



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

*Studio e sviluppo di una metodologia semplificata per l'analisi di impatto ambientale di un Autonomous Mobile Robot*

*Studying and Development of a simplified methodology for the environmental analysis of an Autonomous mobile Robot*

Relatore:

Prof. Ing. **Michele Germani**

Tesi di Laurea di:

**Thomas Tarsi**

Correlatore:

Dott. **Luca Manuguerra**

Anno accademico 2021/2022



*Ad Annalisa*

---

*UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE*

*FACOLTA' DI INGEGNERIA*

*Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN) , Italy*

## Sommario

INTRODUZIONE.....	5
Capitolo 1 .....	6
LA MOBILITA' ELETTRICA NELL'INDUSTRIA 4.0 .....	6
1.1 Le Rivoluzioni Industriali.....	6
1.2 Industria 4.0 .....	7
1.2.1 Il ruolo del Governo italiano nell'Industria 4.0 .....	7
1.3 Panoramica dei veicoli elettrici industriali.....	9
Introduzione.....	9
1.3.1 Minibus Elettrici .....	10
1.3.2 AGV.....	10
1.3.3 AMR .....	10
Capitolo 2 .....	11
STATO DELL'ARTE LCA MOBILITA' ELETTRICA .....	11
2.1 Introduzione.....	11
2.2 Fasi della Metodologia LCA.....	14
2.3 Analisi LCA dei veicoli elettrici industriali.....	16
Capitolo 3 .....	22
METODOLOGIA PREDITTIVA SEMPLIFICATA PER L'ANALISI AMBIENTALE DI VEICOLI ELETTRICI .....	22
3.1 Scopo dell'Analisi.....	22
3.2 Linee guida modellazione .....	23
3.2.1 Modello Fase Material .....	24
3.2.2 Modello Fase d'Uso .....	26
3.2.3 Modello Fase Manutenzione.....	33
3.2.4 Modello Fase Fine vita.....	34
3.3 Software di programmazione .....	34
3.3.1 Excel.....	34
3.3.2 SimaPro .....	34
Capitolo 4 .....	36
CASO STUDIO: ANALISI PREDITTIVA LCA DI UN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT ..	36
4.1 Progetto E-mobots.....	36
4.2 Presentazione degli Assiemi .....	37

4.2.1 Assieme elettronica .....	37
4.2.2 Assieme Telaio .....	40
4.2 Analisi LCA predittiva semplificata.....	41
4.2.1 Descrizione dell'Analisi.....	41
4.2.2 Life Cycle Inventory (LCI).....	43
4.2.3 Valutazione degli Impatti (VdI).....	47
4.2.4 Interpretazione dei risultati.....	56
Capitolo 5 .....	57
CONFRONTO TRA ANALISI LCA.....	57
5.1 Elenco dei nuovi Assiemi .....	57
5.2 Confronti.....	58
Capitolo 6 .....	62
CONCLUSIONI.....	62
Bibliografia.....	63

# INTRODUZIONE

Lo scopo di questo lavoro è realizzare un'analisi di Life Cycle Assessment predittiva di un Autonomous Mobile Robot attraverso una metodologia semplificata.

L'Industria moderna risulta essere sempre più centrata sul modello di Industria 4.0 e sull'automatizzazione dei processi e dei macchinari.

Inoltre sfruttando le più moderne tecnologie e le innovazioni nel campo della sensoristica elettronica, la tendenza generale è quella di introdurre Robot intelligenti volti ad aiutare e semplificare il lavoro dell'uomo; l'obiettivo è sviluppare prodotti sempre più efficienti e meno impattanti a livello ambientale, da qui l'importanza di svolgere le analisi predittive di valutazione di impatto ambientale sull'intero ciclo di vita, la quale è molto utile in fase di progettazione per individuare gli aspetti che incidono di più sulle emissioni di CO<sub>2</sub> e sul consumo delle materie prime. Questo permetterà al progettista di individuare una soluzione alternativa meno impattante cambiando ad esempio i materiali e i processi produttivi.

Nel corso della trattazione verranno presentati i passaggi fondamentali della metodologia proposta, le ipotesi fatte e le modellazioni adottate nell'applicazione di tale analisi a un Autonomous Mobile Robot integrato con un braccio robotico.

Infine una volta ottenuti i risultati dell'analisi secondo le varie categorie di impatto ambientale, sarà realizzato un confronto con i dati ottenuti tramite un'analisi di impatto ambientale completa condotta a fine progettazione del prodotto. In questo modo sarà possibile individuare e valutare i cambiamenti del prodotto dal progetto fino alla sua realizzazione.

# Capitolo 1

## LA MOBILITA' ELETTRICA NELL'INDUSTRIA 4.0

### 1.1 Le Rivoluzioni Industriali

Il termine Industria 4.0 è legato alla trasformazione che sta vivendo l'industria nell'ultimo decennio ovvero la cosiddetta Quarta Rivoluzione Industriale, dove la prima è stata la celeberrima Rivoluzione Industriale che a fine '700 in Gran Bretagna ha visto per la prima volta nella storia l'introduzione di macchine volte a semplificare e velocizzare il lavoro degli uomini nei processi produttivi, in particolare l'applicazione della Macchina a vapore alle pompe idrauliche usate nelle miniere di carbone e ai telai delle fabbriche tessili.

La Seconda Rivoluzione Industriale è stata quella che a fine '800 ha visto l'introduzione di materie prime quali l'acciaio nel campo dell'edilizia civile, il petrolio e i suoi derivati nell'alimentazione dei motori a combustione interna, l'uso dell'elettricità in applicazioni come l'illuminazione e i motori elettrici, il tutto ha permesso il passaggio da un'industria manifatturiera alle prime produzioni di massa.

La Terza è avvenuta dopo la metà del '900 e ha permesso l'automatizzazione della produzione con macchinari in grado di lavorare da soli una volta impostati grazie al largo impiego dell'elettronica.

Dopo questa digressione storica passiamo a vedere più nel dettaglio in cosa consiste la Quarta Rivoluzione Industriale.

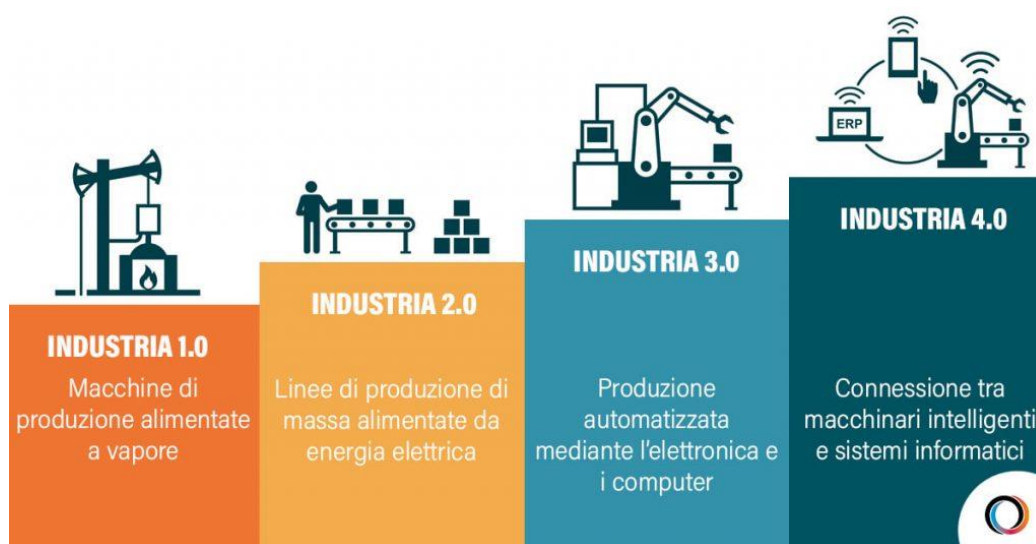


Figura 1. Confronto delle Rivoluzioni Industriali



## 1.2 Industria 4.0

Essa indica una tendenza dell'automazione industriale realizzata tramite l'integrazione delle più sofisticate tecnologie elettroniche ed informatiche per migliorare le condizioni di lavoro degli operai aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti.

In tutto il mondo le Aziende stanno gradualmente modernizzando il loro modo di fare produzione in modo da renderla flessibile e adattarla a ogni piccolo cambiamento in tempo reale grazie all'inserimento di macchinari automatizzati, sensibili e interconnessi tra loro, così da permettere l'integrazione e lo scambio di informazioni tra tutti gli attori del processo; ciò viene fatto ricorrendo alle tecnologie digitali disponibili sul mercato come l'analisi dei big data, la sicurezza informatica, le simulazioni dei processi, la realtà aumentata, l'Internet delle cose e la produzione additiva (Additive manufacturing) [1].

L'Industria 4.0 si sta dirigendo verso l'informatizzazione e l'automazione dei processi di produzione e di distribuzione: ad esempio, con particolare riferimento alla catena logistica, sempre più spesso la movimentazione dei materiali e dei dipendenti all'interno dell'azienda sta migliorando mediante l'utilizzo di veicoli a guida automatizzata [2].

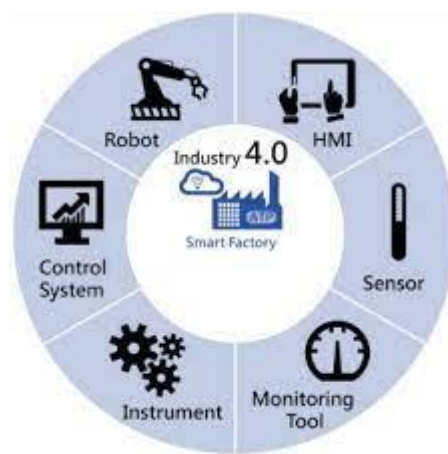


Figura 2. Tecnologie digitali impiegate nell'industria 4.0

### 1.2.1 Il ruolo del Governo italiano nell'Industria 4.0

A livello nazionale va evidenziato il ruolo del Governo italiano nel sostenere sin dai primi momenti la nuova rivoluzione industriale tramite l'adozione del "Piano Nazionale Industria 4.0"

nel 2016 da parte del Governo Renzi, Piano promosso dall'allora Ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda.

L'obiettivo del Piano era **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**:

- **Sostenere le imprese innovative in tutte le fasi del loro ciclo di vita,**

Supportando e incentivando le imprese che investono in beni strumentali nuovi, in beni materiali e immateriali (*software* e sistemi IT) funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale dei processi produttivi.

Riducendo la pressione fiscale per le imprese che investono nel futuro lasciando gli utili in azienda.

- **Favorire lo sviluppo dell'ecosistema nazionale dell'imprenditoria innovativa.**

Sostenendo le imprese che richiedono finanziamenti bancari per investimenti in nuovi beni strumentali, macchinari, impianti, attrezzature di fabbrica a uso produttivo e tecnologie digitali (*hardware* e *software*).

Incentivando il rafforzamento patrimoniale delle imprese italiane attraverso il finanziamento con capitale proprio, al fine di ottenere strutture finanziarie più equilibrate fra fonti e impieghi e fra capitale di rischio e debito, e quindi più competitive.

- **Diffondere una nuova cultura imprenditoriale votata alla collaborazione, all'innovazione e all'internazionalizzazione**

Stimolando la spesa privata in Ricerca e Sviluppo per innovare processi e prodotti e garantire la competitività futura delle imprese.

Promuovendo l'integrazione sussidiaria del *welfare* aziendale alle forme di *welfare* pubblico (previdenza complementare, sanità integrativa, ecc.).

Favorendo le forme di partecipazione organizzativa dei lavoratori.



**Figura 3. Copertina presentazione Piano Nazionale Industria 4.0**

Il secondo intervento per l'Industria 4.0 è stato promosso dal Governo Conte nel Dicembre 2019, con lo scopo di migliorare e potenziare alcuni aspetti della precedente riforma, in particolare **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**:

- Ampliare la platea dei potenziali beneficiari dei crediti d'imposta
- Maggiore attenzione alla Sostenibilità ambientale, all'innovazione, agli Investimenti Green e alle attività di design e ideazione estetica
- Sostegno alla formazione tecnologica del personale e alla Transizione digitale delle imprese

## **1.3 Panoramica dei veicoli elettrici industriali**

### **Introduzione**

Una soluzione per ridurre le emissioni di gas a effetto serra e per diminuire la dipendenza dai combustibili fossili è stata individuata nei veicoli elettrici a batteria (Battery Electric Vehicle — BEV) anche perché caratterizzati dalla possibilità di essere ricaricati mediante fonti rinnovabili. Grazie alla capacità di eliminare l'inquinamento dei fumi di scarico i BEV vengono chiamati anche veicoli a zero emissioni, e in particolare le industrie all'interno delle loro aziende si stanno dirigendo verso un sempre maggior impiego della mobilità elettrica, in particolare quella automatizzata, non solo per la movimentazione delle merci ma anche per lo spostamento dei dipendenti, ad esempio da un settore all'altro della fabbrica.

Infatti i sistemi a guida elettrica autonoma stanno aumentando sul mercato dal momento che offrono molti vantaggi rispetto ad altri sistemi di movimentazione dei materiali, come il funzionamento prevedibile, affidabile e automatico, l'agilità e la versatilità, la riduzione dei danni che potrebbero derivare dall'errore umano, la riduzione dei costi di gestione e di manutenzione e la movimentazione efficiente anche su lunghe distanze, con possibilità di operare 24 ore su 24, 7 giorni su 7 e la massima sicurezza contro gli infortuni [5].

Vediamo ora le principali tipologie di veicoli elettrici impiegati oggi dalle industrie

### **1.3.1 Minibus Elettrici**

Una tipologia di veicoli elettrici a batteria utilizzata nelle grandi industrie dove è necessario collegare due siti produttivi contigui è il Minibus Elettrico (o Shuttle); questo Minibus è una navetta dedicata sia al trasporto di persone che di merci su un'area vasta utile a collegare magazzini lontani tra loro.

La scelta di una navetta elettrica è anche dovuta alla sua sostenibilità: permetterà infatti di risparmiare sui costi di gestione delle movimentazioni, sfruttando la disponibilità di generatori elettrici fotovoltaici dell'azienda per la ricarica delle batterie.

### **1.3.2 AGV**

Una tipologia molto più diffusa di veicoli elettrici industriali dediti al trasporto merci intraziendale sono gli Automated Guided Vehicles, riassunti nella ben più nota sigla AGV.

Richiedono un grande investimento economico iniziale e vengono utilizzati in campo industriale per movimentare oggetti all'interno delle fabbriche: sono veicoli senza conducente e telecomandati, in grado di svolgere lavori ripetitivi e continui percorsi definiti, consentendo il trasferimento di unità di carico, o prodotti, da un punto di origine (carico) a un punto di consegna (scarico) in un tempo predefinito e costante [6]. Ogni veicolo è controllato da un software gestionale che gli assegna una missione, indicando il percorso e i tempi da rispettare.

Per navigare un AGV ha bisogno di essere condotto da cavi, bande magnetiche o sensori, che di solito richiedono estese (e costose) modifiche nella configurazione dell'impianto, durante le quali può essere necessario fermare la produzione. Un AGV si limita a seguire questi percorsi fissi, i quali richiedono ulteriori costi e nuovi cambiamenti all'impianto, nel caso in cui debbano essere cambiati. Inoltre può rilevare ostacoli sul suo tracciato, ma non può aggirarli, quindi si arresta semplicemente finché l'ostacolo non è rimosso.

### **1.3.3 AMR**

L'ultima tipologia di veicoli elettrici industriali impiegata nello spostamento delle merci, nonché la più sofisticata, flessibile ed economica è quella degli Autonomous Mobile Robot, abbreviata nella sigla AMR.

Un AMR è dotato di un'intelligenza indipendente e presenta molti vantaggi rispetto a un AGV poiché naviga usando delle mappe che possono essere caricate direttamente sul robot, o che questo costruisce autonomamente in loco grazie alla tecnologia di cui è dotato, basta impostargli le posizioni dei punti di carico e scarico; questi aspetti consentono una sua veloce adattabilità a differenti compiti da svolgere poiché è sufficiente una piccola e semplice riprogrammazione, cosa che invece non è così immediata

in un AGV, il quale al contrario durante il suo ciclo di vita difficilmente viene riprogrammato poiché non è economicamente conveniente.

Il sofisticato software di un AMR usa i dati forniti da videocamere, sensori e scanner laser montati sul robot per rilevare l'ambiente circostante e scegliere il percorso migliore verso il suo obiettivo. Funziona in modo completamente autonomo e, se muletti, bancali persone o altri ostacoli si trovano sul suo tragitto, l'AMR li aggira in tutta sicurezza, utilizzando il miglior percorso possibile. Tutto questo garantisce che il flusso di materiale rimanga puntuale, ottimizzando la produttività **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**



**Figura 4. Un AMR in funzione**

## Capitolo 2

# STATO DELL'ARTE LCA MOBILITA' ELETTRICA

## 2.1 Introduzione

Come già affermato precedentemente lo scopo di questo lavoro è condurre un'Analisi predittiva di valutazione dell'impatto ambientale sul ciclo di vita di un AMR, questo perché negli ultimi anni sta assumendo sempre più importanza il tema della Sostenibilità ambientale e quindi si rende necessaria l'adozione di strategie di Sviluppo Sostenibile come indicato nell'Agenda 2030 sottoscritta dall'Organizzazione delle Nazioni Unite; pertanto rientra in questo contesto il sempre maggior rilievo che stanno assumendo le Analisi LCA (Life Cycle Assessment, Valutazione del ciclo di vita) su

prodotti, materiali, processi, edifici civili, tanto da essere riconosciute dalla Commissione Europea come il miglior metodo per la valutazione degli impatti ambientali.

Procediamo ora con la descrizione di un'Analisi LCA.

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

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

Le normative di riferimento sono: la ISO 14040 del 2006 [8], che contiene informazioni su concetti e procedure dell'LCA e la normativa ISO 14044 sempre del 2006 [9], che definisce nel dettaglio la procedura da seguire per svolgere un'analisi LCA.

