

LCA di mezzi per la mobilità urbana nel contesto italiano

Paola Cristina Brambilla, Elisabetta Brivio, Giulio Mela, Andrea Temporelli

2023

Progetto Mobilità sostenibile e interazione con il sistema energetico

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale



Accordo di programma 2022-2024 con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.

Progetto Mobilità sostenibile e interazione con il sistema energetico

Work Package WP 1 - Analisi integrata e strategie di sviluppo della mobilità sostenibile in Italia

Linea di Attività LA 1.04 - Valutazione degli effetti ambientali di scenari di transizione ecologica della mobilità 2023

Codice identificativo RT-2.07-1.04-1

Titolo: LCA di mezzi per la mobilità urbana nel contesto italiano

Autori: Paola Cristina Brambilla, Elisabetta Brivio, Giulio Mela, Andrea Temporelli

Verificatori: Pierpaolo Girardi

Approvatori: Michele de Nigris, Filippo Colzi

Tipologia di documento: RAPPORTO

Data di emissione: 29/12/2023

Note: prima emissione

© Copyright 2023 by Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S.p.A.

Contributo/i liberamente utilizzabile/i a condizione che venga chiaramente e visibilmente citata la società titolare.

Per la tutela dell'ambiente, prima di stampare questo documento pensa bene se è veramente necessario.



INDICE

INDICE	3
SOMMARIO.....	5
1 - INTRODUZIONE	6
2 - LCA DI BUS PER IL TRASPORTO PUBBLICO URBANO	7
2.1 Goal and Scope	7
2.1.1 Unità funzionale	7
2.1.2 Confini del sistema.....	7
2.1.3 Sistema di allocazione.....	7
2.1.4 Categorie di impatto	8
2.2 Inventario	9
2.2.1 Produzione e fine vita di veicoli e batteria.....	9
2.2.2 Approvvigionamento dei vettori energetici	11
2.2.3 Uso e manutenzione dei veicoli	12
2.3 Analisi e interpretazione dei risultati	12
2.3.1 Environmental Footprint	12
2.3.2 CLCC e Critical CLCC.....	16
3 - AGGIORNAMENTO DEGLI STUDI PREGRESSI	18
3.1 Batterie di veicoli per la micromobilità	18
3.1.1 Impatti ambientali batterie per la micromobilità.....	20
3.2 Motore monopattino	22
3.2.1 Impatti ambientali	23
3.3 Monitoraggio dei mezzi per la micromobilità	24
3.3.1 Cargobike a pedalata assistita	24
3.3.2 ebike	25
4 - CONFRONTO DEI MEZZI PER LA MOBILITÀ URBANA	26
4.1 Mobilità passeggeri	26
4.1.1 Environmental Footprint	26
4.1.2 CLCC e Critical CLCC.....	31
4.2 Mobilità merci	34
4.2.1 Environmental Footprint	35
4.2.2 CLCC e Critical CLCC.....	38
5 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	41
6 - BIBLIOGRAFIA.....	43
7 - APPENDICE: APPROFONDIMENTO LCA DI BUS URBANI.....	46
7.1 Informazioni di dettaglio per la redazione dell'inventario	46
7.2 Analisi di incertezza	51
8 - APPENDICE: AGGIORNAMENTO BATTERIE MICROMOBILITÀ.....	54
8.1 Dati di inventario	54
8.2 Test di laboratorio per l'individuazione della vita utile delle batterie	58
9 - APPENDICE: AGGIORNAMENTO MOTORE MONOPATTINO	59
10 - APPENDICE: FATTORI EMISSIVI IN FASE D'USO AUTO, BUS E FURGONI	60



11 - APPENDICE: LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT	62
11.1 Mobilità dei passeggeri	62
11.1.1 <i>Environmental Footprint</i>	62
11.1.2 CLCC e Critical CLCC – <i>Analisi dell'incertezza</i>	64
11.2 Mobilità delle merci	66
11.2.1 <i>Environmental Footprint</i>	66
11.2.2 CLCC e critica CLCC – <i>Analisi dell'incertezza</i>	68
12 - ACRONIMI	71



