

Politecnico di Torino

Politecnico di Torino - DENERG Dipartimento di Energia "Galileo Ferraris"
Politecnico di Milano – CMIC Dipartimento di chimica, materiali e ingegneria
chimica "Giulio Natta"

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria meccanica

Impatto ambientale di un veicolo commerciale BEV usando la metodologia LCA



Relatori:

Prof. Ezio Spessa (POLITO)

Prof. Giovanni Dotelli (POLIMI)

Correlatori:

Ing. Antonella Accardo (POLITO)

Ing. Marco Luigi Musa (POLITO)

Candidato:
Marco Manzoni

Abstract

La tesi espone i risultati di una analisi ambientale su un veicolo commerciale leggero BEV. Sono stati analizzati due aspetti:

- 1) l'intero ciclo di vita di una batteria agli ioni di litio,
- 2) lo smaltimento del BEV e dei veicoli analoghi con powertrain diesel ed elettrico.

La prima fase ha riguardato la valutazione dell'impatto ambientale della batteria NMC111, impiegabile dal veicolo. I dati per la fase di estrazione dei materiali, di produzione e di smaltimento della batteria sono stati ottenuti dal database GREET e dal database Ecoinvent. I dati relativi all'impatto della fase di uso della batteria al variare della missione del veicolo sono stati ottenuti da una modellazione numerica su Matlab, impiegando i dati forniti dal produttore del veicolo commerciale. Durante la seconda fase del lavoro, è stata modellata la fase di smaltimento del veicolo, usando i dati di diversi database. Infine, i valori ottenuti nelle due fasi sono serviti per aggiornare una analisi dell'impatto ambientale del veicolo stesso al variare del powertrain, analisi effettuata negli anni precedenti che escludeva la fase di smaltimento e in cui il veicolo elettrico impiegava una batteria Ni-NaCl per la trazione.

Sommario

Abstract.....	3
Sommario	5
Introduzione	7
1. Digressione generale sulla metodologia LCA.....	10
1. Definizione di LCA	10
2. Normative e testi metodologici di riferimento	10
3. Struttura LCA.....	12
4. Definizione dello scopo e degli obiettivi.....	13
4.1. Obiettivo.....	13
4.1. Scopo.....	13
4.2. Prodotto di sistema	13
4.3. Condizioni di bordo	14
4.4. Unità funzionale	15
5. LCI	15
6. LCIA.....	16
6.1. Categorie e indicatori di impatto scelti.....	17
2. Aggiornamento del sistema di accumulo energetico del Daily elettrico	19
1. Sorgente di bordo di partenza	19
2. Evoluzione batterie per la trazione fino all'anno 2020.....	20
3. Caratteristiche e differenze prestazionali celle	24
4. Scelta della batteria	27
5. Distinta base della batteria e caratteristiche costruttive	29
3. Impatto ambientale della batteria NMC111	31
1. La fase di manufacturing della batteria	31
1.1. Grafite	31
1.2. PVDF	32
1.3. LiPF6	32
1.4. EC e DMC.....	33
1.5. NMP o 1-metil-2-pirrolidone.....	34
1.6. Alluminio e rame	34

1.7.	Produzione del catodo NMC111.....	34
1.8.	BMS.....	35
2.	La fase d'uso della batteria.....	36
2.1.	Modello cinematico iniziale della fase d'uso (modello v.0)	37
2.2.	Miglioramento del modello cinematico (modello v.1)	39
3.	Fine vita della batteria.	41
3.1.	Il processo di smaltimento della batteria	41
3.2.	Processo piro-idrometallurgico	42
3.3.	La Circular Footprint Formula.....	45
3.4.	Lista materiali a cui è stata applicata la CFF.....	49
3.5.	Scelta dei parametri della formula: A, B, Q _{sout} /Q _p	50
3.6.	Scelta dei parametri della formula: R1, R2, R3	52
3.7.	Semplificazione formula	53
3.8.	Valori di emissione specifica	53
4.	Risultati relativi alla batteria.....	54
4.1.	Risultati della fase d'uso.....	54
4.2.	Risultati fase di fabbricazione e fine vita	55
4.	Fase di fine vita del veicolo.....	59
1.	Il processo di smaltimento del veicolo.....	61
2.	Impatto ambientale dello smaltimento del veicolo.....	64
2.1.	Scelta dei parametri R1, R2, R3 della Circular Footprint Formula	65
2.2.	Scelta dei parametri A, B, Q _{sin} /Q _p , Q _{sout} /Q _p	66
2.3.	Risultati della fase di smaltimento	67
5.	Risultati sull'intero veicolo e conclusioni.....	70
6.	Ringraziamenti	73
7.	Bibliografia	74

Introduzione

Nel XIX secolo, la meccanizzazione della produzione industriale e agricola si presentò come una rivoluzione storica, portando con sé grossi benefici quali un aumento della produttività e un abbattimento dei costi di produzione. Apparirono numerosi prodotti che utilizziamo ancora o sono la base di quelli che impieghiamo oggi. Il principio fondante della ingegnerizzazione di questi prodotti, nato proprio con la rivoluzione industriale e durato fino agli anni '70, era la creazione di un prodotto riproducibile e funzionale senza tenere conto sia degli aspetti relativi alla fine del prodotto, e quindi a come quel prodotto debba essere utilizzato quando non più funzionale, e sia l'aspetto relativo all'impatto che quel prodotto avrebbe potuto avere sull'ambiente. La vita del prodotto inoltre veniva pensata come "lineare": il prodotto nasce dall'idea di una persona, viene progettato su carta, sulla base del progetto viene realizzato con le macchine utensili, viene venduto per essere usato e infine gettato via. Si hanno quindi tre fasi principali la progettazione, la produzione e l'uso. Chiaramente per prodotto si intende un oggetto che si ha in casa o che si usa tutti i giorni ma questo percorso viene seguito anche una da una infrastruttura, come una strada o una centrale elettrica, o un servizio.

A quei tempi, la comparsa di questi prodotti per via dell'industrializzazione ha incrementato il livello di benessere alle persone: grazie alle lampadine non era più necessario avere delle candele, grazie alle stufe alimentate con il carbone le case rimanevano calde, grazie alle centrali elettriche si poteva avere la luce in casa e grazie alle auto ci si poteva tranquillamente spostare da un punto all'altro. Diversi anni dopo l'industrializzazione si ritorse contro. Tra il 5 e il 9 dicembre 1952, una Londra industrializzata venne avvolta da una densa nebbia che causò circa 6000 morti e tantissimi ricoveri per via di problematiche respiratorie, quali bronchite e insufficienze. L'effetto dell'aria fortemente umida e stagnante, insieme al fumo generato dal riscaldamento domestico e dalle centrali elettriche alimentate con carbone di bassa qualità, generò una coltre di nebbia che bloccò la circolazione automobilistica e limitò notevolmente le attività commerciali. Alle famiglie fu raccomandato di tenere chiuse le finestre e lasciare i bambini a casa. Era necessario intervenire sia per ripristinare la visibilità stradale sia per garantire la salute agli adulti dei bambini e lo si fece con il "Clean Air Act", un atto del parlamento britannico che impose il passaggio a fonti energetiche più "sostenibili" come il gas naturale.

Inizia quindi ad apparire il concetto di "sostenibilità ambientale" e di "sviluppo sostenibile". L'elevata industrializzazione ha mostrato il suo punto debole: non è possibile ottenere uno sviluppo economico senza una salvaguardia ambientale e non è possibile avere una crescita economica senza che siano mantenute le funzionalità dell'ambiente. La WCED o Commissione Mondiale dell'Ambiente e dello Sviluppo, nel 1987, definisce come sviluppo sostenibile come "lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere l'abilità delle future generazioni di soddisfare i loro bisogni". In sito a questa definizione, vi è quindi l'obbligo morale ed etico di garantire la libertà al prossimo ma nel senso più ampio, più precisamente garantire la libertà nelle future generazioni di poter godere dei beni della Terra senza alcun condizionamento tantomeno limite dovuto alle precedenti generazioni. Viene definito l'idea di "limitazione", che non deve essere interpretato come un vincolo assoluto ma come equilibrio, che viene "imposta dallo stato della tecnologia e dalla organizzazione sociale sul uso delle risorse

ambientali per soddisfare i bisogni presenti e futuri” allo scopo di tutelare l’ambiente. Lo sviluppo economico deve essere quindi portato avanti in armonia tra ambiente, economia e società. Bisogna porre come fondamentale il soddisfacimento dei “bisogni” e in particolare “i bisogni dei poveri del mondo a cui devono essere data assoluta priorità”. Lo sviluppo sostenibile si fonda quindi sulla sostenibilità ambientale ma soprattutto sulla sostenibilità sociale. Le fasce più deboli sono quelle maggiormente più colpite da eventi drammatici: anziani, persone povere e con problematiche respiratorie pregresse furono le prime a perdere la vita nel 1952. Lo sviluppo economico quindi deve garantire il benessere delle persone, non danneggiarlo e sicuramente non incrementare iniquità sociali.

Lo sviluppo sostenibile è considerato oggi come l’unica strada percorribile di fronte ai fenomeni climatici dovuti all’aumento del fenomeno del riscaldamento globale. Ben 195 Paesi hanno raggiunto un primo accordo universale, un piano d’azione globale, inteso a riportarsi sulla buona strada per evitare pericolosi cambiamenti globali. Alla COP21 di Parigi, i governi presenti si sono posti come obiettivo il mantenere l’aumento della temperatura mondiale inferiore ai 2°C rispetto ai livelli preindustriali, obiettivo che potrà essere raggiunto parzialmente attraverso i piani nazionali di azione per il clima. L’intraprendente obiettivo è quello di ridurre le emissioni di CO2 almeno del 40% entro il 2030 rispetto al valore del 1990. Questo vorrà dire che tutti i settori industriali responsabili delle principali emissioni di CO2 saranno o sono già stati regolamentati, e tra questi anche il settore dei trasporti, responsabile del 30% delle emissioni totali di CO2 in Europa, di cui il 72% solo dal trasporto stradale.

Un progettista oggi non può essere più insensibile verso l’aspetto ambientale del prodotto che idealizza, e non può considerare l’attenzione verso l’ambiente come un orpello decorativo nella progettazione, ma anzi deve essere messo al primo posto. Riprendendo il discorso iniziale, l’ingegnerizzazione di un prodotto non può oggi tralasciare l’ambiente ambientale. Il progettista deve chiedersi: “quanto incide sull’ambiente la produzione della auto, del mio smartphone, della tv che ho progettato?”, “in che modo può danneggiare la salute delle persone e delle future generazioni?” e “cosa ne faccio della tv una volta che si guasta? La getto via?”, “Quanta CO2 emette il prodotto nella fase di produzione e come posso ridurla?”. In ottica ambientale nessun aspetto della vita del prodotto può essere lasciato al caso e quindi anche comprendere meglio qual è il destino dell’oggetto una volta esaurita la sua funzione principale è fondamentale.

L’ingegnere deve diventare consapevole dei problemi ambientali di ciò che progetta e deve cercare di ridurre al minimo i rischi e gli impatti. È in grado di farlo solo se conosce il mondo in cui vive e affronta i problemi di oggi e del futuro, prendendo decisioni che escono dall’ambito puramente tecnico e attivandosi nei processi economici per la formazione di un nuovo sviluppo sostenibile. Oggi la sostenibilità ambientale deve essere il principio guida da seguire in tutti i processi decisionali. La tematica ambientale ha spinto la Coca-Cola nel 1969 a farsi suo il sentimento di progettare in modo sostenibile, compiendo la prima analisi sulla vita dei contenitori impiegati per le loro bevande e prendendo decisioni allo scopo di risolvere il problema dell’inquinamento delle bottiglie di vetro Coca-Cola abbandonate. Il vetro quindi poteva essere smaltito, rifuso e impiegato per realizzare nuove bottiglie di vetro, oppure la bottiglia di vetro poteva essere pulita e impiegata dal produttore per essere

nuovamente un contenitore per bevande. Non si può più pensare a una vita lineare del prodotto come nel XIX secolo ma circolare, dove ogni fase è collegata alla precedente e alla prossima e gli input di una fase sono gli output della fase precedente. Questo è alla base del life cycle thinking (Figura 1).

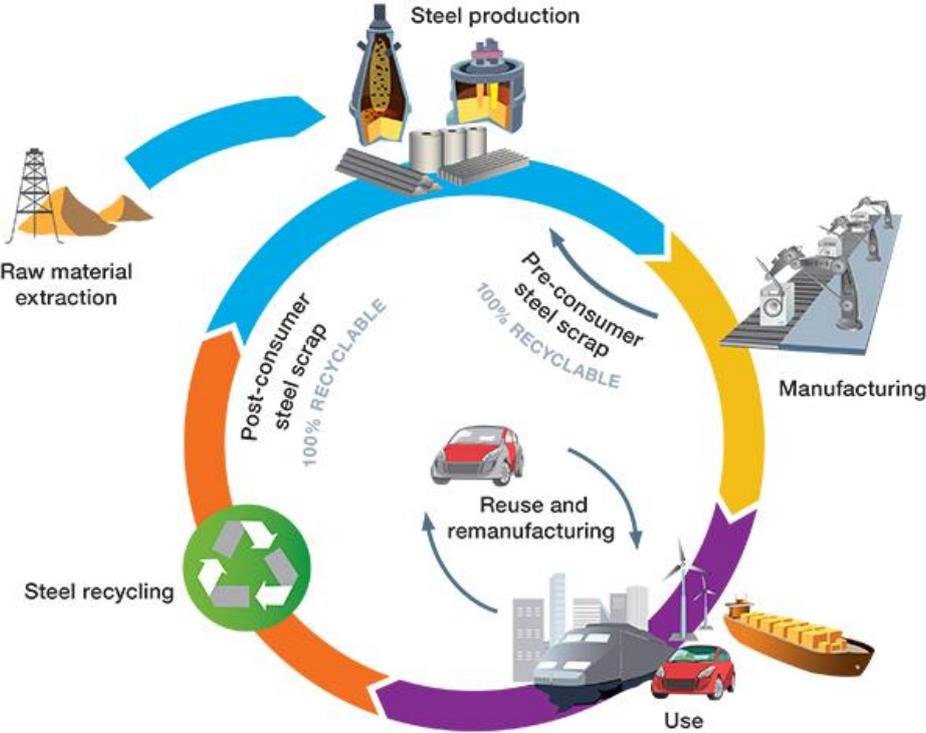


Figura 1. Esempio di life cycle thinking applicato all'acciaio.

1. Digressione generale sulla metodologia LCA

1. Definizione di LCA

La LCA o Life Cycle Assessment è uno strumento impiegato per valutare, sia in termini quantitativi sia in termini qualitativi, l'impatto ambientale di un prodotto di sistema. Si parla di "prodotto di sistema" invece che di solo "prodotto", perché l'analisi può essere condotta non solo su un oggetto fisico ma anche su un servizio. Per esempio, oggetto di analisi può essere il servizio di consegna dei pacchi postali oppure un oggetto, come una bottiglietta d'acqua.

Se si considera un oggetto fisico, la LCA può essere una analisi nel suo complesso considerando tutte le fasi: si passa dalla fase di ottenimento di tutto ciò che è necessario per realizzare l'oggetto, alla fase di utilizzo, fino alla fase dello in cui il prodotto viene smaltito. L'insieme di queste fasi prende il nome di ciclo di vita dell'oggetto. In modo analogo si può affermare per un servizio. Una analisi di questo tipo prende il nome di analisi "cradle-to-grave", ossia dalla culla alla tomba. La culla rappresenta il momento della nascita del prodotto, per esempio la miniera da cui sono estratti i materiali, e invece la tomba il momento in cui la funzionalità di quel prodotto si è esaurita e quindi corrisponde al suo destino ultimo, per esempio la discarica, un secondo utilizzo o il riciclaggio.

Alcune analisi si soffermano soltanto a una parte del ciclo di vita. Ci si può concentrare solo sulla parte di fabbricazione del prodotto, dal momento in cui il materiale grezzo viene estratto, entra nello stabilimento da cui esce sottoforma di prodotto finito. In questo caso si parla di analisi "cradle-to-gate", dove gate è riferito all'uscita dello stabilimento.

In ottica di economia circolare, si può pensare di condurre una analisi completa che comprenda anche la fase in cui il prodotto smaltito torni a diventare materiale grezzo impiegabile per un nuovo prodotto, anche diverso da quello precedente. In questo caso si parla di analisi "cradle-to-cradle" o "ecobalance".

L'approccio modulare e algebrico è una caratteristica peculiare della LCA. È possibile pertanto ripercorrere la storia dell'oggetto nell'analisi, valutare l'impatto per ogni singola fase e ricavare l'impatto globale semplicemente sommando i singoli valori.

2. Normative e testi metodologici di riferimento

La maggior parte degli studi sulla LCA seguono le indicazioni contenute nelle normative ISO della famiglia "14000", di cui le due principali sono le 14040:2006 e 14044:2006. La prima versione degli standard ISO risale al 1997 mentre l'ultima versione aggiornata è al 2018. Nella Figura 2 è indicata la storia delle normative ISO in ambito LCA.

14041	1998.10.01	Environmental Management - Life Cycle Assessment - Goal and Scope Definition and Inventory Analysis - First Edition (<i>withdrawn</i>)
14041	1999.12.31	UNI EN ISO (<i>withdrawn</i>)
14042	2000.03.01	Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Impact Assessment - First Edition (<i>withdrawn</i>)
14043	2000.03.01	Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Interpretation - First Edition (<i>withdrawn</i>)
14042	2001.09.30	UNI EN ISO (<i>withdrawn</i>)
14043	2001.10.31	UNI EN ISO (<i>withdrawn</i>)

14047	2003.10.01	Environmental management Life cycle impact assessment Examples of application of ISO 14042 - First Edition (<i>withdrawn</i>)
14044	2006.07.01	Environmental management Life cycle assessment Requirements and guidelines - First Edition
14044	2006.10.26	UNI EN ISO
14047	2012.06.01	Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations - Second Edition

Figura 2: Storia delle normative ISO LCA

La ISO 14040:2006 descrive in termini generici i principi, le fasi e i punti chiave della LCA. La ISO 14044:2006 pone in evidenza quali siano i requisiti richiesti per condurre una analisi di questo tipo.

Un ulteriore testo metodologico utile per portare avanti una analisi sul ciclo di vita è la ILCD che contiene indicazioni sulle categorie di impatto. Le linee guida della PEF sono state considerate per la valutazione dell'impatto della batteria e dell'intero veicolo.

3. Struttura LCA

La LCA prevede quattro fasi:

- la fase di definizione dello scopo e dell'obiettivo;
- la fase di inventario o life cycle inventory LCI;
- la fase di valutazione degli impatti o life cycle assesment LCIA;
- la fase di interpretazione o life cycle interpretation.

Le 4 fasi della LCA sono collegate fra di loro, l'una è legata all'altra come indicato nella Figura 3. Al termine ho dei risultati non fine a sé stessi ma utili per il miglioramento del prodotto dal punto di vista ambientale. I risultati posso suggerirmi di cambiare le caratteristiche del prodotto e quindi cambia la fase di definizione, oppure il miglioramento può coinvolgere le parti di inventario o la valutazione degli impatti.

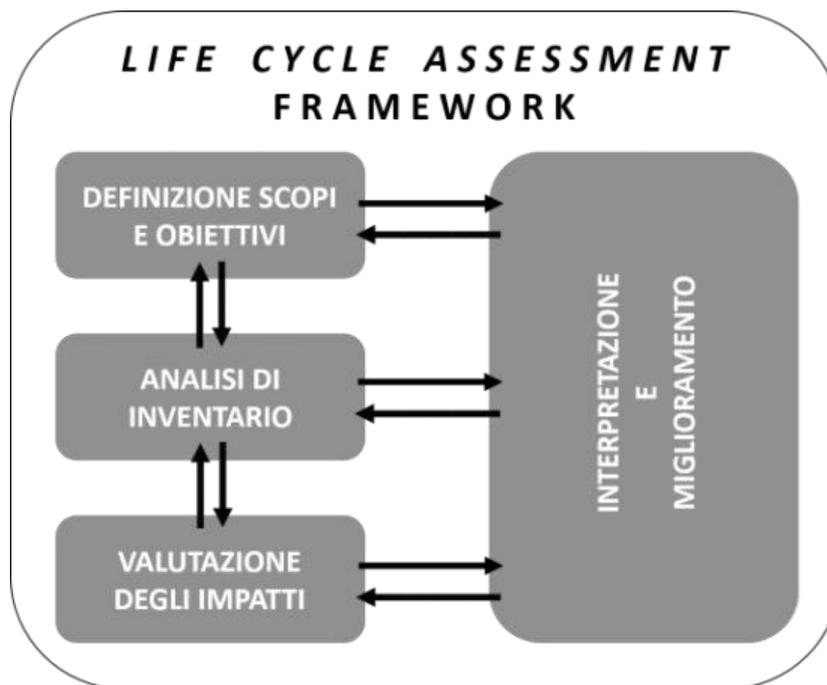


Figura 3: Fasi dell'analisi LCA

Definire lo scopo e l'obiettivo significa indicare le ragioni per le quali si sta conducendo lo studio e tutti i parametri di progetto dello studio. Nella fase di inventory, si collezionano tutti i dati necessari per l'analisi e attraverso i quali si esegue la valutazione dell'impatto. I risultati finali sono oggetto di discussione nella fase di interpretazione e indicano quali strade percorrere per ridurre l'impatto ambientale.

4. Definizione dello scopo e degli obiettivi

4.1. OBIETTIVO

Quando si vuole realizzare una LCA è necessario indicare in modo chiaro l'obiettivo che si vuole raggiungere con l'analisi. L'obiettivo può differire notevolmente e può essere, per esempio, lo sviluppo di una metodologia di analisi, l'ottimizzazione di un prodotto da un punto di vista ambientale, fornire una indicazione ai policy maker su quali strategie adottare nel futuro oppure anche finalità di marketing. In quest'ultimo caso un chiaro esempio è la pubblicità televisiva di AUDI del 2019, in cui l'azienda si impegna a ridurre le emissioni di GHG del 25% rispetto al valore del 2014 lungo l'intero ciclo di vita nei prossimi anni.

In poche righe bisogna indicare:

- la ragione per la quale si sta conducendo lo studio,
- l'applicazione dello studio,
- a chi è rivolto lo studio,
- se i risultati si pensa che possano essere usati in una asserzione comparativa.

In questa trattazione, l'obiettivo era ricavare una metodologia applicabile a un veicolo commerciale. Lo studio è rivolto verso il mondo della ricerca e verso il mondo dei produttori dei veicoli commerciali e verranno usati in una asserzione comparativa.

4.1. SCOPO

Nello scopo bisogna spiegare cosa si intende fare nell'analisi LCA. Bisogna in altre parole definire:

- a) Il prodotto di sistema e la sua funzione,
- b) Unità funzionale,
- c) Condizioni al contorno,
- d) Assunzioni,
- e) Allocazione,
- f) Qualità dei dati.

4.2. PRODOTTO DI SISTEMA

Per portare avanti una analisi del ciclo di vita è necessario avere una descrizione più chiara e più precisa possibile del prodotto da analizzare. Un modo per descrivere un oggetto o un servizio è con un diagramma di flusso del sistema in cui i riquadri prendono il nome di unità legate fra di loro da relazioni.

L'intero modello, spesso molto complesso, ricorda un albero ed è quindi spesso chiamato albero del prodotto. Poiché si punta a una definizione di sistema essenzialmente lineare, si parte da un riquadro da cui si diramano più rami.

In questa trattazione sono il prodotto di sistema considerato è:

- Un veicolo commerciale leggero che potrebbe adottare una batteria agli ioni di litio.

4.3. CONDIZIONI DI BORDO

Le condizioni di bordo definiscono quali sono i processi e i flussi da considerare nell'analisi. Generalmente un diagramma con l'indicazione dei flussi di energia o di massa può aiutare a definire quali sono i processi considerati e quali sono invece esclusi.

Per il veicolo sono state considerate le condizioni di bordo, indicate nella Figura 4. Le fasi riquadrate in rosa indica che il modello è stato realizzato da zero, le fasi indicate con una trama rosa-verde indica che il modello era presente e proveniva da [1] ma ha subito delle variazioni.