LCA può aiutare a:

- identificare opportunità per migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti nei vari punti del loro ciclo di vita;
- informare il progettista riguardo alle decisioni da prendere (ad esempio ai fini della pianificazione strategica, della definizione delle priorità, della progettazione o riprogettazione di prodotti o processi);
- selezionare gli indicatori pertinenti delle prestazioni ambientali, comprese le tecniche di misurazione, o nel marketing (ad esempio, implementare uno schema di etichettatura ecologica, presentare una dichiarazione ambientale o produrre una dichiarazione ambientale di prodotto).

L'elenco seguente riassume alcune delle caratteristiche fondamentali della metodologia di valutazione del ciclo di vita:

- l'LCA esamina in modo sistematico gli aspetti ambientali e gli impatti sui sistemi di prodotto, dall'acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale, in conformità all'obiettivo, al campo di applicazione e al grado di dettaglio definiti;

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

## 2.2 Fasi della Metodologia LCA

La metodologia dell'LCA definisce le quattro fasi di seguito specificate:

### 1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Si definiscono:

- a) in primo luogo, lo scopo dell'analisi (come ad esempio il carico ambientale di un determinato ecosistema, la valutazione di emissioni di CO<sub>2</sub> ecc.);
- b) poi l'unità funzionale, ovvero l'azione che sarà soggetta all'analisi. La funzione è dotata di unità di misura ed è il parametro di riferimento su cui si basa tutta l'analisi.
- c) le categorie di impatto ambientale, le metodologie di calcolo degli impatti, la qualità dei dati e le assunzioni fatte.
- d) Come ultimo si definiscono i Confini del sistema, ovvero le fasi che verranno incluse nell'analisi.

I Confini del sistema possono comprendere:

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





**Figura 5. Confini del Sistema**

## 2. LCI (Life Cycle Inventory):

Costituisce la fase di reperimento di tutti i dati necessari per lo svolgimento dell'analisi a seconda dell'obiettivo precedentemente definito.

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

- Considerazione dell'obiettivo.
- Preparazione della raccolta dati.
- Collezionamento dei dati (dall'azienda, dai clienti, dai fornitori, da letteratura).
- Validazione dei dati.
- Relazionamento dei dati all'unità funzionale.
- Raffinazione, se necessario (ad esempio per mancanza dati) dei confini del sistema.
- Revisione e ripetizione se necessario di alcuni passi.

## 3. Valutazione degli impatti:

Qui si determinano gli impatti ambientali dell'oggetto di valutazione. Questa fase è solitamente accompagnata da software commerciali. I risultati devono essere presentati in maniera pertinente e comprensibile.

#### 4. Interpretazione dei risultati:

Infine si analizzano i risultati finali anche attraverso confronti con risultati presenti in letteratura, in modo tale da redigere raccomandazioni indirizzate al progettista o in generale perseguire l'obiettivo per cui è stata svolta l'analisi.

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

### 2.3 Analisi LCA dei veicoli elettrici industriali

Per quanto concerne le Analisi LCA di veicoli elettrici in letteratura si hanno parecchi documenti sulle auto elettriche e il loro confronto con le auto a motore a combustione interna, mentre risultano esigue le analisi condotte sulla valutazione del ciclo di vita di veicoli elettrici industriali come gli AGV, a fine 2021 se ne contano appena 54 come riportano Roberta Stefanini e Giuseppe Vignali [10] nella loro ricerca iniziale prima di procedere con un'Analisi LCA di due AGV introdotti in un'industria alimentare che produce varie tipologie di carni stagionate.

I due ricercatori hanno condotto un'analisi comparativa dell'impatto ambientale di due diversi scenari nella logistica finale della linea di produzione: il primo analizza lo scenario passato quando la fabbrica impiegava tre carrelli elevatori guidati da operai per la movimentazione dei pallet su cui sono alloggiati le carni stagionate, mentre il secondo e attuale scenario è quello dove l'azienda ha sostituito i carrelli elevatori con due AGV e una stazione di controllo della forma e sagoma dei pallet per evitare che ci siano parti sporgenti.

- L'unità funzionale è il pallet, e in particolare il prelievo e la movimentazione di un unico pallet di prodotto finito dalla zona di fine produzione alla zona di spedizione, considerando anche le materie prime necessarie alla preparazione del pallet
- I confini del sistema dello studio usano un approccio gate-to-gate, cioè si considera una sola fase del ciclo di vita del prodotto e in particolare quella della logistica finale della movimentazione della carne stagionata imballata<sup>7</sup>
- Il software utilizzato per effettuare l'LCA è SimaPro 9.1
- Il metodo di calcolo di impatti più utilizzato è il ReCiPe
- Risorse, materie prime e la quantità di energia necessaria per la movimentazione e lo stoccaggio in magazzino e la successiva movimentazione verso l'area spedizione merci della unità funzionale precedentemente definita sono riassunti come segue (**Tabella 1**).

	Previous scenario (3 forklifts + manpower)	Current scenario (pallet AGV + trilateral AGV + control shape station)
<b>Pallet</b>	1 pallet 800×1200 mm	1 pallet 800×1200 mm
<b>Corrugated cardboard</b>	8 corrugated cardboard=960 g	1 corrugated cardboard= 120 g
<b>Stretch film</b>	LDPE film=0.28 kg	PLA film=0.20 kg
<b>Batteries</b>	Forklifts with lead-acid batteries were used, whose charge has a low efficiency, only 70% Battery life: 350 charge cycles	AGVs with lithium-ion batteries, more performing and with a significantly improved weight/capacity ratio Battery life: 4000 charge cycles
<b>Electricity</b>	Forklift: $19 \text{ kW} \times 5/60 = 1.583 \text{ kWh}$ Total energy of the three forklifts: $1.583 \times 3 = 4.75 \text{ kWh}$	AGV pallet: $10 \text{ kW} \times 10/60 = 1.66 \text{ kWh}$ Trilateral AGV: $15 \text{ kW} \times 7/60 = 1.75 \text{ kWh}$ Motorized roller conveyors and shape control: $8 \text{ kW} \times 3/60 = 0.40 \text{ kWh}$ Total energy = $1.66 + 1.75 + 0.40 = 3.81 \text{ kWh}$

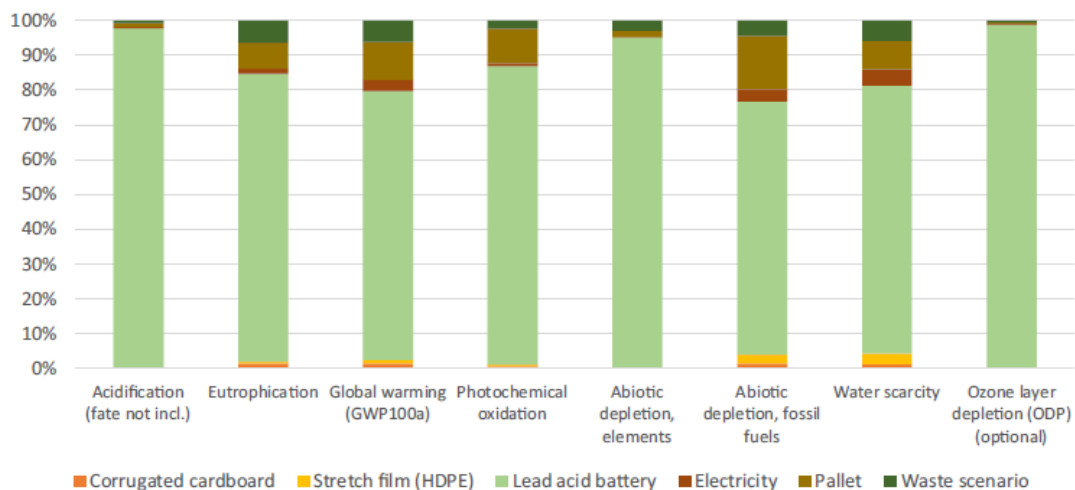
**Tabella 1. Analisi d’inventario dei due scenari**

- Considerando anche i rifiuti prodotti, la suddivisione in base al tipo di smaltimento di ciascun materiale è stato considerato, ed è stata stimata una distanza di 50 km dai siti di smaltimento.
- Le diverse percentuali delle tipologie di smaltimento sono state estrapolate dalle relazioni dei direttivi dei rispettivi consorzi:
  - il 25° Rapporto sulla raccolta, riciclo e recupero di carta e cartone da COMIECO [11],
  - il Bilancio di Sostenibilità 2019 di COREPLA [12],
  - la Relazione sui rifiuti urbani di Ispra Ambiente [13].

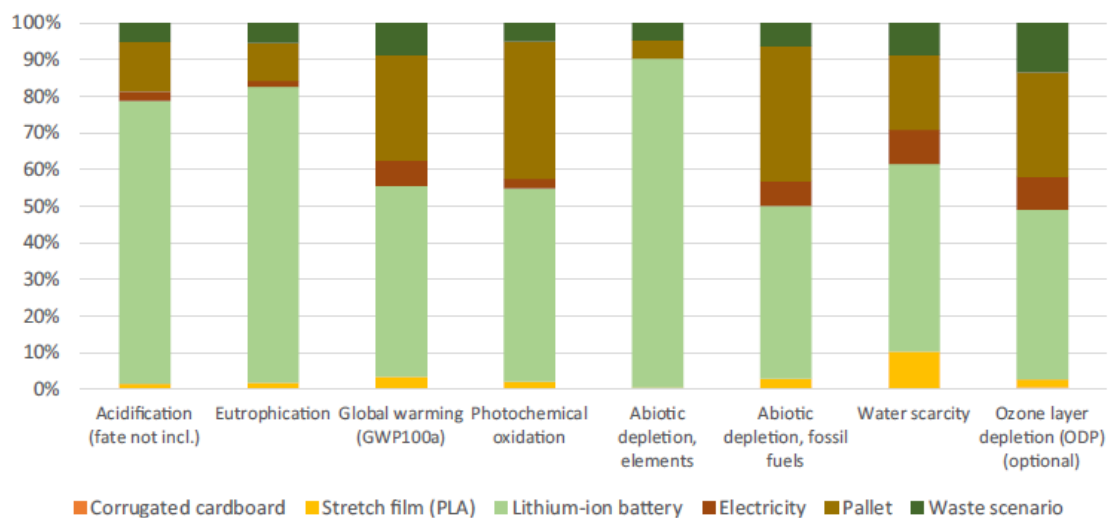
Utilizzando il software SimaPro, partendo dai dati illustrati nell’Analisi di Inventario, l’LCA è stata effettuata utilizzando due metodologie per la valutazione degli impatti: la Dichiarazione di Prodotto Ambientale (EPD) e il ReCiPe.

Ciò consente di ottenere risultati obbiettivi, garantendo che l’individuazione dello scenario migliore non dipenda dal metodo utilizzato. Ora vengono presentati i due metodi e discussi i principali risultati che emergono da ciascun metodo e dal confronto tra lo scenario passato e quello attuale, per stabilire quale sia il più ecosostenibile.

- L’EPD in SimaPro è un metodo utilizzato principalmente per ottenere dichiarazioni ambientali di prodotto, infatti le sue categorie sono più incentrate sul solo inquinamento ambientale in particolare sui processi di acidificazione dovuti ai prodotti presi in esame.



**Tabella 2. Contributo degli impatti nello scenario precedente con metodo EPD**



**Tabella 3. Contributo degli impatti nello scenario attuale con metodo EPD**

Per giustificare i risultati numerici ottenuti per ogni scenario, sono stati creati grafici che calcolano il contributo dell'impatto di ogni componente considerato nell'Analisi di Inventario, come pallet, film estensibile, batteria, elettricità, e cartone ondulato (**Table 2 e 3**).

I valori percentuali evidenziano che per entrambi gli scenari il maggiore contributo all'impatto è stato la batteria in tutte le categorie considerate, in secondo luogo il pallet, in terzo luogo l'energia elettrica utilizzata per funzionare le macchine, mentre il film estensibile e il cartone ondulato hanno avuto un impatto molto basso.

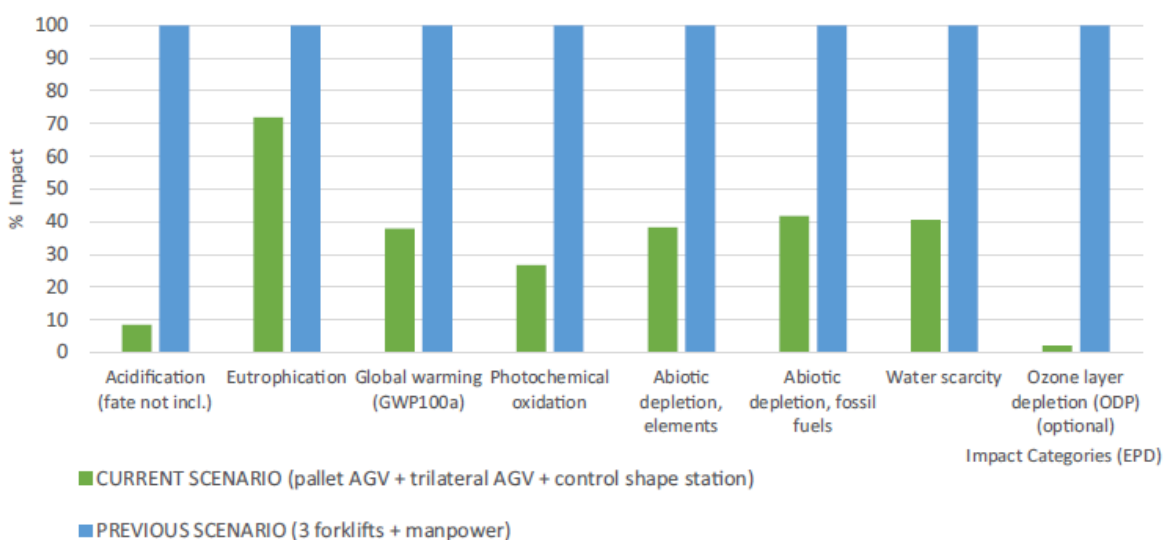
Tuttavia, passando dallo scenario precedente a quello attuale si può notare una riduzione nell'impatto della batteria, grazie al passaggio dalle batterie ricaricate con acido a quelle agli ioni di litio utilizzate nello scenario 4.0.

Nella soluzione attuale, dove vengono utilizzate batterie al litio, la potenza installata è ridotta rispetto alle batterie al piombo, perché quelle attuali possono essere ricaricate più volte durante il giorno e in breve tempo (fino al 50% in 30 min).

Una batteria al litio è anche 3 volte più leggera di una batteria al piombo, passando da 30 a 9 kg per kWh, riducendo il consumo del veicolo.

La tabella seguente riassume l'impatto numerico dei risultati dei due scenari (**Tabella 4**).

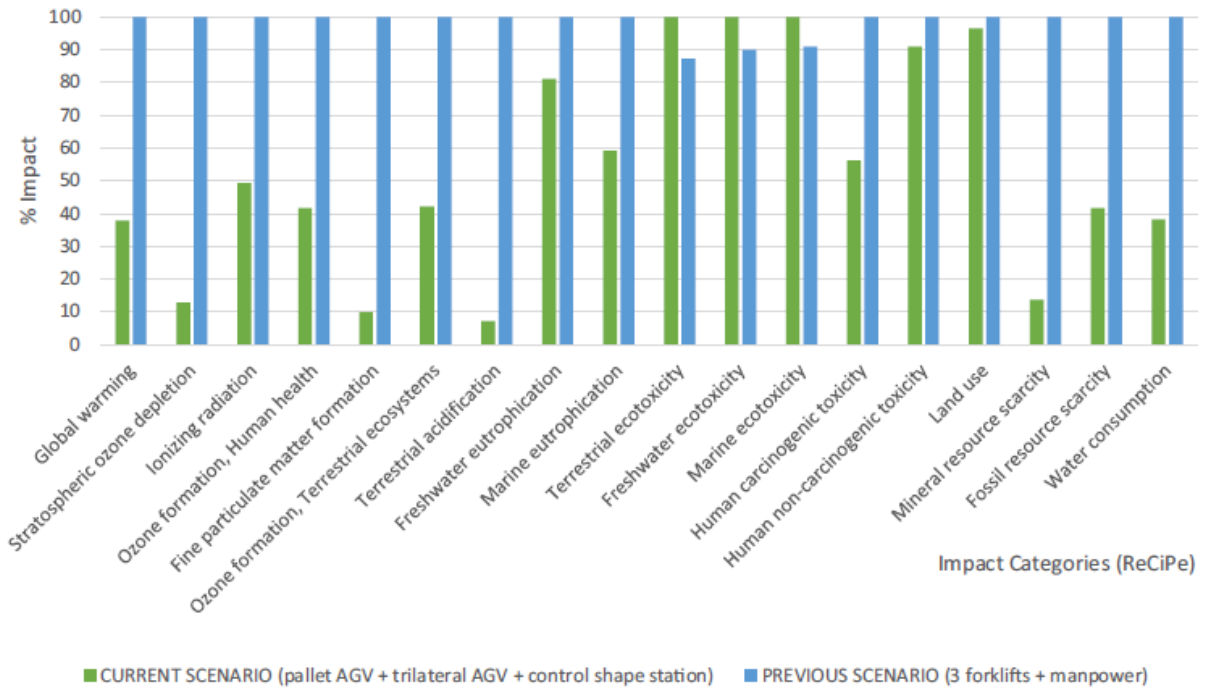
Nel complesso, i risultati ottenuti attraverso questa valutazione d'impatto sono favorevoli allo scenario 4.0: come sintetizzato nel grafico, considerando l'incidenza percentuale, l'attuale soluzione con due AGV consente di ridurre l'impatto su ciascuna categoria considerata con il metodo EPD, in particolare per l'acidificazione e l'esaurimento dello strato di ozono.