SOMMARIO

Le politiche europee per Energia e Clima hanno portato a riduzioni delle emissioni di gas serra in tutti i settori ad eccezione di quello dei trasporti, per cui appare evidente come il raggiungimento della neutralità climatica non possa prescindere da interventi decisivi in tale settore, *in primis* l'elettrificazione dei mezzi. Specialmente in ambito urbano, l'elettrificazione del trasporto pubblico locale (TPL) può portare ad elevati benefici, specie se affiancata a mix elettrici sempre più *decarbonizzati*. Occorre però valutare se dietro l'assenza di emissioni allo scarico non si celino impatti in altre fasi del ciclo di vita dei mezzi.

Lo studio analizza, in ottica di *Life Cycle Assessment* (LCA), gli impatti ambientali (*Environmental Footprint*) ed economici (*Commodity Life Cycle Costing*) di diverse opzioni per il trasporto urbano dei passeggeri (bus, auto e micromobilità) e delle merci (furgoni e cargobike), avvalendosi anche di attività sperimentali sui mezzi per la micromobilità, atte all'individuazione dei materiali usati nella produzione di batterie e motori e dei consumi energetici in fase d'uso.

Relativamente agli spostamenti casa-lavoro, la micromobilità risulta la migliore alternativa in tutte le categorie di impatto (con riduzioni di circa il 90% delle emissioni climalteranti rispetto ad auto tradizionali) ad eccezione del consumo di risorse ove presentano prestazioni inferiori al bus Diesel. I bus risultano preferibili alle auto, per qualsiasi motorizzazione, confermando come le azioni volte all'introduzione di mezzi elettrici nelle flotte del TPL vadano nella direzione del raggiungimento della neutralità climatica. Lo *shift* modale da auto Diesel a bus elettrico e da auto elettrica a bus elettrico porta ad una riduzione delle emissioni climalteranti rispettivamente dell'84 e del 53%. Micromobilità e TPL sono una valida alternativa anche per il consumo di materiali critici, la cui disponibilità potrebbe rappresentare il principale ostacolo alla diffusione dei mezzi elettrici.

Per quanto riguarda la consegna merci di ultimo miglio, la cargobike rappresenta la soluzione migliore per tutte le categorie di impatto con risparmi rispetto ai furgoni Diesel che vanno da oltre il 50% nel caso del *Climate Change* a circa il 20% per *Resource Use Minerals and Metals*. Poiché tale soluzione appare percorribile per lo più nei centri storici delle città, nelle aree a minore densità urbana occorrerà affiancare le cargobike a furgoni elettrici, che risultano la seconda opzione preferibile. Infine, l'attività ha messo in luce l'importanza dell'uso di dati primari. In futuro, sarebbe auspicabile introdurre tali analisi anche per auto e bus.

Keywords: LCA, CLCC, critical-CLCC, bus elettrici urbani, micromobilità, mobilità urbana – (AR).



1 - INTRODUZIONE

Le politiche europee per l'energia ed il clima hanno portato a riduzioni delle emissioni di gas serra in tutti i settori ad eccezione di quello dei trasporti, per il quale l'aumento della domanda ha più che compensato gli effetti positivi legati a standard emissivi sempre più stringenti [1]. Secondo i dati pubblicati dall'Unione Europea nel 2023 [2], le emissioni di gas serra dal settore trasporti, dopo una riduzione nel 2020 causata dalla pandemia, sono tornate a crescere e nel 2021 rappresentavano il 26.7% delle emissioni totali dell'Unione. Di queste, il 76.2% è da ascrivere al trasporto su strada. I veicoli pesanti, compresi i bus, sono responsabili di circa il 28% delle emissioni complessive da traffico stradale in EU.

