	1%
Plastica	137,4	0,18	25	0%
Vetro	1282,7	2	2565	25%
Vetroresina	91,6	0,5	46	0%
Gomma	91,6	10	916	9%
Alluminio	137,4	2,47	339	3%
Massa totale [kg]	4581	TOTALE [€]	10126	

Tabella 41. LCC Fase Material, Assieme Telaio componenti

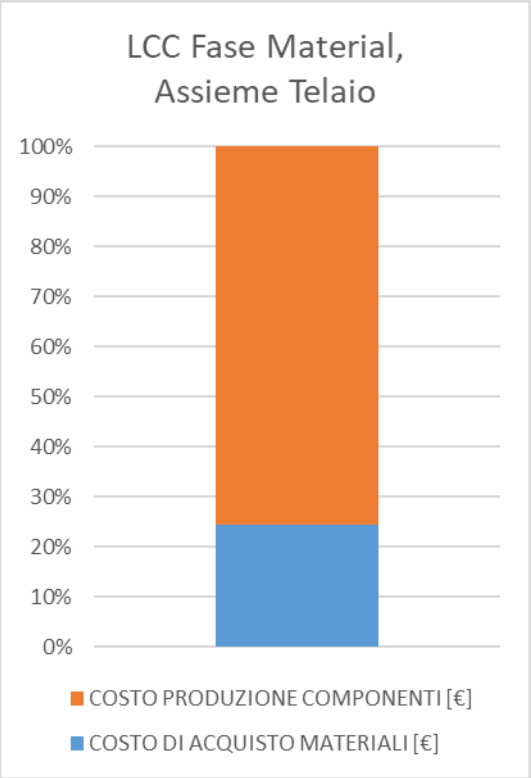


Figura 55. LCC Fase Material, Assieme Telaio

ASSIEME TELAIO		
		%
COSTO DI ACQUISTO MATERIALI [€]	10126	24%
COSTO PRODUZIONE COMPONENTI [€]	31348	76%
TOTALE [€]	41474	

Tabella 42. LCC Fase Material, Assieme Telaio

Totale

Dal totale della Fase Material si nota che l'impatto economico maggiore è quello che va sostenuto per la realizzazione dell'Assieme Telaio (Figura 56). L'impatto dell'assieme telaio sul totale è del 69%.

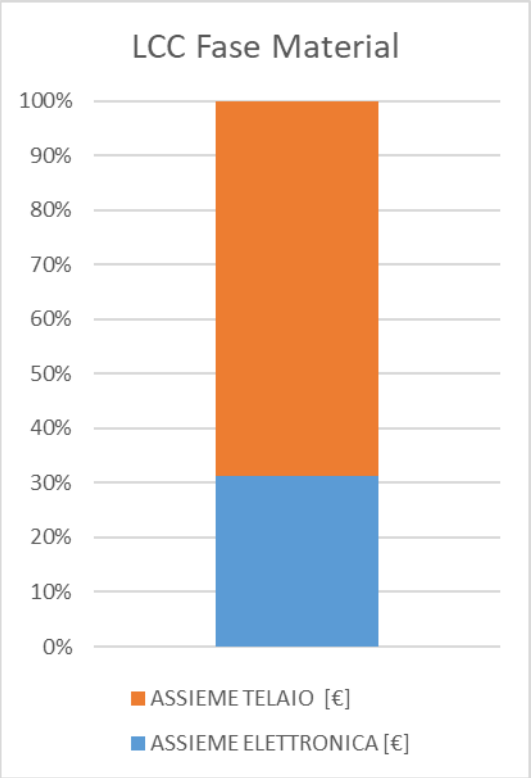


Figura 56. LCC Fase Material

FASE MATERIAL		
		%
ASSIEME ELETTRONICA [€]	18940	31%
ASSIEME TELAIO [€]	41474	69%
TOTALE [€]	60414	

Tabella 43. LCC Fase Material

6.3.3.2 VdC: Fase d'Uso

Per la Fase d'Uso si modellano due scenari: il primo riguarda la ricarica in azienda e il secondo la ricarica da distributori commerciali. Dai dati in Tabella 44 si può notare come il costo dell'energia elettrica da distributori commerciali sia nettamente superiore e quindi comporterà un aumento di prezzo considerevole.

Percorso medio al giorno [km/gg]	35
Distanza vita prevista [km]	70000
Prezzo energia elettrica ricarica in azienda [€/kWh]	0,16
Prezzo energia elettrica ricarica distributori commerciali [€/kWh]	0,45

Tabella 44. Dati Fase d'Uso

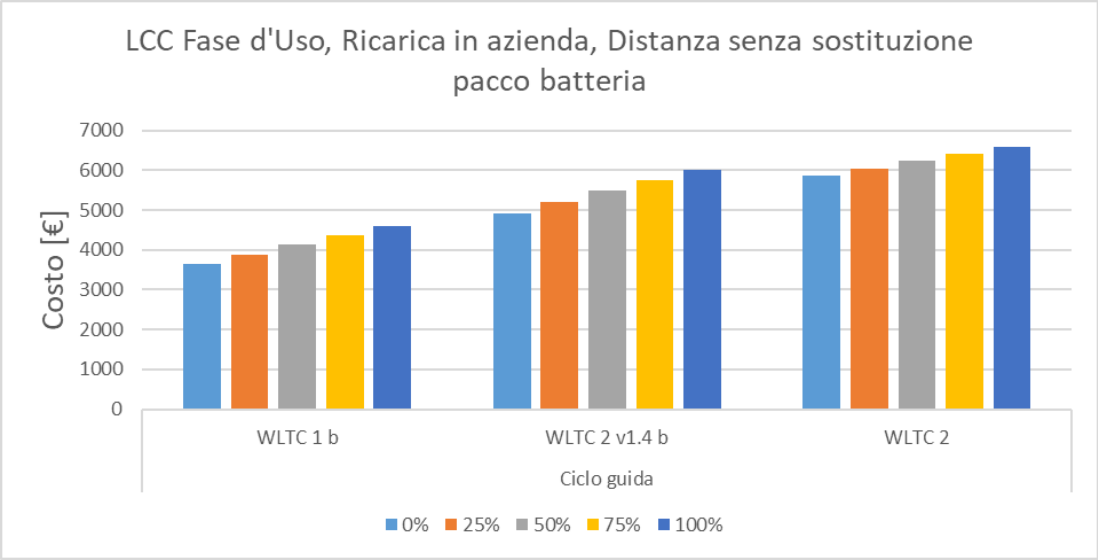


Figura 57. LCC Fase d'Uso, Ricarica in azienda

Fase d'Uso, Ricarica in azienda, Distanza senza sostituzione pacco batteria						
		Costo energia elettrica Fase d'Uso [€]				
	Carico	0%	25%	50%	75%	100%
Ciclo guida	WLTC 1 b	3655	3891	4128	4365	4603
	WLTC 2 v1.4 b	4930	5214	5490	5755	6011
	WLTC 2	5852	6045	6232	6413	6587

Tabella 45. LCC Fase d'Uso, Ricarica in azienda

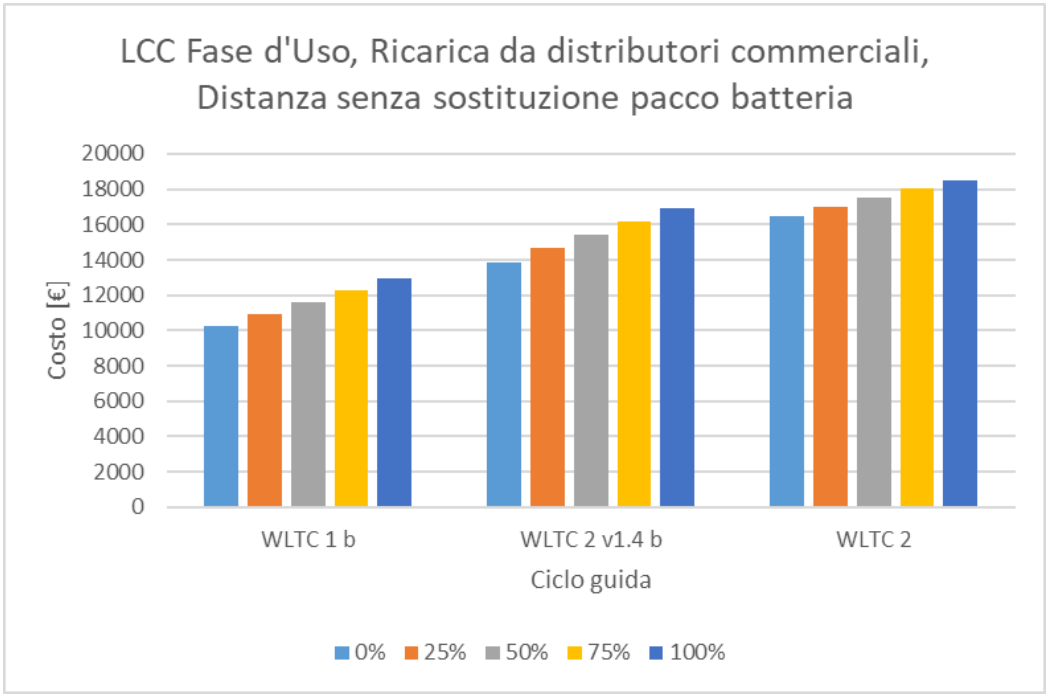


Figura 58. LCC Fase d'Uso, Ricarica da distributori commerciali

Fase d'Uso, Ricarica da distributori commerciali, Distanza senza sostituzione pacco batteria						
		Costo energia elettrica Fase d'Uso [€]				
	Carico	0%	25%	50%	75%	100%
Ciclo guida	WLTC 1 b	10278	10943	11610	12277	12946
	WLTC 2 v1.4 b	13866	14663	15440	16187	16907
	WLTC 2	16460	17001	17527	18037	18527

Tabella 46. LCC Fase d'Uso, Ricarica da distributori commerciali

6.3.3.3 VdC: Fase Manutenzione

L'impatto economico maggiore è dato dalla sostituzione dei pneumatici.