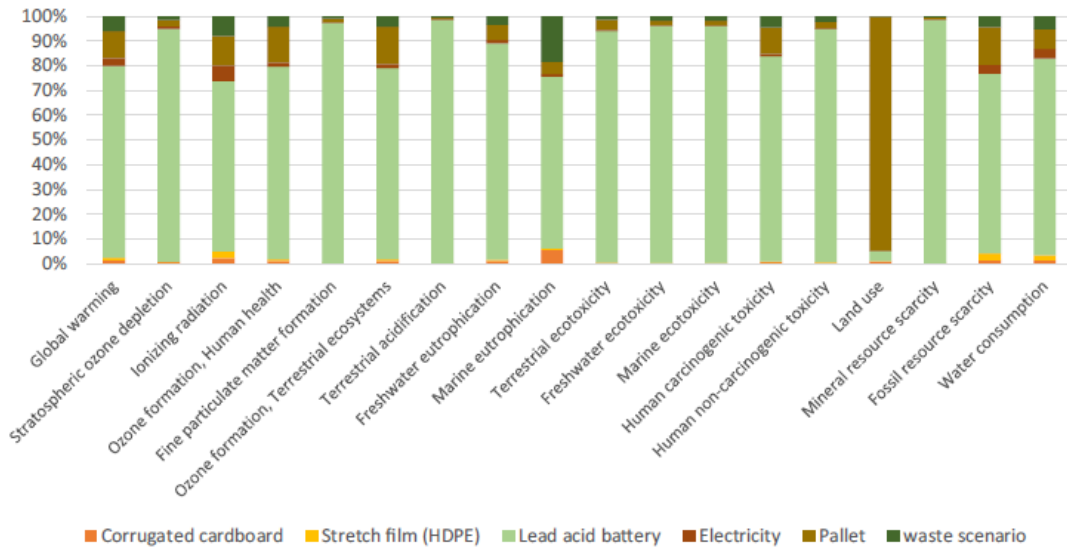
**Tabella 4. Confronto scenario attuale e precedente con metodo EPD**

- Il metodo ReCiPe calcola 18 indicatori di midpoint e 3 indicatori di endpoint: i primi si concentrano sui singoli problemi ambientali come il cambiamento climatico o l'acidificazione, mentre i secondi mostrano l'impatto sulla salute umana, sulla biodiversità e sulla scarsità di risorse primarie.

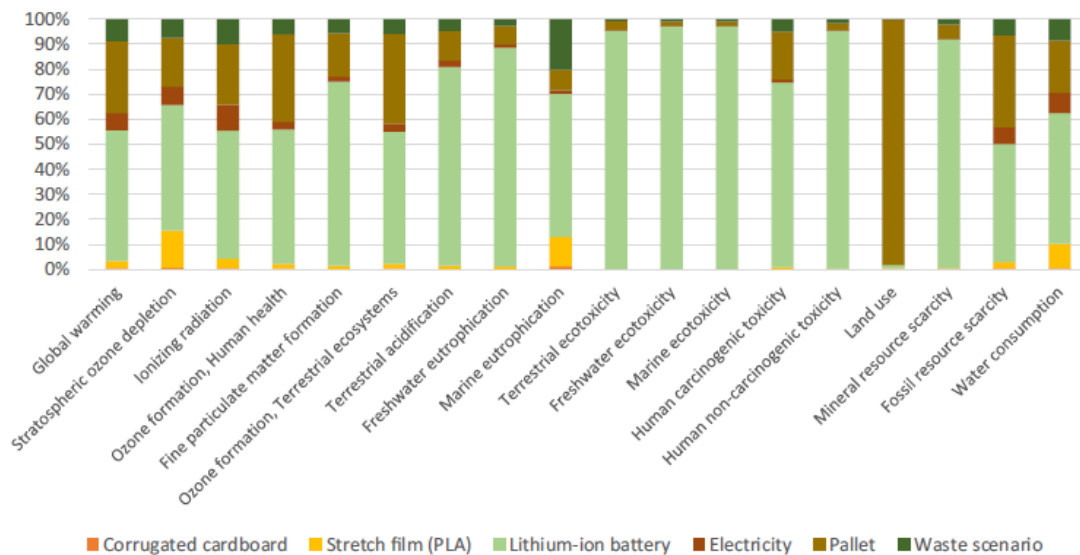
I risultati numerici ottenuti per ciascuna categoria di impatto calcolati per gli scenari precedente e quello 4.0 sono riportati nella **Tabella 4**.



**Tabella 4. Confronto scenario attuale e precedente con metodo ReCiPe**



**Tabella 5. Contributo degli impatti nello scenario precedente con metodo ReCiPe**



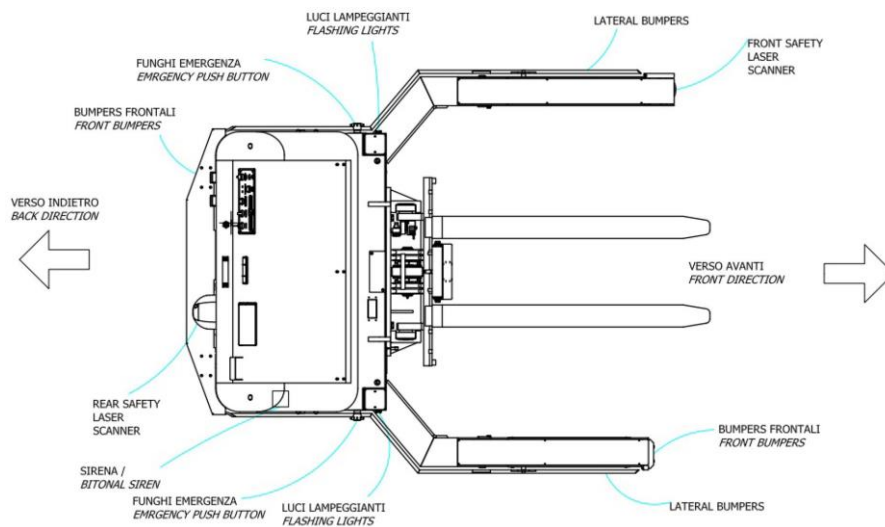
**Tabella 6. Contributo degli impatti nello scenario attuale con metodo ReCiPe**

Dando un'occhiata al contributo di questi impatti nelle **Tabelle 5 e 6**, ancora una volta le batterie sono quelle che hanno l'incidenza maggiore in entrambi gli scenari, ma è interessante notare come cambia il contributo di impatto dei componenti secondo diverse categorie.

Per esempio, i pallet sono la causa principale dell'uso del suolo in entrambi gli scenari. Inoltre, il film estensibile composto in PLA risulta meno ambientalmente sostenibile rispetto al film in PE utilizzato nello scenario precedente.

Confrontando i risultati di impatto tra il 4.0 e lo scenario precedente, si può notare anche qui che gli AGV consentono di ottenere risultati migliori nella maggior parte delle categorie di impatto

- Si conclude la citazione a questa ricerca [10] evidenziando come conducendo l'Analisi LCA su un'unica fase del ciclo di vita del prodotto (in questo caso la movimentazione di un pallet), impiegando due metodi di calcolo differenti, quali il ReCiPe e l'EPD, su due scenari contrapposti, ne emerge che quello più innovativo che persegue le indicazioni dell'industria 4.0 utilizzando veicoli elettrici industriali a guida autonoma è anche quello meno impattante a livello ambientale, in particolare grazie all'uso delle batterie al litio rispetto alle vecchie batterie ad acido.



**Figura 6. Schema AGV per movimentazione pallet**

## Capitolo 3

# METODOLOGIA PREDITTIVA SEMPLIFICATA PER L'ANALISI AMBIENTALE DI VEICOLI ELETTRICI

### 3.1 Scopo dell'Analisi

La fase di progettazione rappresenta la fase più importante nella realizzazione di un prodotto perché le scelte prese in questo primo periodo andranno a caratterizzare non solo i costi di produzione ma anche altri aspetti del ciclo vita, come ad esempio lo scenario di fine vita e la manutenzione.

In fase di progettazione, per tenere in considerazione tutte le caratteristiche del prodotto, viene condotta un'analisi multi-obiettivo che, oltre agli aspetti di carattere tecnico ed economico, tenga conto anche dell'impatto ambientale. Questo è stato uno dei temi introdotti negli ultimi anni, in particolare attraverso l'*Ecodesign*.

L'Ecodesign è un modello economico che coinvolge l'intero processo di ideazione, progettazione, vendita sul mercato e smaltimento di un prodotto rispettoso dell'ambiente ma con prestazioni



inalterate. All'interno di questo approccio è fondamentale ripensare ai processi di produzione per mettere al centro Economia Circolare e Sostenibilità. Il suo contributo può essere molto rilevante in fase iniziale di progettazione come strumento di supporto al progettista per evidenziare l'impatto delle diverse scelte.

Molto spesso però, a causa delle poche informazioni anche di carattere tecnico che si hanno a disposizione, si preferisce svolgere l'analisi al termine della progettazione, in modo tale da ottenere anche dei valori oggettivi e corretti. In questo modo però l'analisi LCA viene depotenziata, perché privata dell'aspetto di strumento di supporto alla fase di decisionale e la si usa solo per la valutazione delle scelte ormai prese.

L'obiettivo di questo capitolo è quello di sviluppare un metodo semplificato e flessibile di analisi LCA, al fine di utilizzare al meglio i risultati di questa per operare delle modifiche e ottimizzare degli aspetti critici dove è possibile. Ci teniamo a sottolineare che il metodo è stato ripreso dalla Tesi di Luca Manuguerra intitolata "*Sviluppo di una metodologia predittiva semplificata per l'analisi ambientale ed economica del ciclo di vita di un veicolo elettrico*" e a cui abbiamo apportato ampliamenti e modifiche per adattarlo all'Analisi di un AMR. [25]

Così lo strumento si propone di fornire supporto al progettista e, nonostante l'esigua quantità di dati a disposizione inizialmente, egli avrà la capacità di stimare gli impatti più rilevanti e successivamente all'aumentare delle informazioni potrà raffinare l'esito dell'analisi.

## **3.2 Linee guida modellazione**

Il modello nasce dalle considerazioni fatte da M. Held et al.[14], i quali propongono una metodologia LCA semplificata per la stima degli impatti ambientali della produzione e del fine vita (End of Life — EoL) di un veicolo elettrico, nessuna casa automobilistica è stata direttamente coinvolta nel loro studio per lo scambio di dati di inventario specifici sui componenti del veicolo e del gruppo propulsore.

L'approccio che viene proposto è un quadro flessibile, il quale si adatta al livello di dettaglio e della qualità dei dati di input disponibili. Qui si applicherà il modello a un veicolo elettrico industriale di dimensioni ridotte rispetto a un veicolo elettrico a batteria per cui tale modello nasce, comunque esso permette di considerare i dati di processo, delle miscele di materiali e delle tecnologie, nonché una LCA semplificata dei veicoli che utilizzano moduli preconfigurati. Questi sono regolati in base alle principali specifiche tecniche del veicolo e dei componenti del gruppo propulsore (ad esempio la massa totale del sistema di batterie, la tecnologia delle batterie utilizzate, i tipi di celle, la chimica dei materiali attivi, la densità energetica e la capacità energetica dei sistemi di batterie).

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

Il metodo proposto da Held si divide in tre parti, le quali fanno riferimento ai diversi modelli che vengono utilizzati per descrivere le diverse fasi dei Confini del sistema dell'analisi:

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

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

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

Tutti i modelli verranno implementati in Excel e SimaPro, che rappresentano i software che vengono scelti per la valutazione degli impatti e del consumo energetico.

### **3.2.1 Modello Fase Material**

Come indicato da H. Ambrose, et al.[15], la modellazione del veicolo elettrico deve essere divisa in due macrogruppi:

- a) Assieme Telaio;
- b) Assieme Elettronica.

Per fare una divisione dei componenti da assegnare ai due assiemi si segue il metodo che viene proposto da M. Held et al. [14], che in primo luogo decide di descrivere l'Assieme Elettronica, costituito da moduli e componenti spesso presenti nei principali database degli strumenti LCA, che sono parametrizzati rispetto alla massa. L'Assieme Telaio è descritto come l'insieme di tutte le parti e

i materiali che non sono stati definiti nell'Assieme Elettronica; non si indicano solo la parte strutturale del veicolo ma anche tutte le componenti che appartengono alla dinamica, aerodinamica e interni del veicolo.

### **3.2.1.1     *Modello Assieme Elettronica***

Nell'Assieme Elettronica vengono individuati i principali componenti elettronici come ad esempio il pacco batteria, i motori elettrici e i bracci robotici.

In primo luogo si ricerca nel database di SimaPro se sono stati già modellati in modo tale da sceglierli.

In caso contrario si cerca di modellarli attraverso prodotti simili presenti nel database.

Per individuare gli impatti di ciascun componente è importante definire la massa di ognuno; queste informazioni sono ottenibili dai cataloghi. Di solito nel catalogo viene indicata la massa totale e l'ingombro del pacco batteria, questi due dati sono utili per verificare che le stime delle masse dei gruppi siano corrette. In generale si può dire che la massa delle celle rappresenta il 50-70% del totale della massa.

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

### **3.2.1.2     *Modello Assieme Telaio***

Per la modellazione dell'Assieme Telaio si segue quelle che sono le indicazioni proposte da H. Ambrose, et al. [15], si definiscono i materiali e la loro percentuale in massa.

Per trovare la massa totale dell'Assieme Telaio al quale faranno riferimento le percentuali definite in precedenza, si sottrae alla massa a vuoto del veicolo, la massa dell'Assieme Elettronica, ovvero si considera Assieme Telaio tutto ciò che non fa parte dell'altro Assieme. In questo modo si hanno a disposizione tutte le informazioni necessarie per fare una valutazione della Fase Material all'interno di Simapro, scegliendo i materiali da database. Questo modello presenta un limite importante poiché non viene presa in considerazione la fase di produzione dei componenti del veicolo, ovvero l'insieme dei processi che trasformano i materiali nei componenti poi assemblati del veicolo.

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

- In fase iniziale di progettazione, non si ha ancora a disposizione nel dettaglio la definizione di tutti i processi produttivi.

- Una definizione nel dettaglio di tutti processi produttivi per ciascun componente presente nel veicolo può rappresentare un lavoro molto dispendioso che può non essere rilevante ai fini del risultato finale.

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

### **3.2.2 Modello Fase d'Uso**

In questo modello si intendono inserire quei parametri che durante l'impiego dell'AMR incidono sull'impatto ambientale, e in particolare ci riferiamo al consumo energetico del veicolo poiché durante la sua vita utile la batteria di cui è dotato verrà ricaricata per un numero elevato di volte.

Si definisce allora un modello di consumo energetico che ha come obiettivo quello di ottenere un risultato medio dei kWh consumati per km percorso (kWh/km). Moltiplicando questo valore con i km totali percorsi nell'intera vita del veicolo permette di ottenere il consumo energetico complessivo che in Simapro permetterà di valutare l'impatto ambientale dell'energia elettrica consumata. Il modello energetico si basa sui metodi proposti da B. Marmioli, et al.[16], M. Hernandez et al. [17], e Schücking et al.[18], Faria et al. [19][20]. Tutti questi articoli concordano nel realizzare un modello cinematico, dato che le emissioni e i consumi dei veicoli sono caratteristiche che dipendono in larga misura dalla tipologia del veicolo e dallo stile di guida.

Per valutare lo stile di guida si sono valutate diverse percentuali di carico per vedere la loro influenza sulle prestazioni. Una volta determinato il consumo medio, per individuare il consumo energetico totale è necessario specificare la distanza percorsa durante la vita utile del veicolo. La distanza percorsa è stata individuata nel seguente modo su richiesta dell'azienda produttrice:

- La distanza viene stimata considerando che il veicolo durante la sua vita utile non sostituisce il pacco batteria;

Questo implica che una volta terminata la durata della batteria si esaurisce anche l'utilità dell'AMR, di cui l'azienda produttrice stima un percorso di 4000 km durante l'intera vita

#### **3.2.2.1 Ciclo guida**

Con ciclo guida si intende un modello di utilizzo di veicolo che esprime la velocità raggiunta dal veicolo durante il suo utilizzo su un percorso scelto, con risoluzione temporale pari a un secondo. Il ciclo guida può essere personalizzato, cioè specifico del proprio caso studio e quindi stimato in base

al percorso oppure può essere scelto tra quelli proposti in letteratura o da organizzazioni internazionali che li realizzano per valutare le emissioni di CO<sub>2</sub>. I cicli guida consigliati in questo studio fanno parte della *Procedura di prova per veicoli leggeri armonizzata a livello mondiale* (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure — WLTP) che definisce una norma globale per determinare i livelli di inquinanti ed emissioni di CO<sub>2</sub>, consumo di carburante o di energia, e gamma di veicoli elettrici leggeri (autovetture e furgoni commerciali leggeri).

I *Cicli di prova per veicoli leggeri armonizzati a livello mondiale* (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles — WLTC) sono prove su banco dinamometrico per la determinazione delle emissioni e del consumo di carburante dei veicoli leggeri [21]. I cicli WLTC fanno parte delle procedure di prova dei veicoli leggeri armonizzate a livello mondiale (WLTP), pubblicate come regolamento tecnico globale UNECE n. 15 (GTR 15). Sebbene gli acronimi WLTP e WLTC siano talvolta usati in modo intercambiabile, le procedure WLTP definiscono una serie di altre procedure, oltre ai cicli di prova WLTC, necessarie per l'approvazione del tipo di un veicolo.

Le procedure WLTP includono diversi cicli di prova WLTC applicabili a categorie di veicoli con diverso rapporto potenza-massa (Power-to-Mass Ratio - PMR). Il parametro PMR è definito come il rapporto tra potenza nominale espressa in Watt [W] e la massa a vuoto espressa in chilogrammi [kg]. La massa in ordine di marcia indica la massa a vuoto, escluso il conducente, come definito in ECE R83.

Nell'Unione Europea nel 1992 era stato introdotto il ciclo di guida standardizzato NEDC (New Europea Driving Cycle), il quale si applica a tutte le autovetture e ai veicoli commerciali leggeri e serve per misurare il consumo di carburante e le specifiche emissioni dei veicoli e fornire così valori e risultati comparabili, ora però dal 2018 per questioni di trasparenza e Standard a livello mondiale si è passati all'uso dei cicli WLTP.

Il ciclo NEDC è costituito da due parti: ciclo guida urbano e ciclo guida extraurbano, invece i cicli WLTC vengono assegnati in base alle caratteristiche del veicolo. Ciascun ciclo WLTC è sostanzialmente diviso in quattro parti (Low, Medium, High e Extra-High) che a secondo del ciclo WLTC scelto e del veicolo possono essere presenti o escluse. Ogni parte del ciclo fa riferimento a differenti situazioni di stress, rappresentate attraverso variazioni di velocità.