In questo quadro, risulta evidente come il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione dettati dal Green Deal Europeo [3] (-55% entro il 2030 e zero emissioni entro il 2050) non possa prescindere da interventi decisivi che coinvolgano il settore dei trasporti [4], il più significativo dei quali è rappresentato dalla elettrificazione dei trasporti [5]. Se in passato l'attenzione del mondo scientifico si era concentrata principalmente sulle auto adibite al trasporto privato dei passeggeri, negli ultimi tempi si osserva un crescente interesse per la decarbonizzazione del trasporto pesante e, più in particolare, del trasporto pubblico locale (TPL) [6] [7] [8] [9] [10]. Dagli studi analizzati emerge come l'aumento diffuso di mezzi elettrici nelle flotte del trasporto pubblico locale (TPL) possa portare ad elevati benefici, specie se accoppiato con mix elettrici caratterizzati da una elevata quota di produzione da rinnovabili [8]. In questo senso, per incentivare l'elettrificazione delle flotte del TPL, la Direttiva Europea EU 2019/1161 [11] (*Clean Vehicle Directive*) – recepita in Italia dal Decreto Legislativo 187/2021 [12] – impone obiettivi minimi di approvvigionamento di veicoli puliti e a basso consumo energetico per le pubbliche amministrazioni, tenendo conto, in fase di appalto, degli impatti energetici ed ambientali lungo tutto il ciclo di vita di tali mezzi. Occorre, in altre parole, valutare se l'assenza di emissioni allo scarico non comporti un trasferimento degli impatti in altre fasi del ciclo di vita dei mezzi cosiddetti *green*. La metodologia del *Life Cycle Assessment* (LCA) – basata su un approccio "dalla culla alla tomba" – si presta a diventare lo strumento principe per tali valutazioni, poiché capace di tenere conto degli impatti potenziali legati alle emissioni di inquinanti e al consumo di risorse lungo tutto il ciclo di vita dei veicoli analizzati, a partire dall'approvvigionamento dei materiali necessari alla costruzione del mezzo, passando per l'approvvigionamento dei vettori energetici necessari al funzionamento, al vero e proprio utilizzo (comprensivo di manutenzione) fino a giungere alla gestione del fine vita.

Nel contesto degli obiettivi del triennio di ricerca 2022-2024 del progetto di Ricerca di Sistema *Mobilità sostenibile e interazione con il sistema energetico*, il presente studio mira ad ampliare il novero delle tecnologie sostenibili per la mobilità in ambito urbano incluse nelle analisi, introducendo un confronto tra le motorizzazioni diesel ed elettrica di bus urbani che mette in luce punti di forza e di debolezza di ciascuno (Capitolo 2 -). Grazie ai risultati e alle competenze maturati in precedenti periodi di ricerca, le prestazioni dei mezzi per il TPL vengono confrontate con quelle dei mezzi per il trasporto privato (Capitolo 4 -). Le prestazioni dei mezzi vengono valutate utilizzando il metodo *Environmental Footprint* (EF 3.0) sviluppato dal *Joint Research Centre* e raccomandato dalla Commissione Europea come metodo comune per misurare le prestazioni ambientali dei prodotti [13]. Inoltre, ulteriori elementi di confronto sono ottenuti mediante l'applicazione dell'indicatore economico *Commodity Life Cycle Costing* (CLCC) [14] con particolare riferimento alle risorse critiche che risultano strategiche per lo sviluppo futuro delle tecnologie elettriche. L'esigenza di analizzare la presenza di materiali critici è emersa anche dalla collaborazione con l'Associazione Italiana Economisti dell'Energia.

Questo confronto ha potuto beneficiare di alcuni aggiornamenti che hanno riguardato, in modo particolare, i mezzi per la micromobilità, per i quali, una attività sperimentale realizzata *ad hoc* ha fornito dati primari per il modello LCA della fase di produzione di motore e batterie (Capitolo 3 -). Sempre nell'ottica di un continuo aggiornamento dei modelli disponibili, sono proseguite le attività di monitoraggio dei consumi dei mezzi per la micromobilità.



2 - LCA DI BUS PER IL TRASPORTO PUBBLICO URBANO

Il presente capitolo analizza e confronta le prestazioni di due differenti motorizzazioni di bus urbani (elettrico e diesel) per il trasporto pubblico dei passeggeri in un'ottica di ciclo di vita.