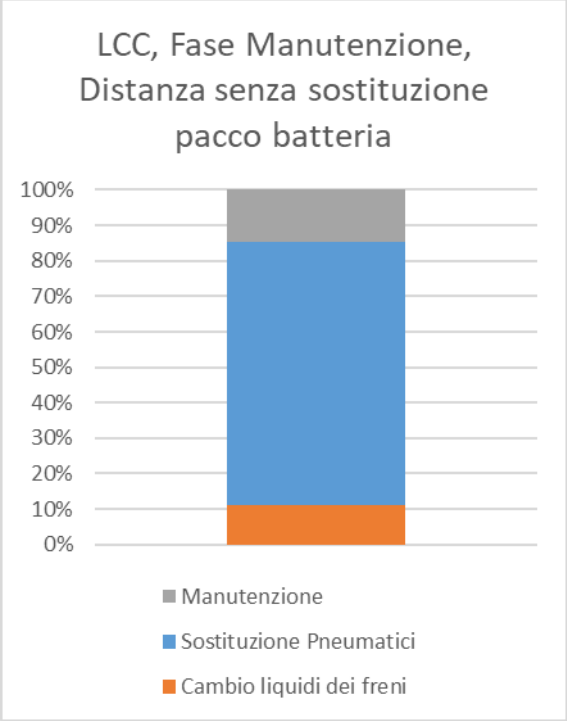


Figura 59. LCC Fase Manutenzione

Operazione manutenzione	Distanza [km]	Costo [€]	n	Distanza senza sostituzione batteria [km]	
				n interventi	70000
Cambio liquidi dei freni	60000	150	1	1	150
Sostituzione Pneumatici	50000	250	4	1	1000
Manutenzione	40000	200	1	1	200
			TOTALE [€]		1350

Tabella 47. LCC Fase Manutenzione

6.3.3.4 VdC: Fase Fine Vita

Dal grafico in Figura 60 si può notare come sia economicamente vantaggioso praticare la rivendita a fine vita del pacco batteria.

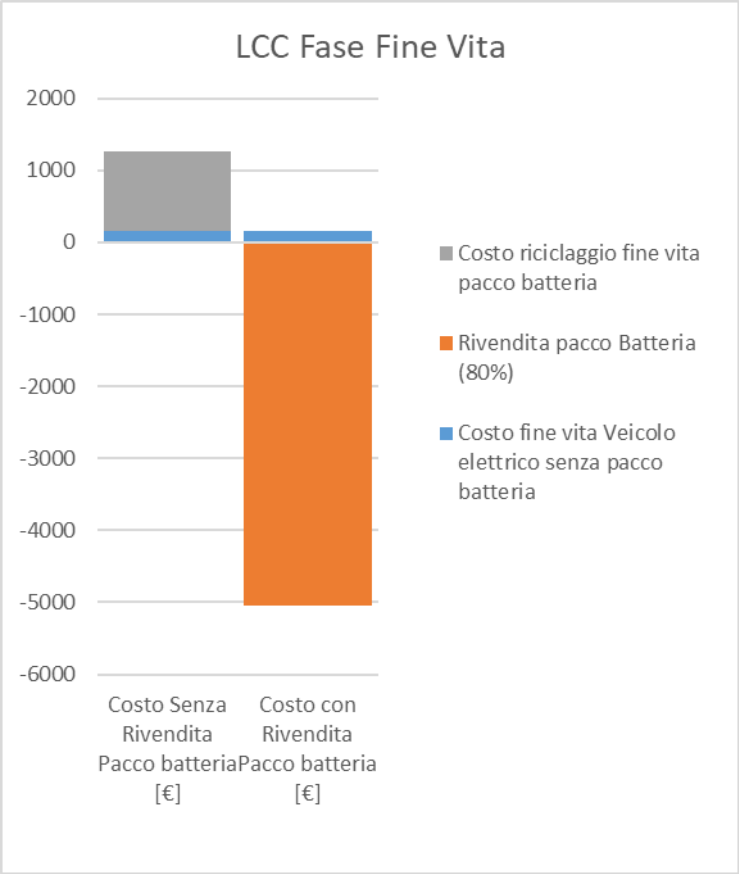


Figura 60. LCC Fase Fine Vita

Operazione Fine Vita	Costo Senza Rivendita Pacco batteria [€]	Costo con Rivendita Pacco batteria [€]
Costo fine vita Veicolo elettrico senza pacco batteria	158	158
Rivendita pacco Batteria (80%)	0	-5050
Costo riciclaggio fine vita pacco batteria	1102	0
TOTALE	1260	-4892

Tabella 48. LCC Fase Fine Vita

6.3.3.5 VdC: Complessivo

In questo scenario in cui l'azienda non prevede la sostituzione del pacco batteria, sia per la ricarica in azienda che per la ricarica da distributori commerciali, il costo sostenuto per la realizzazione del veicolo ha un impatto economico decisamente superiore a prescindere dal ciclo guida considerato (Figura 61).

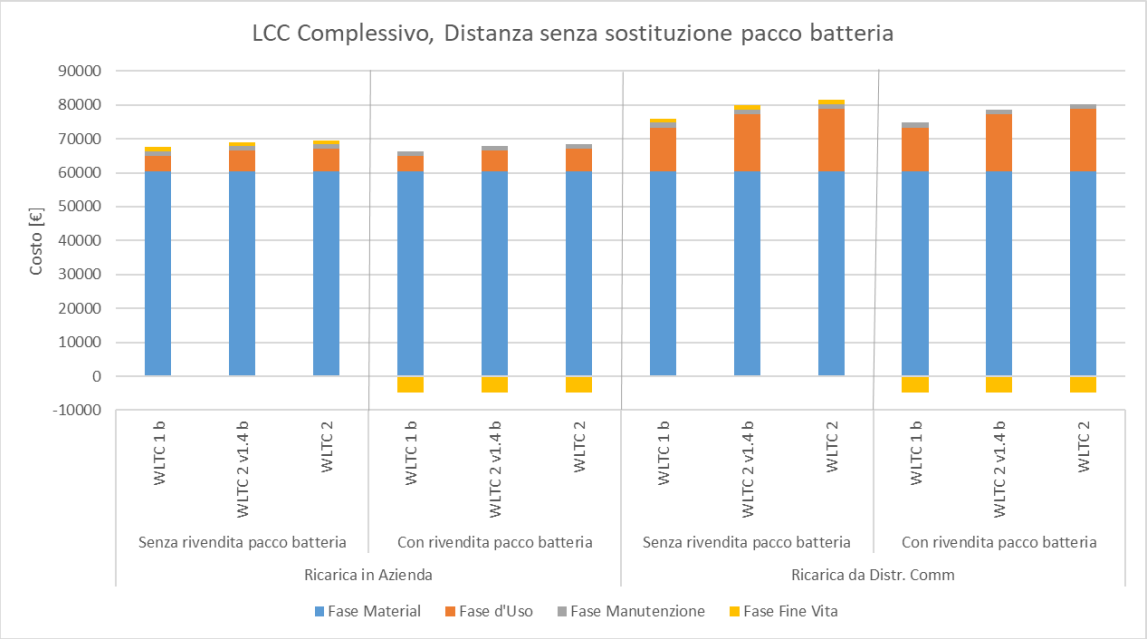


Figura 61. LCC Complessivo, Distanza senza sostituzione del pacco batteria

Mix Energetico		Italia	
Carico		100%	
Consumo [kWh/km]		WLTC 1 b	0,411
		WLTC 2 v1.4 b	0,537
		WLTC 2	0,588
Distanza [km]		70000	

Scenario Fine Vita			Costo Fasi Ciclo Vita [€]					
			Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	TOTALE	%
Ricarica in Azienda	Senza rivendita pacco batteria	WLTC 1 b	60414	4603	1350	1260	67627	2%
		WLTC 2 v1.4 b	60414	6011	1350	1260	69035	3%
		WLTC 2	60414	6587	1350	1260	69611	
	Con rivendita pacco batteria	WLTC 1 b	60414	4603	1350	-4892	61475	2%
		WLTC 2 v1.4 b	60414	6011	1350	-4892	62883	3%
		WLTC 2	60414	6587	1350	-4892	63459	
Ricarica da Distr. Comm.	Senza rivendita pacco batteria	WLTC 1 b	60414	12946	1350	1260	75970	5%
		WLTC 2 v1.4 b	60414	16907	1350	1260	79931	7%
		WLTC 2	60414	18527	1350	1260	81551	
	Con rivendita pacco batteria	WLTC 1 b	60414	12946	1350	-4892	69818	6%
		WLTC 2 v1.4 b	60414	16907	1350	-4892	73779	8%
		WLTC 2	60414	18527	1350	-4892	75399	

Tabella 49. LCC Complessivo, Distanza senza sostituzione del pacco batteria

			Totale senza rivendita [€]		Totale con rivendita [€]	
Ciclo guida	Carico	Consumo [kWh/km]	Ricarica in azienda	Ricarica distr. comm.	Ricarica in azienda	Ricarica distr. comm.
WLTC 1 b	0%	0,326	66678	73302	60526	67150
	25%	0,347	66915	73967	60763	67815
	50%	0,369	67152	74633	61000	68481
	75%	0,390	67389	75301	61237	69149
	100%	0,411	67627	75970	61475	69818
WLTC 2 v1.4 b	0%	0,440	67954	76889	61802	70737
	25%	0,465	68237	77687	62085	71535
	50%	0,490	68514	78464	62362	72312
	75%	0,514	68779	79211	62627	73059
	100%	0,537	69035	79931	62883	73779
WLTC 2	0%	0,523	68876	79483	62724	73331
	25%	0,540	69069	80025	62917	73873
	50%	0,556	69256	80551	63104	74399
	75%	0,573	69437	81061	63285	74909
	100%	0,588	69611	81551	63459	75399

Tabella 50. LCC Complessivo, Distanza senza sostituzione del pacco batteria, Completo

6.3.4 Interpretazione dei risultati

6.3.4.1 Confronto con altri risultati

Confrontando i risultati ottenuti in questo studio con quelli presentati da Sami Kara et al. [10] riguardo un LCC di un veicolo elettrico utilizzato in Australia, si nota che le conclusioni sono in linea in quanto i costi maggiori riguardano l'acquisto del veicolo. Si sottolinea però che nello studio di Sami Kara l'analisi è fatta lato acquirente e per un auto, mentre in questo caso l'analisi è fatta lato produttore e per una navetta elettrica.