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

**Figura 7. Cicli di guida WLTC**

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

Si vede ora il dettaglio del Ciclo di guida che ci interessa per modellare il consumo energetico del nostro AMR

- **Ciclo Classe 1:** Con il rapporto potenza-massa più basso, la Classe 1 è rappresentativa dei veicoli guidati in India, essa fa riferimento a piccoli veicoli come mini-bus e veicoli a guida autonoma come gli AGV

Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	s	m		km/h	km/h	km/h	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
Low 1	589	154	3330	26.1%	49.1	27.6	20.4	-1.00	0.76
Medium 1	433	48	4767	11.1%	64.4	44.6	39.6	-0.53	0.63
Low 1	589	154	3330	26.1%	49.1	27.6	20.4	-1.00	0.76
Total	1611	356	11428						

**Figura 8. Ciclo WLTC Classe 1 parametri di riferimento**

Per motivi che saranno più chiari nel prosieguo di questo paragrafo, questo ciclo guida viene rinominato Ciclo WLTC Classe 1 b per distinguerlo da un'altra variante della Classe 1 ovvero il Ciclo WLTC Classe 1 a, il quale viene introdotto per aumentare i diversi veicoli rappresentabili e le diverse condizioni di guida possibili:

- WLTC Classe 1 a: fa riferimento alla versione 1.4, da utilizzare quando  $PMR \leq 22$  (Rapporto Peso-Potenza) e  $v_{max} \leq 70$  km/h (velocità massima).

L'introduzione di questo ciclo di guida è utile poiché per alcuni veicoli potrebbe non essere possibile seguire i requisiti di velocità / tempo del ciclo. Le ragioni di ciò sono:

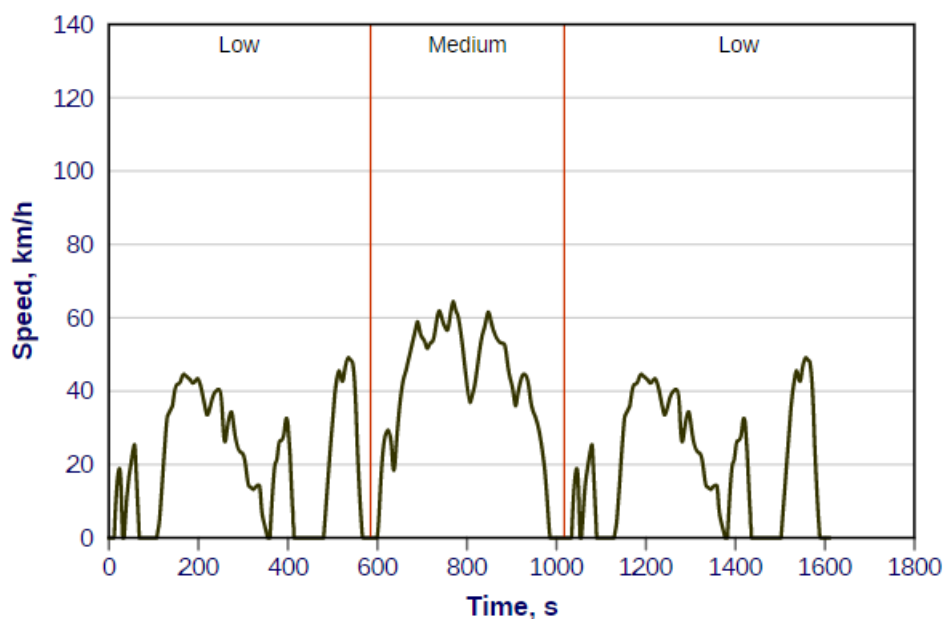
- Potenza molto bassa dei veicoli della Classe 1, i quali potrebbero non essere in grado di raggiungere le accelerazioni necessarie per mantenere la velocità del ciclo. In questi casi, è

possibile applicare una procedura di riduzione dei tassi di accelerazione massimi per migliorare la guidabilità. Una conseguenza di questa procedura è una riduzione delle velocità massime del ciclo.

- Alcuni veicoli possono avere una velocità massima limitata a un valore inferiore alla velocità massima del ciclo ridotto. In questi casi, il veicolo deve essere guidato alla sua velocità massima nei periodi di ciclo in cui la velocità del ciclo è superiore alla velocità massima del veicolo.
- Alcuni veicoli potrebbero non essere in grado di seguire la traccia della velocità del ciclo ridotto entro la tolleranza richiesta per periodi specifici. In questi casi il veicolo deve essere guidato con il comando dell'acceleratore completamente attivato durante questi periodi.

In questi casi, sono consentite le violazioni delle tracce di guida.

Si ricorda che l'obiettivo è quello di valutare un consumo medio del veicolo in funzione dello stile di guida e del carico, senza altri fini di valutazione di carattere tecnico, quindi anche se lo stile di guida può non essere perfettamente uguale allo stile di guida di un veicolo elettrico, il valore medio di consumo energetico finale può essere ritenuto realistico. Utilizzare un ciclo guida personale, sviluppato in modo specifico del proprio caso studio, sicuramente porta con sé molti vantaggi, perché permette di valutare specificatamente anche quello che riguarda le variazioni della massa dell'autoveicolo e della pendenza del percorso durante il tragitto. Si consiglia in ogni caso affiancare al ciclo guida personale anche quello standard WLTP, perché è modello di carattere generale che esplora diverse situazioni di funzionamento



**Figura 9. Ciclo WLTC classe 1b**

In particolare nel caso che qui si tratta, poiché i dati a disposizione erano insufficienti, si è deciso di modellare tale fase su Excel, definendo un ciclo di guida ipotizzato, sulla base del WLTC 1 b.

Tale ciclo è stato ottenuto scalando l'originale e adattandolo per un AMR che ha una velocità massima pari a 5 km/h contro i 50 km/h dei veicoli rientranti nella classe 1 b

### 3.2.2.2 *Modello consumo energetico del veicolo elettrico*

Ora si spiega come quantificare il consumo energetico del nostro AMR tramite vari passaggi per ottenere infine un indice di consumo medio  $C_m$  che esprima quanta energia [kWh] viene impiegata dall'AMR per ogni [km] percorso.

Il modello energetico impiegato utilizza un approccio cinematico del veicolo, dove le condizioni di funzionamento del sistema e le variabili di controllo sono ottenute dallo stato cinematico del sistema stesso.

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

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

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

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

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

Dove,

- $m$ : massa del veicolo (kg),

- $g$ : accelerazione di gravità ( $m / s^2$ ),

- $\alpha$  (alfa): angolo di inclinazione,



- $a$ : accelerazione ( $m / s^2$ ),
- $C_r$ : coefficiente di resistenza al rotolamento,
- $\rho$  (ro): densità dell'aria ( $kg / m^3$ ),
- $C_d$ : coefficiente di resistenza aerodinamica,
- $A_F$ : area frontale del veicolo ( $m^2$ ),
- $v$ : velocità del veicolo ( $m / s$ ).

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

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

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

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

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

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

$$P_{wheel} \geq 0$$

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

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

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

Con  $P_{aux}$  si intende la potenza richiesta dagli ausiliari;  $\eta_t$  è il rendimento della trasmissione;  $\eta_m$  è il rendimento del motore;  $\eta_c$  esprime il rendimento del DC/AC inverter;  $\eta_b$  è il rendimento della batteria. Questo risultato però deve essere filtrato, perché quando il ciclo guida utilizzato non è stato formulato in modo da essere adattato al veicolo ma viene invece scelto tra quelli standard, può accadere che venga richiesta al motore una potenza che non è in grado di erogare:

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

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

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

$$P_{wheel} \leq 0$$

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

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

Dove  $\eta_K$  rappresenta il rendimento del KERS.

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

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

Quindi considerando la convenzione presa per il segno esprimiamo che i valori di potenza che sono inferiori alla potenza di carica verranno sostituiti con il valore della potenza di carica stessa perché

rappresenta il limite minimo di potenza in grado di assorbire. I valori che si ottengono vengono indicati come  $P_{el.recover.eff}$ .

Per ciascun time step consideriamo:

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

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

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

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

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

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

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

### 3.2.3 Modello Fase Manutenzione

La Fase di Manutenzione riguarda tutte quelle operazioni volte a preservare la funzionalità e l'integrità del nostro veicolo elettrico, essa può essere considerata una parte della Fase d'Uso, ma in questo studio si preferisce considerarla separatamente perché nel caso dei veicoli elettrici assume un ruolo rilevante quando si prevede la sostituzione del pacco batteria durante la vita utile del veicolo. La Fase di Manutenzione relativa alle operazioni che avvengono sul veicolo viene affrontata attraverso le valutazioni fatte da SimaPro e presenti nel database. Queste operazioni sono operazioni standard fatte su un veicolo elettrico, nelle quali non è prevista la sostituzione del pacco batteria. Nel caso in cui il veicolo elettrico non presenti la necessità di sostituire il pacco batteria, l'impatto di questa fase risulterà irrilevante.

### **3.2.4 Modello Fase Fine vita**

La modellazione della Fase del Fine Vita consiste nell'assegnare a ciascun materiale e componente lo specifico trattamento legato al fine vita del prodotto, specificando se viene riciclato, riusato o smaltito in discarica. Anche in questo caso la modellazione viene fatta attraverso SimaPro assegnando per ciascun materiale o componente la probabile percentuale di massa che verrà inviata a un trattamento di riciclo; il resto viene inviato in discarica.

Si evidenzierà una sostanziale differenza di impatto tra lo smaltimento dei materiali metallici e quello degli assiemi elettronici, i quali risultano essere maggiormente pesanti in relazione ai parametri considerati;

## **3.3 Software di programmazione**

Come software di programmazione per condurre l'Analisi predittiva si utilizzano principalmente Excel e in secondo luogo SimaPro

### **3.3.1 Excel**

La procedura presentata fin qui è stata riportata in Excel, Software di fogli di calcolo molto utile a riassumere nelle tabelle la vasta mole di dati da elaborare in questa Analisi e che possono poi essere facilmente tradotti e riassunti in grafici e diagrammi.

Il lavoro è stato condotto realizzando un unico file che presenta un foglio iniziale, il quale va completato riportando tutti i dati richiesti in modo da completare un'analisi che restituisce i seguenti risultati:

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

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

Dopo di che Excel è stato usato per calcolare i risultati del consumo energetico legato al ciclo di guida e per riassumere tutti i risultati degli impatti ambientali calcolati e tradurli in grafici più esplicativi.

### **3.3.2 SimaPro**

SimaPro aiuta ad applicare efficacemente al proprio progetto i temi relativi alla sostenibilità, per aiutare a prendere decisioni solide, cambiare in meglio i cicli di vita dei prodotti. SimaPro è la

soluzione software LCA leader, con una reputazione di 30 anni nell'industria e nel mondo accademico in più di 80 paesi.

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

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

Con SimaPro si può:

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

## Capitolo 4

# CASO STUDIO: ANALISI PREDITTIVA LCA DI UN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

### 4.1 Progetto E-mobots

Il caso studio nasce da un progetto di ricerca e sviluppo finanziato dal MIUR e denominato E-MOBOTS (Electric MObility roBOT & Shuttle), esso ha l'obiettivo di realizzare soluzioni di mobilità elettrica destinate alla Fabbrica Intelligente nello spirito di Industria 4.0, ed in particolare ai processi produttivi ad alta efficienza e per la sostenibilità industriale.

Il progetto è stato sviluppato da Tekne, in collaborazione con Joytek e la sua prima soluzione riguarda lo sviluppo di un sistema AMR che offra un'ampia autonomia e flessibilità di utilizzo, sfruttando per esempio la tecnologia wireless e le tecniche robotiche più o meno collaborative, per migliorare ulteriormente la produttività e la logistica. L'obiettivo è di superare lo stato dell'arte, che prevede AMR controllati da un sistema di controllo centrale, a favore di una maggiore autonomia ed efficienza.

Una seconda soluzione riguarda una navetta elettrica (Shuttle) per il collegamento intra-aziendale tra due siti produttivi, sia per trasporto persone che per logistica (magazzino distribuito tra i due siti). La ragione principale per la realizzazione di una navetta elettrica è la sua sostenibilità: permetterà infatti di risparmiare sui costi di gestione delle movimentazioni, sfruttando anche la disponibilità di generatori elettrici fotovoltaici per la ricarica delle batterie. L'obiettivo è anche la piena integrazione della navetta con il sistema di fabbrica e con altre componenti del ciclo di lavorazione, nello spirito di Industria 4.0.

Un altro obiettivo importante del progetto è l'ottimizzazione della collaborazione della navetta con l'AMR per automazione industriale (mettendo così in collegamento le due soluzioni precedenti), per esempio per operazioni automatiche di carico/scarico merci, o anche per il trasporto dello stesso AMR da un sito all'altro. Non ultimo, la navetta e l'AMR dovranno essere modellati ed ottimizzati in termini di uso di componenti in comune (batterie, motorizzazione ecc.) in modo da ottimizzare la logistica e la manutenzione, e in generale la sostenibilità della soluzione proposta [22].



**Figura 10. Progetto E-mobots**

## **4.2 Presentazione degli Assiemi**

Ora passiamo a definire gli Assiemi che saranno oggetto dell'Analisi predittiva, si sono suddivisi in 4 componenti analizzati in due Assiemi, i cui nomi sono caratterizzati dai materiali principali che li compongono: Assieme Elettronica e Assieme Telaio.

### **4.2.1 Assieme elettronica**

I principali componenti modellati nell'Assieme Elettronica sono l'Autonomous Mobile Robot della Omron chiamato LD90, il Robot collaborativo antropomorfo TM12 integrato all'AMR e sempre prodotto dalla Omron, il pacco batteria e la componentistica elettronica generica come cavi, inverter e motori elettrici.

I componenti sono stati modellati con quelli disponibili nel database e mancando un'effettiva distinta componenti fornita dall'azienda ci siamo limitati a inserire i dati generici presenti nei cataloghi dei prodotti LD 90 e TM12. In particolare, l'LD 90 è stato modellato con uno scooter elettrico privo di batteria riportando le masse, essendo quello l'unico modello presente che potesse ben approssimare la composizione dei materiali e la funzione dell'AMR. La batteria è stata modellata a parte, mentre il TM12 è stato modellato con gli elementi presenti nel database e ipotizzando la composizione dei suoi materiali.

Ora si presentano quindi i due principali componenti modellati, il TM 12 e l'LD 90 i quali sono realizzati dalla ditta Omron.

Essa è un'azienda giapponese, attiva nel settore dei componenti per l'automazione industriale, nei prodotti elettromedicali e nei componenti per l'elettronica. Oggi fattura più di 5,5 miliardi e conta più di 35.000 dipendenti in 36 nazioni che operano per fornire prodotti e servizi ai clienti in una

varietà di settori, inclusi l'automazione industriale, le industrie dei componenti elettronici e la cura della salute.

#### **4.2.1.1 TM12**

A dicembre 2018 l'azienda Omron ha deciso di lanciare la sua prima serie di robot collaborativi facendo una cooperazione con l'azienda Tech-Man. Da questa unione è nata una linea di cobot denominata TM.

Nel caso studio verrà trattato in particolare del TM 12, esso è un Robot collaborativo (da qui "Cobot") di nuova generazione, pensato per lavorare a distanza ravvicinata con gli operatori e con caratteristiche molto differenti rispetto alla precedente generazione di Robot antropomorfi; questi prevedevano grosse celle di sicurezza con robot pesanti, potenti e veloci e pertanto pericolosi, che svolgevano un lavoro preciso e con tempi ciclo minimi ma solo un tipo di lavoro una volta programmati a causa della loro complessità.

Invece oggi si è passati a una robotica più "smart" e versatile, facilmente adattabile a ogni funzione e con masse in gioco molto minori, una robotica che possa essere di ausilio all'uomo e non che lo sostituisca in toto nelle sue mansioni .

I cobot a differenza dei precedenti robot rispettano distanze di sicurezza tra loro e tra le persone, arrivando a decelerare all'ingresso dell'operatore nell'area di azione e a bloccarsi al minimo contatto. I tempi, le distanze degli arresti e i compiti da svolgere sono programmabili e personalizzabili, garantendo così la massima flessibilità operativa. Questo consente a tale tipo di soluzioni di svolgere compiti anche molto complessi, interagendo con i colleghi umani in tutta sicurezza. Ciò è possibile grazie a una sensoristica di ausilio di cui sono dotati che permette di rilevare ciò che sta attorno.

Ecco i principali dati che caratterizzano il TM 12:

- Peso: 33.3 Kg
- Massima distanza raggiungibile: 1300 mm
- Carico sollevabile: 12 Kg
- Velocità tipica: 1.3 m/s
- Peso controller: 14.5 Kg per versione DC



#### 4.2.1.2 LD90

Nel 2017 l'azienda Omron ha lanciato sul mercato la prima serie di robot mobili a guida autonoma (AMR): la serie LD. Nel caso studio prendiamo in esame l'LD 90.

Esso è un AMR di piccole dimensioni e in grado di trasportare fino a 90 kg, da qui il nome del modello. È stato appositamente concepito per lavorare anche in spazi stretti e altamente dinamici. Le dimensioni di massima di questo robot mobile sono 380x500x700 mm, il suo peso è di 62 kg comprendendo la batteria.