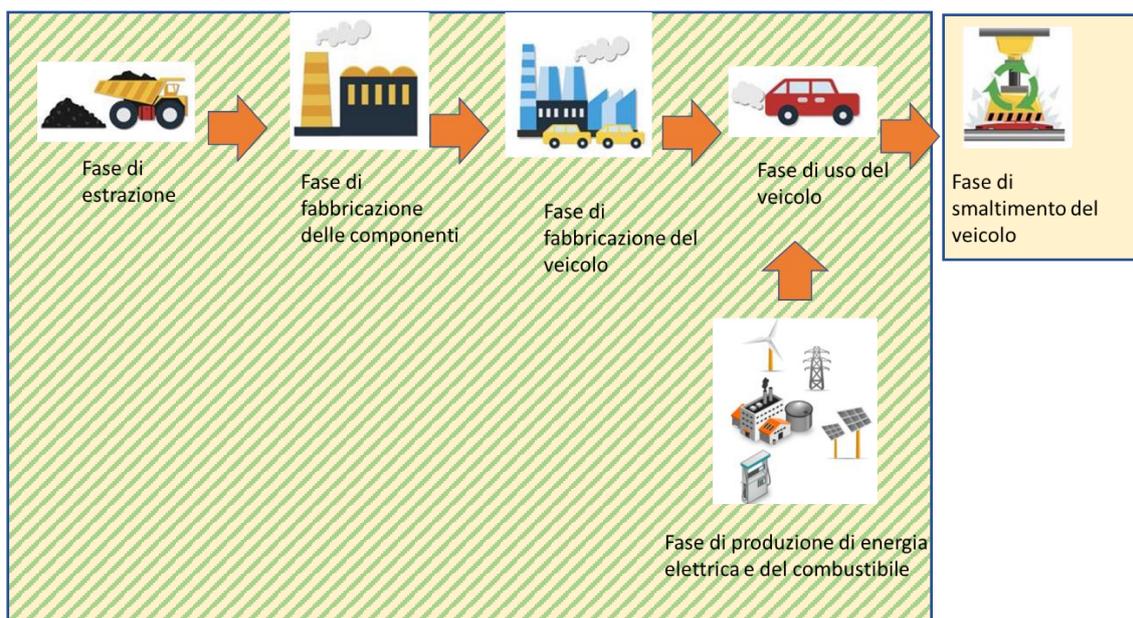


Figura 4. Condizioni di bordo

Nell'analisi sono considerati sia i flussi elementari, ossia flussi di materiali che non subiscono alcun intervento dall'uomo, sia i flussi di prodotto, ossia i flussi di materiali che hanno subito una trasformazione da parte dell'uomo.

Nei prossimi capitoli sono presenti ulteriori diagrammi utili per chiarire quali sono le condizioni di bordo considerate.

Nell'analisi l'impatto della costruzione delle infrastrutture è escluso.

4.4. UNITÀ FUNZIONALE

Un prodotto di sistema è definito da una serie di processi che provvedono a una certa funzione. La funzione del prodotto deve rispondere alla domanda “cosa fa l’oggetto?” e alla domanda “qual è il suo compito?”. L’unità funzionale deve chiaramente essere una misura qualitativa e quantitativa della funzione dell’oggetto studiato.

Il veicolo commerciale ha la funzione di trasportare del materiale e quindi l’unità funzionale adottata è il **km**. Si suppone che non assolva a nessuna altra funzione oltre a quella specificata.

5. LCI

La fase di inventory è costituita da:

- Preparazione per la collezione dei dati,
- Collezione dei dati,
- Validazione dei dati,
- Allocazione dei dati,
- Relazionare i dati all’unità di processo e all’unità funzionale,
- Aggregazione dei dati.

Sono di seguito riportati la provenienza dei dati relativi al veicolo e alla batteria che monta.

	BATTERIA	VEICOLO (escluso batteria)
Fase di estrazione	Da letteratura (GREET)	Da [1]
Fase di fabbricazione	Da letteratura (GREET) + Dal produttore	Da [1]
Fase d’uso	Da letteratura (GREET) + Dal produttore	Da [1]
Fase di generazione del combustibile e della corrente elettrica	X	Da [1] più modifiche legate all’uso di una batteria al litio
Fase di smaltimento	Da letteratura (GREET)	Da letteratura

Figura 5. Fonti dei dati

Non sono presenti problemi di multifunzionalità. Si può affermare con certezza che i dati forniti sono consistenti e in genere di buona qualità, sebbene non siano stati calcolati i data quality indicator.

Bisogna tenere conto soltanto che i dati di [1] sono riferiti al 2016; il veicolo al 2020 potrebbe aver subito delle leggere variazioni sulla distinta materiali. È stata usata una allocazione di massa, ossia sono stati attribuiti gli oneri ambientali relativi al materiale in peso in ingresso o all'unità di processo. Per la definizione dell'inventario è stato usato Ecoinvent, il database GREET e il database EF.

Ecoinvent è la banca dati che viene più utilizzata nelle analisi LCA, essendo uno tra i più consistenti e trasparenti database presenti. È stato sviluppato da un consorzio non profit di istituti di ricerca svizzeri.

GREET (Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation) è una banca dati contenenti le emissioni di alcune particelle e non permette il calcolo completo di una LCA. È un database trasparente e gratuito e mette a disposizione le distinte di materiale di prodotti particolari, come le batterie. È stato sviluppato per il mondo automotive dall'istituto Argonne National Laboratory, istituto di ricerca gestito dal dipartimento dell'energia statunitense.

Il database EF (European Footprint) è un database sviluppato dalla Comunità Europea per il calcolo dell'impronta ambientale di un prodotto ed è impiegato per la valutazione dell'impatto ambientale, seguendo le disposizioni contenute nella PEFCR dei prodotti (Product Environmental Footprint Category Rule).

6. LCIA

La impact assesment è strutturata secondo la ISO14044 e la ISO 14040 in due parti.

MANDATORY ELEMENT

- Selezione delle categorie di impatto e degli indicatori di categoria,
- Assegnazione e calcolo della LCIA (Caratterizzazione): prevede la conversione del calcolo della LCI attraverso l'uso di fattori di caratterizzazione (contenuti in un metodo) e l'aggregazione nella stessa categoria di impatto, usando la stessa unità di misura.

OPTIONAL ELEMENT

- Normalizzazione: prevede il calcolo della magnitudo per ogni categoria di impatto, dividendo il risultato per un valore comune,
- Raggruppamento: le categorie di impatto sono raggruppate in set predefiniti nell'obiettivo e nello scopo,
- Aggiunta di pesi: è il processo di conversione dei risultati degli indicatori che prevede l'uso di un peso.

Nell'analisi qui esposta, ci si è fermati alla fase di normalizzazione. Le categorie di impatto sono i problemi ambientali ai quali deve essere associata la LCI e gli indicatori di categoria rappresentano un valore quantitativo delle categorie di impatto.

6.1. CATEGORIE E INDICATORI DI IMPATTO SCELTI

Le categorie di impatto possono essere, a seconda del livello considerato:

1. Midpoint, se riguardano un problema ambientale particolare (per esempio riscaldamento globale),
 - Endpoint, se riguardano un'area coinvolta da un problema ambientale (per esempio la salute umana, l'ambiente naturale o le risorse naturali).

In questa trattazione sono state considerate le categorie di impatto midpoint e sono indicate nella seguente tabella.

Categoria	Metodo		
	Ecoinvent	REET	EF
Global warming	IPCC 2013 100a	REET	IPCC 100a
Acidification	CML2001		Accumulated exceedance
Eutrofication	CML2001		Accumulated exceedance
Photochemical oxidation	CML2001		LOTOS-EUROS
Abiotic depletion	CML2001		CML

Tabella 1. Categorie di impatto e metodi utilizzati.

IPCC è il metodo che viene usato per la valutazione dell'effetto del global warming ed è stato sviluppato in un tavolo intergovernativo delle Nazioni Unite con lo scopo di creare un metodo rilevante dal punto di vista scientifico per la valutazione del riscaldamento globale. Permette il calcolo solo per il global warming

La metodologia CML è la più completa e utilizza dati generalmente Europei. È stata sviluppata da un istituto di ricerca in Leiden, Olanda. Ha diverse categorie di impatto midpoint.

Sono qui descritte le diverse categorie di impatto.

Categoria di impatto e indicatore		Descrizione
Global warming	gCO ₂ eq	Aumento della temperatura media del Globo terrestre dovuto all'effetto serra di alcuni composti. Causa fenomeni di desertificazione e scioglimento dei ghiacciai
Acidification	gSO ₂	Aumento del pH del suolo, delle falde acquifere, nei laghi dovuto a sostanze acide rilasciate nel suolo
Eutrofication	gPO ₄ ³⁻	Eccessivo arricchimento di sostanze nutritive in ambiente acquatico che determina lo sviluppo eccessivo delle alghe
Photochemical oxidation	kgNMVOC	Generazione dell'ozono e di altre sostanze a livello del terreno per via dell'interazioni delle sostanze chimiche dovute alla combustione con la luce solare. Causa problemi respiratori
Abiotic depletion	kg	Consumo di risorse non-biologiche della natura, come combustibile, minerali, acqua, metalli. Può essere suddiviso in ulteriori categorie come consumo d'acqua, minerali, ecc.

Tabella 2. Descrizione delle categorie di impatto.

2. Aggiornamento del sistema di accumulo energetico del Daily elettrico

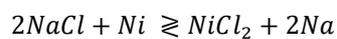
Il sistema di stoccaggio del veicolo in [1] prevede due batterie FIAMM SONICK ZEBRA e il Supercapacitore accompagnati dai relativi BMS. La batteria verrà sostituita da una delle tipologie di batterie disponibile nel mercato oggi (anno 2020). La sostituzione della batteria comporta una variazione degli impatti nel ciclo di vita del veicolo.

1. Sorgente di bordo di partenza

Il sistema di accumulo di energia è costituito da una batteria ZEBRA che si occupa di fornire la componente media della potenza e un supercondensatore che si occupa della dinamica veloce della potenza e di gestire i picchi di potenza in ingresso, dovuti alla frenata rigenerativa, e in uscita, dovuto ai picchi di richiesta di coppia della macchina elettrica.

La batteria ZEBRA è una batteria Ni-NaCl₂ e si basa sulla reazione chimica che trasforma il cloruro di nichel in cloruro di sodio. Questa è costituita da 288 celle disposte in due serie da 144 e poste fra di loro in parallelo.

Ogni singola cella è costituita da un elettrodo negativo formato da Sodio e un elettrodo positivo formato da cloruro di nichel. Durante il processo di scarica, il sodio reagisce con il cloruro di nichel per formare cloruro di sodio e nichel secondo l'equazione chimica successiva.



Equazione 1: Equazione di cella della batteria ZEBRA.

Le caratteristiche energetiche principali della batteria Zebra nell'oggetto di studio sono indicate nella Tabella 3.

Parametro	Valore numerico	
Capacità	Ah	76
Energia nominale	kWh	28,2
OCV 0-15%	V	371
Numero di celle	-	288
Densità energetica con la BMS	Wh/kg	118

Tabella 3. Caratteristiche energetiche batteria ZEBRA.

Il supercapacitore ha una struttura intermedia tra un accumulatore elettrochimico, come la batteria Zebra, e un condensatore. È caratterizzato da due armature tra le quali è posto un elettrolita (le due armature funzionano da elettrodi del sistema) e coniuga le due tipologie di accumulo dell'energia: di carattere elettrochimico della batteria e di carattere elettrostatico del condensatore. Nel veicolo commerciale, è deputato al compito di stoccare l'energia della frenata rigenerativa, che in caso di frenata

“violenta” può essere di una quantità molto importante, e di rilasciarla in caso di picchi di potenza richiesti, garantendo una migliore dinamica del sistema.

2. Evoluzione batterie per la trazione fino all'anno 2020

Negli ultimi anni, la ricerca di batterie con una densità energetica migliore ha indirizzato l'attenzione verso batterie che sfruttano la tecnologia agli ioni di litio, da questo momento chiamate Batterie Li-Ion, più prestazionali rispetto alle batterie ZEBRA (vedi Figura 6).

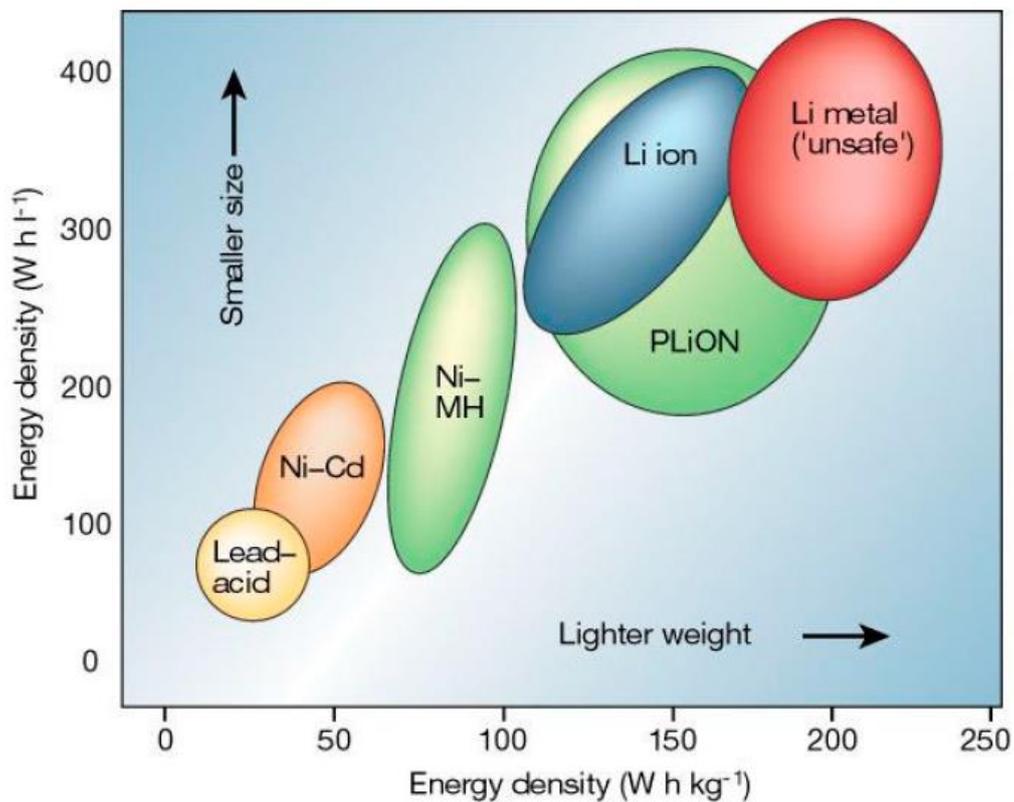


Figura 6. Plot tipologie di batterie in base alla densità energetica [2].

Le Li-Ion hanno subito un miglioramento tecnologico negli ultimi anni per via dell'introduzione di nuovi materiali. Secondo [3], al 1995 la produzione delle batterie Li-Ion era dedicata per la maggior parte alla realizzazione delle batterie LCO (batteria Litio-Cobalto-Ossigeno con catodo in LiCoO_2) mentre solo una parte della produzione era destinata alle batterie LMO (batteria Litio-Manganese-Ossigeno con catodo in LiMn_2O_4). Negli anni a venire (2010) la quota di mercato delle batterie LCO è stata erosa da nuove tipologie di batterie, portando la quota di mercato al solo 40%, a causa dell'introduzione di nuove tipologie di batterie, come le batterie NMC (batterie Nichel-Manganese-Cobalto con catodo: $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$), per alcune applicazioni particolari le batterie NCA (batterie Nichel-Cobalto-Alluminio con catodo: $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$) e le batterie con i fosfati a struttura olivina LFP (batterie Litio-Ferro-Fosfato con catodo: LiFePO_4). La produzione mondiale di materiale per batterie tra il 1995 e il

2010 mostra un notevole incremento dovuto specialmente allo sviluppo di applicazioni delle batterie in larga scala come indicato nella Figura 7.

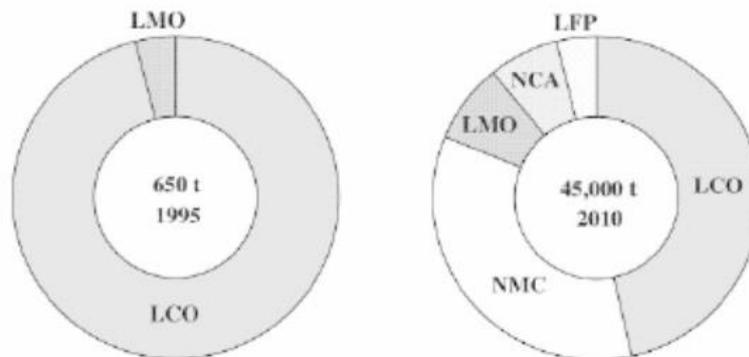


Figura 7. Evoluzione produzione materiali per i catodi di batterie Li-Ion tra il 1995 e il 2010 [3].

Gli altri componenti della batteria Li-Ion (anodo, elettrolita e separatore) hanno subito nel tempo variazioni tecnologiche minori.

La grafite rappresenta il materiale preferenziale per l'anodo, le cui caratteristiche chimiche sono state migliorate nel tempo per garantire un minor costo e una maggiore capacità della batteria. Non può essere impiegato la grafite al suo stato naturale per l'elevata reattività con l'elettrolita. Pertanto, viene generalmente rivestita con un sottile strato di carbonio mesofase. Una possibile alternativa è l'adozione del carbonio duro. Ulteriori materiali come ossidi metallici (es. Co_3O_4 , CoO , CuO , e leghe in litio e titanio) sono in fase di studio [3] [4].

L'elettrolita è in genere una soluzione di sali in solventi organici. Come solvente organico si usano generalmente degli esteri carbonati ciclici ed esteri carbonati lineari mentre come sale si usa un sale in base di fosforo, come il LiPF_6 . Altre sostanze impiegate in passato come elettrolita sono al momento passate in secondo piano. Gli studi sull'elettrolita sono fortemente focalizzati su tre aree: additivi alla soluzione elettrolitica, soluzioni elettrolitiche non infiammabili e nuovi sali [3]. Una possibile alternativa agli elettroliti liquidi deriva dall'uso di elettroliti polimerici come gli elettroliti in composito basati sul polioossietilene ed elettroliti ceramici come il LiSICONs (Lithium Super Ion Conductors), al momento in ambito di studio [4].

Il separatore per le batterie Li-Ion è in genere una membrana microporosa con polifine ed è posizionato tra anodo e catodo per separarli e permettere il passaggio degli ioni di litio. Esistono diverse tipologie di separatore in base a come vengono prodotti. Il separatore può essere realizzato estrudendo un polimero sotto forma di film secondo un processo che non fa uso di solventi (il processo è chiamato dry-process One-component system) e senza l'uso di ulteriori lavorazioni. Un plasticizzante può essere miscelato insieme al polimero e poi rimosso attraverso un solvente nel processo Wet-process Two-component oppure tale processo può essere modificato, inserendo in aggiunta ai due un riempitivo inorganico (processo Wet-process Three-component). In ambito di ricerca si stanno sviluppando nuovi separatori

commerciali con un maggiore resistenza al calore, realizzati con gomme al silicone al fluoro oppure con resine poliesteri o ancora resine ad alta resistenza al calore contenenti polialchileni [3].

Le batterie agli ioni di litio sono ora impiegate nel mondo automotive come serbatoio di energia per la trazione. Essendo l'uso di batterie per la trazione di automobili private più consolidato rispetto al mondo dei veicoli commerciali, diventa interessante valutare quali sono le tecnologie impiegate dai costruttori per modelli di BEV a uso privato. Come si osserva nella Tabella 4, la maggior parte delle batterie per le automobili private elettriche utilizza come tecnologia la NMC.

Manufacturer	Model	Battery size (kWh)	Battery Chemistry	Battery Supplier	Vehicle range (mi)	Vehicle range (km)
Tesla	S	60-100	C/NCA	Panasonic/Tesla	208-315	334-508
Tesla	X	60-100	C/NCA	Panasonic/Tesla	208-315	334-508
BMW	i3	22,33	C/NMC	Samsung/Bosch	80,114	129,183
Nissan	Leaf	24,30	C/LMO (C/NMC)	AESC and LG Chem [†]	84,107	135,172
Volkswagen	e-Golf	24,35.8	C/NMC	Panasonic (Sanyo Div.)	83,124	135,200
Chevrolet	Spark	19	C/LFP	A123	82	132
Fiat	500e	24	C/NMC	Samsung/Bosch	87	140
Kia	Soul EV	27	C/NMC	SK Innovation	90	145
Smart	Fortwo EV	17.6	C/NMC	LG Chem	68	109
Ford	Focus EV	35.5	C/NMC	LG Chem	100	160
Mercedes	B-Class Electric	28	C/NCA, (C/NMC)	Panasonic/Tesla and SK Innovation [†]	85	137
Mitsubishi	I	16	LTO/LMO	Toshiba	62	100
Honda [*]	Fit EV	20	LTO/LMO	Toshiba	82	132
Toyota [*]	RAV4 EV	41.8	C/NCA?	Panasonic/Tesla	113	182

^{*}Discontinued Models. [†]In process of changing suppliers. Note: NCA = $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}$; NMC = $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y$; LMO = LiMn_2O_4 ; C = graphite; LTO = $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.

Tabella 4. Elenco di veicoli elettrici vendute o presentati negli USA al 2016 [5].

In ambito dei veicoli commerciali, molti produttori hanno annunciato modelli di veicoli elettrici usando le batterie agli ioni di litio come batterie di trazione, come si osserva nella Tabella 5.

Modello	GWW [t]	Produzione	Capacità [kWh]	Tipo
Daimler eCanter	7.5	In produzione	83	Li-Ion
MAN eTGM	26	Customers test	225/149	Li-Ion
Volvo FL Electric/FE Electric	16/27	Customers test	300	Li-Ion
Renault Z.E	3.1/16/27	Customers test	33/300/200	Li-Ion
DAF LF Electric	19	Customers test	222	Li-Ion
Scania R450	40	Customers test	Pantografo	--
Tesla Semi	36	Annunciato	--	--
Nikola	40	Prototipo	500-1000	--

Tabella 5. Principali modelli e prototipi di veicoli commerciali elettrici al 2019 [6].

Secondo la ricerca [7], le batterie impiegate oggi nei veicoli elettrici sfruttano solo la tecnologia agli ioni di litio e non sarà dato uno spazio ad altre tipologie di batterie diverse fino al 2025, con lo sviluppo di batterie agli ioni di sodio, come si osserva nella Figura 8.

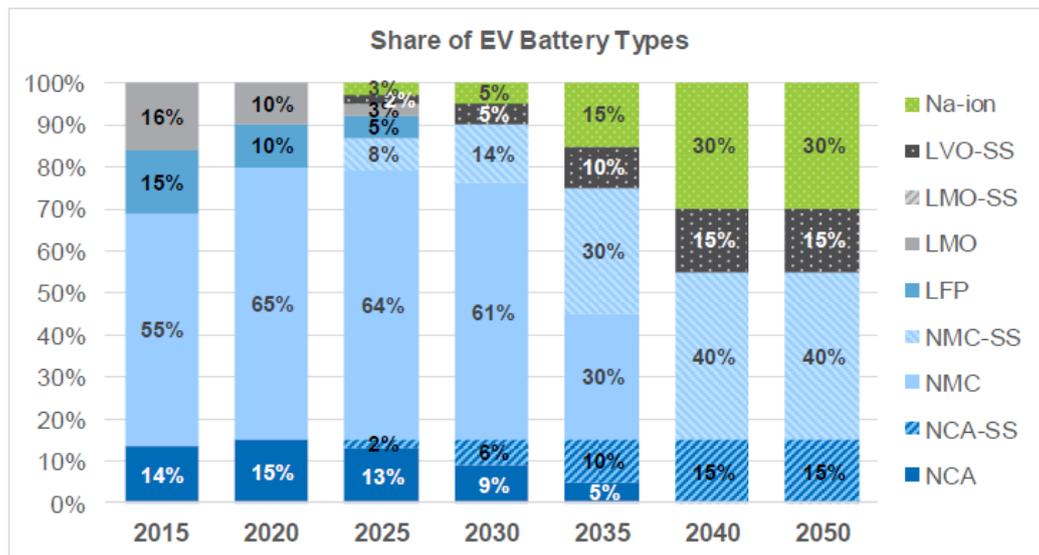
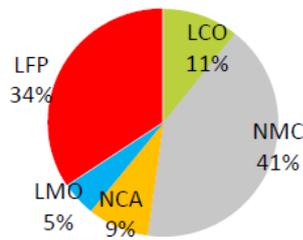


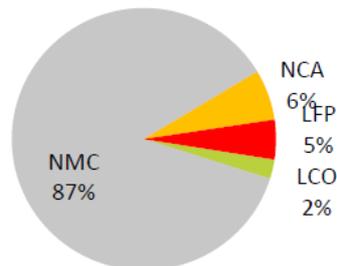
Figura 8. Previsione mercato batterie negli anni [7].