6.3.4.2 Scenario: Distanza con prevista sostituzione pacco batteria

L'azienda prevede di non sostituire il pacco batteria durante la vita del veicolo. In questo scenario si propone una situazione alternativa in cui al veicolo viene chiesto di percorrere una distanza pari a 200000 km, distanza scelta tipicamente per le auto. Lo scenario proposto porta dei cambiamenti a due fasi del ciclo vita in particolare: Fase d'Uso e Fase Manutenzione. L'impatto della Fase d'Uso ovviamente aumenterà perché aumentando la distanza percorsa aumenta il consumo di energia elettrica. La Fase Manutenzione cambierà accrescendo il suo impatto perché bisogna tener conto della sostituzione del pacco batteria che avverrà ogni 70000 km, quindi per questo scenario sono previsti due sostituzioni del pacco batteria durante il suo ciclo vita (Figura 62). La sostituzione del pacco batteria e il conseguente impatto del fine vita dei pacchi batteria introdotti per la sostituzione, hanno un impatto rilevante ai fini del totale della Fase Manutenzione. Per questa situazione vengono fatti due scenari, il primo riguarda l'invio del pacco batteria sostituito ad un trattamento di riciclaggio a fine vita, mentre il secondo prevede la rivendita del pacco batteria. I costi necessari per le operazioni sono riportati nella Tabella 51.

La voce "Cambio Pacco batteria (80%)" valuta il costo necessario per sostituire un pacco batteria. La voce "Rivendita Pacco batteria (80%)" valuta il ritorno economico relativo alla vendita del pacco batteria con un'energia nominale pari all'80% di quella iniziale con una svalutazione del 20%. La voce "Costo riciclo pacco batteria sostituito" è la valutazione del costo che è necessario per il riciclo del pacco batteria sostituito.

Dal confronto della fase manutenzione con e senza rivendita si nota che sicuramente l'impatto economico è vantaggioso con la prevista rivendita del pacco batteria, che va ad alleggerire il carico della Fase Manutenzione.

Dal totale possiamo notare come l'impatto della fase d'uso quando la ricarica avviene attraverso distributori commerciali si avvicini all'impatto della fase material (Figura 63).

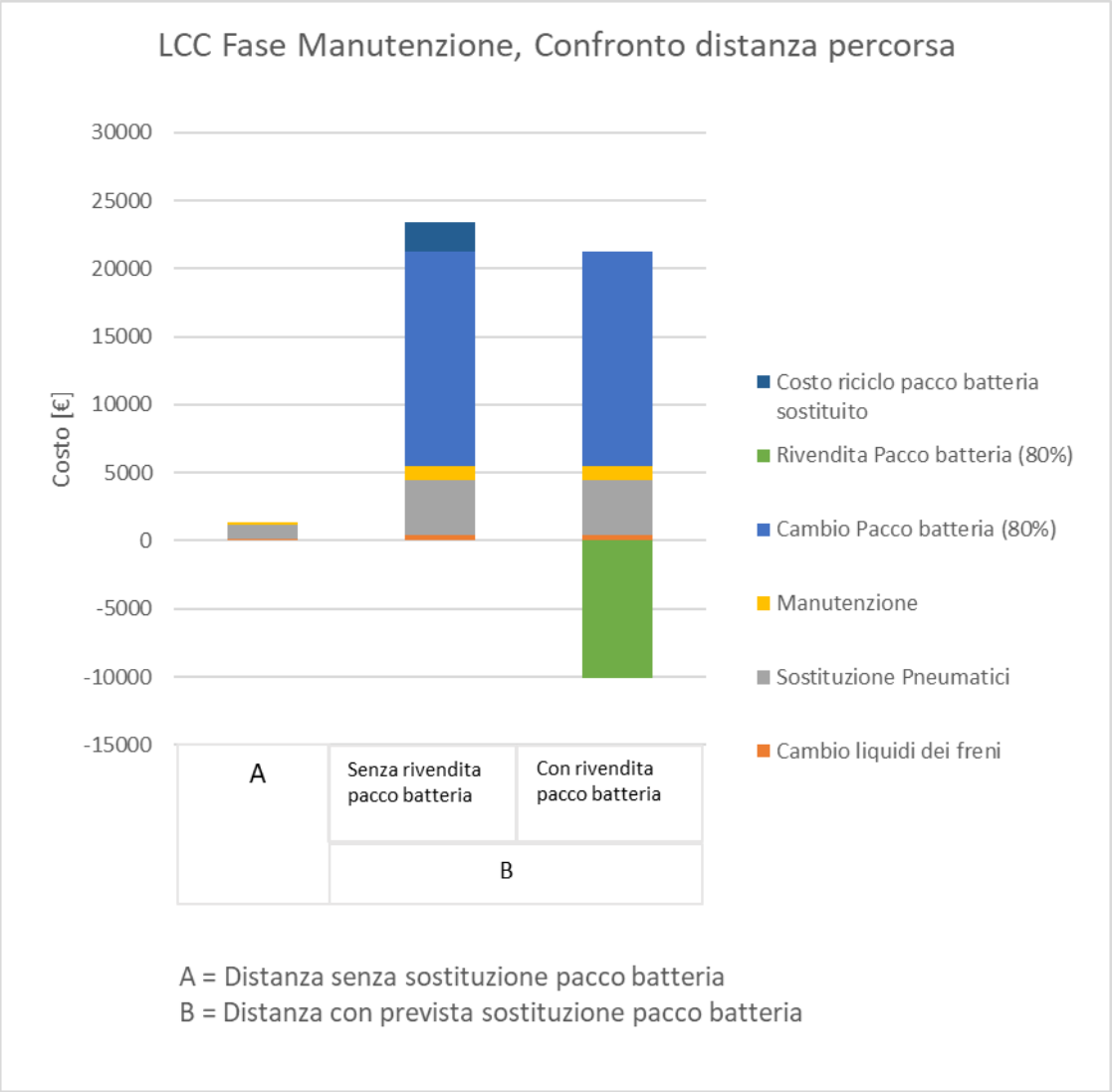


Figura 62. LCC Fase Manutenzione, Confronto distanza percorsa

Distanza [km]	A	70000		A		B			
	B	200000				Senza rivendita pacco batteria		Con rivendita pacco batteria	
Operazione manutenzione	Distanza [km]	Costo a intervento [€/n.i.]	n operazioni	n interventi	Costo [€]	n interventi	Costo [€]	n interventi	Costo [€]
Cambio liquidi dei freni	60000	150	1	1	150	3	450	3	450
Sostituzione Pneumatici	50000	250	4	1	1000	4	4000	4	4000
Manutenzione	40000	200	1	1	200	5	1000	5	1000
Cambio Pacco batteria (80%)	70000	7890	1	0	0	2	15780	2	15780
Rivendita Pacco batteria (80%)	70000	-5050	1	0	0	0	0	2	-10099
Costo riciclo pacco batteria sostituito	70000	1102	1	0	0	2	2205	0	0
			TOTALE [€]		1350		23435		11131

Tabella 51. LCC Fase Manutenzione, Confronto distanza percorsa

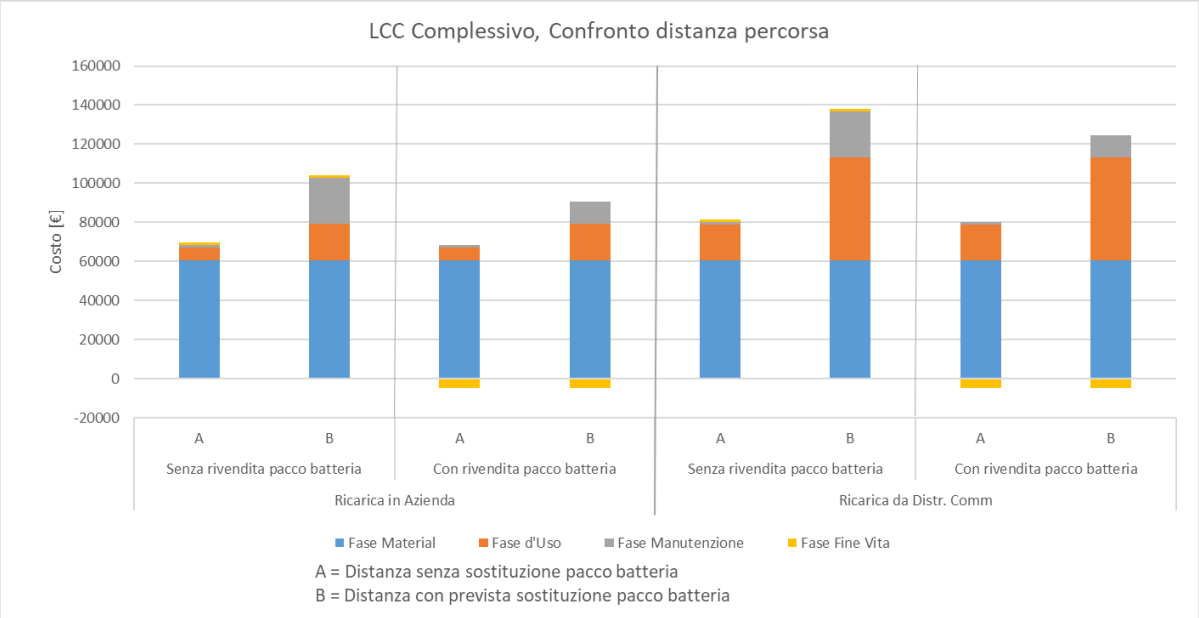


Figura 63. LCC Complessivo, Confronto distanza percorsa

Ciclo guida	WLTC 2		
Carico	100%		
Consumo [kWh/km]	0,588		
Distanza Vita [km]	A	70000	
	B	200000	