Dei vantaggi, delle funzionalità e dell'utilizzo di questo AMR si è già parlato al paragrafo 1.3.3 AMR, il tutto riprendendo i passi principali affrontati da Matteo Forlini et al [23]

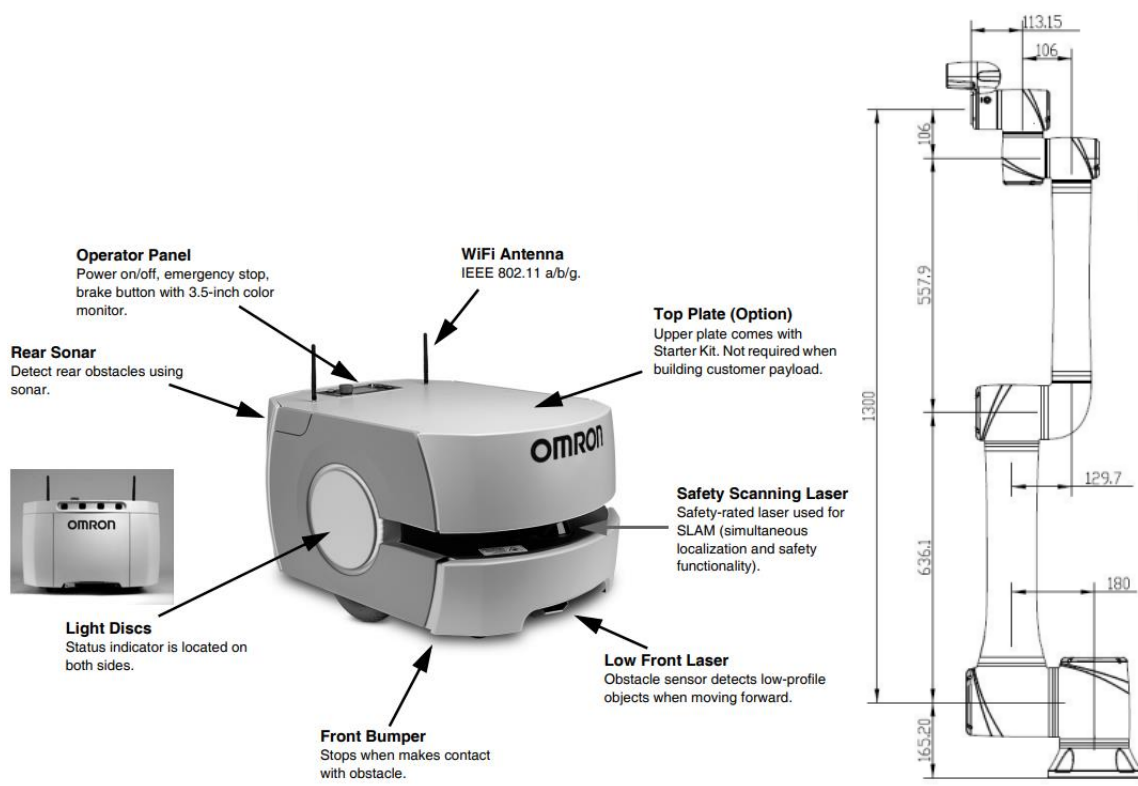


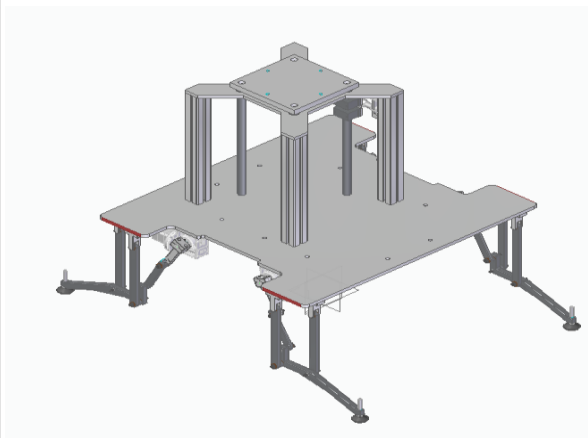
Figura 11. e 12. LD 90 e TM 12

## 4.2.2 Assieme Telaio

Nell'Assieme Telaio si sono modellate le due parti progettate da Joytek e che servono per integrare insieme l'LD 90 e il TM 12, le parti in questione sono una Colonna mobile e una Piastra con "piedini".

Nella modellazione di queste parti sono stati considerati solo i materiali che li costituiscono trattandosi di una Analisi predittiva, vediamo nella **Tabella 7** la massa totale dell'Assieme e le percentuali della composizione dei materiali ipotizzate inizialmente dall'azienda

ASSIEME TELAIO		
MATERIALI	VALORE	MASSA [kg]
Massa totale	<b>41</b>	kg
Acciaio	67%	27,3
Legno	0%	0
Plastica	12%	5
Vetro	5%	2,2
Vetroresina	0%	0
Gomma	11%	4,3
Alluminio	5%	2,2



**Tabella 7. Materiali Assieme Telaio**

**Figura 13. Assieme Telaio**

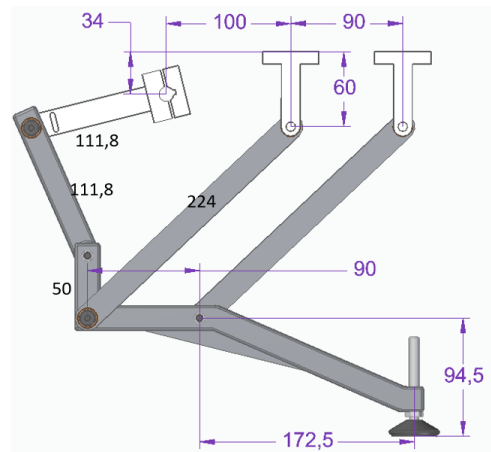
### 4.2.2.1 Colonna mobile

La Colonna mobile è stata progettata per consentire il sollevamento del TM12 e permettergli di coprire una maggior area di lavoro, essa viene montata e fissata sopra la piastra, nella Figura 13 si può vedere come è stata realizzata

### 4.2.2.2 Piastra con piedini

La Piastra con "piedini" è stata realizzata per permettere l'integrazione del TM 12 con l'LD 90 e lo scopo dei "piedini" è quello di dare stabilità al robot durante lo svolgimento delle sue operazioni di spostamento delle merci ed evitare che si ribalti quando è nelle configurazioni estreme

I piedini sono 4 e si muovono tramite 4 attuatori e vengono azionati solo nella fase di lavoro del TM 12, mentre sono in posizione di riposo durante il movimento dell'LD 90, vediamo nella figura qui accanto lo schema di costruzione di un "piedino"



**Figura 14. Dettaglio di un "piedino"**

## 4.2 Analisi LCA predittiva semplificata

### 4.2.1 Descrizione dell'Analisi

#### Definizione dell'obiettivo

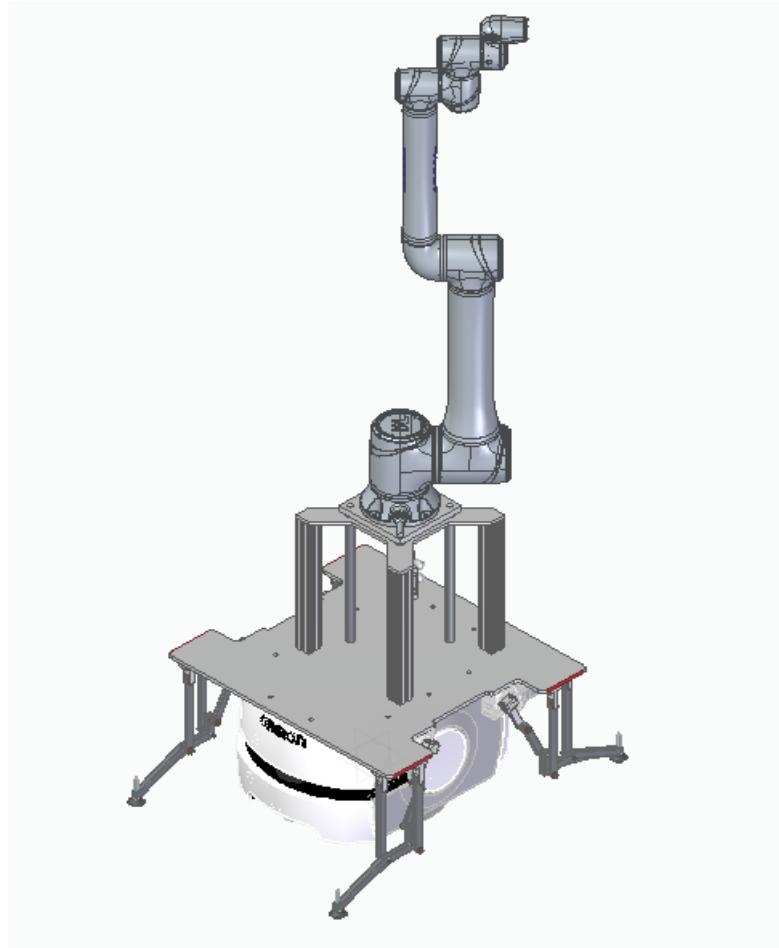
L'obiettivo dell'analisi è quello di valutare l'impatto ambientale del ciclo di vita di un Autonomous Mobile Robot integrato a un cobot tramite un opportuno sistema meccanico, la valutazione vuole essere semplice e fatta anticipatamente rispetto alla fase di produzione e utilizzo del prodotto considerato.

#### Confini del sistema

I confini del sistema comprendono:

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

La Fase di Manutenzione viene presa in considerazione ma questa assumerà un ruolo poco rilevante perché la sostituzione della batteria non viene prevista dall'azienda. L'azienda prevede 4000 km di vita utile dell'AMR e nessun cambio di batteria.



**Figura 15. AMR completo**

### **Unità funzionale**

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

### **Categoria di impatto**

Le categorie di impatto scelte sono:

- Climate change [kg CO2 eq];
- Human toxicity [kg 1,4-DB eq];
- Ionizing radiation [kBq U235 eq];

- Metal depletion [kg Fe eq];
- Fossil depletion [kg oil eq].

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

La scelta di queste categorie di impatto nasce dalla ricerca di diversi lavori scientifici che consigliano questi indici come i più rappresentativi nell'analisi di veicoli elettrici [24].

### Limiti della trattazione

Il seguente studio presenta dei limiti dovuti alla mancanza di una collaborazione con l'azienda fornitrice dell'LD 90, del TM 12 e del pacco batteria. Alcune delle informazioni sono state reperite da letteratura o ipotizzate, coerentemente con altre informazioni fornite da cataloghi e dall'azienda produttrice del veicolo.

## 4.2.2 Life Cycle Inventory (LCI)

### 4.2.2.1 LCI Fase Material

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

ASSIEME ELETTRONICA				
Massa totale		109	kg	
COMPONENTI		NUMERO	MASSA SINGOLO [kg]	MASSA TOTALE [kg]
Pacco batteria		1	27,5	27,5
LD90		1	43	43
TM12		1	33,3	33,3
Motore		0	0	0
Componentistica elettronica	Vehicle control unit	0	0	0
	Charger	0	0	0
	Converter	0	0	0
	Controller	0	0	0
	Power Distribution Box	0	0	0
	Batteria 12V	0	0	0
	Altri (Materiale elettronico)	1	2,5	2,5
Altri (Cavi)	1	2,5	2,5	

Tabella 8. LCI Assieme Elettronica

Per l'LCI dell'Assieme Telaio si rimanda alla Tabella 7. già mostrata.

#### 4.2.2.3 LCI Fase d'Uso

I dati raccolti riguardo la Fase d'Uso sono stati utilizzati per la modellazione dell'AMR e la scelta del ciclo adatto alle condizioni di guida che si vogliono analizzare.

Si ricorre quindi qui al Modello di Consumo energetico del nostro veicolo introdotto nel paragrafo 3.2.2 e lo si implementa con i seguenti dati della **Tabella 9**, che sono le informazioni necessarie da fornire come input al Modello.

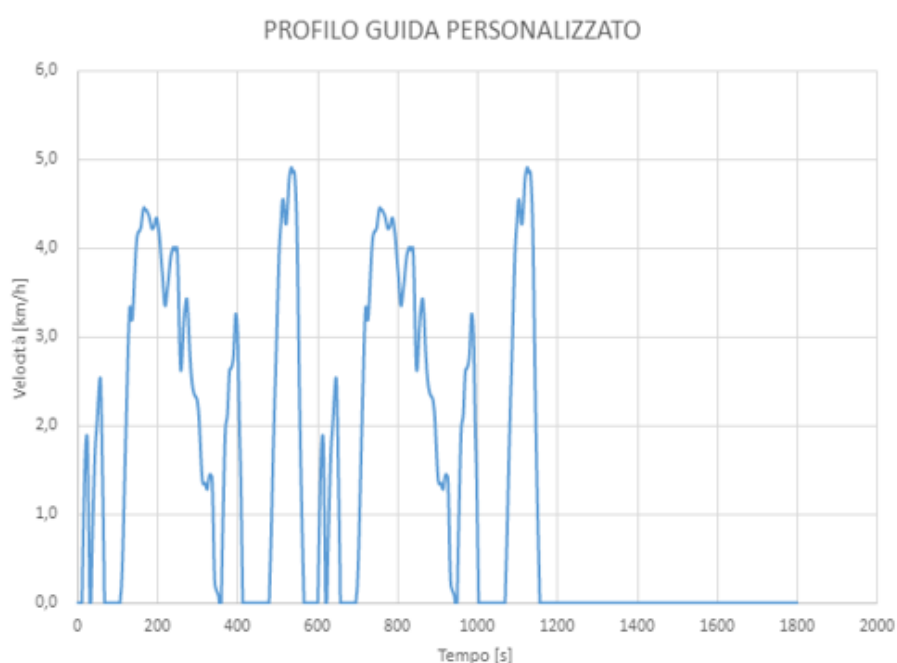
DATI			
Acc di gravità	g	9,81m/s <sup>2</sup>	
Angolo inclinazione	$\alpha$	0°	
Coeff di resistenza	Cr	0,008	
Densità dell'aria	$\rho_{air}$	1,22kg/m <sup>3</sup>	
Coefficiente di resistenza aerodinamica	Cd	0,8	
Area frontale del veicolo	Af	0,2m <sup>2</sup>	
Massa carico	mmp	70kg	
Massa carico max	mcmx	12kg	
Massa veicolo	mv	150kg	
Numero posti	np	1	
Carico medio trasportabile	cmp	12kg	
Rendimento batteria	nb	0,97EV Powertrain	
Rendimento DC/AC Converter	nc	0,95	
Rendimento motore	nm	0,85	0,73
Rendimento trasmissione	nt	0,9	
Potenza richiesta dagli ausiliari	Paux	50W	
% di energia recuperabile in frenata/decelerazione per autobus	Kers	0	
Potenza di ricarica	Pric	0W	
Peak Power	Ppeak	10000W	

**Tabella 9. LCI Modello veicolo**

## Ciclo guida

Per questo studio è stato scelto come ciclo guida di riferimento quello fornito dal WLTP. Visto che le velocità massime in gioco sono molto basse rispetto a quelle definite dai WLTC si è optato per un ciclo guida personalizzato (Figura 16) (che fosse anche coerente con la movimentazione in ambito industriale, ed essendo il PMR di questo veicolo molto basso il ciclo guida consigliato è solo il WLTC classe 1).

Le velocità massime sono di 50 km/h mentre l'AMR si muove a una velocità massima di 5 km/h, pertanto abbiamo operato una riduzione in scala di un fattore 10 prendendo a modello un ciclo WLTC 1 b.



**Figura 16. Ciclo guida personalizzato**

## Consumo Energetico medio del veicolo

Attraverso il modello di cui già detto si valuta il consumo medio del veicolo in [kWh/km] con il ciclo di guida scelto e facendo una parzializzazione del carico allo 0, al 25, al 50, al 75 e al 100%

Carico	Consumo [kWh/km]
0%	0,0423
25%	0,0424
50%	0,0425
75%	0,0426
100%	0,0427

**Tabella 10. Consumi in base al carico**

Essendo il carico max 12 kg e il peso totale del robot sui 150 kg, la parzializzazione del carico restituisce consumi pressoché invariati, pertanto nella Valutazione degli Impatti ci si riferisce solo alla condizione di carico massimo. Considerate le modeste dimensioni del robot e le basse potenze in gioco, i valori ottenuti si possono considerare conformi a quelli trovati in letteratura per altre categorie di veicoli elettrici

#### **4.2.2.4 LCI Fase Manutenzione**

Per la Fase Manutenzione di un veicolo elettrico la parte più rilevante a livello di impatto ambientale è la sostituzione della batteria, ma in questo caso la raccolta dei dati non è necessaria perché l'azienda prevede che la batteria duri per l'intera vita utile del robot, cioè 7 anni, percorrendo 4000 km, e che non venga mai sostituita. Di conseguenza questa fase non risulta rilevante all'interno del presente caso studio come confermato dai risultati ottenuti.

#### **4.2.2.5 LCI Fase Fine Vita**

Per questa fase si sono ipotizzati e impostati i possibili scenari di smaltimento e le possibili percentuali di riciclo per i materiali generici e per i componenti principali, questi sono presentati nella Tabella 11.

Con "Trattamento di Fine Vita" si intende che quel componente sarà destinato a uno specifico trattamento di smaltimento, scelto tra quelli a disposizione nel database di SimaPro.



Nel caso delle Celle della Batteria non avendo un'indicazione specifica del tipo di trattamento si è deciso di optare per un trattamento sia un mix tra il trattamento idrometallurgico e pirometallurgico (scelta presente nel database di SimaPro); i due processi indicati sono i più comuni per recuperare i materiali presenti nelle celle chimiche, il primo metodo ricorre a soluzioni acide acquose per separare i vari elementi e recuperarli poi recuperarli per successive precipitazioni, il secondo metodo invece usa la fusione dei materiali ad alta temperatura e per il recupero dei vari elementi chimici in genere si ricorre a processi idrometallurgici.

Ciò che rimane escluso dalle percentuali indicate viene inviato in discarica.