Inoltre, si conferma la tendenza degli anni pre-2020 con la scomparsa delle batterie LCO a favore delle batterie NMC che assume grosse quote di mercato (65%), mentre le batterie LMO, LFP e NCA occupano uno spazio secondario (rispettivamente 10%, 10% e 15%).

Cathode active materials in 2018 350 000 Tons



Cathode active materials in 2030 1 670 000 Tons



*Assumption: Tesla keep NCA chemistry and have a relative success
(+600 000 EV sold per year in 2030 – TESLA forecast 500 000 in 2025)*

Figura 9. Previsione di mercato dei materiali per i catodi delle batterie agli ioni di litio.

Una ulteriore analisi di mercato, indicata nella Figura 9, dimostra come le batterie NMC rappresentino la naturale evoluzione delle batterie agli ioni di litio, occupando la maggior quota di mercato. I risultati includono i materiali per le batterie agli ioni di litio impiegate per tutte le applicazioni. [8]

3. Caratteristiche e differenze prestazionali celle

Nelle celle delle batterie Li-Ion il processo di carica avviene con un flusso di ioni litio che dal catodo si muovono verso l'anodo attraverso l'elettrolita. L'evento di scarica della batteria è rappresentato dal processo opposto con gli ioni che si trasferiscono dall'anodo verso il catodo attraverso il catodo. La tensione che si genera ai capi dei poli della cella generalmente risulta essere compresa tra 3.2 e 3.8 V, maggiore rispetto ad altre batterie [9]. In questo modo è possibile collegare un numero inferiore di celle per avere la tensione desiderata. Per avere un pacco batterie con tensione nominale 350V bastano ora soltanto 98 celle (350 V/3.6 V), un numero inferiore rispetto alle batterie Ni-MH che richiedono invece 292 celle, di cui ognuna a tensione 1.2 V.

Le perdite di capacità della batteria possono essere di due tipi, reversibili e permanenti. La perdita di capacità reversibile corrisponde a una perdita di energia della batteria che può essere recuperata se ricaricata mentre la perdita di capacità permanente rappresenta l'energia della batteria che viene persa ma che non può essere recuperata neppure attraverso una ricarica. Le batterie agli ioni di litio presentano un basso grado di scarica spontanea e di cui una percentuale diventa permanente.

La Tabella 6 riassume le principali caratteristiche delle batterie agli ioni di litio impiegate al 2020. Le batterie LCO presentano caratteristiche intermedie in termini di energia specifica e densità di energia. Le batterie NCA presentano ottime caratteristiche ma sono accompagnate da costi superiori rispetto alle altre tipologie di batterie. Le batterie NMC sono contraddistinte da potenze specifiche eccezionali e garantiscono una elevata accelerazione al veicolo nel quale sono montate; essendo sufficientemente economiche rappresentano un'ottima soluzione per essere impiegate nei BEV.

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Cathode chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	80-130	105-120	70	120-150	80-220	140-180
Energy density (Wh/L)	220-250	250-265	130	250-450	210-600	325
Specific power (W/kg)	1400-2400	1000	750	600	1500-1900	500-3000
Power density (W/L)	4500	2000	1400	1200-3000	4000-5000	6500
Volts (per cell) (V)	3.2-3.3	3.8	2.2-2.3	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7
Cycle life	1000-2000	>500	>4000	>700	>1000	1000-4000
Self-discharge (% per month)	<1%	5%	2-10%	1-5%	2-10%	1%
Cost (per kWh)	\$400-\$1200	\$400-\$900	\$600-\$2000	\$250-\$450	\$600-\$1000	\$500-\$900
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-20 to +60	-40 to +55	-20 to +60	-20 to +60	-20 to +55

Tabella 6. Caratteristiche principali delle batterie agli ioni di litio [9].

Le tipologie di batterie agli ioni di litio possono essere confrontate graficamente sulla base l'energia specifica, potenza specifica, sicurezza, prestazioni, longevità e fattibilità in termini di costi. [10] Nella Figura 10 si osserva come le batterie NMC rappresentano un ottimo compromesso fra costo, sicurezza e vita della batteria. Le batterie LCO (LiCoO₂) presentano caratteristiche peggiori in termini di durata, sicurezza e potenza specifica. Le batterie LFP pur avendo ottime prestazioni peccano in energia specifica e quindi non garantiscono elevate autonomie al veicolo.

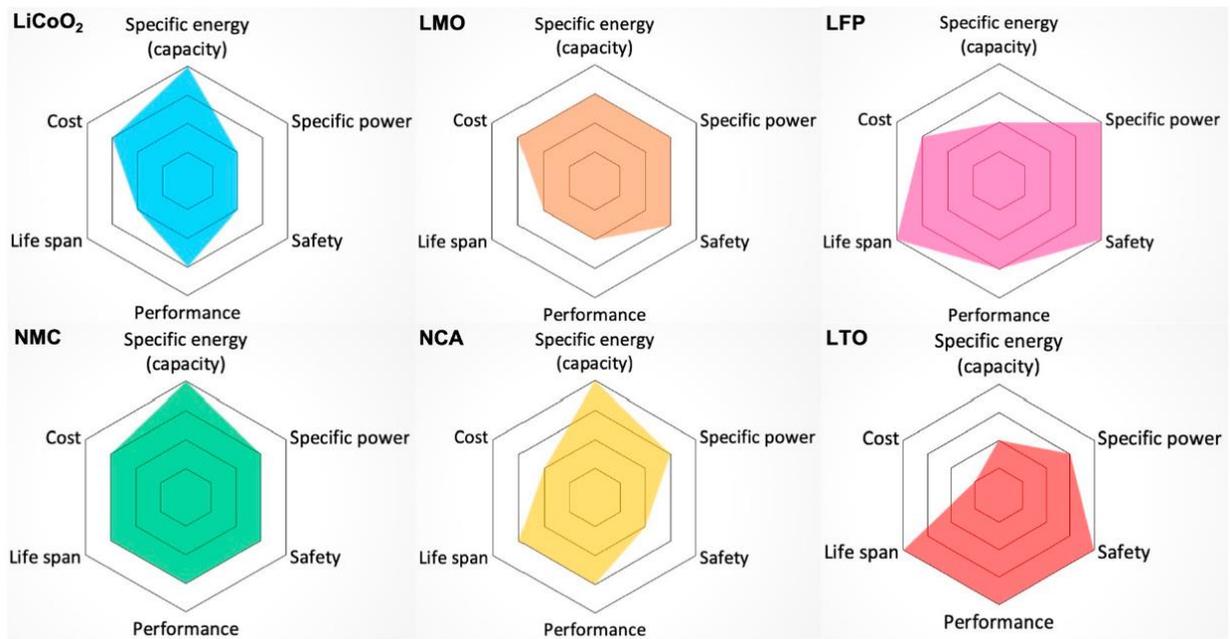


Figura 10. Rappresentazione grafica caratteristiche batterie in base al tipo.

Dunque le varie tipologie di batterie presentano dei vantaggi e degli svantaggi che possono essere riassunte nella Tabella 7.

Cathode Material	Midpoint voltage vs. Li (C/20)	Specific Capacity (Ah/kg)	Advantages	Disadvantages	Applications
LCO	3.9	155	In common use, good cycle life, good energy	Moderate charged state thermal stability,	Mainly smaller portable electronics (3C)
LMO	4.0	100-120	Very good thermal stability, inexpensive, very good power capability	Moderate cycle life, lower energy	Higher power applications such as power tools and electric motive power
NCA	3.7	180	Very good energy, good power capability, good cycle life	Moderate charged state thermal stability, sensitive to moisture even in discharged state	Excellent for motive power and premium electronic applications
NMC	3.8	160	Very good combination of properties (energy, power, cycle life and thermal stability)	Patent issues	Both portable and high power applications including power tools and electric vehicles
LFP	3.4	160	Very good thermal stability and cycle life, good power capability	Lower energy, special preparation conditions	Mainly used in high power such as power tools and energy storage applications, patent issues

Tabella 7. Vantaggi, svantaggi e possibili applicazioni delle batterie agli ioni di litio.

4. Scelta della batteria

È possibile la sostituzione della batteria Zebra con una delle 4 batterie:

1. NMC con catodo in ossido di nichel-manganese-cobalto e litio;
2. NCA con catodo in ossido di nichel-cobalto-alluminio e litio;
3. LFP con catodo in ossido di ferro-fosfato-cobalto e litio;
4. LMO con catodo in ossido di manganese e litio.

In questa tesi si è discussa la sostituzione della batteria Zebra con la batteria NMC, anche per via delle scelte del costruttore. Ulteriori tipologie di batterie potrebbero essere prese in considerazione in future analisi di sensitività.

La distinta base è stata ottenuta dal database GREET non essendo presenti i modelli in Ecoinvent.

Nel database GREET2020 sono presenti tre tipologie di batterie:

- NMC111,
- NMC811,
- NMC622.

La differenza tra le tre tipologie è dettata dalla composizione dei materiali del catodo. La batteria NMC111 usa $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ ¹ come materiale per il catodo e la grafite come materiale per l'anodo. È stata scelta la batteria NMC111 perché più comune e con un maggior livello di dettaglio nella distinta materiale. NMC811 rappresenta la batteria che probabilmente verrà utilizzata nel futuro mentre NMC622 è una vecchia tipologia di batteria disponibile nel database per eventuali aggiornamenti futuri [11]. La tendenza nel futuro è ridurre la quantità di cobalto presente nella batteria, materiale costoso ed estratto in pochi Paesi (generalmente instabili geopoliticamente), fino a porre a zero la quantità presente (come nella batteria 910).

A favore della batteria NMC111 va inoltre la previsione fatta nello studio [7], indicato nella Figura 11.

¹ Per la denominazione si far riferimento alla sigla $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, ossia al rapporto atomico. Per esempio, la denominazione NMC111 deriva dallo stesso valore per i pedici $x=y=z=1/3$

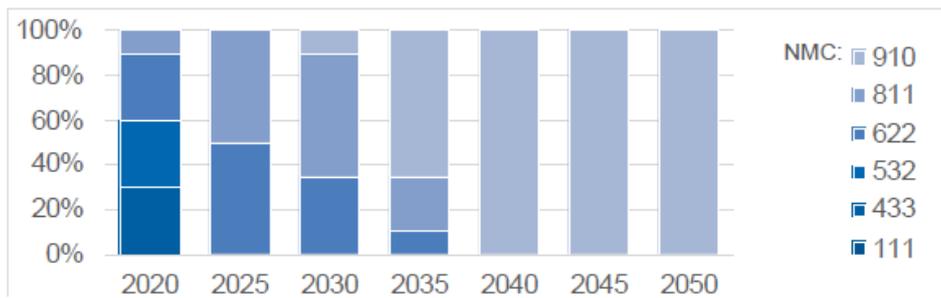


Figura 11. Trend batterie dal 2020 al 2050.

Per i parametri energetici si fa riferimento alla seguente tabella

Parametro		Batteria modello	Batteria del costruttore
Tipologia	--	NMC111	NMC
Numero di batterie	--	3	3
Numero di celle	--	96 in serie in 2 rami in parallelo	96 in serie in 2 rami in parallelo
Capacità singola cella	[Ah]	46	52
Massima tensione operativa	[V]	---	408
Peso singola batteria con la BMS	[kg]	165	---
Potenza nominale	[kW]	100	71
Energia disponibile	[kWh]	23.5	33.345
Peso complessivo	[kg]	209	---

Tabella 8. Caratteristiche energetiche batteria NMC111 e batteria costruttore.

5. Distinta base della batteria e caratteristiche costruttive

La batteria NMC111 è una batteria agli ioni di litio costituita da più moduli e ogni modulo è costituito da più celle allo scopo di aumentare il valore della tensione, da 3.7 V a livello cella a 400V a livello batteria. Nel caso trattato in questa dissertazione si hanno due rami in parallelo da 96 celle in serie. Ogni cella è costituita da un:

- Un catodo in un ossido di nichel-manganese-cobalto in quantità 1/3,1/3,1/3 e di litio,
- Un anodo in grafite,
- Un collettore dell'anodo in rame,
- Un collettore del catodo in alluminio,
- Un elettrolita solido costituito da un sale di litio LiPF6, miscelato con EC – Etil carbonato e DMC – Dimetilcarbonato,
- Da un separatore in PP – Polipropilene e PE - Polietilene,
- Da un involucro in PET – Polietilentereftalato,
- Da un materiale che serve per tenere unito gli elettrodi al collettore, costituito in PVDF – Polivinildenfluoruro.

La composizione della cella è indicata nella seguente figura. Il peso della cella è pari a 0.386 kg.

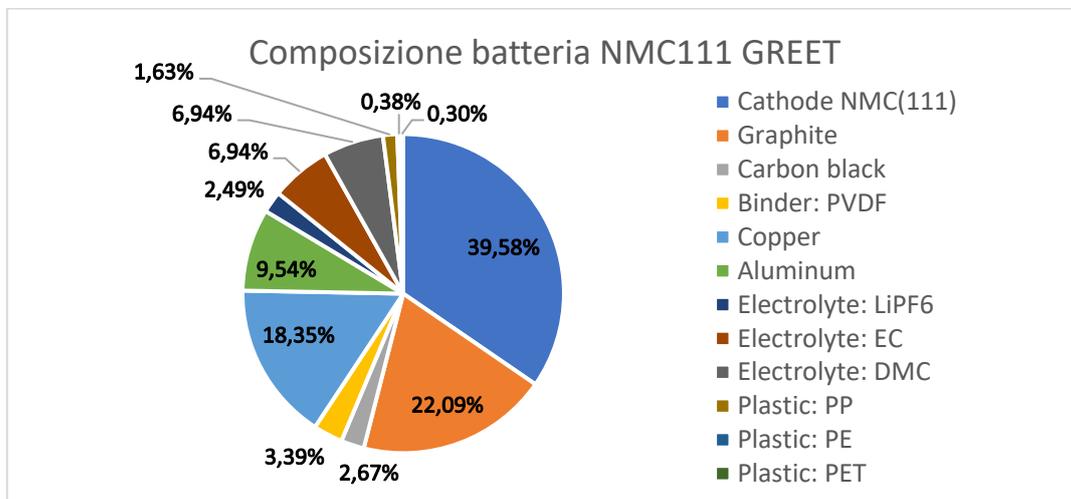
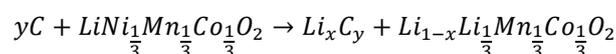


Figura 12. Percentuali in peso delle componenti della cella NMC111

Come già detto, in una cella agli ioni di litio si genera durante il processo di scarica un flusso di ioni dal catodo verso l'anodo attraversando l'elettrolita per via della reazione di ossidoriduzione spontanea indicata di seguito.



Equazione 2. Reazione di scarica della cella NMC111

La cella può essere prodotta in tre forme: cilindrica, prismatica e pouch. La forma adottata per la cella va a influenzare la densità energetica e di potenza della batteria.

La temperatura di funzionamento della cella non può superare i 60°C/100°C per via del fatto che si possono innescare fenomeni di fuga termica nella batteria. Quando la temperatura supera i 100°C, le reazioni esotermiche producono più calore di quanto la cella è in grado di smaltire. Il calore generato causa un aumento di temperatura che fa accelerare le reazioni chimiche secondo la legge di Arrhenius. Le reazioni che avvengono all'interno della cella diventano inarrestabili, generano ulteriore calore, che per conduzione si trasferisce nelle celle adiacenti: ha inizio la fuga termica. Le reazioni esotermiche che avvengono normalmente sono tre: la riduzione all'anodo, la decomposizione termica dell'elettrolita e l'ossidazione al catodo. Se la temperatura è troppo elevata, l'ultima reazione indicata rilascia l'ossigeno in forma gassosa incrementando il rischio di esplosione della batteria. A temperatura elevate, quando si raggiunge la temperatura di fusione delle placche PP e PE intorno a 130°C, il separatore si fonde ponendo la batteria a rischio corto circuito. Incrementi elevati di temperatura potrebbero innescare una autocombustione alimentata dall'ossigeno presente [3].

Uno dei compiti del Battery Management System è quindi quello di monitorare la temperatura delle celle attraverso dei sensori e limitare eccessive variazioni di temperatura tra cella e cella, per garantire le stesse prestazioni. I sensori mandano il segnale di temperatura al BMS. Se la temperatura è troppo alta rispetto al valore di benchmark si avvia il processo di raffreddamento delle celle mentre se il valore è troppo basso rispetto a un valore di benchmark inizia il processo di riscaldamento della cella.

La struttura di controllo della temperatura dipende dall'architettura della BMS: una BMS centralizzata è uno "scatolotto" di grosse dimensioni e un numero elevato di cavi che vanno verso i sensori e verso le ventole e le resistenze, mentre una BMS distribuita presenta una scatola "master" da cui si dipartono pochi cavi verso la scatola "slave" che amministrano uno o più moduli.

Inoltre, il BMS serve per limitare la tensione massima della cella e la tensione minima. Se si ha una sovraccarica della cella si osserva una produzione di calore che genera ossigeno, mentre se si ha una sovraccarica della cella si osserva una crescita dendritica dei metalli che potrebbe causare un cortocircuito. Sovraccarica e sovraccarica sono due delle cause della fuga termica della cella, insieme al cortocircuito dovuto a una penetrazione meccanica.

La BMS ha una logica che tiene conto del degrado delle celle nel tempo. In genere per una batteria per la trazione, dopo una perdita del 20% di capacità, le celle hanno capacità molto diverse fra di loro tali da obbligare la sostituzione della batteria. Infine, da una misura della corrente è in grado di ricavare lo stato di carica della batteria

3. Impatto ambientale della batteria NMC111

1. La fase di manufacturing della batteria

La fase di manufacturing della batteria prevede la realizzazione dei componenti costitutivi della cella, l'assemblaggio della cella e l'assemblaggio della BMS, secondo lo schema indicato Figura 13. A questa fase vengono allocati gli impatti della produzione della batteria, della estrazione dei materiali vergini e una parte degli impatti dei materiali riciclati impiegati.

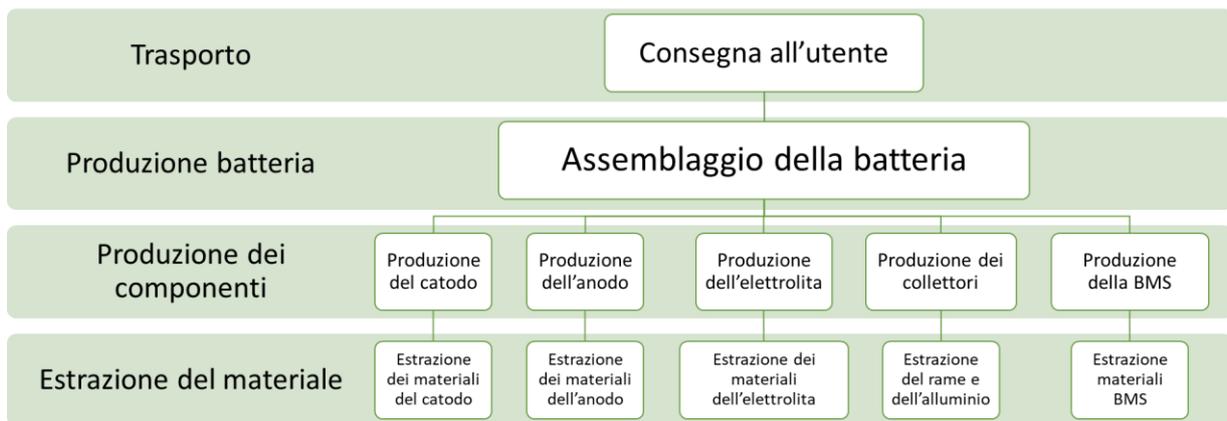


Figura 13. Condizioni di bordo processo di fabbricazione della batteria.

I flussi di energia, di materiali, così come le modalità di produzione sono stati presi da GREET [12], mentre il modello è stato sviluppato sia su Ecoinvent sia su GREET. È stato supposto che la produzione della batteria avvenga in Cina. Di seguito è descritto il modello impiegato su GREET.

1.1. GRAFITE

La produzione della grafite per l'elettrodo negativo è stata modellata considerando i processi tipici che vengono usati per la produzione degli elettrodi per l'industria dell'alluminio. La grafite è quindi prodotta in due step.

1. Il coke, una volta estruso, subisce un trattamento termico di baking a 800°C-1000°C, ovvero i componenti vengono posti in contenitori cilindrici in acciaio inossidabile (saggers), riempiti con sabbia per ridurre la deformazione e infine inseriti in un forno a temperatura controllata, in modo da ridurre il rischio di rottura.
2. Segue il processo di grafitizzazione a 3000°C in cui l'estruso cambia la sua struttura cristallina in grafite.

I valori di energia utilizzati nel modello sono riferiti al contesto americano e sono derivano dalla Aluminium Association.

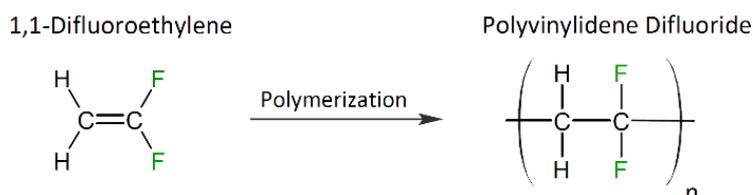
Energy Carrier	Amount Consumed (mmBtu/ton)
Electricity	0.42
Natural gas	2.04
Residual oil	0.18
Coal	0.09
Total	2.7

^a Source: PE Americas 2010.

Tabella 9. Valori relativi alla produzione di grafite

1.2. PVDF

Il PVDF o polivinildifluoruro è il materiale polimerico usato per tenere unito il materiale del catodo e deriva dalla reazione di polimerizzazione del fluoruro di vinidile VDF o 1,1 difluoroetilene in forma gassosa secondo la equazione indicata di seguito.



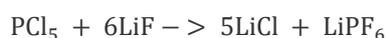
Equazione 3. Reazione di polimerizzazione PVDF.

La resina può essere facilmente lavorata con operazioni di estrusione in film, barre, tubi e fogli attraverso lo stampaggio a iniezione, estrusione, fusione e colata. Oltre ad essere impiegate nelle batterie agli ioni di litio, trova applicazione come rivestimento architettonico nelle valvole nell'industria chimica, nelle turbopompe, negli imballaggi speciali agricoli e industriali [13].

Non avendo disponibilità di dati sul processo di polimerizzazione, il processo di produzione del PVDF è stato modellato come processo di polimerizzazione del PVC.

1.3. LiPF₆

LiPF₆ è l'elettrolita impiegato nella batteria ed è realizzato a partire dal LiF e a PF₅ in una reazione che avviene a temperature comprese tra -20°C e +300°C con un tempo di reazione compreso tra 0.1 e 10 ore secondo la seguente equazione.



Equazione 4. Reazione di clorurazione.

La disponibilità nel mercato dei materiali di partenza del processo è elevata e a basso costo: il pentacloruro di fosforo PCl₅ deriva dal processo di clorazione del dicloruro di fosforo PCl₂ a temperature

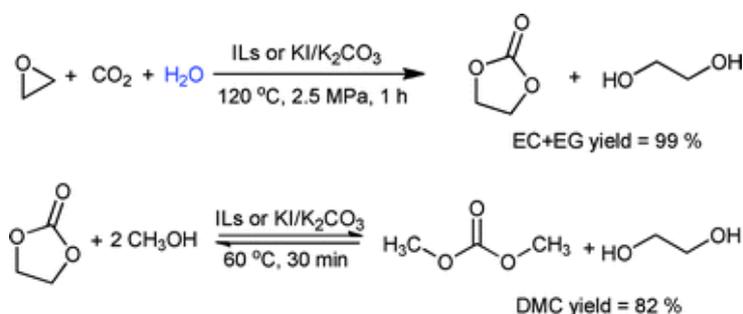
comprese tra i -20 e 100°C mentre il fluoruro di litio LiF deriva dal processo di reazione dell'acido fluoridrico e del carbonato di litio. Il LiF inoltre trova diversi impieghi come nell'ottica UV e nei reattori nucleari.