Scenario Fine Vita			Costo Fasi Ciclo Vita [€]					
			Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	TOTALE	
								%
Ricarica in Azienda	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	6587	1350	1260	69611	
		B	60414	18821	23435	1260	103930	49%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	6587	1350	-4892	63459	
		B	60414	18821	11131	-4892	85474	35%
Ricarica da Distr. Comm	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	18527	1350	1260	81551	
		B	60414	52934	23435	1260	138043	69%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	18527	1350	-4892	75399	
		B	60414	52934	11131	-4892	119587	59%

Tabella 52. LCC Complessivo, Confronto distanza percorsa

6.3.4.3 Scenario: Alternative materiale telaio

Essendo nella Fase Material, l'Assieme Telaio ad avere il ruolo più impattante e nel particolare il materiale acciaio; questo scenario rappresenta il tentativo di una valutazione di materiali alternativi all'acciaio per la realizzazione dei componenti strutturali del telaio. In particolare è stato scelto l'alluminio e il composito (matrice di resina con rinforzo in fibra di carbonio). La modellazione è stata riportata nel dettaglio al paragrafo 6.2.4.4 Scenario: Alternative materiale telaio. Dal grafico in Figura 64, si conclude che l'impatto maggiore è dato dal composito in qualsiasi scenario, mentre l'alluminio risulta avere un impatto economico migliore solo per lo scenario di una distanza percorsa di 200.000 km e con la ricarica da distributori commerciali.

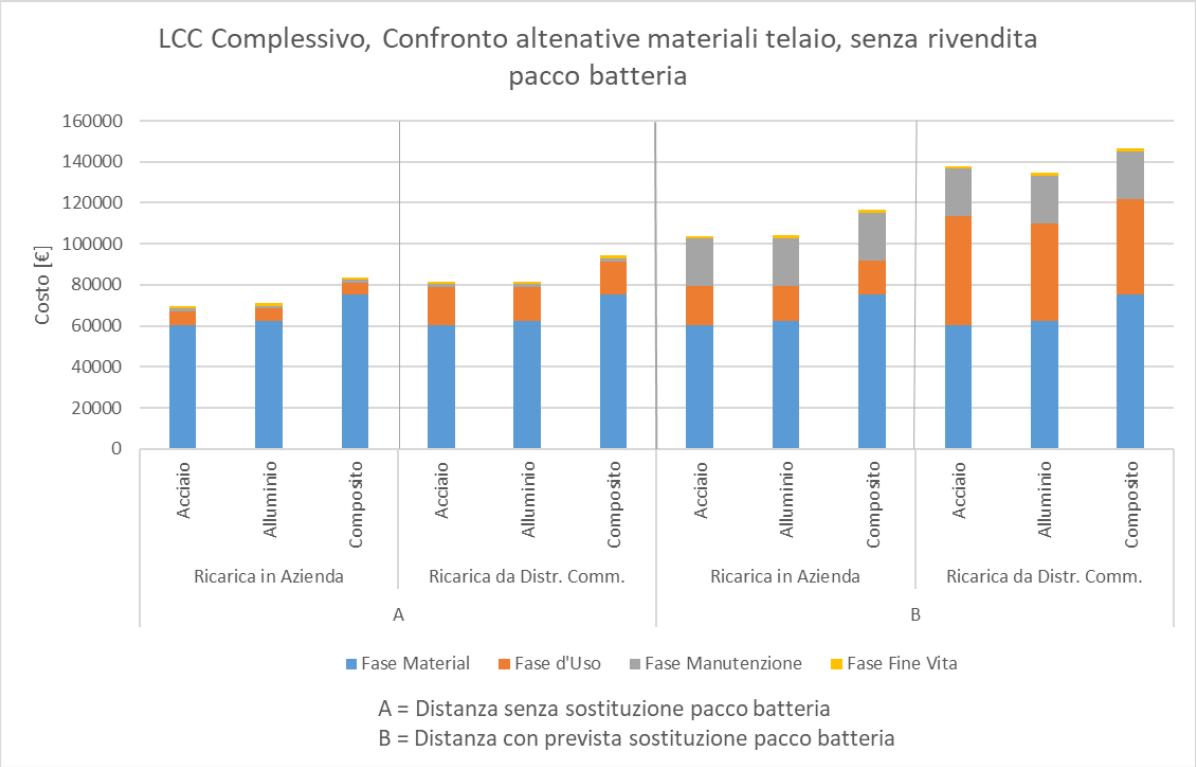


Figura 64. LCC Complessivo, Confronto alternative materiale, senza rivendita pacco batteria

Ciclo guida	WLTC 2	
Carico	100%	
Distanza [km]	A	70000
	B	200000
Consumo [kWh/km]	Acciaio	0,588
	Alluminio	0,527
	Composito	0,516

Senza rivendita pacco batteria			Costo Fasi ciclo vita [€]					
Alternative materiale Telaio			Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	TOTALE	
								%
A	Ricarica in Azienda	Acciaio	60414	6587	1350	1260	69611	
		Alluminio	62454	5897	1350	1266	70968	2%
		Composito	75302	5777	1350	1305	83734	20%
	Ricarica da Distr. Comm.	Acciaio	60414	18527	1350	1260	81551	
		Alluminio	62454	16586	1350	1266	81657	0%
		Composito	75302	16247	1350	1305	94204	16%
B	Ricarica in Azienda	Acciaio	60414	18821	23435	1260	103930	
		Alluminio	62454	16850	23435	1266	104005	0%
		Composito	75302	16505	23435	1305	116546	12%
	Ricarica da Distr. Comm.	Acciaio	60414	52934	23435	1260	138043	
		Alluminio	62454	47389	23435	1266	134545	-3%
		Composito	75302	46419	23435	1305	146461	6%

Tabella 53. LCC Complessivo, Confronto alternative materiale, senza rivendita pacco batteria

Per la valutazione del costo della fase produttiva per i telai che utilizzano in maniera prevalente l'alluminio ed il composito si è deciso in primo luogo di individuare un indice di riferimento (I_p indice produzione) valutato in base alla massa e al prezzo al kg del telaio.

$$I_{p_{materiale}} = 0.4 \cdot \left(\frac{m_{materiale}}{m_{telaio}}\right) + 0.6 \cdot \left(\frac{c_{materiale}}{c_{telaio}}\right)$$

Dove $m_{materiale}$ indica la massa in kg del materiale preso in analisi (acciaio, alluminio e composito); m_{telaio} è la massa totale dell'assieme telaio; $c_{materiale}$ indica il prezzo al kg del materiale preso in analisi (acciaio, alluminio e composito); c_{telaio} è la somma dei prezzi al kg dei materiali dell'assieme telaio. Dalla funzione si può notare come si sia dato un peso maggiore (0.6) al costo al kg del materiale rispetto alla massa (0.4).

Calcolato l'I_p per l'acciaio, è stato possibile individuare il costo della fase produttiva relativa al materiale acciaio, che sottraendolo al totale, ha permesso di individuare il costo della fase produttiva senza il materiale acciaio ed i comune quindi ad i tre materiali. Calcolato l'I_p per i tre materiali e conoscendo il costo della fase produttiva del materiale acciaio, si calcola quello relativo all'alluminio e al composito attraverso una proporzione.

$$CP_{materiale} = CP_{acciaio} \cdot \frac{I_{p_{materiale}}}{I_{p_{acciaio}}}$$

Dove $CP_{materiale}$ è il costo della fase produttiva del materiale.

Calcolato il costo produttivo sia per i componenti strutturali del telaio in alluminio che in composito, sommandoli a quello del resto del telaio, è possibile individuare il totale.

6.3.4.4 Scenario: Confronto con veicolo motore a combustione interna

In molti articoli viene riportato il confronto tra il veicolo elettrico con uno a motore a combustione interna. Per valutare il consumo medio del veicolo al km, viene utilizzato lo stesso modello introdotto per il veicolo elettrico ma con dati diversi adatti per un veicolo con motore a combustione interna (ICEV) (Tabella 37). Il veicolo che è stato considerato è un veicolo con motore Diesel euro 6. La Fase Material ICEV si differenzia dall'EV per l'assenza del pacco batteria e motore elettrico sostituito da un motore a combustione interna. La Fase Manutenzione ICEV è stata valutata attraverso i dati presenti in Tabella 55. La fase d'Uso è stata valutata con i dati in Tabella 54.

Si è preso in esame solo lo scenario ciclo guida WLTC Classe 2 e carico 100%, in questo caso l'ICEV ha un consumo di 1.304 kWh/km, mentre l'EV 0.588 kWh/km.

Dal totale in Figura 65 si nota come l'unico scenario economicamente vantaggioso, considerando la situazione che prevede la non sostituzione del pacco batteria durante la vita utile del veicolo, sia quello che riguarda la ricarica in azienda e la rivendita del pacco batteria a fine vita, anche si ha un vantaggio molto basso, riduzione del costo totale di circa l'1%. Anche nella situazione in cui la distanza percorsa è di 200000 km, risulta essere quello indicato in precedenza lo scenario migliore con un aumento anche della percentuale di differenza, riduzione del costo totale del 10% (dovuto alla fase d'uso che per il veicolo EV è enormemente più vantaggiosa quando la ricarica è in azienda).