FINE VITA TRATTAMENTO		
% Acciaio	85%	Riciclo
% Alluminio	85%	Riciclo
% Vetroresina	50%	Riciclo
% Vetro	50%	Riciclo
% Plastica	50%	Riciclo
% Gomma	50%	Riciclo
% Motore elettrico	50%	Trattamento fine vita
% Componentistica elettronica	50%	Trattamento fine vita
% Cella Batteria	100%	Trattamento fine vita (50% idrometallurgico e 50% pirometallurgico)
% Case Batteria	85%	Riciclo
% BMS Batteria	50%	Trattamento fine vita
% Altro Batteria	50%	Trattamento fine vita

**Tabella 11. Trattamenti di Fine Vita**

### 4.2.3 Valutazione degli Impatti (VdI)

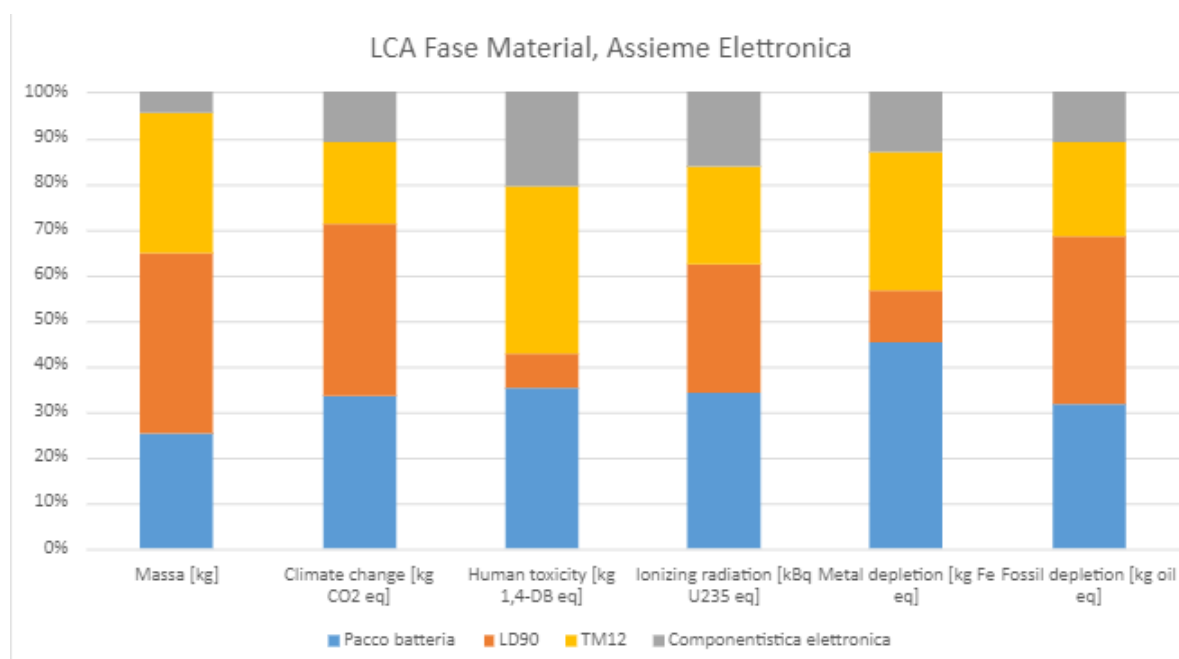
Si propongono ora le figure e le tabelle con i risultati della Valutazione degli Impatti delle varie fasi

### 4.2.3.1 VdI Fase Material

- **Assieme Elettronica**

Categoria d'impatto	ASSIEME ELETTRONICA								TOTALE
	Pacco batteria		LD90		TM12		Componentistica elettronica		
	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	28	25%	43	40%	33	31%	5	5%	109
Climate change [kg CO2 eq]	242	34%	271	38%	129	18%	79	11%	721
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	1262	35%	265	7%	1313	37%	729	20%	3568
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	28	34%	24	28%	18	21%	13	16%	83
Metal depletion [kg Fe eq]	585	45%	147	11%	389	30%	168	13%	1289
Fossil depletion [kg oil eq]	67	32%	78	37%	44	21%	23	11%	212

**Tabella 12. LCA Fase Material, Assieme Elettronica**

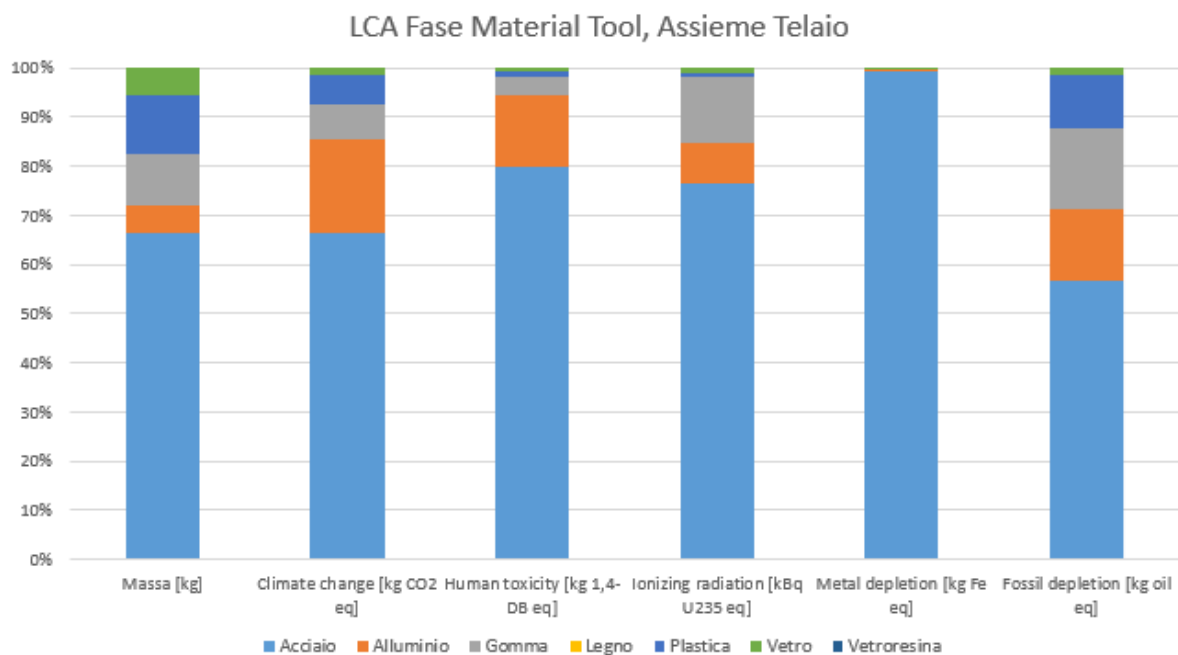


**Figura 17. LCA Fase Material, Assieme Elettronica**

- **Assieme Telaio**

Categoria d'impatto	ASSIEME TELAIO														TOTALE
	Acciaio		Alluminio		Gomma		Legno		Plastica		Vetro		Vetroresina		
	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	27	67%	2	5%	4	10%	0	0%	5	12%	2	5%	0	0%	41
Climate change [kg CO2 eq]	120	67%	34	19%	13	7%	0	0%	11	6%	3	1%	0	0%	180
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	72	80%	13	14%	3	4%	0	0%	1	1%	1	1%	0	0%	90
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	12	76%	1	8%	2	14%	0	0%	0	1%	0	1%	0	0%	16
Metal depletion [kg Fe eq]	370	99%	1	0%	1	0%	0	0%	0	0%	1	0%	0	0%	372
Fossil depletion [kg oil eq]	29	57%	7	14%	8	16%	0	0%	6	11%	1	1%	0	0%	51

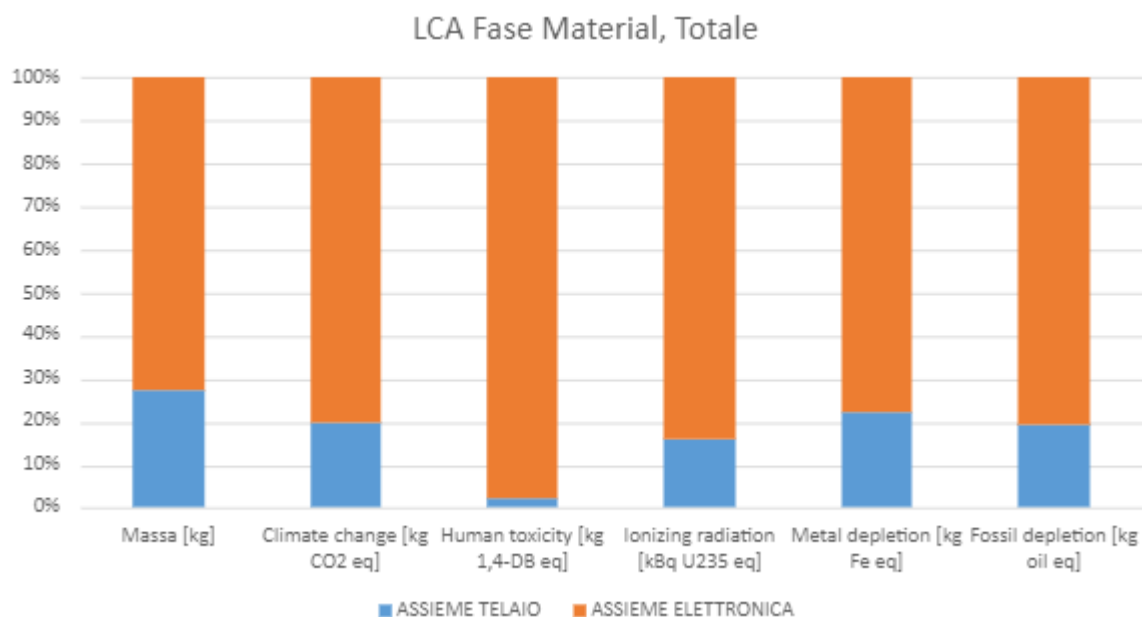
**Tabella 13. LCA Fase Material, Assieme Telaio**



**Figura 18. LCA Fase Material, Assieme Telaio**

Qui si vede che l'incidenza maggiore sugli impatti è dovuta all'acciaio, in linea con la percentuale di composizione dei materiali del Telaio, seguito dall'Alluminio

- **Totale**



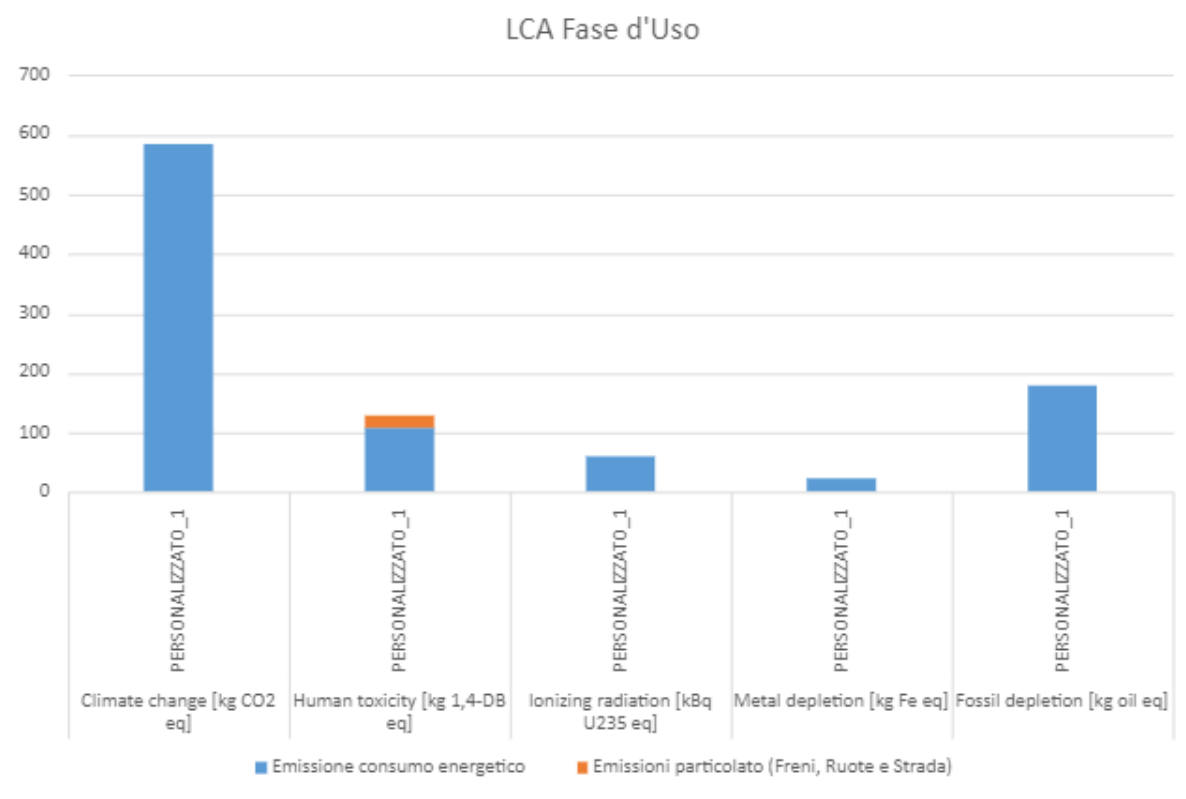
**Figura 19. LCA Fase Material Totale**

La Figura 18 mostra che l'impatto ambientale dipende in gran parte dalle parti elettroniche dell'AMR, in parte per il fatto che rappresentano la percentuale in massa maggiore, ma anche in linea con il fatto che l'estrazione dei metalli necessari e tutti i processi che seguono la lavorazione e l'assemblaggio di queste parti elettroniche sono molto più impattanti in termini di emissioni e di consumo delle materie prime rispetto alle più semplici parti del Telaio.

FASE MATERIAL					
Categoria d'impatto	ASSIEME TELAIO		ASSIEME ELETTRONICA		TOTALE
	Impatto	%	Impatto	%	
Massa [kg]	41	27%	109	73%	150
Climate change [kg CO2 eq]	180	20%	721	80%	902
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	90	2%	3568	98%	3659
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	16	16%	83	84%	99
Metal depletion [kg Fe eq]	372	22%	1289	78%	1661
Fossil depletion [kg oil eq]	51	19%	212	81%	263

**Tabella 14. LCA Fase Material, Totale**

### 4.2.3.2 VdI Fase d'Uso



**Figura 20. LCA Fase d'Uso**

Questi sono i risultati ottenuti con il Ciclo di Guida Personalizzato di cui si è detto al Paragrafo 3.2.2, dove si nota che l'impatto maggiore è quello sulla categoria del Cambiamento climatico mentre le emissioni di particolato contribuiscono in minima parte e solo nella categoria Human toxicity.

Distanza prevista [km]	4000				
Ciclo Guida	PERSONALIZZATO				
Carico	100%				
Mix energetico	Personalizzato				
LCA Fase d'Uso					
Categoria d'impatto	Ciclo Guida_carico100%	Consumo [kWh/km]	Emissione Consumo Energetico	Emissioni particolato	TOTALE
Climate change [kg CO2 eq]	PERSONALIZZATO_1	0,043	585	0	585
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	PERSONALIZZATO_1	0,043	109	18	127
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	PERSONALIZZATO_1	0,043	60	0	60
Metal depletion [kg Fe eq]	PERSONALIZZATO_1	0,043	25	0	25
Fossil depletion [kg oil eq]	PERSONALIZZATO_1	0,043	181	0	181

**Tabella 15. LCA Fase d'Uso**

### 4.2.3.3 VdI Fase Manutenzione

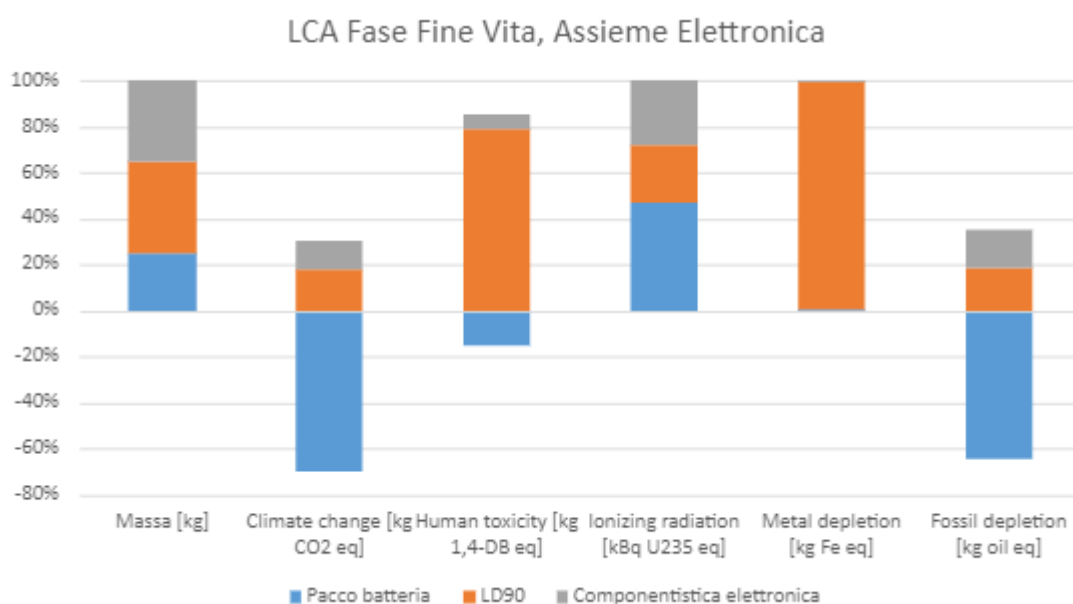
La Valutazione degli Impatti della Fase Manutenzione è praticamente assente in quanto come precedentemente ribadito non è prevista la sostituzione della batteria e tutte le altre operazioni di manutenzione del robot vengono considerate poco rilevanti ai fini dell'Analisi predittiva

### 4.2.3.4 VdI Fase Fine Vita

- **Assieme Elettronica**

FINE VITA ASSIEME ELETTRONICA					
Categoria d'impatto	Pacco batteria	LD90	TM12	Componentistica elettronica	TOTALE
Massa [kg]	28	43	33	38	142
Climate change [kg CO2 eq]	-37	10	7	7	-14
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	-10	55	1	4	50
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	2	1	0	1	5
Metal depletion [kg Fe eq]	0	52	0	0	53
Fossil depletion [kg oil eq]	-7	2	0	2	-3

**Tabella 16. LCA Fine Vita, Assieme Elettronica**



**Figura 21. LCA Fine Vita, Assieme Elettronica**

Si nota che la modellazione scelta per l'LD 90 ha conseguenze negative anche sul Fine Vita perché tutte le categorie hanno un impatto ambientale positivo anche nello scenario di smaltimento, mentre le