L'analisi è sviluppata secondo le linee guida della norma ISO 14040 [15] e ha lo scopo di mettere in evidenza punti di forza e di debolezza delle due opzioni, con il fine ultimo di confrontare gli impatti potenziali associabili a queste modalità di trasporto con le altre modalità già analizzate in precedenti studi di ricerca di sistema (diverse motorizzazioni di auto e mezzi per la micromobilità). Nel seguito, il processo di valutazione viene descritto mettendo in evidenza principali passi codificati di una LCA: Goal and Scope (Paragrafo 2.1); Inventario (Paragrafo 2.2) e Analisi ed interpretazione dei risultati (Paragrafo 2.3).

2.1 Goal and Scope

L'obiettivo dello studio è di valutare i potenziali impatti ambientali di diverse motorizzazioni di bus per il trasporto pubblico in ambito urbano, lungo tutto il ciclo di vita (approccio "dalla culla alla tomba"). Il fine ultimo è quello di mettere in luce aspetti di forza e di debolezza della elettrificazione del trasporto pubblico urbano e di fornire elementi che consentano ai policy maker di introdurre politiche atte alla gestione del trasporto urbano, pubblico e privato, in un'ottica di sostenibilità.

2.1.1 Unità funzionale

Questo studio mette a confronto due motorizzazioni di un bus urbano della lunghezza di 12 metri, uno alimentato a Diesel ed uno elettrico.

L'unità funzionale dello studio è un passeggero*chilometro (pkm) che corrisponde alla funzione specifica di un bus di trasportare passeggeri lungo una determinata linea.

Si ipotizza che la vita utile dei bus sia di 800000 km (80000 km/anno per 10 anni) [16] e che la batteria del bus elettrico venga sostituita una volta lungo la vita utile del mezzo [6]¹.

Il numero massimo di passeggeri trasportabili è pari a 102 passeggeri/veicolo [16]. Assumendo un coefficiente di riempimento medio pari al 20% [17], si ottiene il valore di 20.4 passeggeri medi trasportati per veicolo. Questo valore è in linea con quanto riscontrato in letteratura, così come riportato in Appendice 7 -, Tabella 7.4.

Per creare i modelli LCA dei mezzi, si adotta l'approccio *Attributional*² [18].

2.1.2 Confini del sistema

Lo studio è stato svolto con un'ottica cosiddetta "dalla culla alla tomba", includendo tutte le fasi del ciclo di vita dei bus:

- Estrazione e lavorazione delle materie prime;
- Lavorazione dei componenti e produzione dei veicoli;
- Approvvigionamento dei vettori energetici;
- Fase d'uso;
- Manutenzione;
- Fine vita.

2.1.3 Sistema di allocazione

Nella presente analisi non si manifesta la necessità, nelle filiere principali, di procedere ad alcuna allocazione, se non nel caso dell'energia elettrica (per gli impianti cogenerativi) per cui si rimanda al rapporto [19].

¹ Questa ipotesi è stata confermata anche da un colloquio informale con un esperto di Iveco Bus avvenuto il 9 giugno 2023.

² L'approccio *Attributional* ha lo scopo di descrivere i flussi fisici rilevanti dal punto di vista ambientale in ingresso ed in uscita da un processo e dai sottosistemi ad esso connessi, a differenza dell'approccio *Consequential* che si pone l'obiettivo di descrivere la variazione della rilevanza ambientale dei flussi fisici al variare di determinate decisioni.

Per quanto riguarda l'approccio generale, si è optato per un approccio *Cut-off*³ con la sola eccezione delle batterie, per le quali si è considerato il riciclo dei materiali a fine vita ed un credito ambientale per le materie prime seconde generate dal processo di riciclo stesso.