Percorso medio al giorno [km/gg]	35
Distanza vita prevista [km]	70000
Prezzo Gasolio [€/l]	1,5
Energia Gasolio [kWh/l]	10,7

Tabella 54. Dati modello ICEV, Fase d'Uso

Operazione manutenzione	Distanza [km]	Costo [€]	n	Distanza senza sostituzione batteria [km]	
				n interventi	70000
Cambio dell'olio	40000	150	1	1	150
Cambio filtro dell'olio	40000	80	1	1	80
Cambio cinghia di distribuzione	60000	600	1	1	600
Cambio cinghia alternatore	60000	200	1	1	200
Cambio filtro carburante	40000	150	1	1	150
Cambio liquidi dei freni	60000	150	1	1	150
Cambio filtro dell'aria	40000	50	1	1	50
Cambio fludi di raffreddamento	120000	50	1	0	0
Sostituzione Pneumatici	50000	250	4	1	1000
			TOTALE [€]		2380

Tabella 55. LCC Fase Manutenzione, ICEV, Distanza 70000 km

Operazione manutenzione	Distanza [km]	Costo [€]	n	Distanza prevista [km]	
				n interventi	200000
Cambio dell'olio	40000	150	1	5	750
Cambio filtro dell'olio	40000	80	1	5	400
Cambio cinghia di distribuzione	60000	600	1	3	1800
Cambio cinghia alternatore	60000	200	1	3	600
Cambio filtro carburante	40000	150	1	5	750
Cambio liquidi dei freni	60000	150	1	3	450
Cambio filtro dell'aria	40000	50	1	5	250
Cambio fludi di raffreddamento	120000	50	1	1	50
Sostituzione Pneumatici	50000	250	4	4	4000
			TOTALE [€]		9050

Tabella 56. LCC Fase Manutenzione, ICEV, Distanza 200000 km

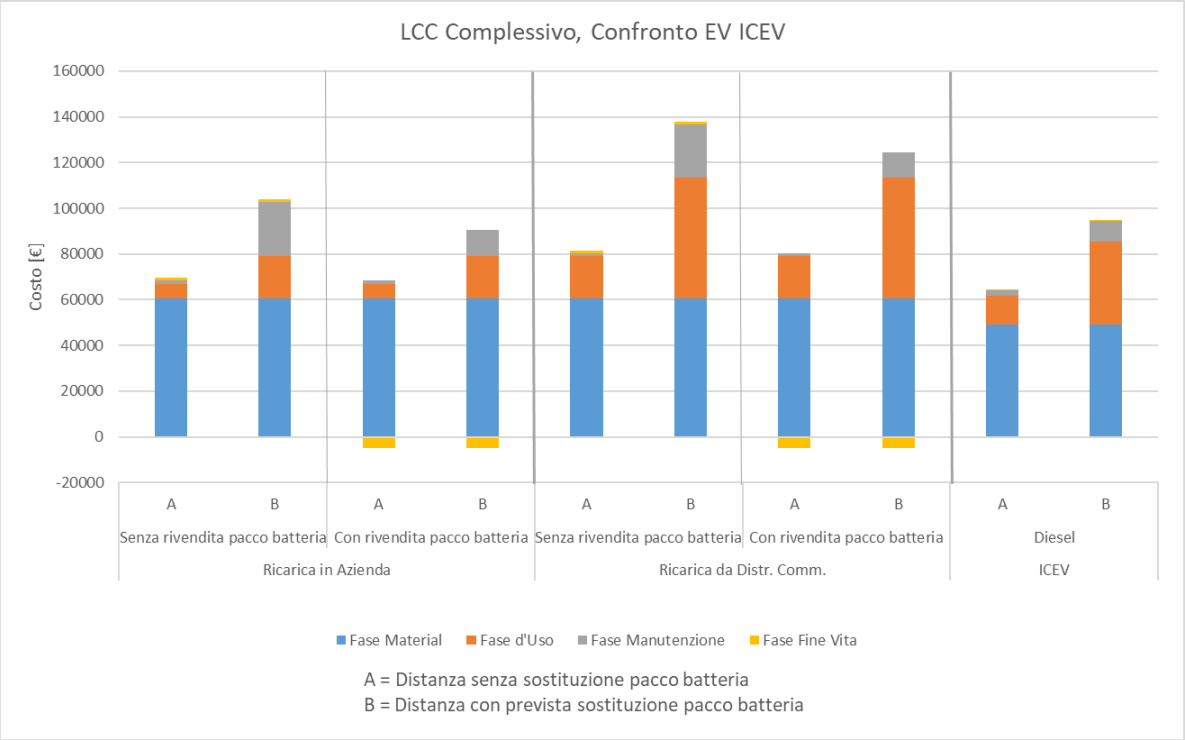


Figura 65. LCC Complessivo, Confronto EV ICEV

Veicolo		EV	ICEV
Ciclo guida		WLTC 2	WLTC 2
Carico		100%	100%
Consumo [kWh/km]		0,588	1,304
Distanza prevista [km]	A	70000	70000
	B	200000	200000

Scenario			Costo Fasi Ciclo Vita [€]					
			Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	Totale	
								%
Ricarica in Azienda	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	6587	1350	1260	69611	8%
		B	60414	18821	23435	1260	103930	10%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	6587	1350	-4892	63459	-1%
		B	60414	18821	11131	-4892	85474	-10%
Ricarica da Distr. Comm.	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	18527	1350	1260	81551	27%
		B	60414	52934	23435	1260	138043	46%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	18527	1350	-4892	75399	17%
		B	60414	52934	11131	-4892	119587	26%
ICEV	Diesel	A	49024	12792	2380	158	64353	
		B	49024	36547	9050	158	94779	

Tabella 57. LCC Complessivo, Confronto EV ICEV

6.3.4.5 Scenario: Confronto con presenza di un impianto fotovoltaico privato

L'ultimo scenario prende in considerazione la possibilità della presenza in azienda di un impianto fotovoltaico privato che consenta di andare a mitigare il costo legato al consumo di energia elettrica andando a coprire il 50% della richiesta. Essendo un autoconsumo di energia elettrica, il costo da sostenere è pari a zero. Il resto dell'energia richiesta viene presa dalla rete nazionale con una ricarica in azienda. Dalla Figura 66 si può notare come la riduzione del costo dell'energia a seguito della presenza dell'impianto fotovoltaico comporta una diminuzione dell'impatto sul complessivo, che nel caso di rivendita del pacco batteria e di lunga percorrenza (200.000 km), arriva anche al 20%.

Prezzo energia elettrica ricarica in azienda [€/kWh]	0,16
Prezzo energia elettrica ricarica distributori commerciali [€/kWh]	0,45
Prezzo Gasolio [€/l]	1,5

Tabella 58. Dati prezzo vettore energetico

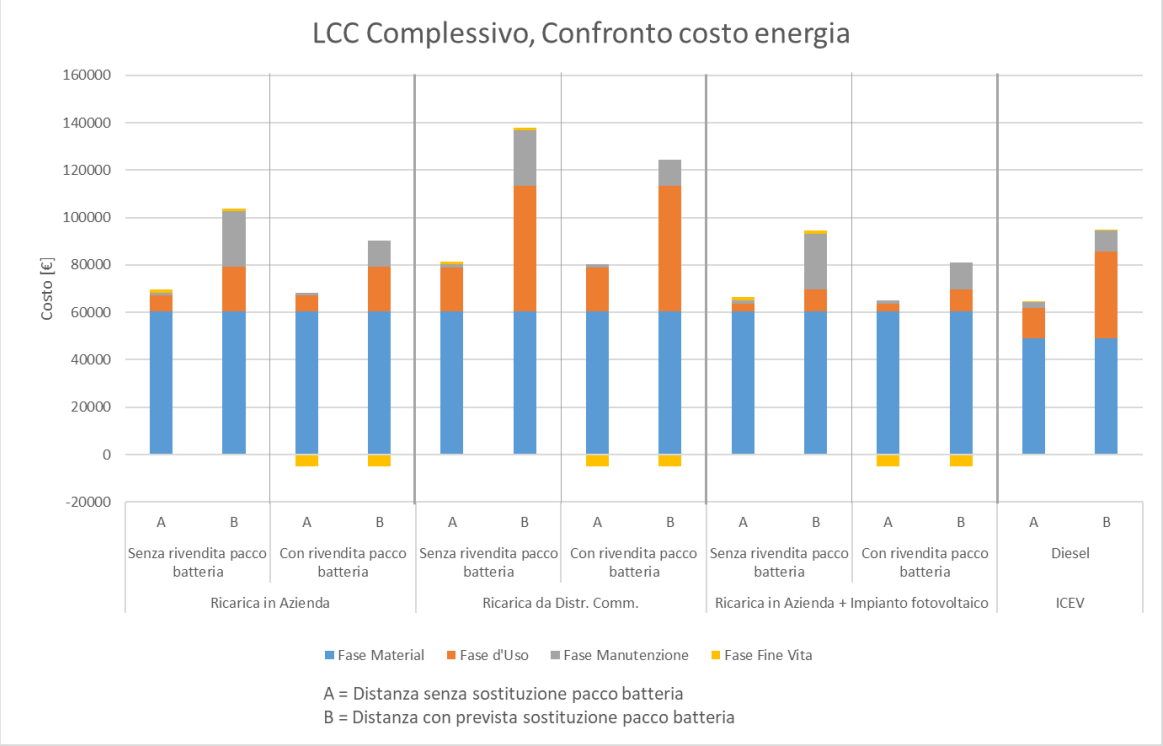


Figura 66. LCC Complessivo, Confronto costo energia

Veicolo			EV	ICEV
Ciclo guida			WLTC 2	WLTC 2
Carico			100%	100%
Consumo [kWh/km]			0,588	1,304
Distanza prevista [km]	A		70000	70000
	B		200000	200000