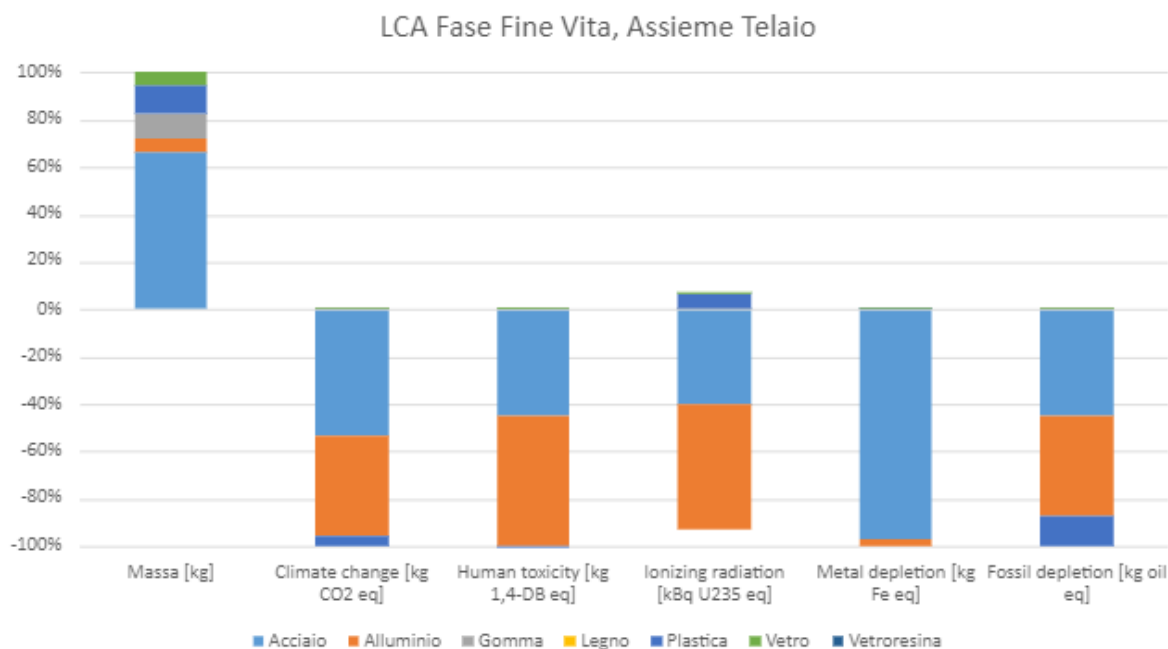
percentuali negative del pacco batteria vanno interpretate positivamente in quanto il riciclo permette di recuperare materiali e quindi ridurre le emissioni totali

- **Assieme Telaio**

FINE VITA ASSIEME TELAIO								
Categoria d'impatto	Acciaio	Alluminio	Gomma	Legno	Plastica	Vetro	Vetroresina	TOTALE
Massa [kg]	27	2	4	0	5	2	0	41
Climate change [kg CO2 eq]	-48	-37	0	0	-4	0	0	-89
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	-11	-14	0	0	0	0	0	-25
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	-1	-1	0	0	0	0	0	-2
Metal depletion [kg Fe eq]	-28	-1	0	0	0	0	0	-29
Fossil depletion [kg oil eq]	-8	-8	0	0	-2	0	0	-19

**Tabella 17. LCA Fine Vita, Assieme Telaio**

Nel Fine Vita dell'Assieme Telaio possiamo vedere che il Riciclo riveste una parte importante e che tutti i materiali vengono recuperati in quanto gli impatti ambientali sono negativi.



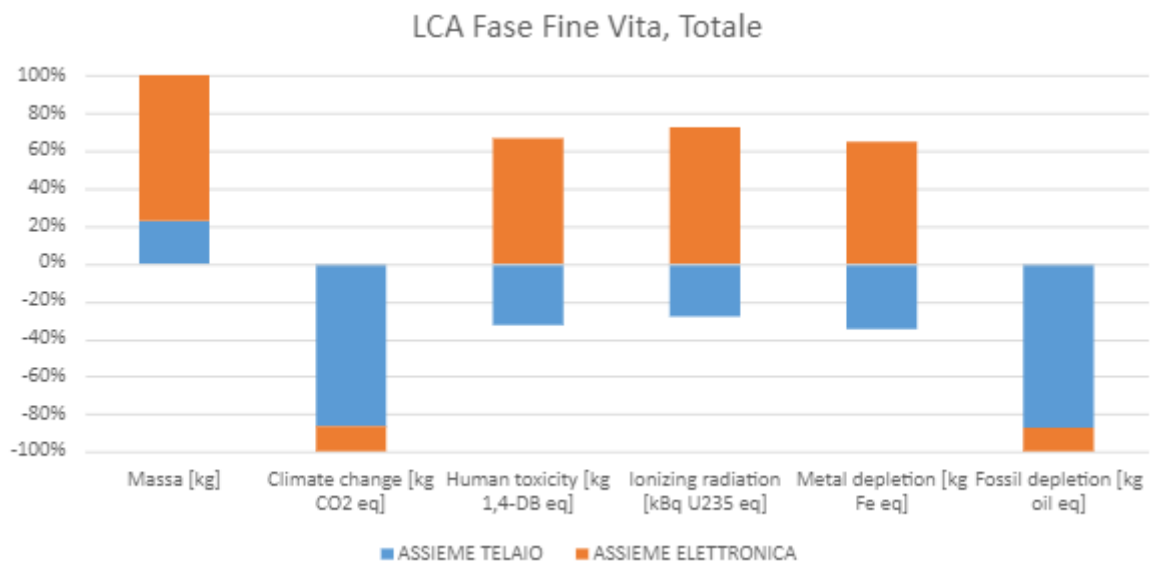
**Figura 22. LCA Fine Vita, Assieme Telaio**

- **Totale**

FINE VITA FASE MATERIAL			
Categoria d'impatto	ASSIEME TELAIO	ASSIEME ELETTRONICA	TOTALE
Massa [kg]	41	142	183
Climate change [kg CO2 eq]	-89	-14	-103
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	-25	50	25
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	-2	5	3
Metal depletion [kg Fe eq]	-29	53	25
Fossil depletion [kg oil eq]	-19	-3	-21

**Tabella 18. LCA Fine Vita, Totale**

Considerando il Totale della Fase Fine Vita si può notare che per l'Assieme Telaio il riciclo riveste una parte decisiva e le percentuali finali sono tutte negative, mentre per l'Assieme Elettronica si hanno impatti positivi soprattutto nelle categorie Human Toxicity e Metal Depletion, questo indica una maggior difficoltà nel recupero dei materiali elettronici rispetto all'acciaio dell'Assieme Telaio.



**Figura 23. LCA Fine Vita, Totale**

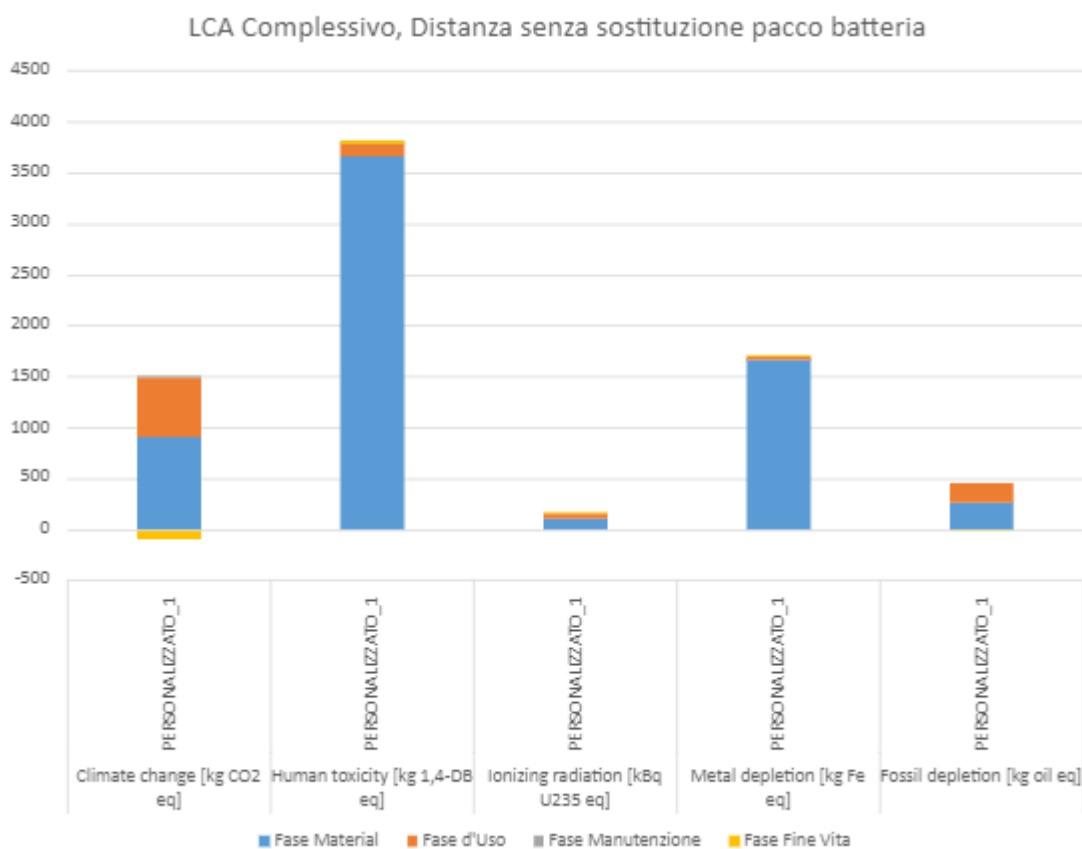


#### 4.2.3.5 *VdI Complessivo*

Per facilitare l'interpretazione dei risultati vengono riassunti in un unico grafico e tabella i risultati ottenuti.

Distanza prevista [km]	4000				
Ciclo Guida	PERSONALIZZATO				
Carico	100%				
Mix energetico	Personalizzato				
LCA Complessiva					
Categoria d'impatto	Fase Material	Fase d'Uso	Fase Manutenzione	Fase Fine Vita	TOTALE
Climate change [kg CO2 eq]	902	585	17	-103	1401
Human toxicity [kg 1,4-DB eq]	3659	127	1	25	3812
Ionizing radiation [kBq U235 eq]	99	60	0	3	162
Metal depletion [kg Fe eq]	1661	25	0	25	1711
Fossil depletion [kg oil eq]	263	181	0	-21	423

**Tabella 19. LCA Complessiva**



**Figura 24. LCA Complessiva**

#### **4.2.4 Interpretazione dei risultati**

Come si può vedere nell’LCA Complessiva di Figura 24, nell’Analisi predittiva, la Fase Material risulta essere la fase più impattante a livello ambientale soprattutto per le categorie Human Toxicity e Metal Depletion; la Fase d’Uso incide in particolare sul Climate change; mentre il Fine Vita è l’unica fase con un contributo negativo ma solo nella categoria Climate change; infine la Fase manutenzione risulta praticamente trascurabile.

Si nota che l’impatto della Fase d’Uso sia modesto nonostante l’AMR sia un prodotto energivoro. Questo risultato ipotizziamo sia dovuto alle poche migliaia di chilometri previste per il suo funzionamento, essendo 4000 km, un chilometraggio molto ridotto per un mezzo industriale, anche se questo AMR svolge la maggior parte del suo lavoro da fermo spostando gli oggetti da una posizione a un’altra compresa nel raggio d’azione del TM 12.

## Capitolo 5

# CONFRONTO DELLA'ANALISI PREDITTIVA CON L'ANALISI LCA COMPLETA

Sono stati confrontati i risultati tra l'Analisi LCA predittiva appena condotta e l'Analisi LCA completa svolta interamente su SimaPro, per lo stesso prodotto in questione. L'Analisi LCA completa è stata svolta sul prodotto a fine progettazione.

Definizione dell'obbiettivo. Confini del sistema, Unità funzionale e Categorie d'impatto considerate rimangono gli stessi già descritti al Paragrafo 4.2.1.

Quello che cambia nell'Analisi condotta su SimaPro è la suddivisione degli Assiemi e il grado di dettaglio dell'Analisi, che in questo caso è maggiore grazie alla disponibilità di una Distinta componenti fornita da Joyteck della Piastra con piedini e della Colonna mobile.

### 5.1 Elenco dei nuovi Assiemi

Gli Assiemi modellati su SimaPro sono 4 e sono i seguenti:

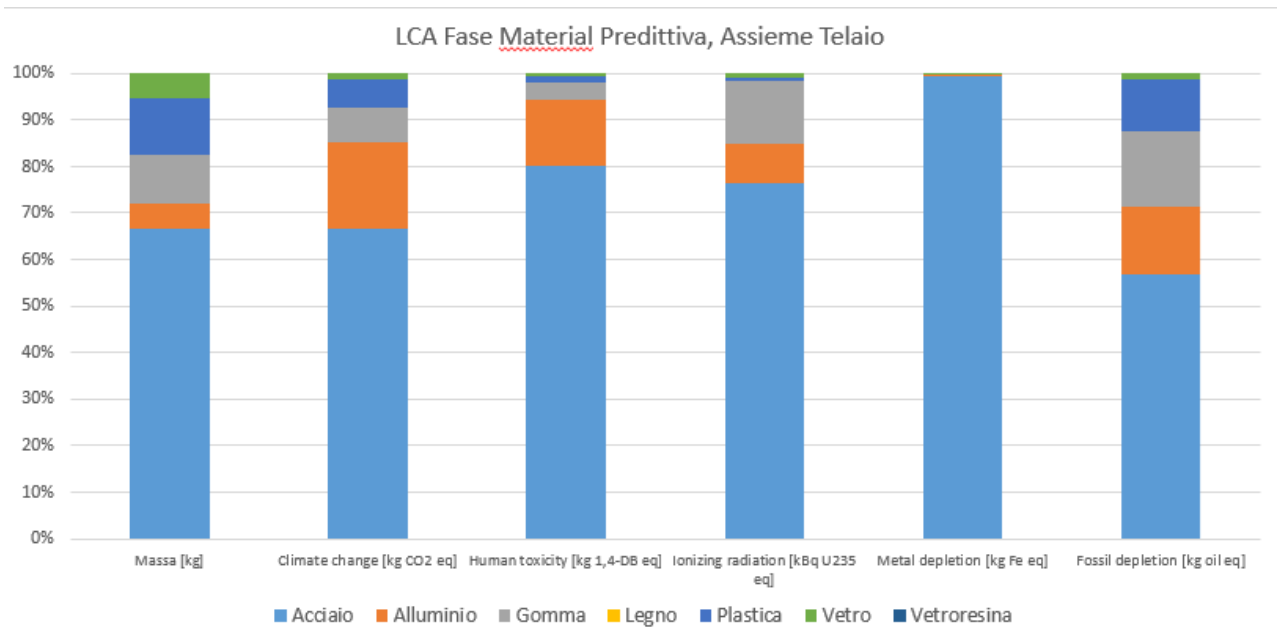
- LD 90
- TM 12
- Colonna mobile
- Piastra con piedini

Nella modellazione di questi componenti sono stati utilizzati i modelli presenti nel database del Software e/o modelli che potessero rispecchiare il più possibile i componenti reali e nel seguire la BOM (Bill Of Materials) della Colonna mobile e della Piastra con piedini va evidenziata una elevata percentuale in massa di Alluminio rispetto all'Acciaio, mentre nell'Analisi predittiva i dati a disposizione davano una situazione opposta, questo emergerà anche dai risultati ottenuti.

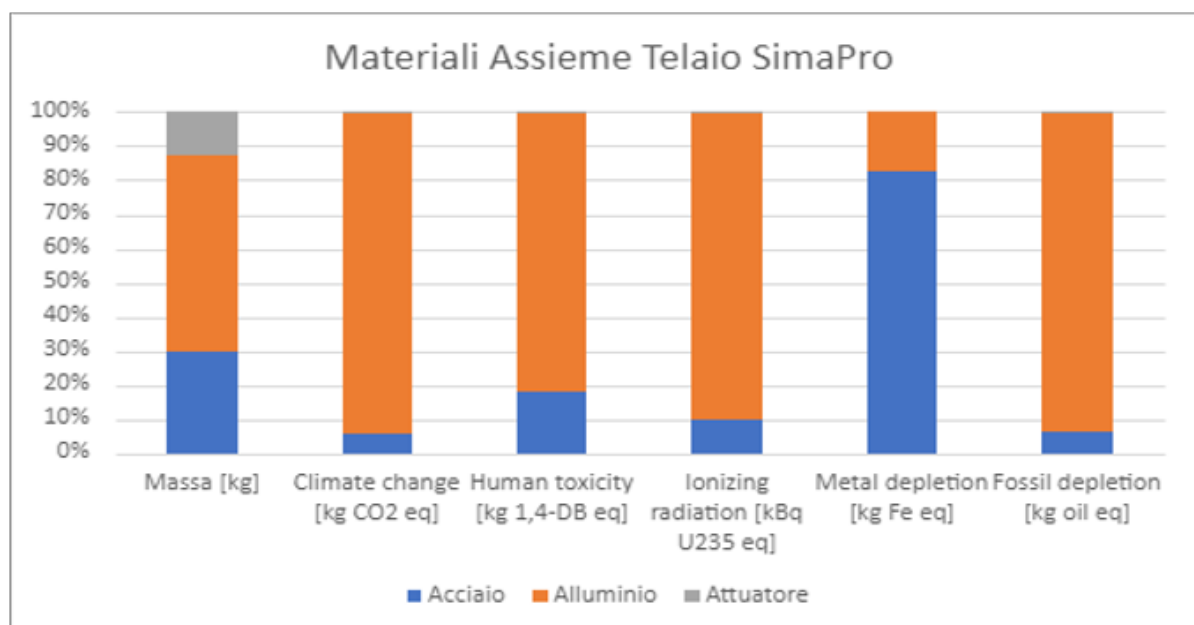
## 5.2 Confronti

- **Sulla Fase Material**

Intanto mettiamo a confronto gli impatti della Fase Material degli Assieme Telaio (in pratica Piasta con piedini + Colonna mobile) distinguendo i materiali impiegati nell'ipotesi predittiva e nel caso realizzato in pratica.