Il LiPF₆ viene poi isolato dalla miscela sotto forma di soluzione in cui, eteri, nitrili ed esteri sono utilizzati come solventi. In genere nel processo viene usato il dietil-etero come solvente, perché il LiPF₆ risulta essere facilmente solubile in esso. Infine, il solvente viene fatto evaporare per ottenere il materiale in forma cristallina [14].

Nel modello è stato considerata la produzione del LiPF₆ ma non dei precursori PCl₅, LiF.

1.4. EC e DMC

EC e DMC ossia Etilcarbonato e dimetilcarbonato vengono miscelato insieme al LiPF₆ per migliorare il valore della costante dielettrica del materiale. Il DMC si ottiene dal EC che si ricava a sua volta dall'ossido di etilene secondo la seguente relazione.



Equazione 5. Reazione di polimerizzazione di EC e DMC [15].

Il processo ha una resa vicino al 79%. L'ossido di etilene a sua volta deriva dall'etilene. I valori di energia richiesta per la produzione dell'Etilene, per la produzione dell'ossido di Etilene, per la produzione di EC e DMC sono indicati nelle seguenti tabelle.

Energy Carrier or Feedstock	Amount Consumed (mmBtu/ton)	Energy Carrier or Feedstock	Amount Consumed
Electricity	0.56	Electricity (mmBtu/ton)	0.69
Natural gas	3.2	Natural gas	3.18
Residual oil	7.7	(mmBtu/ton)	
Natural gas (feedstock)	34	Ethylene (ton/ton)	0.79
Petroleum (feedstock)	87	ethylene oxide)	

^a Sources: Boustead 2005b; National Renewable Energy Laboratory 2012.

^a Source: National Renewable Energy Laboratory 2012.

Tabella 10. Valori relativi alla produzione dell'etilene a sinistra e ossido di etilene a destra

Parameter	Value
Electricity (mmBtu/ton)	0.04
Natural gas (mmBtu/ton)	0.22
Ethylene oxide (ton/ton EC)	0.16

^a Source: Monteiro et al. 2009

Parameter	Value
Net energy use (mmBtu/ton DMC)	1.4
Total electricity consumption (mmBtu/ton DMC)	0.087
Natural gas consumption (mmBtu/ton DMC)	1.27
Production rate of DMC (kg/h)	2,080
Production rate of ethylene glycol (kg/h)	9,296
Energy consumption allocated to DMC (%)	18
Feed rate of ethylene oxide (ton/ton DMC)	0.58

^a Source: Monteiro et al. 2009.

Tabella 11. Dati relativi alla produzione del EC a in alto e DMC a in basso.

1.5. NMP O 1-METIL-2-PIRROLIDONE

È un solvente impiegato per sciogliere alcuni materiali, impiegato durante la produzione della batteria e non presente nel prodotto finito. Si ottiene dalla reazione tra una ammina e un estere. I valori di energia impiegati nel modello sono indicati nella seguente tabella.

Parameter	Value
Electricity (mmBtu/ton)	0.04
Natural gas (mmBtu/ton)	0.22
Ethylene oxide (ton/ton EC)	0.16

^a Source: Monteiro et al. 2009

Tabella 12. Valori relativi alla produzione del NMP.

1.6. ALLUMINIO E RAME

Per alluminio e rame impiegati si usano i processi tipici per la produzione di questi materiali. GREET presenta delle pathway a proposito.

1.7. PRODUZIONE DEL CATODO NMC111

Il processo per la produzione del catodo NMC111 prevede che i solfati di Nichel, Manganese e Cobalto vengano miscelati fra di loro in modo stechiometrico. Viene aggiunto dell'idrossido di sodio e dell'idrossido di ammonio in modo che precipiti l'idrossido di Nichel-Manganese-Cobalto sotto forma di

idrossido. L'idrossido così ottenuto viene filtrato e viene essiccato per generare l'ossido di nichel-manganese-cobalto. Infine il materiale viene estruso per generare il componente. I flussi di energia e di massa impiegati sono indicati nella seguente tabella

	Quantity	Unit
Material inputs		
NiSO ₄ .6H ₂ O	1.475	ton/ton
CoSO ₄ .7H ₂ O	0.635	ton/ton
MnSO ₄ .H ₂ O	0.553	ton/ton
NaOH (48%)	1.853	ton/ton
NH ₄ OH (20% as NH ₃)	0.3	ton/ton
Water consumption		
Water	0.7	ton/ton
Energy consumption		
Steam	13.37	ton/ton

Figura 14. Valori di energia e di materiale relativi al catodo

1.8. BMS

Il BMS è un insieme di schede elettroniche ed è stata modellata come un circuito di un computer desktop, scalato linearmente in funzione dell'energia stoccata nella batteria.

2. La fase d'uso della batteria

L'impatto della fase d'uso della batteria include le perdite dovute alla ricarica della batteria nell'intera vita. Le perdite in kWh sono espresse secondo la seguente formula.

$$Losses = (1 - energy\ efficiency) \cdot (Application\ Service\ energy)$$

Equazione 6. Perdite in kWh.

Dove l'efficienza energetica è data dal rapporto tra l'energia per ricaricare completamente la batteria da uno stato di carica pari a zero e l'energia che viene fornita al sistema di propulsione elettrico in un ciclo. L'efficienza sarà quindi pari al rapporto tra la potenza durante la carica moltiplicato per il tempo di carica e la potenza durante la scarica moltiplicato per il tempo di scarica.

Riarrangiando la formula dell'efficienza energetica si osserva che l'efficienza energetica è il prodotto dell'efficienza di tensione e l'efficienza coulombiana.

$$Energy\ efficiency = \left(\frac{V_p}{V_c}\right) \left(\frac{I_p T_p}{I_c T_c}\right) = (voltage\ efficiency) \cdot (coulumb\ efficiency)$$

Equazione 7. Efficienza energetica.

L' application service energy rappresenta invece l'energia complessiva che viene inviata alla batteria nell'intera vita del veicolo ed è stata ricavata come il prodotto tra il consumo energetico medio per km del veicolo EC_{ttw} per la vita del veicolo in termini di distanza percorsa *lifespan*.

$$Application\ Service = EC_{ttw} \cdot lifespan$$

Equazione 8. Application service

Le emissioni in termini di CO2 sono state valutate moltiplicando le perdite energetiche in kWh, *Losses*, per l'emissione specifica relativa al mix di energia elettrica, *Energy mix*. Come mix energetico è stato scelto il mix energetico europeo.

$$Losses\ Emissions = Losses \cdot Energy\ mix$$

Equazione 9. Emissioni dovute alla fase d'uso.

I valori scelti sono indicati nella tabella seguente.

Lifespan [km]	240000
Energy efficiency [-]	0,96
Energy mix [kgCO₂/kWh]	0,439

Tabella 13

2.1. MODELLO CINEMATICO INZIALE DELLA FASE D'USO (MODELLO V.0)

Per la valutazione dell'energia inviata alla batteria è stato impiegato il modello sviluppato per la batteria Zebra in [1].

L'energia che viene inviata alla batteria durante la carica per 1 km si ricava dal rapporto tra l'energia che la batteria che rende a disposizione per un km di spostamento e il prodotto del rendimento del charger e della batteria.

$$EC_{ttw} = \frac{BEC}{\eta_{chrg} \cdot \eta_{batt}}$$

Equazione 10. Energy consumption per 1 km.

L'energia che la batteria mette a disposizione per un km BEC è data dalla somma dell'energia che rende a disposizione al powertrain elettrico e dell'energia necessaria per la gestione termica della batteria.

$$BEC = \frac{\left(\frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \int_0^T P_{batt,chem} \cdot dt + \frac{0,053}{28} \cdot E_{batt} \cdot D_{mis} \right)}{distanza\ percorsa}$$

Equazione 11. Espressione della BEC v0.

Il significato dei termini dell'equazione sono indicati nella seguente tabella.

$P_{batt,chem}$	Potenza che la batteria mette a disposizione al powertrain
$\frac{0,053}{28} \cdot E_{batt} \cdot D_{mis}$	Termine legato alla gestione termica della batteria
<i>distanza percorsa</i>	Distanza percorsa in un ciclo di scarica completo
T	Il tempo che impiega la batteria a scaricarsi completamente da SOC = 100%

Tabella 14. Termini della Equazione 11.

Lo stato di carica della batteria è invece determinato seguente equazione, dove SOC_0 rappresenta lo stato di carica iniziale, I_{batt} è la corrente di scarica della batteria e C_{tot} è la capacità totale della batteria. Il valore della capacità totale della cella è stato fornito dal produttore.

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{I_{batt}}{C_{tot}} \cdot dt$$

Equazione 12. SOC

La corrente che la batteria fornisce è data dal rapporto tra la potenza della batteria rapportata alla tensione a vuoto della batteria.

$$I_{batt} = \frac{P_{batt,chem}}{V_{oc}}$$

Equazione 13. Corrente v0.

La potenza chimica della batteria è legata alla potenza richiesta dal motore elettrico.

$$P_{batt,chem} = P_{batt,el} \cdot \eta_{batt}^k$$

Equazione 14. Potenza chimica della batteria.

$$P_{batt,el} = P_{em} \cdot \eta_{em}^k \cdot \eta_{inv}^k$$

Equazione 15. Potenza elettrica della batteria.

Per comprendere meglio il significato dei singoli termini (termini e potenze) si può fare riferimento alla Figura 15 e alla Figura 16.

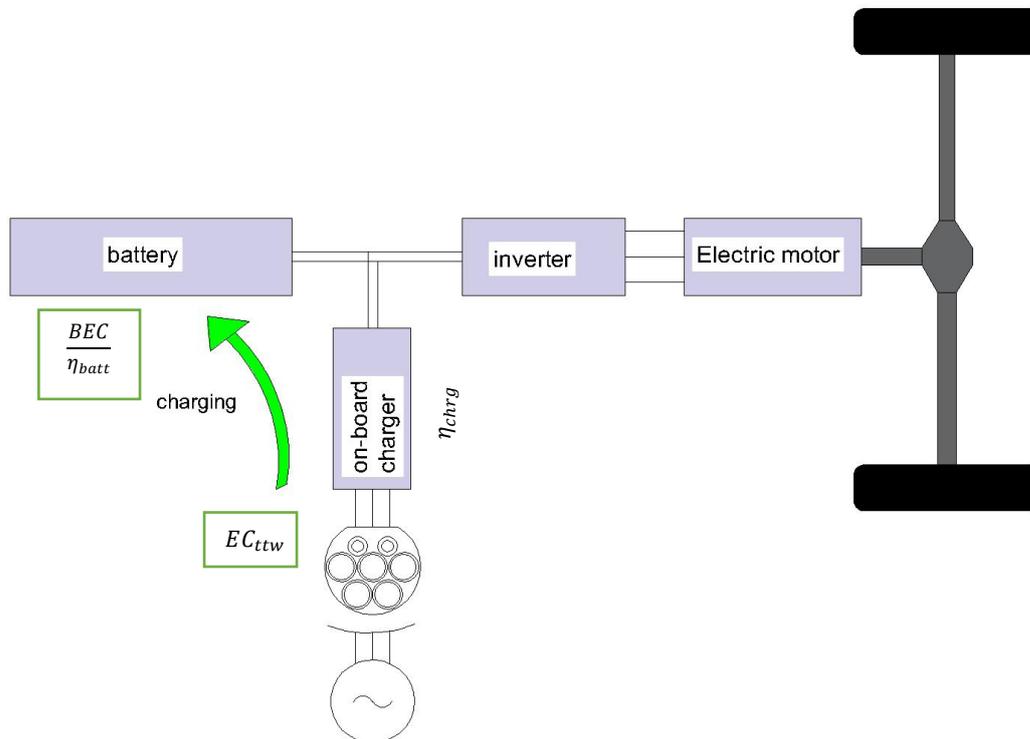


Figura 15. Fase di carica del veicolo elettrico con indicazione in verde del flusso di energia per km del veicolo dal plug alla batteria.

Nella Figura 15, viene schematizzato il processo di ricarica della batteria. La corrente prelevata dalla rete sotto forma di corrente alternata viene raddrizzata attraverso un convertitore elettronico di potenza chiamato on-board-charger e va a ricaricare la batteria. Il convertitore ha un certo rendimento e pertanto, non tutta l'energia inviata viene utilizzata per ricaricare la batteria. Il processo di scarica è stato indicato nella Figura 16. La potenza assorbita dalla batteria durante il processo di carica è leggermente inferiore della potenza che eroga al powertrain, che è legata alla potenza richiesta dal motore. La potenza istantanea del motore elettrico P_{em} è legata alla potenza data alle ruote a meno di un rendimento dovuto alla trasmissione meccanica del veicolo.

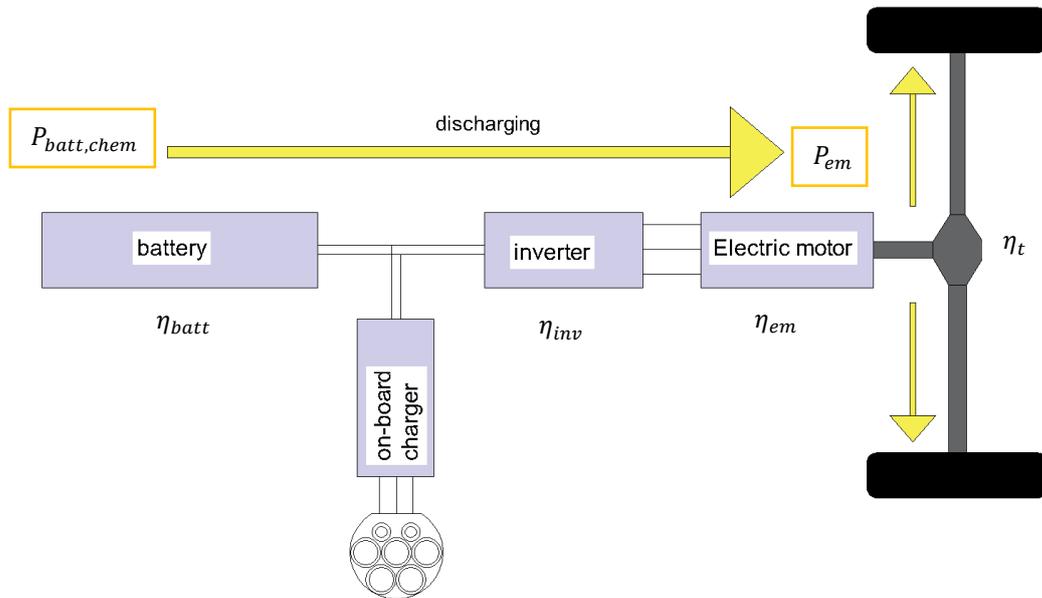


Figura 16. Fase di scarica del veicolo elettrico con indicazione in giallo del flusso di potenza dalla batteria alla trasmissione.

2.2. MIGLIORAMENTO DEL MODELLO CINEMATICO (MODELLO v.1)

Il modello è stato migliorato tenendo conto della chimica degli accumulatori ed è stato applicato alla batteria agli ioni di litio. La batteria al litio non necessita di una gestione termica impattante dal punto di vista dei consumi. La Batteria Zebra infatti aveva una temperatura di funzionamento di 270°C mentre le batterie agli ioni di litio hanno una temperatura di funzionamento prossima alla temperatura ambiente, che in tutti i casi non può superare i 60°C per il rischio di fuga termica.

L'energia che la batteria per km fornisce serve solo per la trazione del veicolo come indicato nella equazione seguente. Viene trascurato l'energia impiegata per la gestione della batteria a veicolo spento.

$$BEC = \frac{\left(\frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \int_0^T P_{batt,chem} \cdot dt \right)}{distanza\ percorsa}$$

Equazione 16. BEC v1.

La tensione ai capi della batteria è funzione dello stato di carica. In tutti le tipologie di accumulatori elettrochimici, agiscono due fenomeni:

- Un fenomeno legato alla reazione chimica di ossidoriduzione all'interfaccia elettrodo/elettrolita (dinamica veloce) e la richiesta di energia per l'attivazione del trasferimento di carica dall'elettrodo all'elettrolita e viceversa;
- Un fenomeno legato alla diffusione degli ioni nell'elettrolita, che essendo caratterizzato da una dinamica lenta causa un gradiente di concentrazione nei pressi dell'elettrodo.

Questi due fenomeni causano rispettivamente una sovratensione di reazione (activation polarisation loss) e una sovratensione di diffusione (concentration polarisation loss), che portano una riduzione della tensione di circuito aperto della batteria al variare della SOC. Inoltre, bisogna considerare una riduzione della tensione per via della resistenza ohmica dei collettori della cella (iR loss).

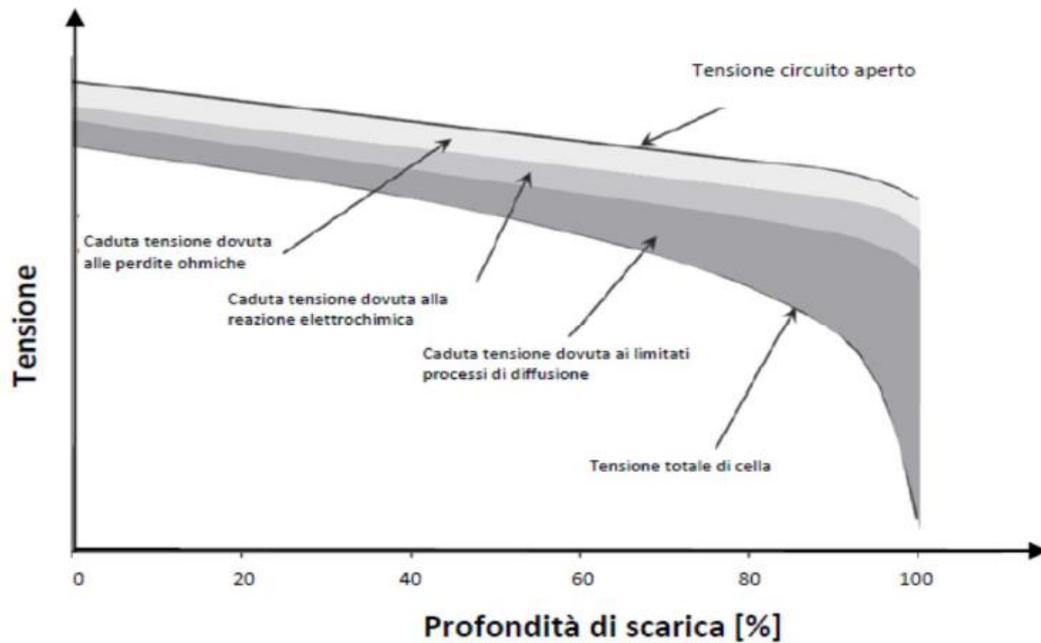


Figura 17. Riduzione della tensione dovuta alla chimica della cella.

La corrente che eroga la batteria è quindi valutata secondo la seguente relazione. La resistenza ohmica della batteria è una resistenza equivalente, il cui valore è legato alla disposizione delle celle nel pacco batteria. Le informazioni relative al valore della resistenza della singola cella, della tensione a vuoto della cella, il numero di celle e la loro disposizione sono state date dal fornitore.

$$I_{batt} = \frac{V_{batt}(SOC) - \sqrt{V_{batt}^2(SOC) - 4 \cdot R_{batt}(SOC) \cdot P_{batt,chem}}}{2 \cdot R_{batt}(SOC)}$$

Equazione 17. Corrente in funzione della SOC v1.

Nella tabella seguente viene spiegato le differenze a seconda della batteria e del modello.

	Modello v.0	Modello v.1	
		Gestione termica della batteria	Tensione in funzione dello stato di carica
BATTERIA NMC	×	×	✓
BATTERIA ZEBRA	✓	✓	✓

Tabella 15

3. Fine vita della batteria.

Per lo scenario di fine vita della batteria NMC111 si è scelto di seguire le linee guida contenute nella PEFCR Renewable Batteries mentre i valori di emissione per la fine vita della batteria sono stati ricavati dal database GREET2020 e dal database Ecoinvent.

3.1. IL PROCESSO DI SMALTIMENTO DELLA BATTERIA

Come indicato nella Figura 18, si suppone che il processo di fine vita della batteria contenga due parti: lo smantellamento delle componenti e la riconversione in materiale riciclato.

Nella fase di smantellamento delle componenti, tutti i componenti aggiunti durante il processo di assemblaggio del pacco batterie, come involucri, sistemi di raffreddamento e plastiche esterne sono separati dal resto della batteria e triturati, pronti per essere impiegati in un nuovo processo.

La parte rimanente (le celle) verrà convertita in materiale attivo per nuove batterie attraverso un processo pirometallurgico che converte le parti rimanenti in una frazione metallica e in scorie. La frazione metallica viene raffinata nel processo idrometallurgico per estrarre materiali come cobalto e solfati metallici.

Nella figura 8 viene indicato lo schema di trattamento della batteria

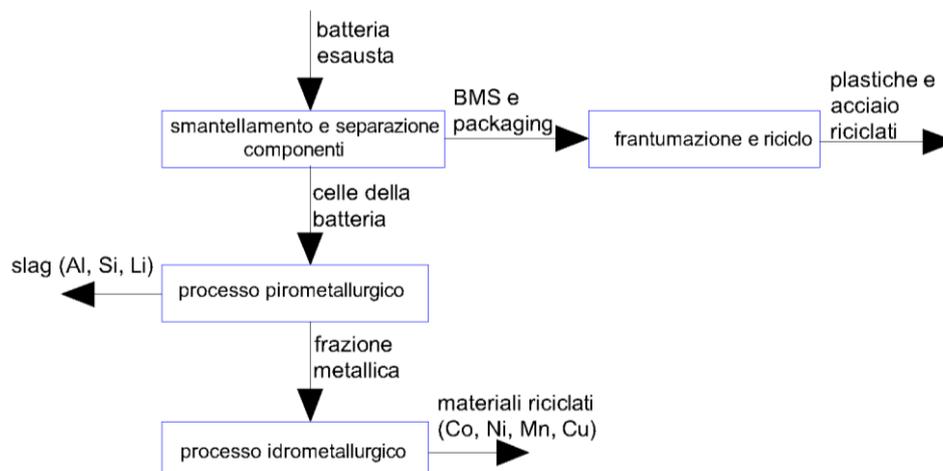


Figura 18: Bordi del sistema EoL batteria.

3.2. PROCESSO PIRO-IDROMETALLURGICO

Il processo idro-pirometallurgico è stato sviluppato dalla compagnia belga Umicore, che si occupa del riciclo della maggior parte delle batterie Li-ion in Europa allo scopo di ricavare i metalli più preziosi, come Cobalto e Litio. La batteria viene smantellata a Hoboken (Olanda) e il processo pirometallurgico avviene ad Hanau (Germania).

Essendo un processo concepito da una azienda privata, i dati sui flussi di materia ed energia non sono disponibili e pertanto, si è reso necessario ipotizzare un processo simil-realistico dalla combinazione di un processo pirometallurgico e un processo idrometallurgico. I dati relativi ai materiali necessari ai processi e i valori di energia impiegata relativi ai due processi sono stati ottenuti da GREET.

Come mix di energia elettrica si è scelto di adottare il mix energetico europeo, supponendo che lo smaltimento della batteria avvenga in uno stabilimento europeo. Informazioni sul processo pirometallurgico e idrometallurgico sono state ricavate da [16] e da [17].

Il processo pirometallurgico prevede che, una volta smantellate le batterie e rimosso il BMS e il packaging del pacco, le celle intere vengano mescolate a dei reagenti riducenti come Alluminio e a dei materiali inerti (50wt%) e vengono inviate in una fornace verticale (shaf furnace) che presenta tre sezioni:

- Pre-heating zone (Bassa temperatura ~ 300°C): l'elettrolita evapora lentamente in una atmosfera ricca di ossigeno, in modo da ridurre il rischio di esplosione della batteria;
- Plastics pyrolyzing zone (Medie temperature ~ 700°C): le plastiche e il binder hanno un elevato potere calorifico e quindi vengono bruciate in un ambiente ricco di ossigeno per aumentare la temperatura e ridurre il consumo di energia dello smelter;
- Smelting e reducing zone (Alte temperature ~ 1200-1450°C): fusione e riduzione dei materiali rimanenti.