Scenario			Costo Fasi Ciclo Vita [€]					
			Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	Totale	
								%
Ricarica in Azienda	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	6587	1350	1260	69611	8%
		B	60414	18821	23435	1260	103930	10%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	6587	1350	-4892	63459	-1%
		B	60414	18821	11131	-4892	85474	-10%
Ricarica da Distr. Comm.	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	18527	1350	1260	81551	27%
		B	60414	52934	23435	1260	138043	46%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	18527	1350	-4892	75399	17%
		B	60414	52934	11131	-4892	119587	26%
Ricarica in Azienda + Impianto fotovoltaico	Senza rivendita pacco batteria	A	60414	3294	1350	1260	66317	3%
		B	60414	9411	23435	1260	94519	0%
	Con rivendita pacco batteria	A	60414	3294	1350	-4892	60165	-7%
		B	60414	9411	11131	-4892	76063	-20%
ICEV	Diesel	A	49024	12792	2380	158	64353	
		B	49024	36547	9050	158	94779	

Tabella 59. LCC Complessivo, Confronto costo energia

Conclusione

L'analisi LCA della navetta elettrica ha evidenziato che la Fase Material e la Fase d'Uso sono le fasi che hanno un impatto maggiore soprattutto quando si considera lo scenario che prevede di non sostituire il pacco batteria durante la vita utile. Per intervenire sulla Fase d'Uso si è visto che per diminuire l'impatto si può scegliere di intervenire sul mix energetico del proprio produttore scegliendone uno che privilegia le fonti rinnovabili e se si ha la possibilità, investire su un impianto fotovoltaico per la ricarica del veicolo. Per la Fase Material si è visto che sostituire l'acciaio con un altro materiale come alluminio o composito comporta una diminuzione dell'impatto a seconda della categoria, ma diminuisce sicuramente se andiamo a considerare l'impatto complessivo in particolare per il materiale alluminio; il materiale infatti influisce riducendo l'impatto della Fase d'Uso e migliorando il benefit arrecato dal riciclo in Fase Fine Vita. Si è potuto costatare che quando si percorre una distanza molto elevata per la quale si necessita di un cambio del pacco batteria, l'impatto della Fase d'Uso prevale sulle altre fasi, riscontrando però un aumento dell'impatto della Fase Manutenzione che nello scenario iniziale è quasi trascurabile. In tutti gli scenari si sottolinea l'importanza di un corretto trattamento del veicolo a fine vita. Molto importante è stato il confronto con un veicolo con motore a combustione interna che ha permesso di concludere che nelle categorie d'Impatto Climate change e Fossil depletion il veicolo EV è nettamente il migliore, mentre nelle altre categorie ed in particolare nella Human toxicity è l'ICEV a prevalere, questo a causa della Fase Material (produzione pacco batteria) e della Fase d'Uso (produzione energia elettrica).

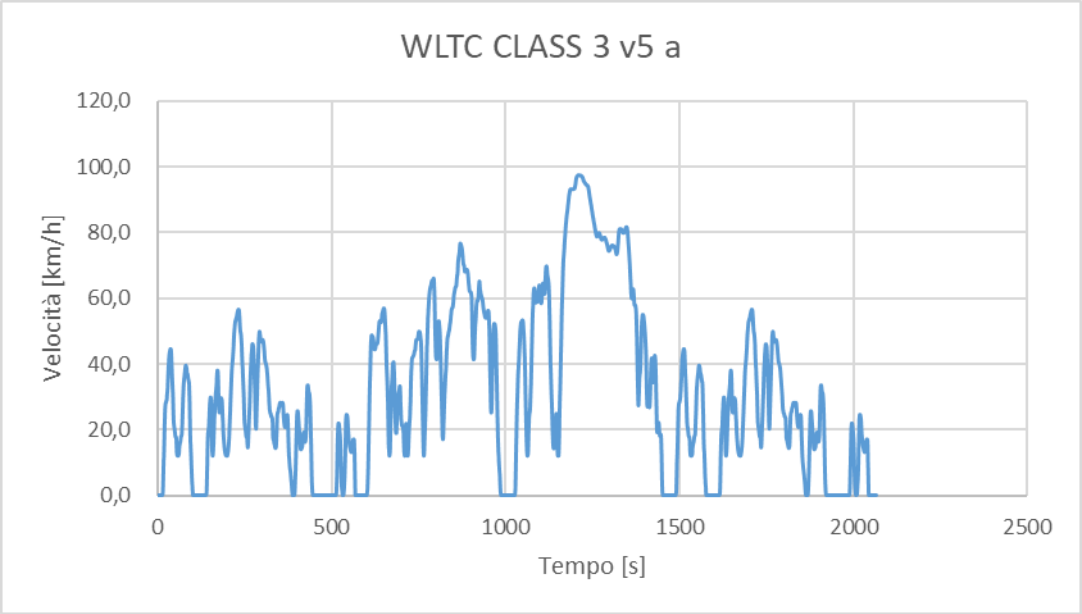
Per quanto riguarda LCC della navetta elettrica possiamo concludere che la Fase Material è la fase che ha un impatto maggiore soprattutto quando si considera lo scenario che prevede di non sostituire il pacco batteria durante la vita utile. Per la Fase Material si è visto che sostituire l'acciaio con un altro materiale come alluminio o composito non comporta una diminuzione dei costi. La ricarica in azienda è la più conveniente. L'impatto della rivendita del pacco batteria a fine vita risulta non essere rilevante in questa situazione. Si è potuto costatare che quando si percorre una distanza molto elevata per la quale si necessita di un cambio del pacco batteria, l'impatto della Fase d'Uso assume un costo quasi pari a quello sostenuto per la Fase Material solo se è prevista la ricarica da distributori commerciali, si riscontra però un aumento dell'impatto della Fase Manutenzione che nello scenario iniziale è quasi trascurabile. La rivendita dei pacchi batteria a fine vita in questa situazione comporta una variazione del costo della Fase Manutenzione non trascurabile, per questo se ne consiglia la rivendita, anche se questi temi vanno affrontati sia dal punto di vista normativo e con dei business plan che analizzino nel dettaglio tutti i possibili scenari. Dal confronto con un veicolo ICEV si è visto che soltanto quando è prevista la ricarica in azienda con rivendita del pacco batteria a fine vita l'EV risulta essere vantaggioso, in tutti gli altri scenari non è così. Bisogna però sottolineare che in esame si

è presa la situazione con il consumo medio maggiore e quindi con un impatto della Fase d'Uso importante. Questo fa giungere alla conclusione che la diminuzione della Fase d'Uso in termini di consumo medio potrebbe fa prevalere la Fase Material anche per questi scenari economicamente vantaggiosi, trasformandoli in svantaggiosi. Questi risultati del LCC sono in linea con quelli presentati da Sami Kara et al. [10], e si ribadisce che per rendere vantaggioso dal punto di vista economico il veicolo elettrico è necessaria una diminuzione del costo del veicolo e del prezzo dell'energia elettrica. Nel caso in cui il costo legato al consumo dell'energia elettrica viene mitigato dalla presenza di un impianto fotovoltaico privato, si può notare come effettivamente l'impatto complessivo diminuisca rispetto ad un veicolo ICEV, soprattutto nel caso di rivendita del pacco batteria.

L'obiettivo della tesi è stato sviluppare una metodologia che in fase iniziale di progettazione stimi l'impatto ambientale ed economico di un veicolo elettrico, il caso studio ha permesso di realizzarlo per una navetta elettrica. Lo sviluppo futuro del progetto consisterà nel confrontare i risultati della metodologia con quelli dell'analisi LCA e LCC applicati alla navetta elettrica ma al termine della progettazione. In questo modo, si potranno affinare i dati a disposizione dato che si conoscerà nel dettaglio la definizione dei componenti, dei relativi processi produttivi e delle condizioni d'uso specifiche, comprendendo se l'approccio allo studio e la metodologia proposta, necessitano di accorgimenti e correzioni.