2.1.4 Categorie di impatto

La valutazione dei potenziali impatti ambientali lungo il ciclo di vita (LCIA – *Life Cycle Impact Assessment*) è avvenuta facendo uso del metodo *Environmental Footprint Impact Assessment Method* (EF Method) [20] sviluppato dal *Joint Research Centre* e raccomandato dalla Commissione Europea come metodo comune per misurare le prestazioni ambientali dei prodotti [13]. Le categorie di impatto incluse nell'analisi sono riportate in Tabella 2.1 e sono quelle utilizzate più di frequente in studi LCA relativi al settore dei trasporti [6].

Tabella 2.1 – Categorie di impatto del metodo *Environmental Footprint* considerate nel presente studio, con rispettivi indicatori e modelli di caratterizzazione.

Categoria di impatto	Unità di misura	Indicatore <i>Midpoint</i>	Modello di caratterizzazione e fonte
<i>Climate change</i> (CC)	kg CO ₂ eq	Potenziale di surriscaldamento globale totale nell'orizzonte temporale di 100 anni (GWP ₁₀₀).	IPCC 2013 [21]
<i>Photochemical ozone formation</i> (POF)	kg NMVOCeq	Potenziale di formazione dell'ozono fotochimico.	LOTOS-EUROS come applicato in ReCiPe 2008 [22]
<i>Acidification</i> (A)	Mol H ⁺ eq	Superamento accumulato del carico critico delle sostanze acidificanti negli ecosistemi terrestri e delle acque dolci.	Superamento accumulato AE (Accumulated Exceedance) [23] [24]
<i>Particulate matter</i> (PM)	Disease incidence	Impatto sulla salute umana dovuto all'esposizione al particolato PM _{2.5} (incidenza di malattia)	UNEP-SETAC Task Force (TF) on PM [25]
<i>Human toxicity, non-cancer</i> (HT-NC)	CTUh ^(*)	Aumento della morbidità non cancerogena nella popolazione totale per unità di composto chimico emesso	USEtox, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [26]
<i>Human toxicity, cancer</i> (HT-C)	CTUh	Aumento della morbidità cancerogena nella popolazione totale per unità di composto chimico emesso	USEtox, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [26]
<i>Resource use, fossils</i> (RU-E)	MJ	Impoverimento delle risorse abiotiche, combustibili fossili (MJ)	Abiotic Resource Depletion, "ultimate reserves" [27]
<i>Resource use, minerals and metals</i> (RU-M)	kg Sbeq	Impoverimento delle risorse abiotiche, minerali e metalli (kg Sb eq.)	Abiotic Resource Depletion, "ultimate reserves" [27]

(*) Comparative Toxic Unit for human.

Ulteriori elementi di confronto sono stati ottenuti mediante l'applicazione dell'indicatore economico *Commodity Life Cycle Costing* (CLCC) [14] che rende conto di tutte le risorse naturali acquisite e utilizzate lungo il ciclo di vita del bene analizzato. Accanto a questo, si è valutato anche l'indicatore *critical-CLCC* [28], dedicato esclusivamente ai cosiddetti "materiali critici", materiali strategicamente importanti per l'Europa, ma caratterizzati da elevato rischio geopolitico. Tali indicatori sono stati sviluppati da RSE nell'ambito del progetto RdS *Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico*, a cui si rimanda per maggiori dettagli [29].

³ Nell'approccio *Cut-off*, l'impatto delle materie prime è sempre imputato al processo principale. Se un materiale viene riciclato, il produttore primario non riceve crediti sulla fornitura di materiale riciclato, ma gli impatti del riciclo (ad esempio raccolta e conferimento ed il processo di riciclo) vengono imputati al processo secondario. Di conseguenza, il materiale riciclato è reso disponibile, privo degli impatti che si imputerebbero alla produzione della materia prima, ai processi secondari che vogliano utilizzarlo. Un tale approccio consente una più flessibile e trasparente gestione della fase di fine vita.

2.2 Inventario

Nei paragrafi che seguono, si riportano le specifiche tecniche rappresentative dei bus nonché la descrizione dei dati utilizzati per la modellazione delle fasi del ciclo di vita.