Per evitare che i gas generati nelle tre parti dello smelter condensino, vengono portati in una camera di post-combustione riscaldata da una torcia al plasma alla temperatura di 1150°C. La torcia ha infatti lo scopo di aumentare l'entalpia dei gas a fronte di un limitato incremento di volume. Vengono in genere vaporizzati dei prodotti a base di Sodio, Calcio oppure ossido di Zinco per catturare i composti alogeni presenti nel gas. Segue un immediato raffreddamento del gas fino a 300°C per evitare la formazione di diossine e furani. Infine, una purificazione permette che il gas possa essere rilasciato nell'ambiente.

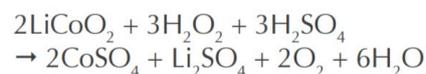
Al termine dell'ultima fase, si genera uno scarto (slag) contenente Alluminio, Litio, Acciaio, Manganese e inoltre Silicio e una frazione metallica contenente i metalli pregiati. L'alluminio non viene recuperato perché viene ossidato da Al in Al₂O₃ durante l'ultima fase e l'energia di ossidazione rilasciata serve in parte per la fusione degli altri materiali. Il litio diventa Li₂O e potrebbe essere recuperato con successivi trattamenti, in genere non viene effettuato perché poco conveniente rispetto all'estrazione come

materiale vergine (un progetto commissionato dal governo tedesco alla Umicore, Daimler, Oko-Institut e Clausthal University of Technology dimostra che l'uso di acido solforico diluito permetta il recupero del litio dallo slag). Il ferro viene ossidato con l'agente riducente SiO₂ in modo da non reagire con il nichel e con il cobalto per la sua alta affinità.

La frazione metallica quindi subisce un processo di precipitazione per recuperare il rame e il ferro mentre il cobalto e il nichel vengono estratti attraverso un processo di estrazione attraverso l'acido cloridrico e un solvente organico. Il cobalto presente nella frazione metallica reagisce diventando CoCl₂ e viene ossidato in Co₂O₃ e infine viene inserito in un forno rotativo a 900°C insieme al Li₂CO₃ per produrre LiCoO₂. Ci si potrebbe fermare qui in modo da ottenere il materiale catodico per le batterie LCO, non adatto per le celle NMC.

Nel modello considerato in questa trattazione, l'obiettivo finale è ottenere il catodo per le batterie NMC e pertanto, i metalli ottenuti proseguono con processo idrometallurgico mentre lo slag viene destinato alla discarica o impiegato come materiale inerte. La percentuale di materiale inviato al processo idrometallurgico si suppone essere pari al 48,3%.

Nel processo idrometallurgico i materiali della frazione metallica subiscono un processo di calcinazione a 700°C per 5 ore. Successivamente avviene la fase di leaching con acido solforico e perossido di idrogeno che genera quindi il solfato di cobalto secondo l'equazione chimica indicata sotto.



Equazione 18. Reazione chimica da cui si realizza il solfato di cobalto.

Analogamente si genera il solfato di manganese e il solfato di nichel. Viene riportato lo schema del processo piro-idrometallurgico.

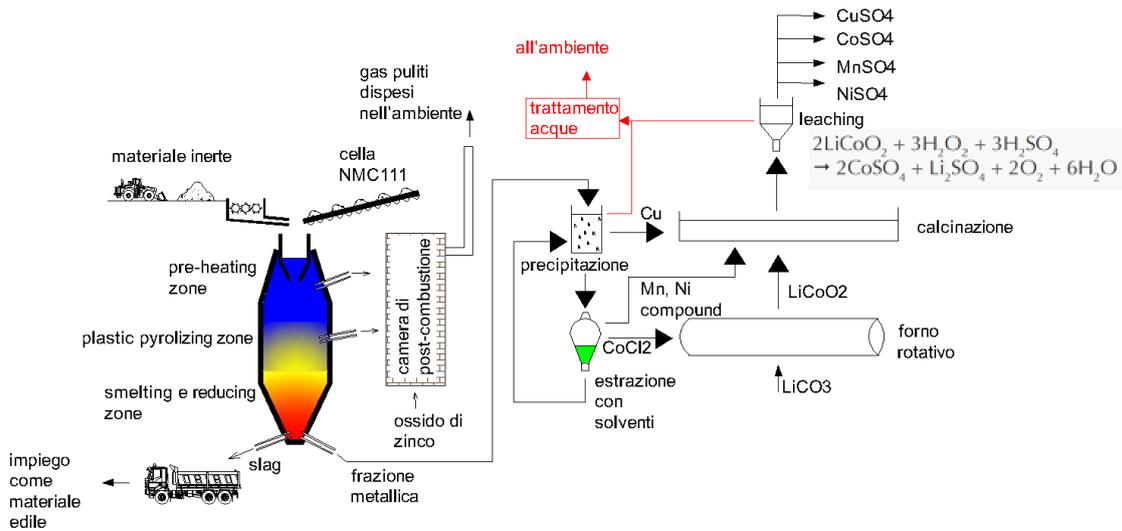


Figura 19. Il processo piro-idrometallurgico in dettaglio.

Nella tabella seguente viene indicato qual è il destino ultimo dei materiali durante il processo idro-pirometallurgico.

In questo schema viene indicato il flusso per materiale nel processo pirometallurgico con indicazione dei valori di efficienza dei processi.

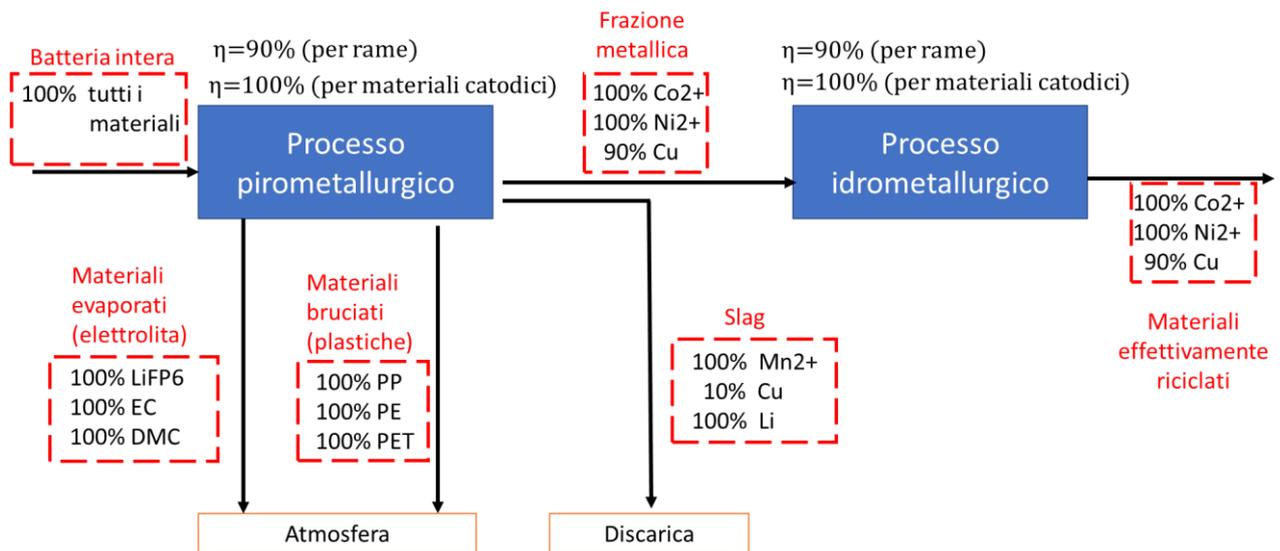


Figura 20. Flussi dei materiali durante il processo di riciclaggio delle celle.

I flussi di energia del processo sono stati ottenuti da GREET e successivamente applicati al modello Ecoinvent.

3.3. LA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

La Circular Footprint Formula fornisce il contenuto di materiale riciclato ed è stata impiegata per la valutazione dell'impatto nella fase di estrazione e nella fase di end-of-life della batteria. È data dalla somma degli impatti ottenuti dalla fase di riciclaggio, dalla fase di riconversione energetica e da impatti per l'uso della batteria esausta in altri contesti (es. scarica). Per la valutazione dell'impatto ambientale a fine vita possono essere tenute conto anche di altre formule secondo [18]

$$(1 - R_1)E_v + R_1 * \left(AE_{recycled} + (1 - A)E_v * \frac{Q_{Sin}}{Q_p} \right) + (1 - A)R_2 * \left(E_{recyclingEoL} - E_v^* * \frac{Q_{Sout}}{Q_p} \right)$$

Equazione 19: CFF materiale.

$$(1 - B)R_3 * (E_{ER} - LHV * X_{ER,heat} * E_{SE,heat} - LHV * X_{ER,elec} * E_{SE,elec})$$

Equazione 20: CFF energia.

$$(1 - R_2 - R_3) * E_D$$

Equazione 21: CFF disposal.

I parametri presenti nella formula sono descritti nella seguente tabella.

Parametro	Descrizione
R_1	Percentuale di materiale del prodotto che è già stato riciclato almeno una volta. Valutato all'ingresso del processo di riciclaggio.
R_2	Percentuale di materiale del prodotto che sarà riciclato in un successivo processo di riciclaggio del prodotto. Valutato all'uscita del processo di riciclaggio.
R_3	Percentuale di materiale del prodotto impiegato nel recupero di energia.
E_v	Emissioni specifiche e risorse consumate derivanti dal processo di acquisizione e pretrattamento del materiale vergine.
$E_{recycled}$	Emissioni specifiche e risorse consumate derivanti dal processo di riciclaggio del solo materiale riciclato (riusato).
$E_{recyclingEoL}$	Emissioni specifiche e risorse consumate derivanti dal processo di riciclaggio.
E_v^*	Emissioni specifiche e risorse consumate per l'acquisizione e pretrattamento di materiali vergini che si presume vengano sostituiti nel futuro da materiali riciclabili.
Q_{Sin}	Qualità del materiale secondario in ingresso
Q_{Sout}	Qualità del materiale secondario in uscita
Q_p	Qualità del materiale primario o vergine in ingresso
A	Fattore di allocazione degli oneri e dei crediti di impatto tra fornitore e utilizzatore materiale riciclato
B	Fattore di allocazione dei processi di recupero di energia

E_{ER}	Emissioni specifiche e risorse consumate derivanti dal recupero di energia (es. termovalorizzazione).
LHV	Potere calorifico inferiore del materiale impiegato nel recupero di energia
E_D	Emissioni specifiche e risorse consumate derivanti dai materiali di scarto non impiegati nel recupero di energia
$E_{SE,elec}$ $E_{SE,heat}$	Emissioni specifiche e risorse consumate che sarebbero derivate dalle fonti di energia, calore ed elettricità ora sostituite
$X_{ER,heat}$ $X_{ER,elec}$	Efficienza del processo di recupero dell'energia sotto forma di calore ed elettricità

Tabella 16: Descrizione parametri della formula CFF

Per comprendere meglio il significato dei termini della formula della PEF si consideri quindi il seguente schema.

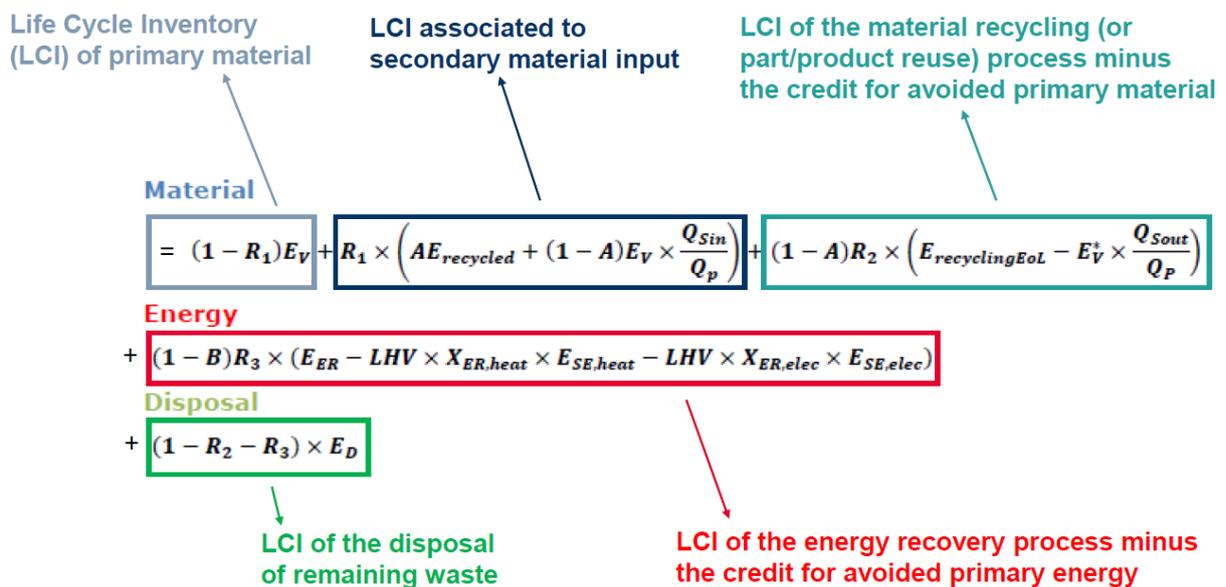


Figura 21. Spiegazione termini della PEF CFF

Dallo schema indicato nella Figura 21 si comprende meglio il significato dei singoli termini. Se si considera la parte "material" della formula, questa rappresenta l'impatto ambientale di tutti i materiali che vengono riciclati e reimpiegati per la realizzazione di una nuova batteria o per un'altra applicazione ed è costituita dai termini:

- 1) $(1 - R_1)E_v$ che rappresenta l'impatto relativo alla estrazione dei materiali vergini della batteria che entrano nell'impianto di riciclaggio;
- 2) $R_1 \times \left(AE_{recycled} + (1 - A)E_v \times \frac{Q_{Sin}}{Q_p} \right)$ che rappresenta l'impatto relativo alla fase di estrazione dei materiali riciclati presenti nella batteria e che entrano all'interno dell'impianto di riciclaggio;

3) $(1 - A)R_2 * \left(E_{recyclingEoL} - E_v^* * \frac{Q_{Sout}}{Q_p} \right)$ che rappresenta l'impatto relativo alla fase di riciclaggio di tutti i materiali.

I primi due termini quindi sono legati alla fase di estrazione della batteria mentre il terzo termine è legato alla fase di riciclaggio del materiale. Il fattore R_1 mi dice quanto materiale riciclato è presente nella batteria e pertanto il complementare $1 - R_1$ mi dice qual è la quantità di materiale vergine. Il fattore R_2 mi dice qual è la percentuale di un materiale presente nella batteria che potrà essere riciclato e questo fattore può essere diverso da R_1 , perché tiene conto sia di un miglioramento/peggioramento del processo di riciclaggio sia del fatto che non tutti i materiali riciclati possono essere reimpiegati per lo stesso prodotto per motivi tecnologici.

Il fattore A mi dice come vengono distribuiti gli oneri e i crediti relativi al processo di riciclaggio. A è la quota parte di crediti/oneri che l'acquirente del materiale riciclato si prende, mentre il complementare $1 - A$ mi dice qual è la percentuale di oneri/crediti che prende chi esegue il processo di riciclaggio e vende il materiale prodotto. È chiaro che questo fattore dipenda da qual è la tendenza del mercato di quel materiale. Se il materiale riciclato è prodotto in grossa quantità ma la domanda è bassa, implica che riciclare è conveniente dal punto di vista del mercato e quindi anche dal punto di vista economico/ambientale. In questo caso quindi chi ricicla si prende più crediti di chi compra il materiale. Se il materiale riciclato è prodotto in basse quantità ma la domanda è alta, implica che non è conveniente riciclare dal punto di vista economico/ambientale e quindi si prende meno crediti rispetto a chi compra quel materiale.

Se si considera la parte "energy" della formula questa rappresenta l'impatto dei materiali che vengono portati in incenerimento per produrre energia utilizzabile sotto forma di energia elettrica o termica.

R_3 mi dice quanto di quel materiale viene portato per generare corrente elettrica. $1 - B$ mi dice quanto di questi impatti viene assegnato a chi produce corrente elettrica o energia termica dai materiali conferito all'impianto di termovalorizzazione. E_{ER} è l'impatto prodotto a seguito della termovalorizzazione del materiale a cui devo sottrarre un credito legato alla produzione evitata di energia da altre fonti. Il potere calorifico del materiale moltiplicato per l'efficienza del processo energetico di recupero termico o elettrico, mi dà la quantità di energia prodotta a seguito della combustione del materiale. Se moltiplico l'energia prodotta a seguito della combustione per il valore di emissione medio per una nazione per la produzione di energia elettrica, espresso per esempio come gCO_2/kWh , si ottiene infine il valore di impatto evitato nella la produzione di energia elettrica. Discorso analogo per l'impatto evitato nella produzione di energia termica.

La parte "disposal" della formula mi indica l'impatto della batteria a seguito del conferimento nella discarica. Per un materiale si considera la quota parte che viene conferita in discarica ossia tutta quella che non viene riciclata o che non viene impiegata nel recupero energetico.

Sommando gli impatti delle varie parti “material”, “energy” e “disposal” si ottiene quindi l’impatto complessivo della fine vita della batteria e della fase di estrazione del materiale.

La formula può essere applicata sia in una situazione closed-loop, situazione che prevede che i materiali in uscita dall’impianto di riciclaggio servano per realizzare lo stesso prodotto di partenza, sia in open loop, situazione che prevede che i materiali riciclati vengano usati per realizzare un prodotto diverso.

Si fa l’ipotesi che ci si trovi nella condizione di closed-loop, e pertanto in questa condizione si osserva che:

- 1) $E_v^* = E_v$: poiché non cambia l’applicazione, il materiale vergine che si va a sostituire con materiale riciclato, per esempio litio di una batteria, è il materiale vergine del prodotto di partenza;
- 2) $E_{recycled} = E_{recyclingEoL}$ poiché non cambia la tipologia di processo di riciclaggio per un materiale, la modalità con cui riciclo il materiale riciclato presente nel prodotto, per esempio il litio riciclato presente nella batteria, è uguale alla modalità con cui riciclo quella tipologia di materiale

3.4. LISTA MATERIALI A CUI È STATA APPLICATA LA CFF

Considerato che ogni materiale della batteria ha un destino diverso, che può essere il reimpiego, l'incenerimento o la discarica, e diversi valori di emissione specifica vergine, si è reso necessario applicare la CFF singolarmente per ogni materiale.

L'elenco dei materiali a cui è stata applicata la CFF è indicato nella tabella seguente.

Materiali
Cobalto
Litio
Nichel
Manganese
Grafite
Carbon black
PVDF - Polivinilidenfluoruro
Rame
Alluminio
LiFP6 - Sale di litio
EC - Etilcarbonato
DMC - Dimetilcarbonato
PP -Polipropilene
PET – Polietilentereftalato
PE - Polietilene
Acciaio

Tabella 17. Elenco dei materiali della batteria a cui è stata applicata la PEF CFF.

3.5. SCELTA DEI PARAMETRI DELLA FORMULA: A, B, QSOUT/QP

Per la scelta dei parametri della formula, ci si è riferito alle indicazioni contenute nella PEFCR delle batterie.

Il parametro A può assumere valori compresi tra 0 e 1.

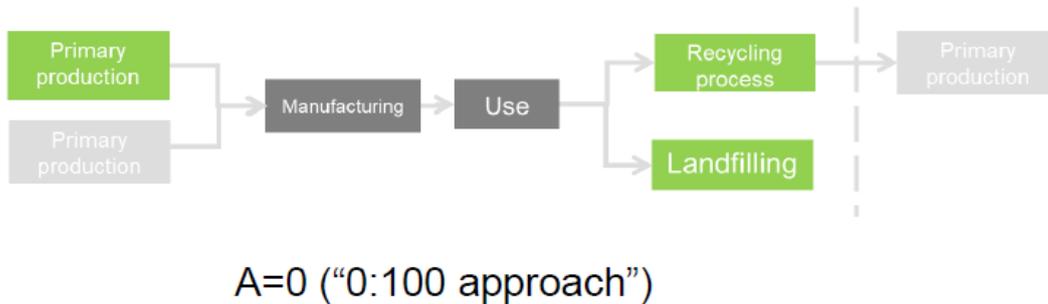


Figura 22. Approccio A=0. Tutti gli impatti sono allocati all'estrazione.

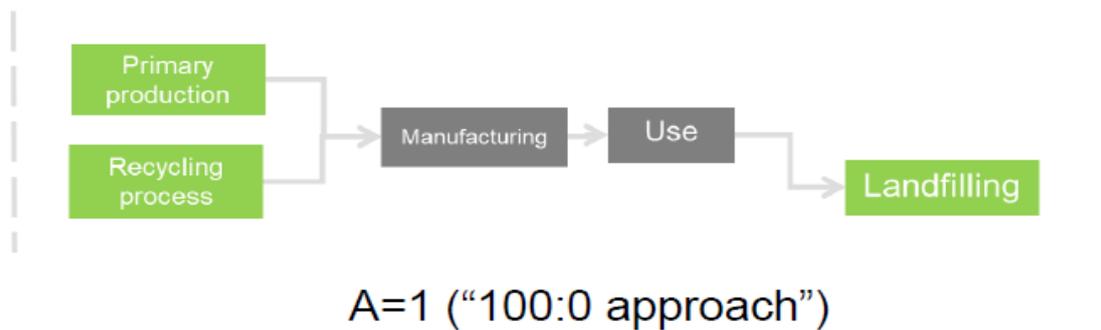


Figura 23. Approccio A=1. Tutti gli impatti sono allocati al riciclaggio

Nella figura, sono indicati i due casi estremi nella scelta di A. Nel caso di A=0, tutti i crediti e gli oneri sono attribuiti a chi produce il materiale mentre nel caso A = 1, tutti i crediti e gli oneri sono attribuiti a chi compra il materiale.

Come già esposto, i valori scelti dipendono quindi dalla domanda e offerta. Sulla base delle indicazioni presenti nell'allegato della PEFCR sono stati scelti i valori di A per i singoli materiali della batteria. I valori sono indicati nella tabella seguente.

		Esempio
A = 0.2	Domanda di materiali riciclati > Offerta di materiali riciclati	Metalli, vetro
A = 0.8	Domanda di materiali riciclati < Offerta di materiali riciclati	Tessuti, plastiche
A = 0.5	Domanda di materiali riciclati = Offerta di materiali riciclati Non è noto il bilancio tra domanda e offerta	

Tabella 18. Valori di A

Il fattore di downgrading del materiale tiene conto di una perdita di qualità di quel materiale. Risulta essere un valore molto alto per i materiali metallici mentre un valore più basso per i materiali plastici. I valori consigliati dalla PEF sono indicati nella tabella seguente

Qsin/Qp = 1	Metalli, Vetro
Qsin/Qp = 0.9	Plastiche
Qsin/Qp = 1	Altri materiali

Tabella 19. Rapporto di downgrading

Sulla base delle indicazioni espresse, per i materiali contenuti nella batteria sono stati scelti i seguenti valori.

Materiale	Tipo	A	Qsin/Qp
Litio	Metallico	0,2	1
Cobalto	Metallico	0,2	1
Nichel	Metallico	0,2	1
Manganese	Metallico	0,2	1
Grafite	Altro	0,5	1
Carbon black	Altro	0,5	1
Binder: PVDF	Altro	0,5	1
Copper	Metallico	0,2	1
Alluminio	Metallico	0,2	1
LiFP6	Altro	0,5	1
EC	Altro	0,5	1
DMC	Altro	0,5	1
PP	Plastico	0,5	0,9
PET	Plastico	0,5	0,9
PE	Plastico	0,5	0,9
Acciaio	Metallico	0,2	1

Tabella 20. Parametri adottati.

3.6. SCELTA DEI PARAMETRI DELLA FORMULA: R1, R2, R3

Il parametro R1 rappresenta la quota parte di materiale riciclato nella batteria. Per la scelta del parametro R1 si è seguito le linee guida indicate dalla PEF, espresse nello schema seguente.