**Figura 25. LCA Fase Material Predittiva**



**Figura 26. LCA Fase Material SimaPro**

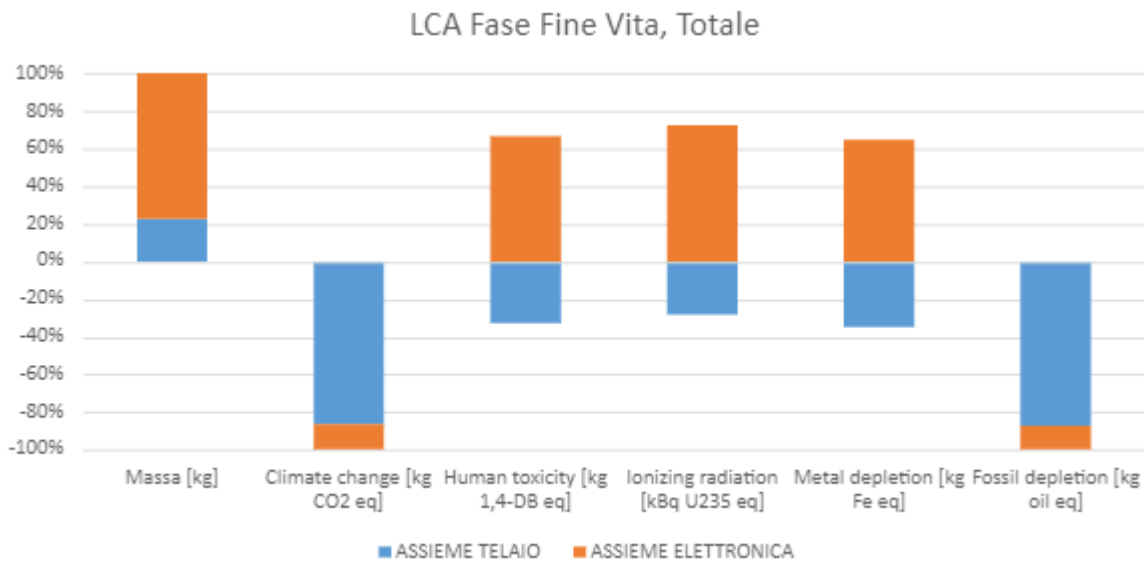
Il confronto mostra che rispetto ai dati di partenza l'Alluminio sostituisce in gran parte l'Acciaio e che gli impatti ambientali dell'Alluminio sono ben più rilevanti a parte che nella categoria Metal Depletion.

La maggior presenza di Alluminio rispetto all'Acciaio si spiega con una scelta dell'Azienda di puntare su un materiale più leggero ma che garantisca le prestazioni meccaniche richieste ai componenti meccanici dell'Assieme Telaio, inoltre questo permette la riduzione del carico che comporta una riduzione dei consumi energetici del veicolo e l'usura della batteria.

- **Sulla Fase d'Uso e Manutenzione**

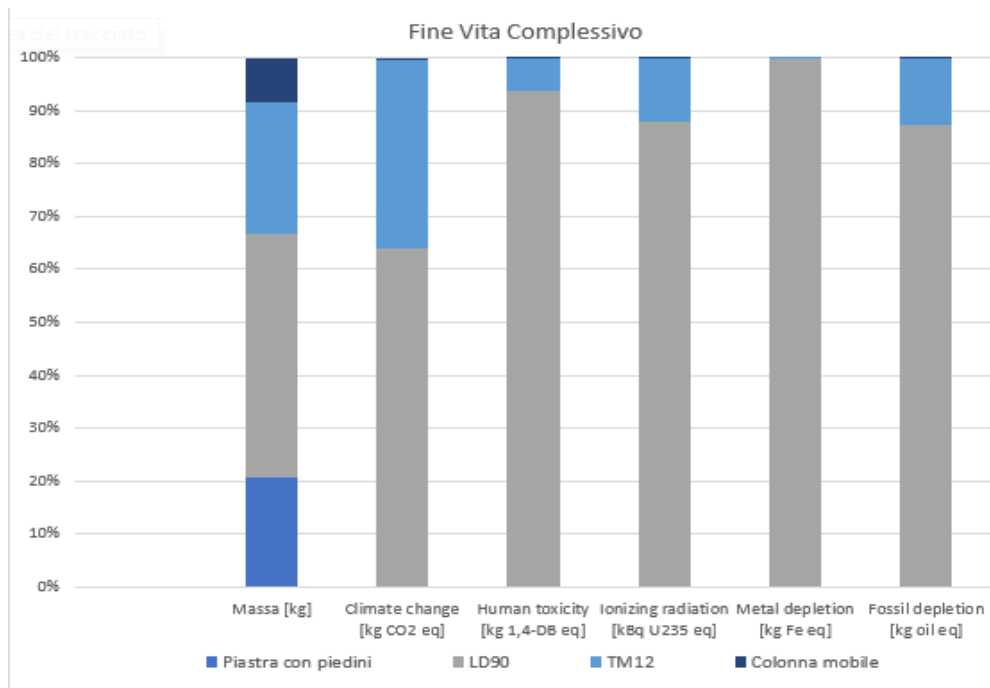
In questa fase non si hanno differenze tra le due metodologie analitiche poiché le modellazioni che sono state seguite sono le stesse, compreso il Ciclo Guida personalizzato

- **Sulla Fase Fine Vita**



**Figura 27. LCA Fase Fine Vita predittiva**

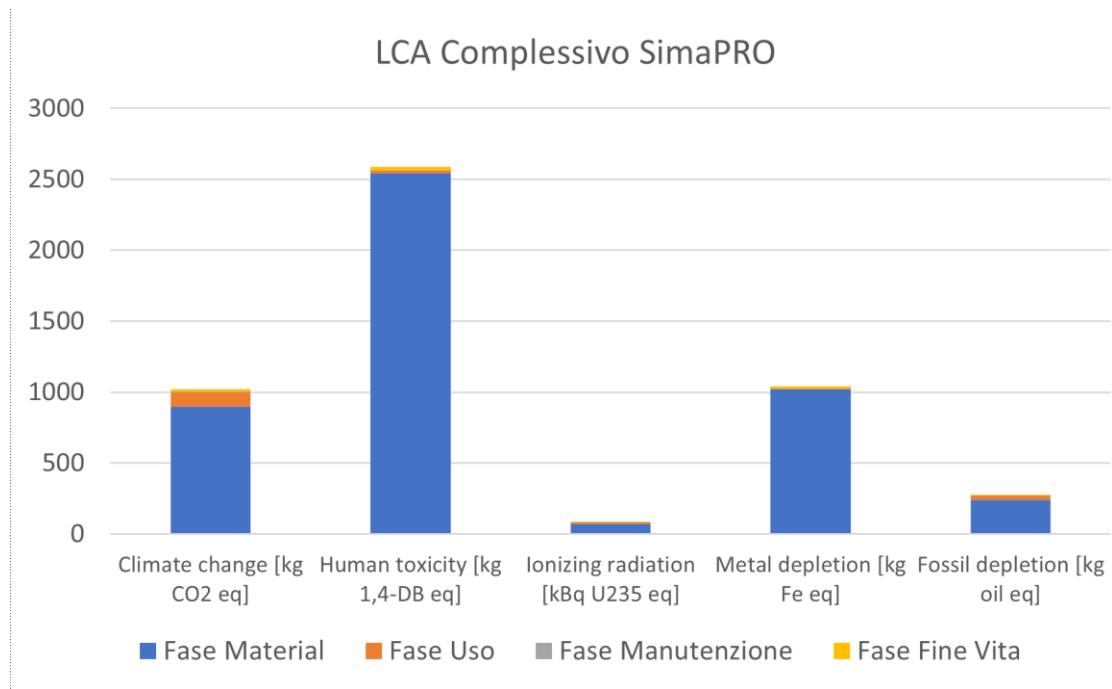
Qui si vede che i risultati ottenuti con le due metodologie sono ben diverse poiché nell'Analisi predittiva si aveva una riduzione delle emissioni grazie agli impatti ambientali negativi, invece con SimaPro si hanno solo impatti positivi e dovuti per la maggior parte all'LD 90, che è una parte elettronica, mentre risultano praticamente nulli gli impatti della Piastra con piedini e della Colonna mobile (che nell'Analisi predittiva facevano parte dell'Assieme Telaio).



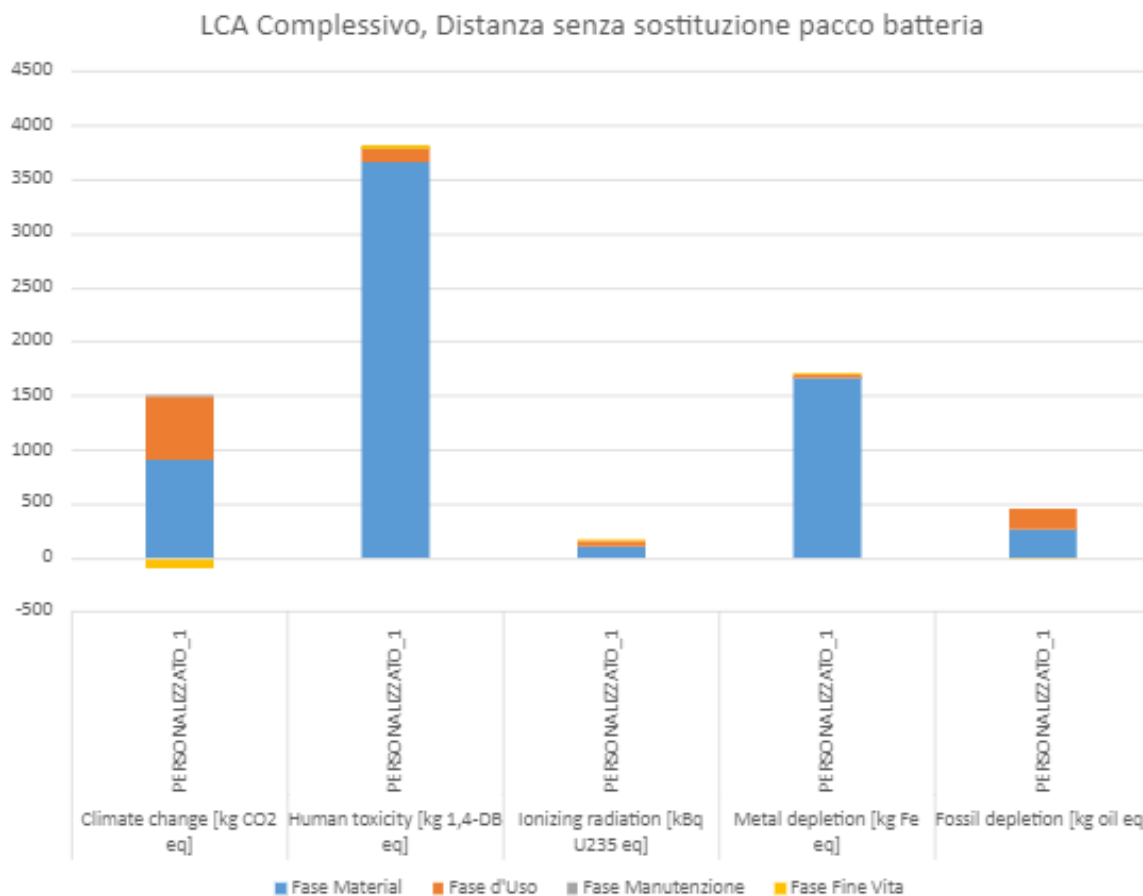
**Figura 28. LCA Fase Fine Vita SimaPro**

- **Sull’LCA Complessiva**

In Figura 29 e 30 vengono confrontati i risultati ottenuti da ogni fase per le due differenti metodologie di Analisi adottate.



**Figura 29. LCA Complessiva SimaPro**



**Figura 30. LCA Complessiva predittiva**

Quello che si nota nel confronto tra le Analisi complessive è che l'andamento degli impatti è lo stesso per ogni categoria considerata e che la Fase Material è la fase più impattante dell'intero ciclo di vita del prodotto, seguita poi dalla Fase d'Uso; quello che cambia è il valore assoluto degli impatti, che nel caso finale dove l'Alluminio è il materiale principale dell'Assieme Telaio, risulta molto minore rispetto al caso precedente dove avevamo il 67% di Acciaio.

## Capitolo 6

### CONCLUSIONI

L'Analisi LCA dell'AMR ha evidenziato che la Fase Material e la Fase d'Uso sono le fasi che hanno un impatto maggiore soprattutto quando si considera lo scenario che prevede di non sostituire il pacco batteria durante la vita utile.

Una possibilità di intervento sulla Fase d'Uso per diminuire l'impatto è optare su risorse energetiche rinnovabili, come quelle provenienti da un impianto fotovoltaico per la ricarica del veicolo così da non dover dipendere da energia proveniente da combustibili fossili non rinnovabili.

Per la Fase Material si è visto che sostituire l'Acciaio con un altro materiale come Alluminio comporta una diminuzione dell'impatto; il materiale infatti influisce riducendo l'impatto della Fase Material e della Fase d'Uso e migliorando il benefit arrecato dal riciclo in Fase Fine Vita.

Se si fosse dovuta considerare una maggiore distanza percorsa allora si sarebbe dovuto trattare anche il cambio del pacco batteria e avremo sicuramente ottenuto un maggiore impatto ambientale per la Fase Manutenzione.

L'obiettivo della tesi è stato sviluppare una metodologia che in fase iniziale di progettazione stimi l'impatto ambientale di un veicolo elettrico industriale, il caso studio ha permesso poi di realizzarlo per un Autonomous Mobile Robot. Lo sviluppo futuro del progetto consisterà nell'approfondire il grado di dettaglio dell'Analisi soprattutto quando si potranno affinare i dati a disposizione dato che si conoscerà la definizione dei componenti, dei relativi processi produttivi e delle condizioni d'uso specifiche, così da migliorare e perfezionare i parametri considerati su SimaPro, comprendendo se l'approccio allo studio e la metodologia proposta, necessitano di accorgimenti e correzioni



## Bibliografia

- [1] Ivanov D, Tang C, Dolgui A, Battini D, Das A (2021) Researchers' perspectives on Industry 4.0: multi-disciplinary analysis and opportunities for operations management. *Int J Prod Res* 59:2055–2278
  
- [2] Bandyopadhyay S (2017) Intelligent vehicles and materials transportation in the manufacturing sector: emerging research and opportunities. *intelligent vehicles and materials transportation in the manufacturing sector: emerging research and opportunities* 1–230
  
- [3] [https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/guida\\_industria\\_40.pdf](https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/guida_industria_40.pdf) , Presentazione al Piano Nazionale Industria 4.0 del Ministro Carlo Calenda
  
- [4] <https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/transizione-4-0-2019-2020?wsdl> , Lettera del Ministro Patuanelli al Sole 24 ore
  
- [5] Eurodrive SEW (2017) I vantaggi degli AGV (Automated Guided Vehicle). Available: <https://blog.sew-eurodrive.it/i-vantaggi-degliagv-automated-guided-vehicle> [Accessed 2021]
  
- [6] AGVE (2021) Perché scegliere un sistema AGV?. Available: <https://www.agve.it/2019/09/20/perche-scegliere-un-sistema-agv/> [Accessed 2021]
  
- [7] <https://www.mobile-industrial-robots.com/it/insights/get-started-with-amrs/agv-vs-amr-whats-the-difference/> Mir: Agv vs amr. [Online]. Available:
  
- [8] ISO, 2006a. 14040:2006 - Environmental management - LCA - Principles and Framework.

- [9] ISO, 2006b. 14044:2006 -Environmental management - LCA - Requirements and Guidelines.
- [10] Environmental and economic sustainability assessment of an industry 4.0 application: the AGV implementation in a food industry, paragrafo 2, Literature review on sustainability assessment of AGVs, di Roberta Stefanini e Giuseppe Vignali
- [11] COMIECO (2020) 25° Rapporto di raccolta, riciclo e recupero di carta e cartone (Dati anno 2019)
- [12] COREPLA (2020) Rapporto di sostenibilità 2019
- [13] ISPRA (2020) Rapporto rifiuti urbani edizione 2019. Available: <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporiorifiuti-urbani-edizione-2019> [Accessed 2021]
- [14] Held, M., Schücking, M., Utilization effects on battery electric vehicle life-cycle assessment: A case-driven analysis of two commercial mobility applications, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019
- [15] Ambrose, H, Kendall, A., Lozano, M., Wachche, S., Fulton, L., Trends in life cycle greenhouse gas emissions of future light duty electric vehicles, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020
- [16] Marmioli, B., Venditti, M., Dotelli, G., Spessa, E., The transport of goods in the urban environment: A comparative life cycle assessment of electric, compressed natural gas and diesel light-duty vehicles, Applied Energy, 2020
- [17] Hernandez, M., Messagie, M., De Gennaro, M., Van Mierlo, J., Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods, Resources, Conservation and Recycling, 2017

- [18] Schücking, M.; Jochem, P.; Fichtner, W.; Wollersheim, O.; Stella, K., *Influencing factors on specific energy consumption of EV in extensive operations*, EVS 2016 - 29th International Electric Vehicle Symposium
- [19] R Faria, P Marques, P Moura, F Freire, J Delgado, AT De Almeida. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles, 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 271-287.
- [20] Ricardo Faria, Pedro Moura, Joaquim Delgado, Anibal T. de Almeida, A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system, *Energy Conversion and Management* 61 (2012)
- [21] Tutuianu, M., Marotta, A., Steven, H., Ericsson, E., Haniu, T., Ichikawa, N., Ishii, H., Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC), UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG, 2013
- [22] <https://www.tekne.it/340/progetti-di-ricerca.html>
- [23] Matteo Forlini, Integration of an autonomous mobile robot with a collaborative manipulator, 2020, Capitolo 5 e 6
- [24] Kamilė Petrauskienė, Monika Skvarnavičiūtė, J. Dvarionienė, Comparative environmental life cycle assessment of electric and conventional vehicles in Lithuania, 2020, *Journal of Cleaner Production*.
- [25] Manuguerra Luca, Sviluppo di una metodologia predittiva semplificata per l'analisi ambientale ed economica del ciclo di vita di un veicolo elettrico, 2021