Per i dati di *background*, il principale riferimento è la banca dati Ecoinvent 3.8 [30], poiché a livello internazionale è il database LCA più completo ed utilizzato. Si è fatto poi riferimento al modello GREET (*The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model*) [31] per la modellazione delle fasi di produzione e manutenzione dei veicoli. Il modello LCA della batteria agli ioni di litio è stato realizzato grazie all'attività sviluppata nell'ambito del progetto RdS *Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico* mentre il mix elettrico italiano è frutto delle attività svolte nel progetto RdS *Scenari energetici e supporto alla governance*. Il sistema è stato modellato utilizzando il software SimaPro.

Nei paragrafi che seguono, vengono fornite le informazioni di dettaglio relative a ciascuna fase del ciclo di vita considerata.

2.2.1 Produzione e fine vita di veicoli e batteria

La modellizzazione della fase di produzione dei bus si basa, come detto, sul modello GREET e più precisamente sulla parte che concerne la modellazione dei veicoli pesanti (MHDV – *Medium Heavy Duty Vehicles*) [31]. Il modello GREET descrive quantitativamente tre differenti configurazioni di veicoli pesanti specificando, per ciascuno di essi, i componenti presenti e la loro composizione per materiale. La descrizione dei componenti presenti in GREET è riportata in Appendice 7 -, Tabella 7.1. Tra i diversi mezzi disponibili, la scelta è ricaduta sul modello 1 -- *Class 6 PnD Trucks (pick-up and delivery)* poiché è risultato il modello più simile per configurazione (numero di semiassi, numero di pneumatici, ...), potenza del motore (250 kW) e peso, al bus urbano 12 m che si vuole modellizzare. I dati di GREET sono stati poi modificati per tenere conto della maggiore presenza, in un bus, di materiali quali ad esempio vetro e tessuti/polimeri, rispetto alle quantità presenti in un camion. Al fine di adattare i dati di GREET al modello di bus, si è presa come riferimento la dichiarazione EPD del bus ibrido Urbino 12 [16].

La Tabella 2.2 riporta i componenti ed il relativo peso per i due modelli di bus considerati dopo le rielaborazioni. La Figura 2.1 mostra invece la composizione percentuale per materiale di ciascuno dei due mezzi. Il dettaglio della composizione per materiale di ciascuno dei due bus è riportato in Appendice 7 - (Tabella 7.2 e Tabella 7.3).

Tabella 2.2 – Peso dei componenti del bus elettrico (BEB) e del bus Diesel (ICEB) considerati in questo studio (Fonte GREET, elaborazioni RSE).

	BEB (kg)	ICEB (kg)
Body	5046.53	5046.53
Chassis (w/o battery)	3717.56	3717.56
Electronic Controller	13.00	0.00
Fluids	87.60	123.75
Lead-Acid Battery	31.30	62.60
Li-Ion Battery	2995.00	0.00
Powertrain System (including BOP)	0.00	644.96
Traction Motor	134.00	0.00
Transmission System/Gearbox	90.00	221.00
Totale complessivo	12115.00	9816.40

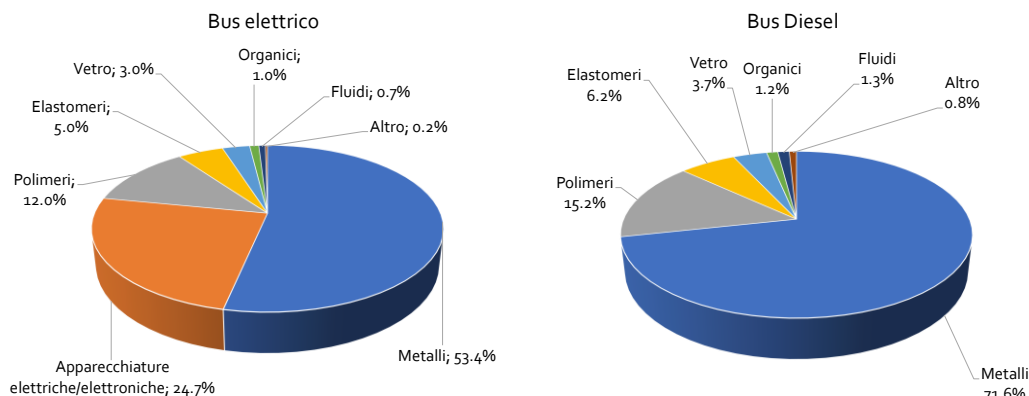


Figura 2.1 – Composizione per materiale (% sul peso totale) per il bus elettrico (BEB) ed il bus Diesel (ICEB) considerati in questo studio (Fonte GREET, elaborazioni RSE).