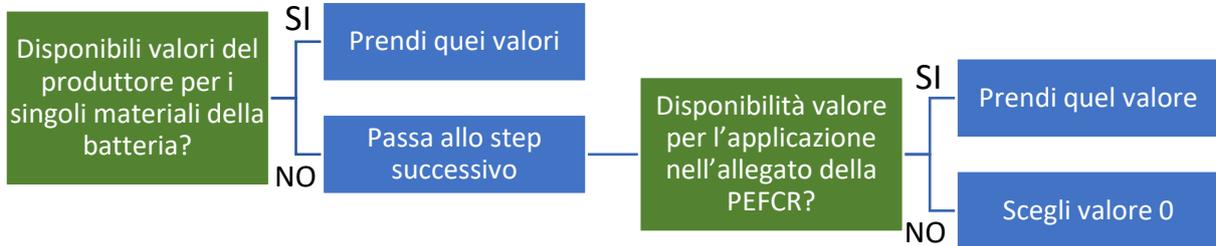


Figura 24. Procedura per la valutazione dei parametri.

Nel caso discusso nella tesi, non si hanno i valori del produttore e la PEF consiglia di adottare un valore pari a 0 per quella applicazione. In questo modo la batteria in partenza è costituita da solo materiale vergine. Anche in [19] è stata adottata la scelta di porre a 0 il contenuto di materiale riciclato della batteria.

Il parametro R2 rappresenta la quota di materiale riciclabile. In questo caso i valori di R2 sono dati dal modello del processo modellato in GREET (ci si ferma al primo step nel diagramma ad albero) e sono legati all'efficienza di riciclaggio del processo. Il valore di R2 è legato al destino dei materiali della batteria:

- tutti materiali che vengono riciclati totalmente o in parte hanno un valore di R2 diverso da 0,
- tutti i materiali che non vengono riciclati ma vengono bruciati durante il processo o vengono hanno un valore di R2 pari a 0.

Il parametro R3 è stato posto pari a 0, supponendo che nessun materiale della batteria bruciato venga impiegato per produrre energia elettrica o termica. Nel processo pirometallurgico, i materiali bruciati generano una energia che non può essere sfruttata.

I valori di R2 sono indicati nella tabella nella pagina successiva.

Materiali	Destino	R2	1-R2-R3
Lithium	Discarica	0	1
Cobalto	Riciclato	1	0
Nichel	Riciclato	1	0
Manganese	Riciclato	1	0
Graphite	Incenerito nel piro	0	1
Carbon black	Incenerito nel piro	0	1
Binder: PVDF	Incenerito nel piro	0	1
Copper	Riciclato/Discarica	0,9	0,1
Aluminum	Discarica	0	1
LiFP6	Incenerito nel piro	0	1
EC	Incenerito nel piro	0	1
DMC	Incenerito nel piro	0	1
PP	Incenerito nel piro	0	1
PET	Incenerito nel piro	0	1
PE	Incenerito nel piro	0	1
Steel	Riciclato/Discarica	0,9	0,1

Tabella 21. Valori dei parametri della PEF applicata alla batteria

3.7. SEMPLIFICAZIONE FORMULA

Sulla base delle ipotesi effettuate la formula circolare si semplifica notevolmente. Il valore dell'impatto ambientale sarà dato solo dalla parte "material" e dalla parte "disposal".

$$E_v + (1 - A) * R_2 * \left(E_{recyclingEoL} - E_v * \frac{Q_{sout}}{Q_p} \right) + (1 - R_2) * E_D$$

Equazione 22: CFF semplificata

Nella valutazione sarà quindi necessario considerare i valori di emissione specifica del materiale vergine E_v , della fase di riciclaggio $E_{recyclingEoL}$ e del conferimento in discarica o all'inceneritore E_D .

3.8. VALORI DI EMISSIONE SPECIFICA

I valori di emissione specifica del materiale vergine sono stati ottenuti da due database diversi, GREET ed Ecoinvent. I valori di emissione dei due database sono espressi nel caso di GREET come kgCO2/tonnellata corta e nel caso di Ecoinvent come kgCO2/tonnellata metrica. In tutti i grafici, il disposal include i materiali che vanno in incenerimento e i crediti riguardano solo la parte del riciclo.

4. Risultati relativi alla batteria

4.1. RISULTATI DELLA FASE D'USO

I risultati dell'impatto della fase d'uso della batteria sono riportati nel seguente grafico al variare di alcuni parametri:

- Il modello impiegato (modello v0 e modello v1),
- La tipologia di batteria (Batteria zebra e batteria NMC111),
- Missione utilizzata.

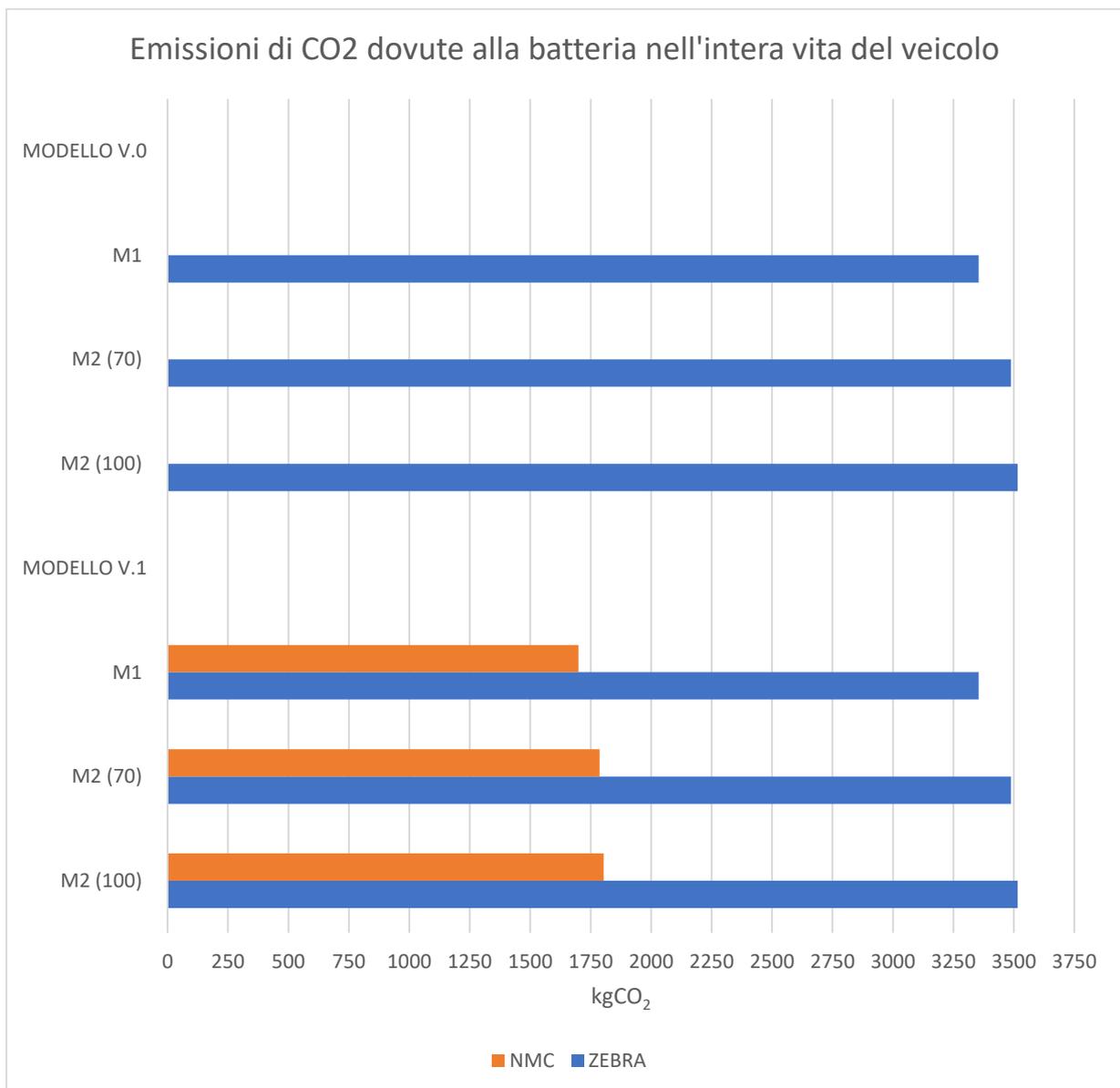


Figura 25. Emissioni di CO₂ dovute alla fase d'uso della batteria ZEBRA e NMC111.

Nella Figura 25 si osserva che l'impatto ambientale della Zebra è quasi il doppio della batteria NMC per via della gestione termica che sottrae molta energia dalla batteria. Le differenze al variare della missione sono trascurabili.

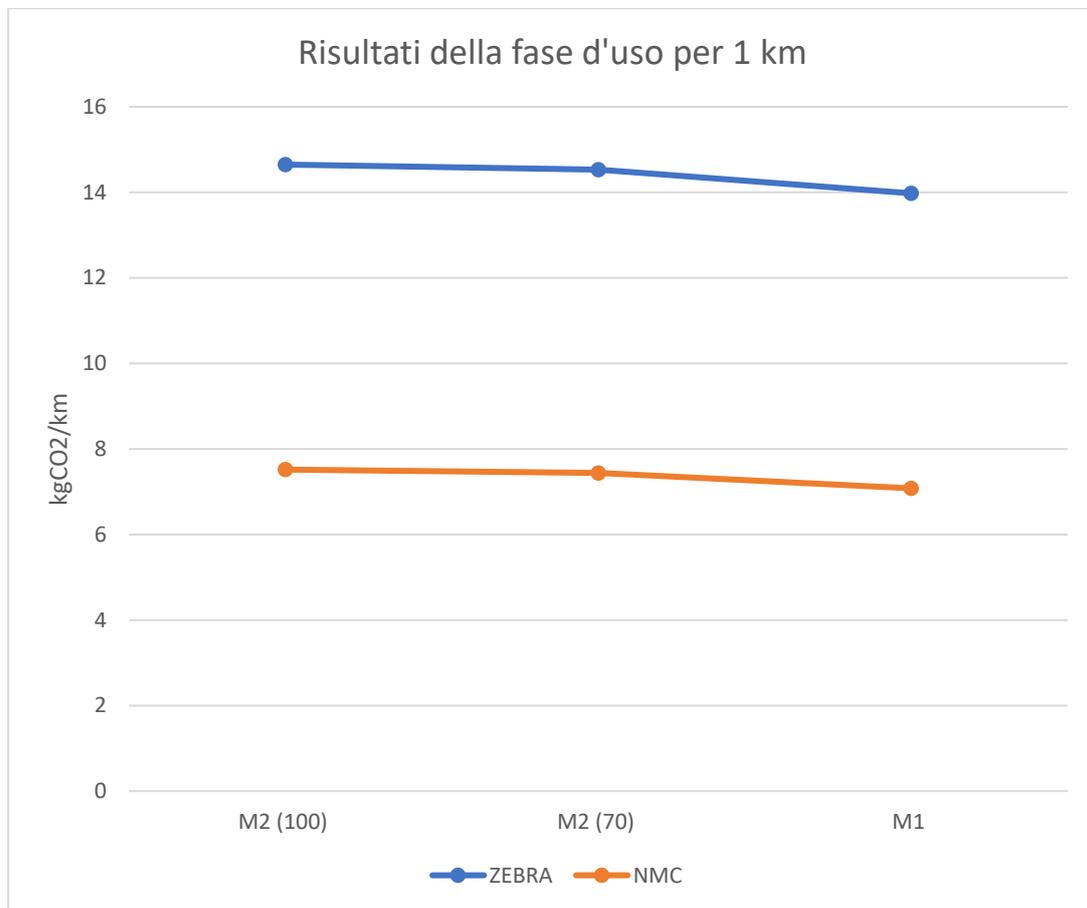


Figura 26. Emissioni al variare della missione per km

Si osserva nella Figura 26 che le emissioni dovute alla fase d'uso della batteria si attestano a 7 gCO2/km per la batteria NMC mentre per la batteria Zebra si attestano a 11 gCO2/km

4.2. RISULTATI FASE DI FABBRICAZIONE E FINE VITA

Sono riportati i risultati delle emissioni di CO2 relativi della batteria NMC111 (escluso il packaging) al variare della banca dati impiegando formula circolare della PEF.

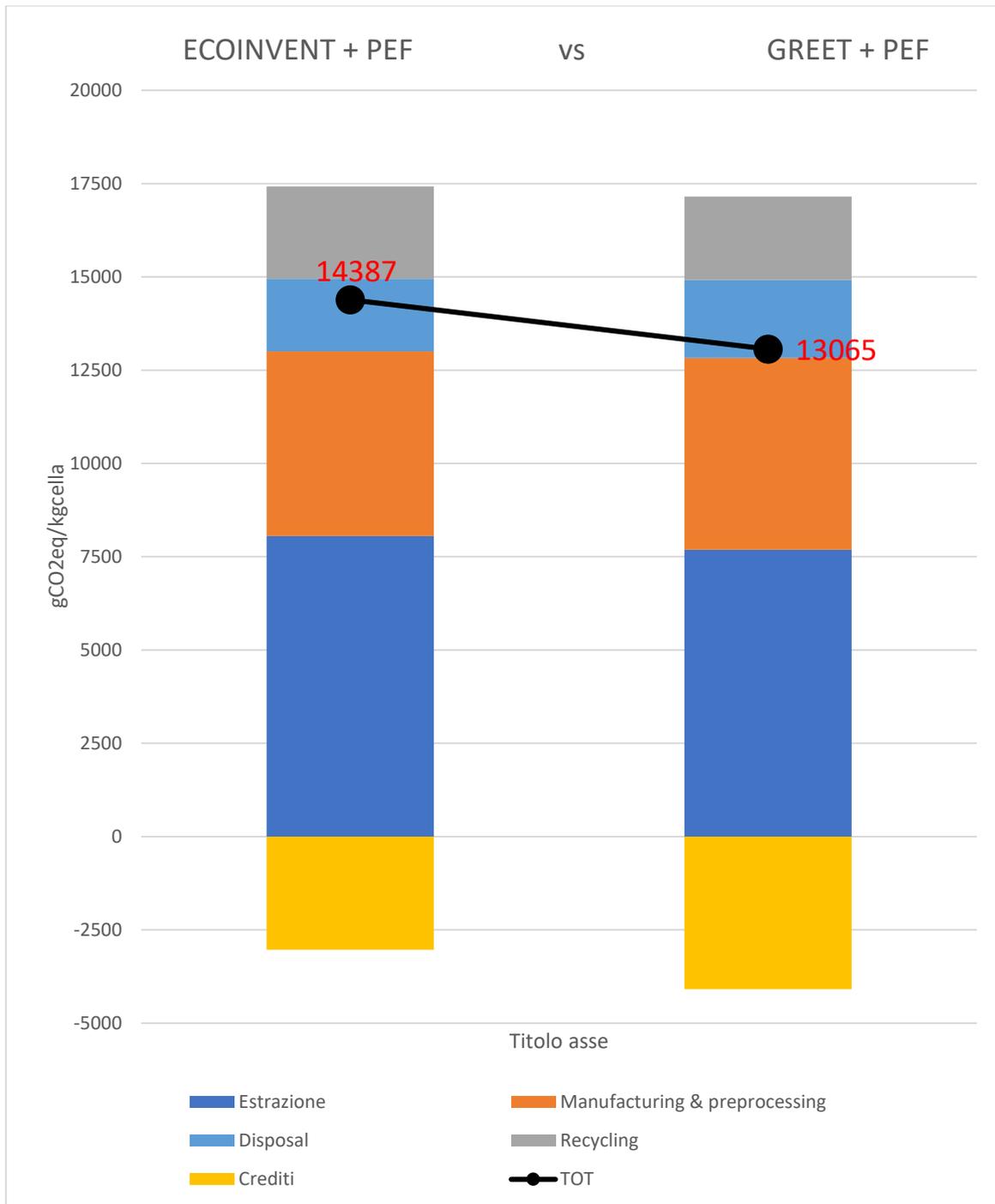


Figura 27

Si osserva che la fase di estrazione è quella che incide di più nell'impatto complessivo della batteria. I valori complessivi si attestano sui 13/14 kg con una variazione del 9% del database GREET rispetto al database Ecoinvent. I crediti usando il database GREET sono maggiori e questi abbassano il valore delle emissioni sul totale della batteria. Usare il database GREET o il database porta piccole variazioni in termini di emissioni di CO2.

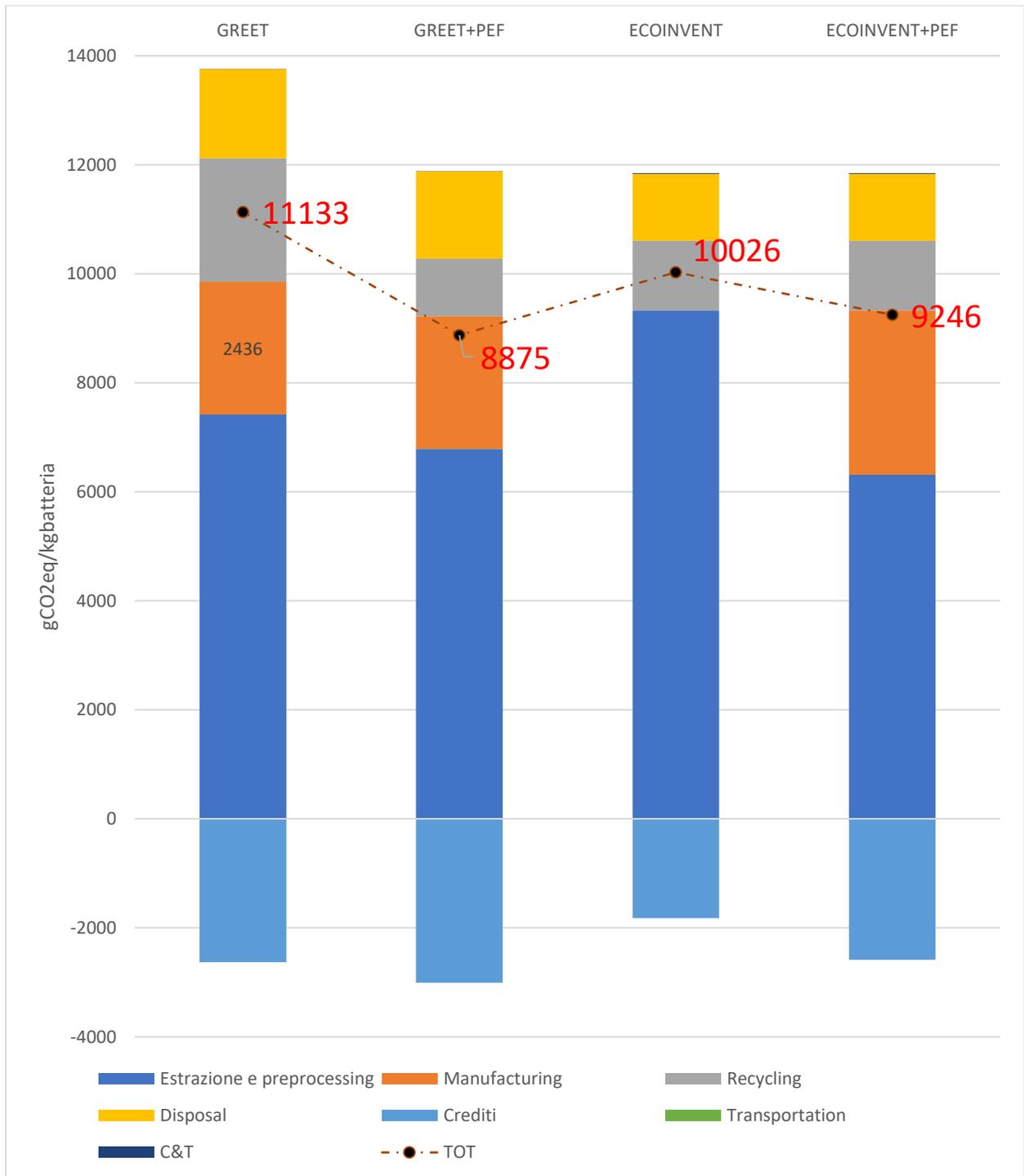


Figura 28. Emissioni della sola celle nella batteria al variare del modello e del database.

Nella Figura 28 si osserva l'impatto delle sola celle in una batteria espressa in gCO₂/kgbatteria che varia al variare del database e del metodo impiegato. L'applicazione della PEF CFF porta a un incremento dei crediti rispetto a quando questa non viene applicata e inoltre porta a una riduzione dell'impatto nella fase di estrazione.

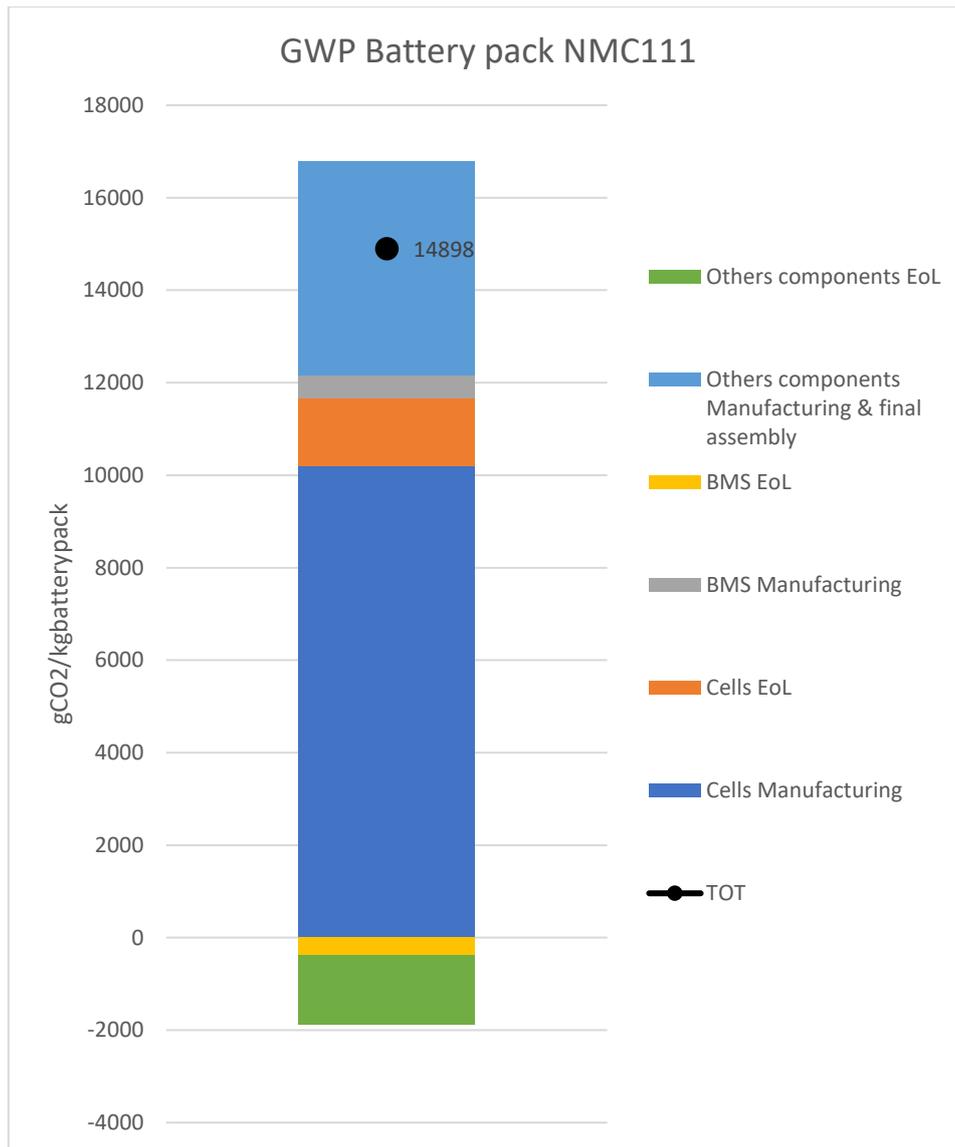


Figura 29. Emissione di un pacco batteria nell'intero ciclo di vita (escluso l'uso).

Nella Figura 29 sono riportati gli impatti della batteria NMC111 nell'intero ciclo di vita, esclusa la fase d'uso usando il database Ecoinvent e applicata la PEF. Per cells EoL si intende la somma degli impatti e dei crediti dovuti al riciclo e del disposal. Si osserva che l'impatto è dovuto per la maggior parte dalla fase di manufacturing della cella, il cui valore corrisponde circa al 69%. Lo smaltimento della batteria ha un impatto molto minore rispetto alla fabbricazione della batteria. Impatto elevato anche per la fabbricazione della BMS e di tutti i dispositivi ausiliari della batteria.