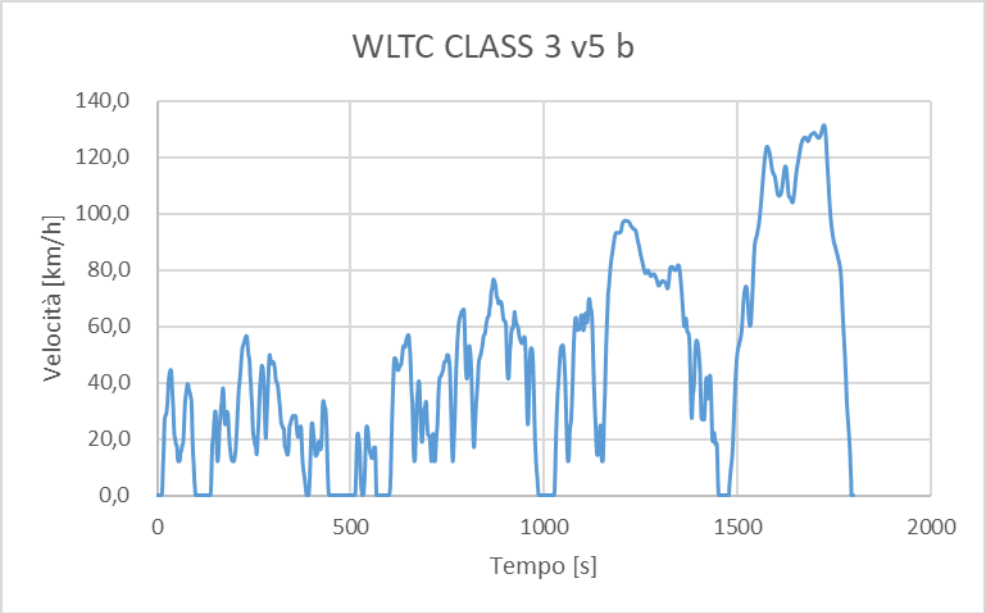
Appendice

- WLTC Classe 3 v5 a



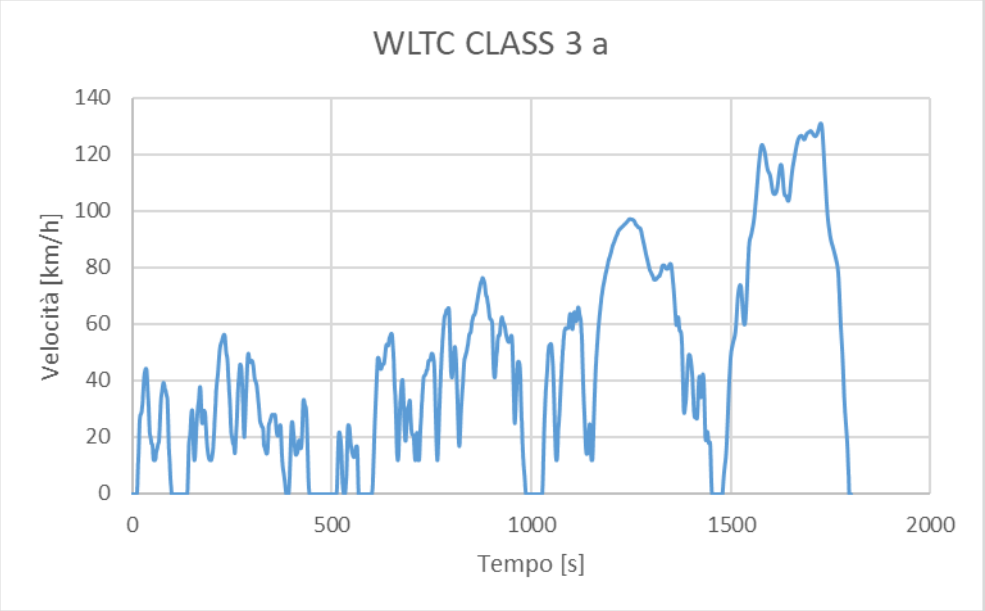
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 3 v5 a					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3095	56,5	-1,47	1,47
medium	433	4756	76,6	-1,49	1,57
high	455	7158	97,4	-1,49	1,58
extra high	323	2269	56,5	-1,43	1,43
TOTALE	1800	17277			

- WLTC Classe 3 v5 b



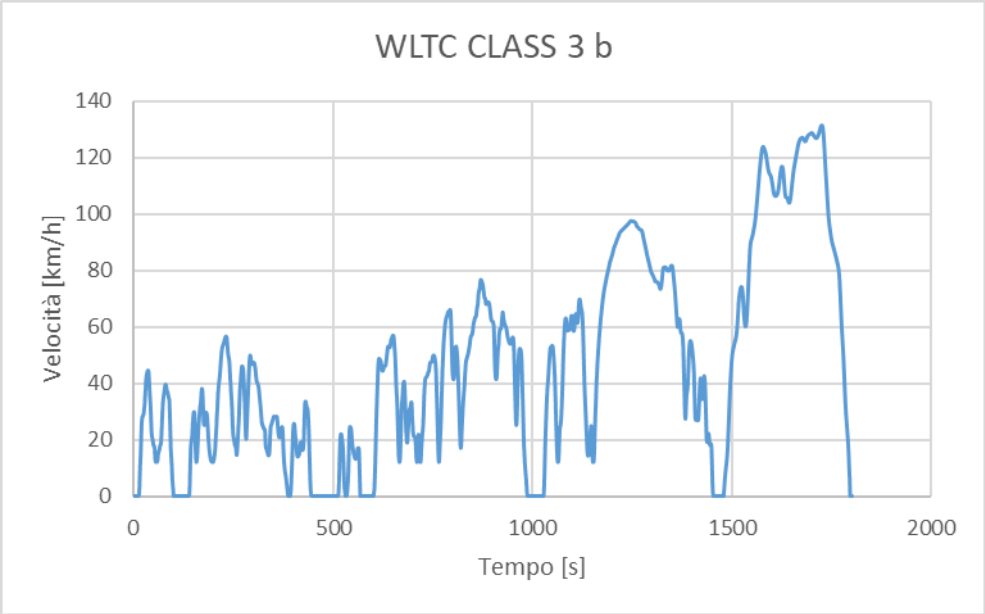
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 3 v5 b					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3095	56,5	-1,47	1,47
medium	433	4756	76,6	-1,49	1,57
high	455	7158	97,4	-1,49	1,58
extra high	323	8254	131,3	-1,21	1,03
TOTALE	1800	23262			

- WLTC Classe 3 a



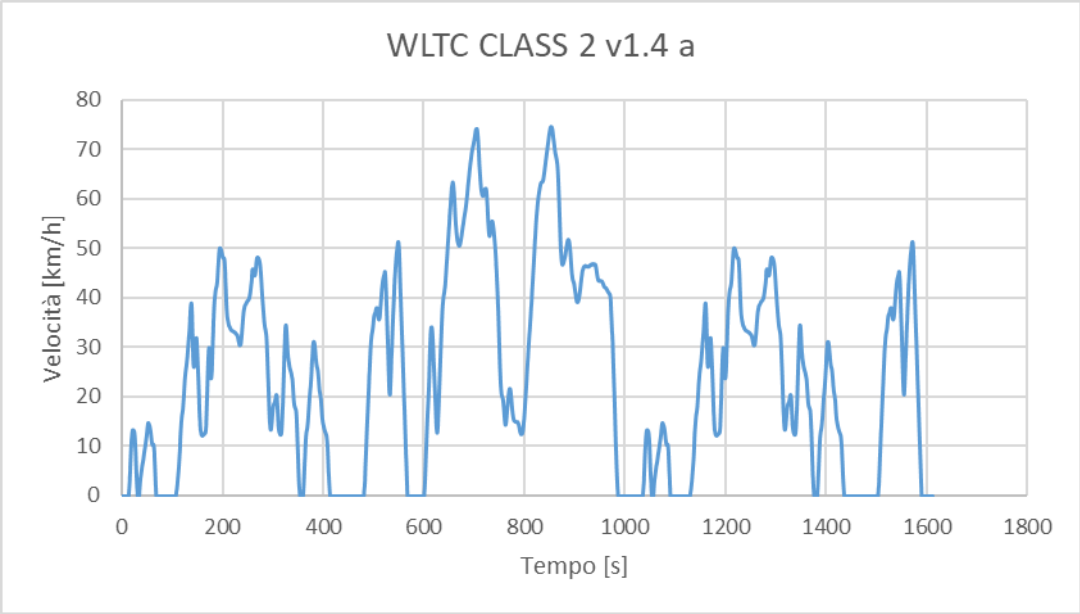
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 3 a					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3095	56,5	-1,47	1,47
medium	433	4721	76,6	-1,47	1,28
high	455	7124	97,4	-1,49	1,58
extra high	323	8254	131,3	-1,21	1,03
TOTALE	1800	23194			

- WLTC Classe 3 b



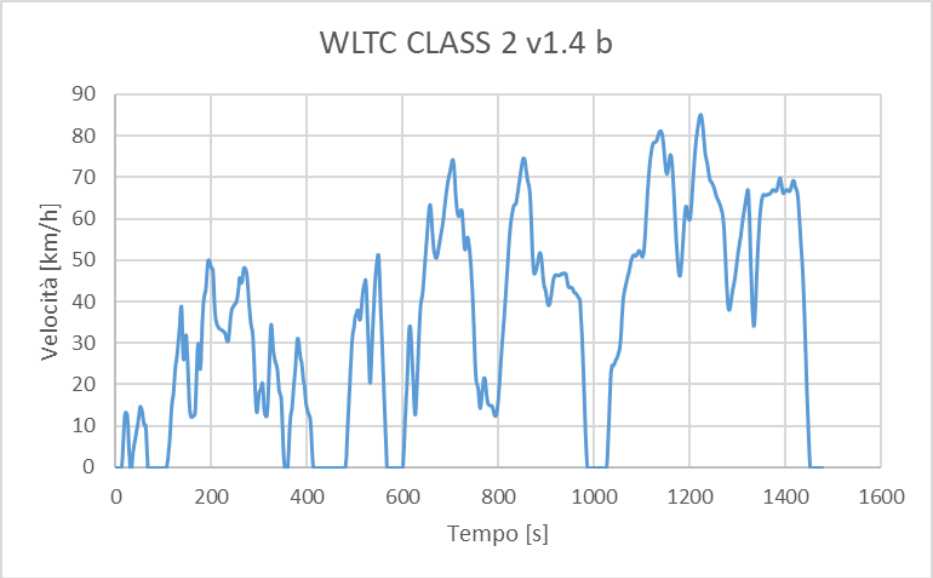
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 3 b					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3095	56,5	-1,47	1,47
medium	433	4756	76,6	-1,49	1,57
high	455	7162	97,4	-1,49	1,58
extra high	323	8254	131,3	-1,21	1,03
TOTALE	1800	23266			

- WLTC Classe 2 v1.4 a



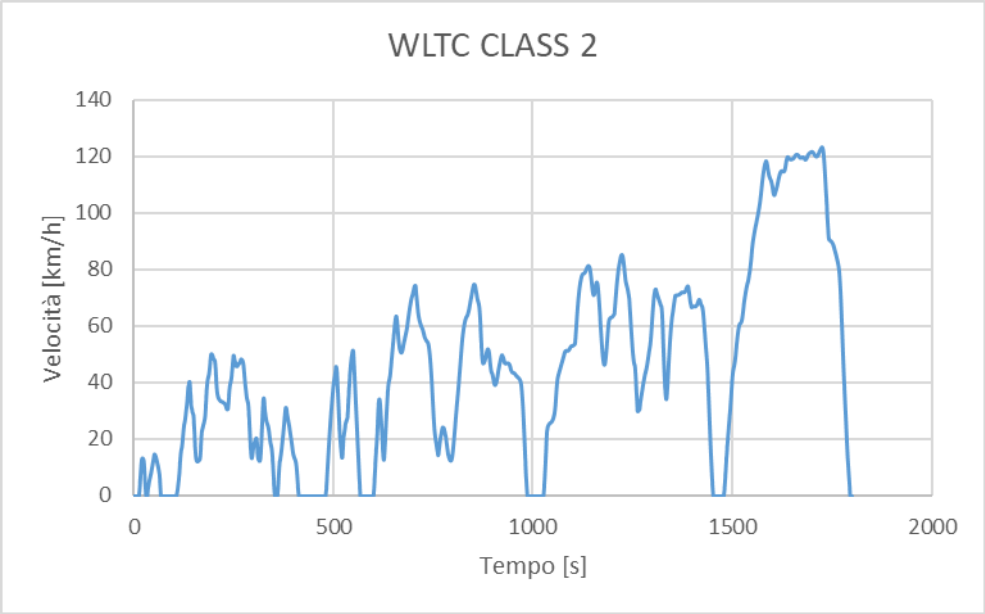
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 2 v1.4 a					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3132	51,4	-1,07	0,92
medium	433	4712	74,7	-0,99	0,96
low	589	3132	51,4	-1,07	0,92
TOTALE	1611	10976			