4. Fase di fine vita del veicolo

Secondo ACI, al 2018 il parco veicoli in Italia è costituito da 51'682'370 veicoli di cui 4'130'291 sono autocarri per il trasporto merci. Alcuni di questi veicoli raggiungono ogni anno la fine vita: al 2016, secondo ISPRA, l'istituto italiano per la protezione dell'ambiente, il numero di veicoli che hanno raggiunto la condizione di fine vita (EIV End-of-life Vehicle) è pari a 1'086'425, generando una quantità di rifiuti da smaltire considerevole pari a 1'086'425 tonnellate in Italia.

In ambito europeo, si osserva che il 78% dei veicoli a fine vita è generato dai primi sei Paesi come indicato nella figura seguente [20].

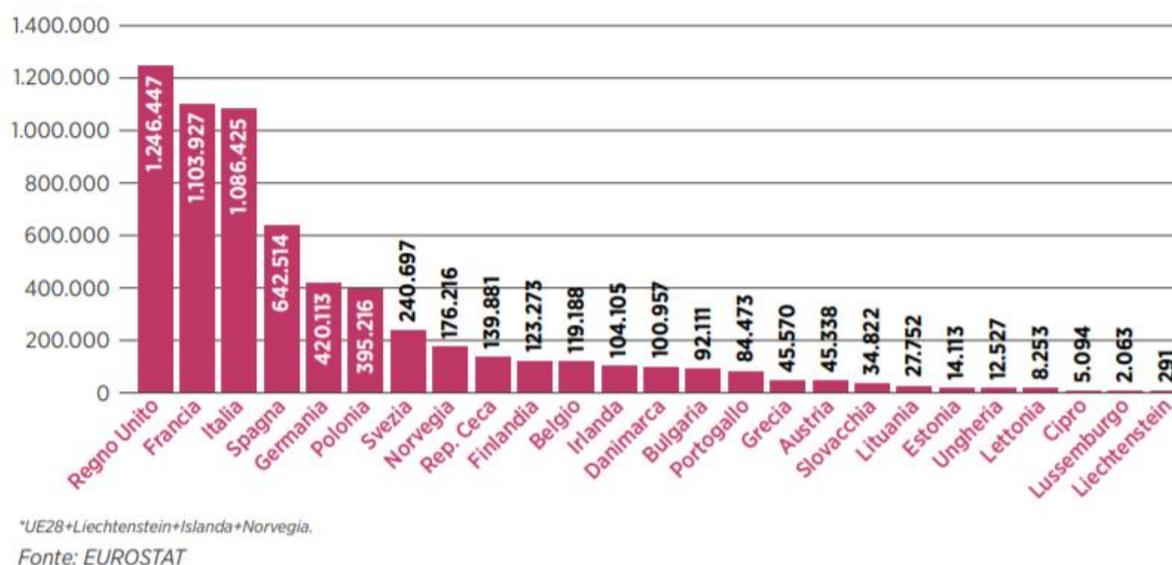


Figura 30. Tonnellate di rifiuti dei veicoli fuori uso.

La gestione dei veicoli a fine vita è regolamentata a livello europeo con la Direttiva 2000/53/CE, recepita in Italia dal Decreto legislativo 209/2003. La misura contenuta nella direttiva ha lo scopo di gestire i rifiuti provenienti dai veicoli giunti al loro termine e promuovere il riciclo, riuso e reimpiego delle parti del veicolo allo scopo di migliorare la qualità dell'ambiente e ridurre al minimo l'impatto ambientale relativo allo smaltimento. La norma è applicata per le categorie di veicoli più presenti nel parco veicolare europeo, le categorie N1 e M1, ossia autocarri adibiti per il trasporto merci di massimo 3.5 tonnellate di peso e autoveicoli per il trasporto di massimo 8 persone escluso il conducente. Prevede che entro il 1° gennaio 2015 gli stati membri raggiungano un tasso di reimpiego e riciclo del 85% e un tasso di reimpiego e recupero del veicolo pari al 95% rispetto al peso medio del veicolo e per anno. Al massimo il 10% del peso del veicolo può essere usato per il recupero energetico. Per "reimpiego", si intende una serie di minime operazioni necessarie perché le componenti del veicolo smaltito sono utilizzati per lo stesso scopo per cui sono state progettate e possano essere usate per la fabbricazione di un nuovo veicolo. Il "riciclaggio" comprende una serie di trattamenti sul componente che modificano drasticamente la forma e la geometria del veicolo allo scopo di generare materiali riutilizzabili per la produzione dello stesso o di un diverso prodotto. Per "recupero" si intende una serie di operazioni

escluso il reimpiego e il riciclaggio che evitano che il componente vada alla discarica, come per esempio il recupero energetico. Al 2016 il tasso medio europeo di reimpiego e riuso del veicolo è pari al 93,6% mentre il tasso medio europeo di reimpiego e riciclo si attesta al 87,8%. L'Italia al 2016 non ha raggiunto l'obiettivo posto per il 2015: il tasso italiano di reimpiego e riciclo è pari a 82,5% mentre il tasso di reimpiego e riuso è pari al 82,6%. Considerato questo aspetto ci si aspetta in Europa una tendenza verso il reimpiego e riuso di tutti i componenti.

L'allegato V della direttiva 2005/64/EC elenca alcuni componenti dei veicoli fuori uso che non possono essere riutilizzati in un nuovo veicolo. Questi sono:

- gli air-bag,
- i gruppi automatici, o non automatici, delle cinture di sicurezza,
- sedili (solo se sono incorporati nel sedile ancoraggi delle cinture di sicurezza e/o gli air-bag),
- bloccasterzi sulla colonna dello sterzo,
- immobilizzatori compresi transponder e unità di controllo elettroniche,
- sistemi di post-trattamento delle emissioni,
- silenziatori del tubo di scarico.

Il D. Lgs 152/2006 dispone lo smaltimento seguendo le linee del D.Lgs 209/2003 anche per i veicoli N2 a cui appartiene il veicolo analizzato in questa trattazione.

1. Il processo di smaltimento del veicolo

Il processo di smaltimento del veicolo è costituito da diverse fasi ed è stato modellato in base alla letteratura scientifica disponibile [21] [22] [23] e in base alle direttive europee. La prima parte dello smaltimento del veicolo a fine vita prevede le seguenti fasi:

1. La fase di trasporto del veicolo verso il centro di riciclaggio,
2. La fase di de-pollution,
3. La fase di smantellamento e separazione delle componenti,
4. La fase di frantumazione, che genera l'ASR ossia il residuo del veicolo frantumato,
5. Eventuali trasporti del residuo.

Si suppone che lo smaltimento del veicolo avvenga in Europa. Per ogni componente/materiale rimosso dal veicolo sono presenti o possono essere presenti uno o più scenari possibili. Nello schema della prima parte dello smaltimento, indicato nella figura seguente, viene quindi richiamata con una freccia lo scenario scelto.

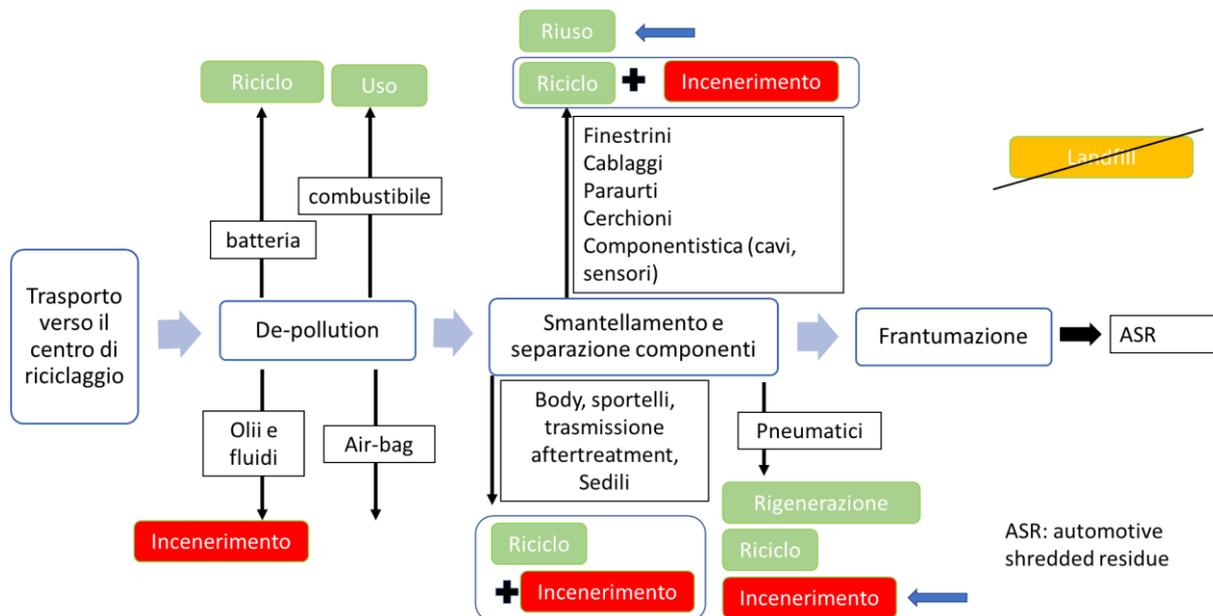


Figura 31. Prima parte dello smaltimento

Una volta conferito il veicolo in un centro di riciclaggio, nella fase di de-pollution vengono rimossi tutte le componenti che possono essere pericolose per la salute dell'uomo o possono creare gravi danni ambientali, come l'olio dei freni, il combustibile, la batteria ed eventualmente l'airbag.

Nella fase di smantellamento e separazione delle componenti, tutte le parti del veicolo che presentano un elevato valore economico vengono rimosse dal veicolo. Una parte di questi componenti viene

reimpiegata per la fabbricazione di un veicolo nuovo e una parte di questi subiscono un trattamento per estrarre i materiali di maggior pregio e la parte rimanente prosegue nel camino di riciclo.

Sono quindi qui sottoindicati i componenti estratti nelle varie fasi.

Fase	Componente	Destino
De-polluting	Batteria al Piombo	Riciclata.
	Batteria NMC111	Riciclato. La modalità è descritta nei capitoli precedenti.
	Combustibile	Riusato nella fase d'uso del veicolo.
	Olio motore, Olio dei freni, Liquido refrigerante, Olio del cambio	Incenerito per produrre energia termica ed elettrica.
Smantellamento e separazione delle componenti	Pneumatici	Triturato e incenerito per produrre energia termica ed elettrica.
	Specchietti retrovisori	Riusati nella fase di manufacturing del veicolo. Subiscono leggere o nessuna modifica.
	Cavi	
	Volante	
	Sensori	
	Cerchioni	
	Powertrain elettrico (motore elettrico e converter)	Vengono estratti i materiali di maggior pregio, quali alluminio, acciaio, rame che vengono mandati al riciclo. Il resto va nella fase successiva.
	Trasmissione meccanica	Vengono lasciati scarni, privi di qualsiasi componente. Vengono mandati a riciclo.
	Body	
	Sportello	
	Motore termico	
Sistema aftertreatment	Vengono estratti i materiali di maggior pregio mentre il resto passa nella fase successiva.	

Tabella 22. Destino dei componenti

Il veicolo analizzato nella motorizzazione elettrica presenta un motore a induzione, tre on board charger (2 da 3.5 kW e uno da 22 kW) e un inverter. Come indicato nella Tabella 22, il motore elettrico viene disassemblato in modo da recuperare il rame dagli avvolgimenti di statore, l'alluminio e il ferro dal rotore. Essendo un motore a induzione e non a magneti permanenti, non sono presenti le terre rare, ad alto valore economico. I convertitori elettronici di potenza invece sono costituiti da un case in alluminio e da semiconduttori in rame. [24]

Gli pneumatici invece vengono rimossi per essere tritati e impiegati nel recupero energetico mentre tutta la componentistica viene reimpiegata nella fase di fabbricazione. Il body, ossia lo chassis

dell'autoveicolo, gli sportelli e tutte le parti in acciaio di grosse dimensioni, vengono private dei componenti aggiuntivi. In questo modo è possibile smaltirli nella filiera dell'acciaio.

Le parti rimanenti del veicolo invece vengono frantumate con un martello per generare l'ASR o automotive shredded residue. Si osservi che tutti i componenti vengono riciclati o inceneriti e nessun componente è destinato alla discarica.

L'ASR subisce un ulteriore trattamento allo scopo di riciclare più materiale possibile. L'ASR è costituito da diverse tipologie di materiali, quali materiali ferrosi e non ferrosi, plastiche, gomma e infine fibre e tessuti. Un classificatore ad aria, dispositivo che permette di separare i materiali che costituiscono l'ASR, separa la parte leggera dalla parte pesante dell'ASR. Il dispositivo, alimentato dall'alto, è costruito in modo che un flusso d'aria spinga verso l'alto i rifiuti leggeri verso l'alto e questi cadono su piatti posti lateralmente mentre i rifiuti pesanti cadono in fondo. La parte leggera costituisce in genere il 75% del ASR mentre la parte pesante il rimanente 25%. Dalla parte leggera, chiamata anche car fluff, possono essere recuperare alcune materie plastiche che sono caratterizzate dall'essere sufficiente "pulite", ossia le particelle del residuo leggere prevalentemente costituite da una tipologia di materiale. Alcuni materiali plastici come PP, PE, ABS possono essere recuperati [22] [21].

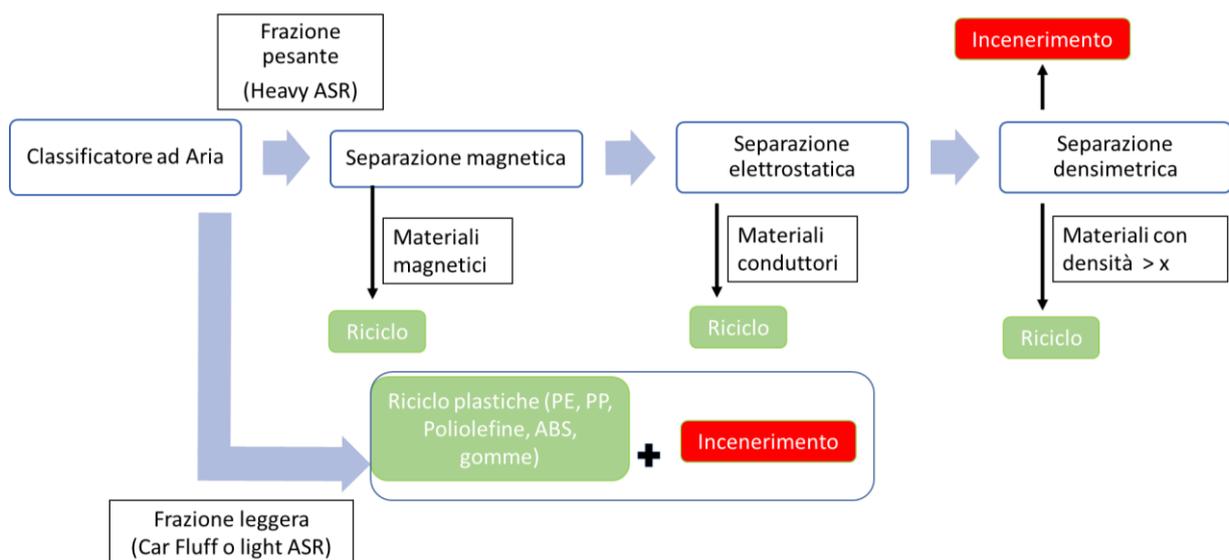


Figura 32. Riciclaggio del ASR

La frazione pesante è invece costituita da materiali metallici. Questi subiscono dei trattamenti di separazione magnetica con un magnete per separare i materiali ferrosi dai materiali non ferrosi a cui segue un trattamento di separazione elettrostatica per separare i materiali conduttori da quelli non conduttori e infine facendo una ipotesi sulla densità dei materiali ferrosi riciclabili si applica una separazione densimetrica per separare questa tipologia di materiali. Il resto dei materiali viene mandato in incenerimento. [25]

2. Impatto ambientale dello smaltimento del veicolo

I componenti che costituiscono il veicolo quindi sono stati classificati in base al destino ultimo. Sono state considerate le seguenti pathway per il veicolo.

Elenco possibili destini
Riciclaggio di acciaio
Riciclaggio di alluminio
Riciclaggio di polipropilene
Riciclaggio di nickel
Riciclaggio di piombo
Riusato
Riciclaggio di rame
Tattamento dispositivi elettrici
Tattamento batteria
Tattamento batteria NMC111
Incenerimento di gomma
Incenerimento di materiali non ferrosi
Incenerimento di rifiuto pericoloso (olii)
Incenerimento di alluminio
Tattamento del sistema aftertreatment
Incenerimento di materiali plastici

Tabella 23. Elenco delle pathway considerato

Per ogni componente e materiale è stato assegnato un destino ultimo secondo il processo di riciclaggio esposto nel capitolo precedente. Nel modello, essendo il polipropilene il materiale plastico presente in maggior quantità e il suo riciclaggio l'unica pathway possibile nel database EF, è stato considerato come l'unica materiale plastico che viene riciclato nel veicolo mentre tutti gli altri materiali plastici vengono inceneriti. Si suppone che tutto l'acciaio, tutto l'alluminio, tutto il rame, tutto il nichel e tutto il piombo vengono riciclati. I materiali non ferrosi vengono bruciati così come olii motore, refrigerante, ecc.

Come nel caso della batteria, anche in questo caso è stata applicata la PEFCR Formula per la valutazione dell'impatto nel fine vita del veicolo e nell'estrazione.

2.1. SCELTA DEI PARAMETRI R1, R2, R3 DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

Il fattore R1 rappresenta la quota parte di materiale riciclato dal veicolo. Per la valutazione si è seguito il seguente schema.



Figura 33. Schema per la scelta dei parametri R1,R2, R3.

Il valore di R1 in questo caso è fornito dal progetto relativo a [1]. I valori scelti sono i seguenti

Materiale	R1
Acciaio	0,4
Alluminio	0,5
Piombo	0,6
Nichel	0,4
Rame	0,3
Polipropilene	0

Tabella 24. Valori di R1 considerati.

Il valore di R2 è legato alla quota parte di materiale riciclabile ed è legata all'efficienza del processo. I valori di R2 considerati sono elencati nella seguente tabella e secondo la procedura della Figura 33 sono stati ottenuti dalla PEF in conseguenza della indisponibilità di altri dati.

Materiale	R2	Applicazione
Acciaio	0,9	appliances – sheet
Alluminio	0,9	automotive
PP	0*	material
Nichel	0*	(non è presente nella lista)
Piombo	1	lead-acid batteries
Rame	0,95	electrical applications (cables)
PE	0,7	PE-HD uninterruptible power supply (UPS)

Tabella 25. Valori di R2 considerati.

I valori di R3 considerati sono pari a 1 per tutti i materiali che vanno in incenerimento.

2.2. SCELTA DEI PARAMETRI A, B, Q_{SIN}/Q_P , Q_{SOUT}/Q_P

Per la scelta dei parametri A, Q_{sout}/Q_p è stata adottata la stessa linea del calcolo della batteria (vedi capitolo 3.3.5). Il fattore B come suggerito dalla PEFCR deve essere posto pari a 0 mentre il rapporto di qualità del materiale riciclato presente nel veicolo rispetto al materiale vergine è stato posto uguale ai valori di Q_{sin}/Q_p .

2.3. RISULTATI DELLA FASE DI SMALTIMENTO

Sono riportati nel grafico seguente i risultati della fase d'uso usando diversi database e non applicando la PEF. Si osserva che in genere dal punto di vista delle emissioni di CO2 conviene smaltire un veicolo diesel piuttosto di un veicolo BEV. Le variazioni dei due database sono elevate intorno al 30%; implica che la scelta del database è importante nella valutazione dei crediti. Usando infatti il database EF i crediti risultano essere maggiori. I crediti sono dovuti all'uso evitato di un materiale: l'acciaio essendo il materiale maggiormente presente nel veicolo, è anche quello che mi da un credito maggiore mentre variazioni, anche non eccessive della percentuale di alluminio nel veicolo, porta a variazioni elevate nel credito dovuto al riciclaggio dell'alluminio.

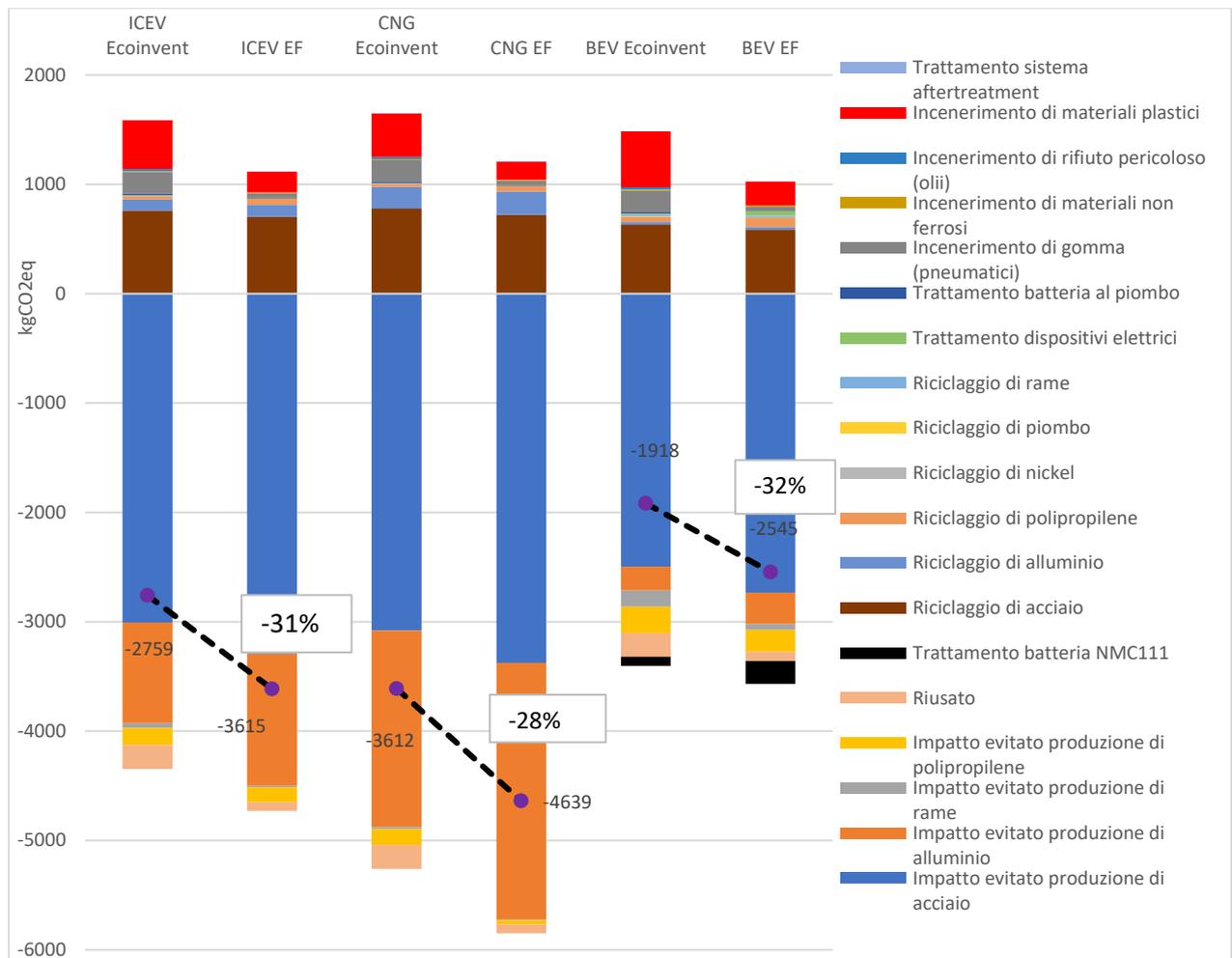


Figura 34. Risultati End of Life veicoli

Applicare la PEF comporta una riduzione del credito a fine vita per il veicolo CNG e per il veicolo ICE. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che nella PEF i termini aggiuntivi portano a uno scalamento dell'impatto a fine vita di circa il 20% per i metalli e circa il 50% per le plastiche. Il veicolo BEV ha un comportamento diverso per via di una diversa composizione dei materiali; il veicolo ha un peso maggiore per via del powertrain elettrico e per via della batteria ma una quantità di acciaio inferiore. Nel caso del BEV si osserva che il credito a fine vita che tende ad aumentare.