- WLTC Classe 2 v1.4 b



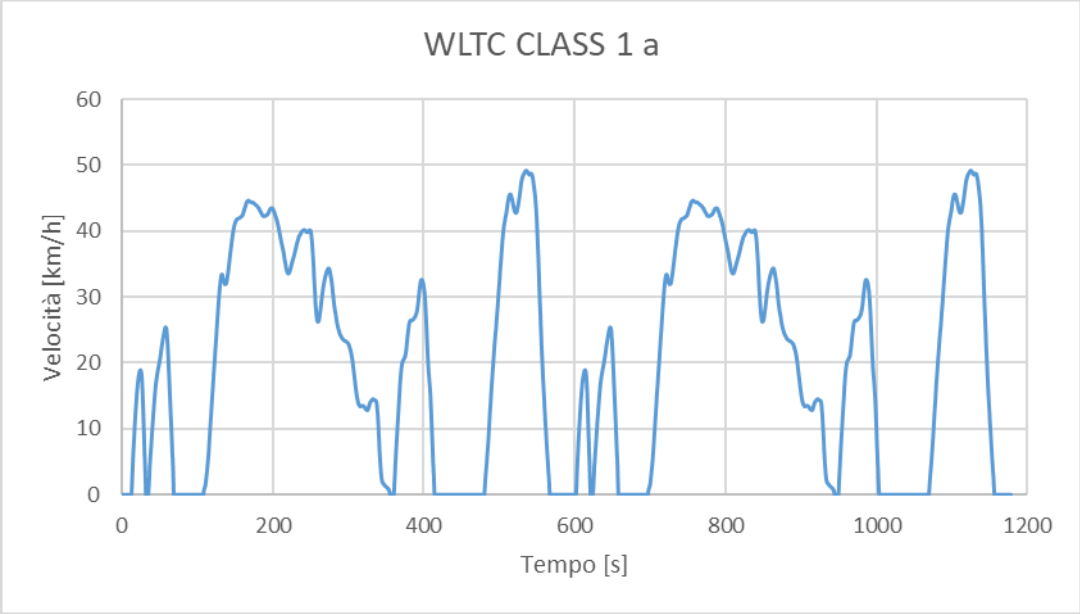
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 2 v1.4 b					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3132	51,4	-1,07	0,92
medium	433	4712	74,7	-0,99	0,96
high	455	6820	85,2	-1,11	0,85
TOTALE	1477	14664			

- WLTC Classe 2



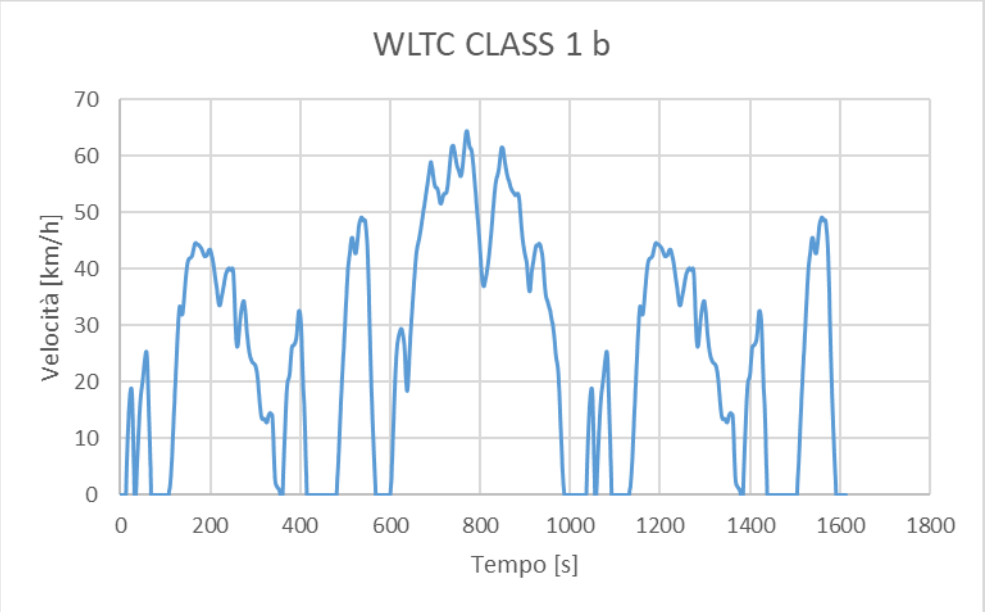
CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 2					
	Durata	distanza	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3101	51,4	-0,94	0,90
medium	433	4737	74,7	-0,93	0,96
high	455	6792	85,2	-1,11	0,85
extra high	322	8019	123,1	-1,06	0,65
TOTALE	1477	14630			

- WLTC Classe 1 a



CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 1 a					
	Durata	distance	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3324	49,1	-1	0,76
low	589	3324	49,1	-1	0,76
TOTALE	1178	6648			

- WLTC Classe 1 b



CARATTERISTICHE CICLO WLTC CLASS 1 b					
	Durata	distance	v_max	a_min	a_max
	s	m	km/h	m/s²	m/s²
low	589	3324	49,1	-1	0,76
medium	433	4767	64,4	-0,57	0,63
low	589	3324	49	-1	1
TOTALE	1611	11415			

Bibliografia

[1] ISO, 2006a. 14040:2006 - Environmental management - LCA - Principles and Framework.

[2] ISO, 2006b. 14044:2006 -Environmental management - LCA - Requirements and Guidelines.

[3] Kamilė Petrauskienė, Monika Skvarnavičiūtė, J. Dvarioniene, Comparative environmental life cycle assessment of electric and conventional vehicles in Lithuania, 2020, Journal of Cleaner Production.

[4] Casals, L.C., García, B.A., Aguesse, F., Iturrondobeitia, A. Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. 2015. The International Journal of Life Cycle Assessment 22(1). DOI: 10.1007/s11367-015-0918-3.

[5] Raugei, M., Morrey, D., Allan Hutchinson, Winfield, P. A coherent life cycle assessment of a range of lightweighting strategies for compact vehicles. Journal of Cleaner Production. 2015. 10.1016/j.jclepro.2015.05.100

[6] R Faria, P Marques, P Moura, F Freire, J Delgado, AT De Almeida. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles, 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24, 271-287.

[7] Faria, R., Marques, P., Garcia, R., Moura, P., Freire, F., Delgado, J., de Almeida, A.T. Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective. 2014. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 24(C), pages 271-287. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.063.

[8] Raugei, M., Winfield, P. 2018. Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles. Journal of Cleaner Production, 123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.237.

[9] Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R. 2009. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation - First edition - VROMeRuimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Retrieved from. http://www.lcia-recipe.net. last access September 2017.

[10] Sami Kara, Wen Li, Nikkita Sadjiva, Life Cycle Cost Analysis of Electrical Vehicles in Australia, 2017, The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering

[11] Schücking, M.; Jochem, P.; Fichtner, W.; Wollersheim, O.; Stella, K., *Influencing factors on specific energy consumption of EV in extensive operations,* EVS 2016 - 29th International Electric Vehicle Symposium

[12] Ambrose, H, Kendall, A., Lozano, M., Wachche, S., Fulton, L., Trends in life cycle greenhouse gas emissions of future light duty electric vehicles, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020

[13] Held, M., Schücking, M., Utilization effects on battery electric vehicle life-cycle assessment: A case-driven analysis of two commercial mobility applications, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019

[14] Marmiroli, B., Venditti, M., Dotelli, G., Spessa, E., The transport of goods in the urban environment: A comparative life cycle assessment of electric, compressed natural gas and diesel light-duty vehicles, Applied Energy, 2020

[15] Hernandez, M., Messagie, M., De Gennaro, M., Van Mierlo, J., Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods, Resources, Conservation and Recycling, 2017

[16] Tutuianu, M., Marotta, A., Steven, H., Ericsson, E., Haniu, T., Ichikawa, N., Ishii, H., Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC), UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG, 2013

[17] Marques, P., Garcia, R., Kulay, L., Freire, F., Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles addressing capacity fade, Journal of Cleaner Production, 2019

[18] Wang, J., Liu, P., Hicks-Garner, J., Sherman, E., Soukiazian, S., Verbrugge, M., Tataria, H., Musser, J., Finamore, P., Cycle-life model for graphite-LiFePO4 cells, Journal of Power Sources, 2011

[19] Yingzhi Cui, Chunyu Du, Geping Yin, Yunzhi Gao, Lingling Zhang, Ting Guan, Lijie Yang, Fuping Wang, Multi-stress factor model for cycle lifetime prediction of lithium ion batteries with shallow-depth discharge, Journal of Power Sources, 2015

[20] Brooker, A., Gonder, J., Wang, L., Wood, E. et al., "FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance," SAE Technical Paper 2015-01-0973, 2015, doi:10.4271/2015-01-0973.

[21] Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus powertrain for year 2005 and 2020 Jonas Hellgre, General Motors Powertrain, Sweden AB, A21-2 FTTCF, 461 80 Trollha¨ ttan, Sweden Available online 17 November 2005

[22] Chen et al., Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries, Joule (2019)

[23] Ricardo Faria, Pedro Moura, Joaquim Delgado, Anibal T. de Almeida, A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system, Energy Conversion and Management 61 (2012)