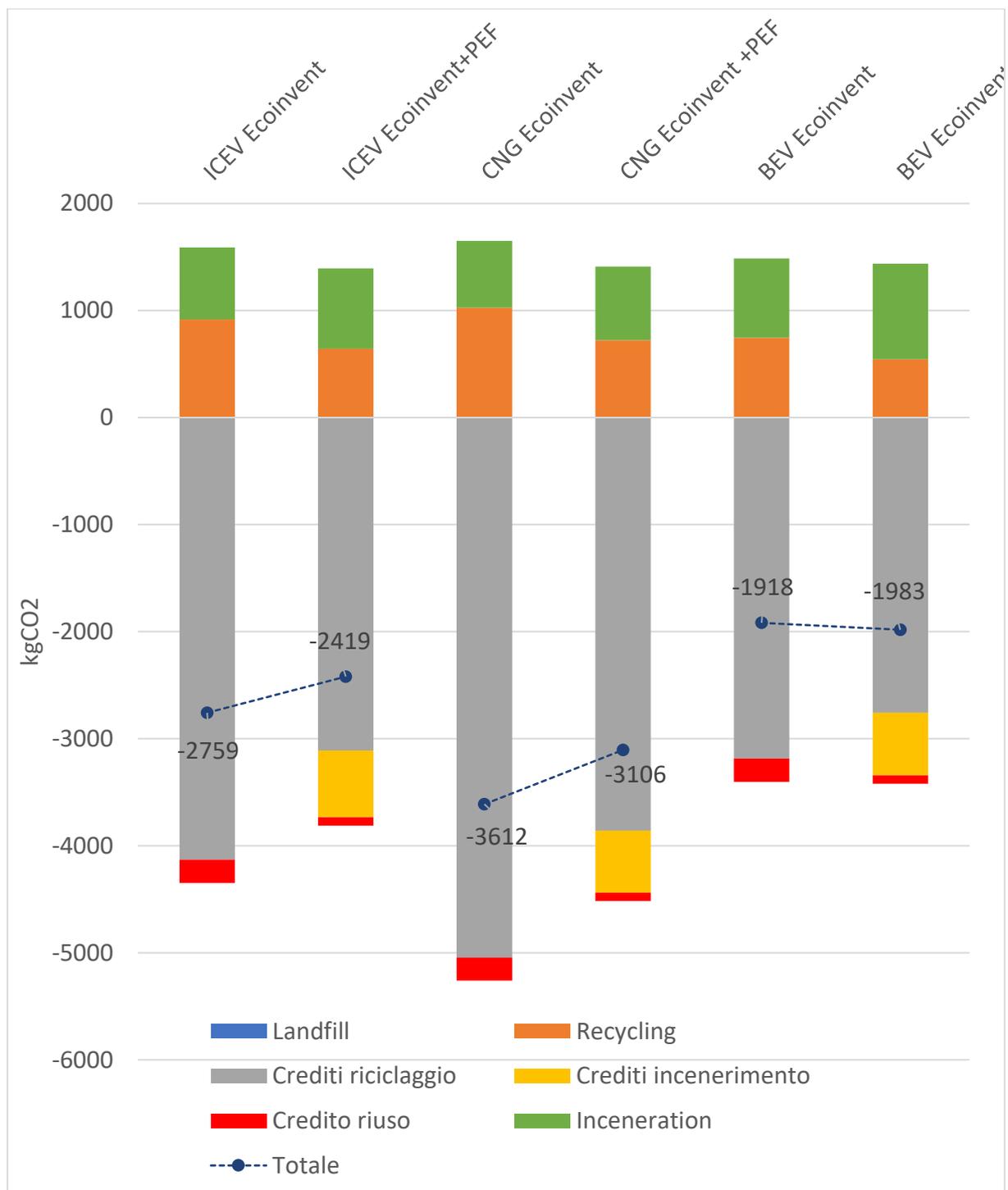


Figura 35. Risultati con e senza l'applicazione della formula circolare

Ci si potrebbe chiedere qual è il contributo della batteria nel credito a fine del veicolo. Indicato nella Figura 36 è riportato in percentuale il contributo della batteria nello smaltimento del veicolo fatta 100 la somma della parte positiva degli impatti. Si osserva che il contributo della batteria nel riscaldamento globale è trascurabile mentre il credito maggiore lo si ha per le categorie di impatto acidificazione, ossidazione fotochimica ed eutrofizzazione.

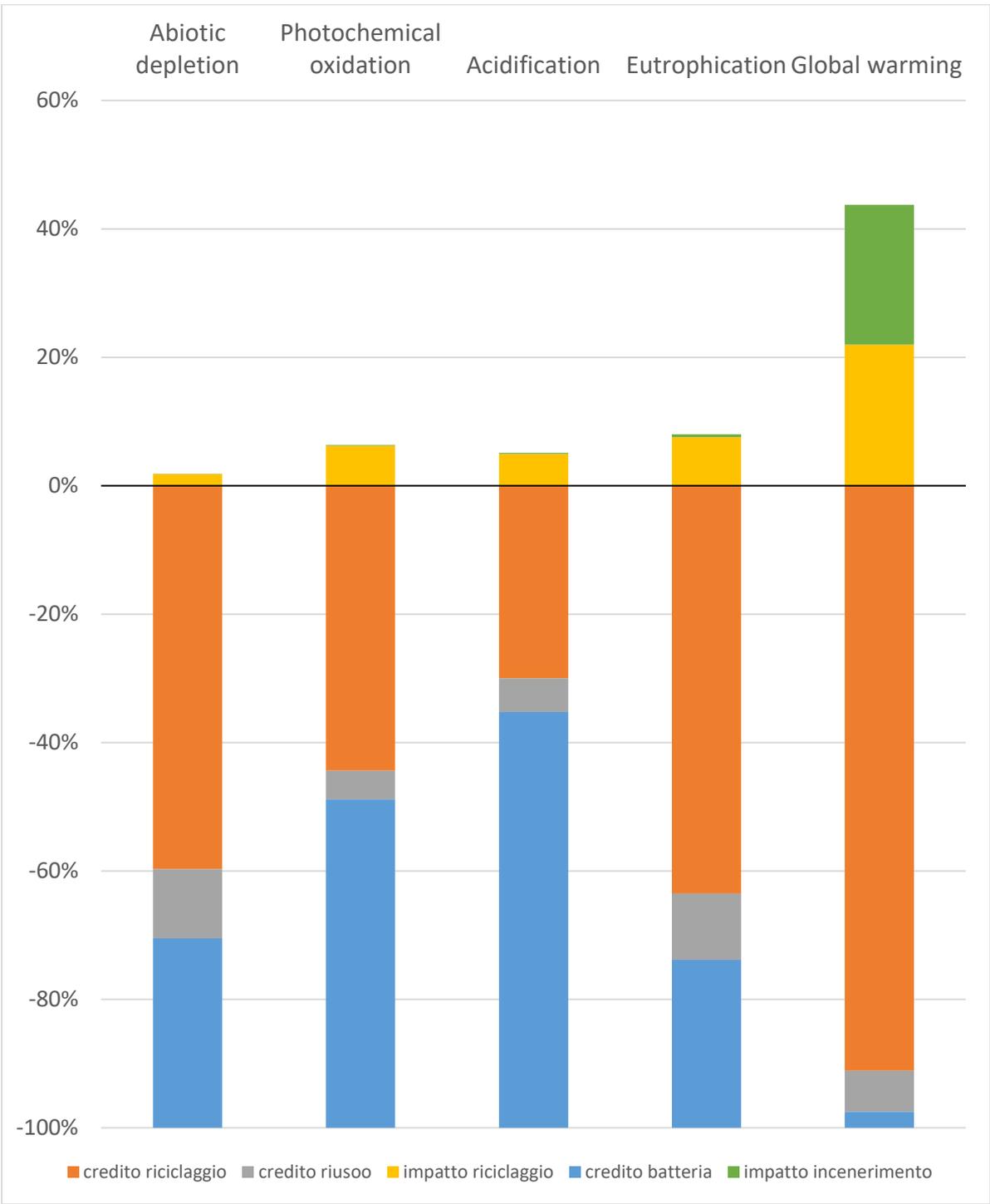


Figura 36. Contributo nella batteria nel credito finale.

5. Risultati sull'intero veicolo e conclusioni

Sono qui riportati i risultati sull'intero veicolo considerata la missione M1 e al variare del powertrain e della modalità di calcolo delle emissioni a fine vita. Come mix energetico è stato scelto il mix italiano.

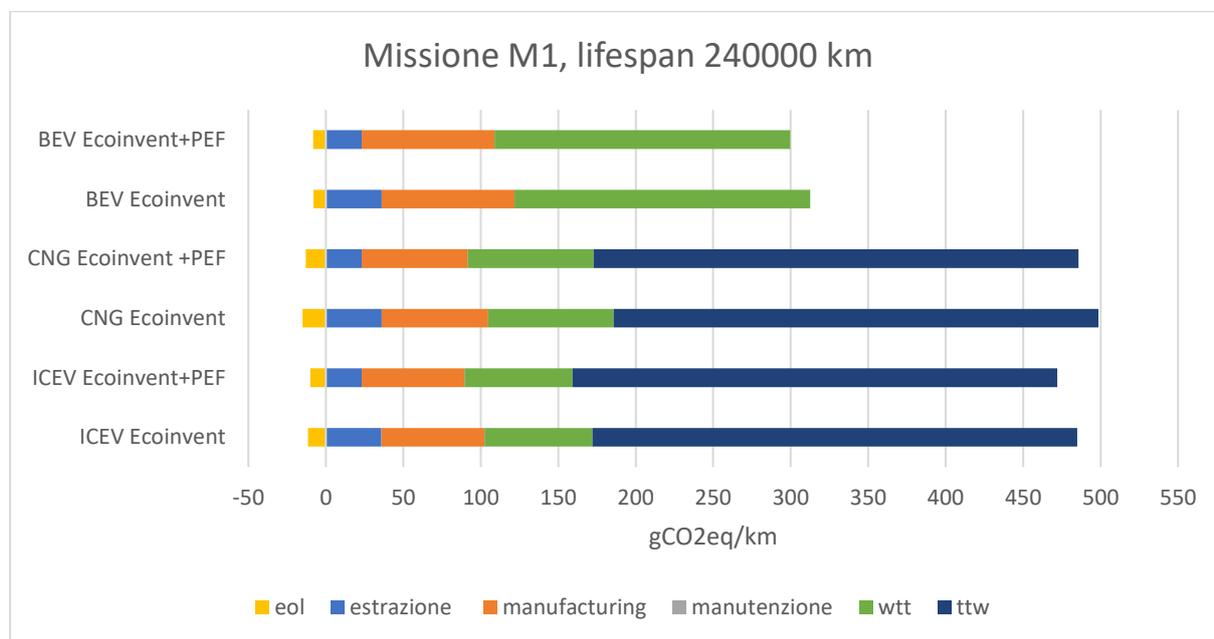


Figura 37. Impatti a fine vita, emissioni di CO2

Complessivamente nella Figura 37 si osserva che il veicolo elettrico presenta un impatto ridotto rispetto al veicolo diesel e al veicolo a gas naturale. Produrre un veicolo elettrico ha un impatto maggiore rispetto a produrre un veicolo diesel o a gas naturale per via della produzione della batteria e del powertrain elettrico. Le emissioni del veicolo elettrico della fase d'uso sono ovviamente solo ttw (tank-to-wheel), ossia dal pozzo al serbatoio e legate al mix energetico, in questo caso medio europeo.

Si può inoltre osservare che il credito dovuto al riciclo è intorno ai 10gCO2/km, e implica una leggera riduzione delle emissioni sul totale. Adottare la formula circolare porta a una riduzione del credito nella fase di fine vita del veicolo diesel e CNG ma anche a una riduzione dell'impatto nella fase di estrazione. Quest'ultima riduzione prevale sulla prima e porta a una riduzione complessiva dell'impatto. Per quanto riguarda il veicolo elettrico, si osserva un aumento del credito di fine vita di decimi di grammi dovuto probabilmente alle caratteristiche costruttive del veicolo e ai materiali impiegati.

Nella pagina seguente è riportato l'impatto complessivo del veicolo per le altre categorie di impatto.

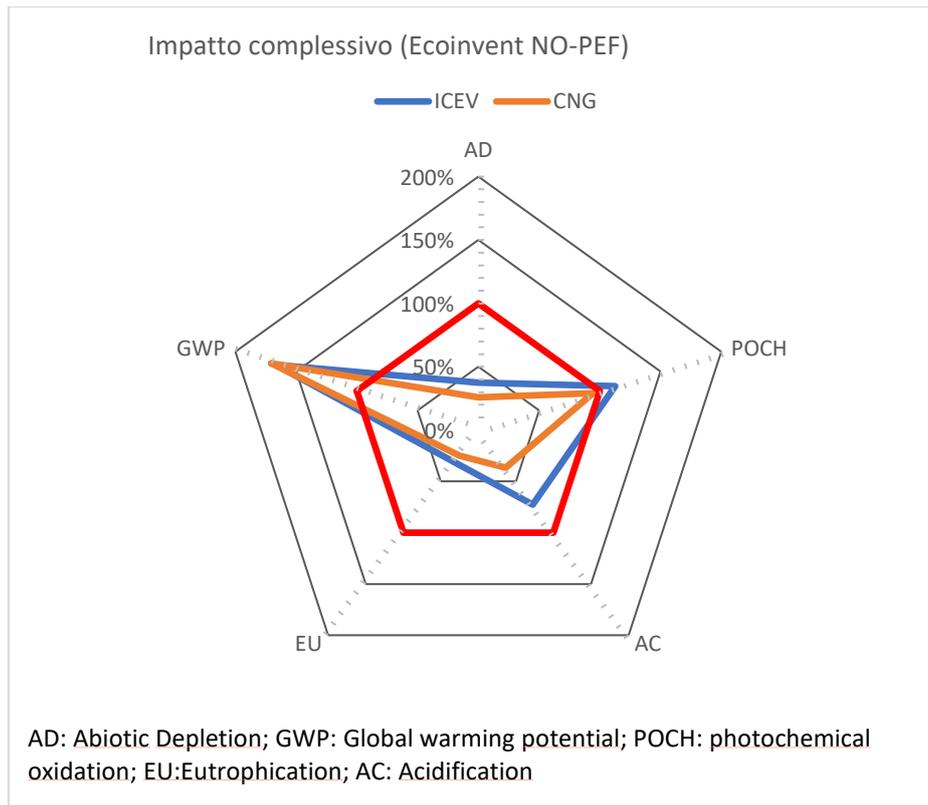


Figura 38. Impatti nelle altre categorie di impatto

Nella Figura 38 si osserva che fatto 100 l’impatto del veicolo elettrico, il veicolo diesel e CNG si comportano peggio nella categoria di riscaldamento globale mentre per le altre categorie di impatto tutti è il veicolo elettrico quello a comportarsi peggio.

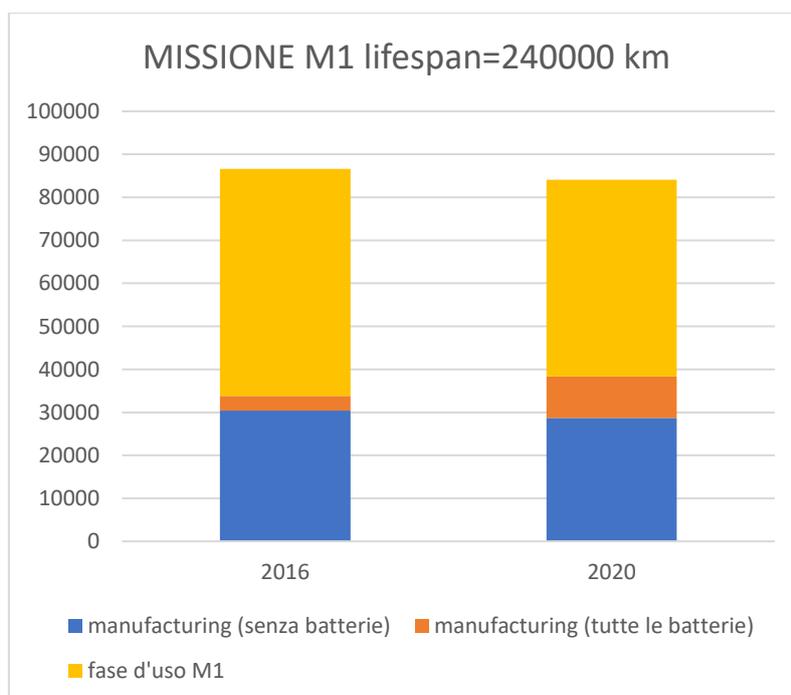


Figura 39. Impatto della batteria nel veicolo (esclusa EoL)

Nella Figura 39 è riportato l'impatto della batteria nella fase di manufacturing, confrontando il valore relativo al progetto del 2016 (ZEBRA) con il valore della batteria NMC111. Pur essendo la produzione della batteria agli ioni di litio più impattante, si osserva che un veicolo con una batteria agli ioni di litio ha un impatto minore rispetto a un veicolo a batteria zebra per via soprattutto della mancanza di una gestione termica impattante.

In conclusione, si può affermare:

- Il veicolo elettrico ha comunque una emissione di CO₂ più bassa rispetto agli altri veicoli se si considera l'intera vita, incluso lo smaltimento;
- Se si applica o se non si applica la PEF, il credito dovuto al riciclaggio è comunque molto basso, intorno ai 10gCO₂/km;
- La batteria ha una importanza non trascurabile nel credito in alcune categorie di impatto;
- La batteria agli ioni di litio è più impattante in termini di emissioni di CO₂ rispetto a una batteria ZEBRA, ma complessivamente il veicolo ha un impatto minore.

6. Ringraziamenti

Vorrei ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato alla stesura della tesi. Ringrazio anzitutto il prof. Ezio Spessa, per avermi dato la opportunità di approfondire tematiche molto attuali e allo stesso tempo di proseguire il percorso universitario, sebbene la situazione di emergenza sanitaria in corso.

Ringrazio il prof. Giovanni Dotelli per la sua disponibilità, mostrata fin da subito, per l'attenzione dimostrate lungo il lavoro e la fiducia verso i miei confronti oltreché a tutti i preziosi consigli dati.

Un ringraziamento speciale ad Antonella Accardo e Marco Musa che in questo lavoro hanno avuto il ruolo fondamentale di accompagnarmi passo passo dandomi gli spunti giusti. Mi hanno permesso di lavorare al loro fianco virtuale e non mi hanno mai fatto mancare il loro sostegno, specialmente nella parte finale del lavoro.

Ringrazio IVECO e Cnh Industrial e in particolare l'ingegner Marco Aimo Boot, sia per i dati forniti sia per avermi comunque dato l'occasione di intraprendere un tirocinio internamente.

Ai miei genitori per essere sempre stati un sostegno economico ma soprattutto emotivo e morale. Grazie a loro ho potuto percorrere questo percorso di studi e concludere finalmente il cammino.

A Tore, mio fratello, e Mayra pronti ad ascoltarmi e a darmi consigli dico grazie. Maledetto quel viaggio a Verona e a Mantova!

A Gian, Katie e alla piccola Aurora, a quella parte della famiglia che vive negli States, il cui legame è rimasto saldo nonostante la distanza. Grazie. Prima o poi tornerò lì per vedere la mia nipotina.

Ringrazio le mie tre fedali Valentina, Paola e Albina, le amiche di una vita; ormai sta diventando sempre più difficile incontrarsi tutti insieme se non con le videochiamate.

Ringrazio a Tommaso, coinquilino, compagno di studi e di palestra, per tutte le uscite serali e per quei pomeriggi passati a chiacchierare. Anche da te prima o poi ci passo.

Grazie a tutte le persone che ho conosciuto a Torino dentro e fuori il Poli (Giuseppe Ruvolo, Salviani, Stefano, Magelli, Daniele Mannella e tutti gli altri) e ai miei amici con cui ho il piacere di scambiare quattro parole quando torno in Sardegna (Daniele, i Paoli, Luca e tutti gli altri).

Grazie!

Ah, dimenticavo. Un grazie a un amico, conosciuto a fine febbraio, il COVID19, per aver cambiato la vita a tutti!

7. Bibliografia

- [1] Marmioli, Venditti, Dotelli e Spessa, «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.
- [2] Ragone, «Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles,» SAE, 1968.
- [3] Pistoia, *Lithium-Ion Batteries: Advances and Application*, 2014.
- [4] Miao, Hynan, V. Jouanne e A. Yokochi, «Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,» *MDPI Energies Journal*, 2019.
- [5] Blomgren, «The Development and Future of Lithium Ion Batteries,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 164.
- [6] Delgado, «The future of vecto: CO2 certification of advanced heavy-duty vehicles in the European Union».
- [7] Ricardo Energy&Environmental, «Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through Life Cycle Assesment,» Brussels, Belgium, 2020.
- [8] C. Pillot, «The Rechargeable Battery market and main trends 2018-2030,» Avicenne energy.
- [9] J. T. Warner, «Lithium-Ion and Other Cell Chemistries,» in *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design : Chemistry, Components, Types and Terminology*, Elsevier Science & Technology.
- [10] «Is Li-Ion the Solution for the Electric Vehicle?,» [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_li_ion_the_solution_for_the_electric_vehicle.
- [11] Dai., Kelly, Dunn. e Benavides, «Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET® Model,» GREET, 2018.
- [12] Dunn, James, Gaines, Gallagher, Day e Kelly, «Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle».
- [13] «<http://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PVDF.html>,» [Online].
- [14] «<https://patents.google.com/patent/CA2259985A1/en>,» [Online].

- [15] J.-Q. Wang, C.-Y. S. Jian Sun, W.-G. Cheng e X.-P. Z. a. S.-J. Zhang, «Synthesis of dimethyl carbonate from CO₂ and ethylene oxide catalyzed by K₂CO₃-based binary salts in the presence of H₂O».
- [16] Kwade e Diekmann, *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*.
- [17] Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, R. e Serna-Guerrero, «A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective,» 2019.
- [18] Allacker, Mathieux, Manfredi, Pelletier, Camillis, Ardente e Pant, «Allocation solution for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives,» 2013.
- [19] Cusenza, Bobba, Ardente, Cellura e Di Persio, «Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles,» 2019.
- [20] Fondazione per lo sviluppo sostenibile, FISE UNICIRCULAR, Unione Imprese Economia Circolare, «L'Italia del riciclo,» 2019.
- [21] Cossu e Lai, «Automotive shredder residue (ASR) management: an overview.».
- [22] Cossu, Fiore, Lai, Luciano, Mancini, Ruffino, Viotti e Zanetti, «Review of Italian experience on automotive shredder residue characterization and management».
- [23] Vermeulena, V. Caneghema, Blocka, Baeyens e Vandecasteelea, «Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation».
- [24] Elwert, Goldmann, Römer, Buchert e Merz, «Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (hybrid) Electric Vehicle,» 2016.
- [25] «Unione Europea,» 2019. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica>.
- [26] Kurzweil, «Post-lithium chemistries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles—ion battery,» in *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, Bruno Scrosati et al, 2015, pp. 127-133.
- [27] «ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines».

- [28] «ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework».
- [29] ReCharge, «PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications».
- [30] Klöpffer e Grahl, Life Cycle assessment (LCA) A guide to Best Practice.
- [31] Pistoia e Liaw, Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety and Cost.
- [32] Raugeri e Winfield, «Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles».
- [33] Khodier, Williams e Dallison, «Challenges around automotive shredder residue production and disposal,» 2017.
- [34] Belbomm, Lewis, Bareel e Leonard, «Life cycle assessment of hybrid vehicles recycling: Comparison of three business lines of dismantling».
- [35] Ruffino, Fiore e Zanetti, «Strategies for the enhancement of automobile shredder residues (ASRs) recycling: Results and cost assessment,» 2013.
- [36] Dai, Kelly, Gaines e Wang, «Life cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications».
- [37] Argonne National Laboratory, «GREET Model: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model,» 2018.
- [38] Unione Europea, *Direttiva 2000/53/EC*.
- [39] Parlamento italiano, *Decreto Legislativo 209/2003*.
- [40] Unione Europea, *Direttiva 2005/64/EC*.