Nel processo di produzione dei veicoli, sono stati considerati i consumi energetici (Tabella 2.3) e le emissioni in fase di verniciatura (Tabella 2.4) pubblicati da GREET e adattati al caso studio in esame.

Tabella 2.3 – Consumi energetici in fase di assemblaggio (fonte GREET, elaborazioni RSE).

Elettricità (kWh/veicolo)	3108
Calore (MJ/veicolo)	5574

Tabella 2.4 – Emissioni in fase di verniciatura dei veicoli (fonte GREET, elaborazioni RSE).

	kg/veicolo
VOC	1.6
CO	0.02
NOx	0.03
PM10	0.06
PM2.5	0.03

In assenza di dati specifici, il fine vita dei bus è stato trattato come in [32] considerando, in prima approssimazione, di poter estendere ai bus il processo di trattamento a fine vita delle auto.

Si ipotizza che il bus elettrico sia dotato di una batteria di tipo NMC, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 2.5. Le specifiche della batteria scelta per l'analisi rispecchiano quelle della batteria Solaris NMC High Energy + con cui è equipaggiato il bus elettrico Urbino 12⁴.

Tabella 2.5 – Specifiche della batteria con cui è equipaggiato il bus elettrico.

Tipo di batteria	NMC
n. pacchi	5
capacità totale (kWh)	395
Peso della batteria (kg)	2995

La modellazione LCA è avvenuta utilizzando come *proxy* il modello di batteria NMC 712 (Lithium Nickel Manganese Cobalt oxide $\text{LiNi}_{0.7}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.2}$) sviluppato nello scorso anno di Ricerca di Sistema [33] poiché, tra i modelli LCA di batterie NMC a disposizione, è quello caratterizzato da una densità energetica vicina a quella delle batterie del bus elettrico (circa 140 Wh/kg di batteria contro i 131 Wh/kg della batteria Solaris)⁵.

⁴ (<https://www.autobusweb.com/batterie-per-autobus-elettrici-i-competitor-affilano-le-armi/>).

⁵ Si tratta di una approssimazione che potrà essere superata con approfondimenti successivi e grazie ai contatti già avviati in via preliminare con Iveco.

La caratterizzazione dei consumi energetici in fase di produzione della batteria è avvenuta ipotizzando che le celle siano prodotte in Cina e che il pacco batterie sia assemblato in Europa. Il fine vita delle batterie consiste di un processo pirometallurgico e di uno idrometallurgico che avvengono in cascata, con recupero di rame, solfato di cobalto, solfato di nichel e solfato di manganese. La modellazione del fine vita è avvenuta a partire dallo studio di Cusenza et al., [34] adattandola, nell'ambito del progetto RdS *Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico, alle chimiche attuali*⁶.

2.2.2 Approvvigionamento dei vettori energetici

Il mix elettrico italiano considerato per la ricarica delle batterie dei bus elettrici è un mix che tiene conto della progressiva decarbonizzazione del sistema elettrico italiano nei dieci anni di vita del mezzo. Tale mix, costruito grazie ai risultati delle attività svolte nel progetto RdS *Scenari energetici e supporto alla governance* [35] [19], è dato da una combinazione lineare dei mix elettrici italiani al 2019⁷ e al 2030 (scenario di *policy Green Deal*), con riferimento ad un mezzo che, prodotto nel 2019, giunga a fine vita nel 2030 [33].

La composizione per fonte dei mix elettrici utilizzati nello studio è rappresentata in Figura 2.2.

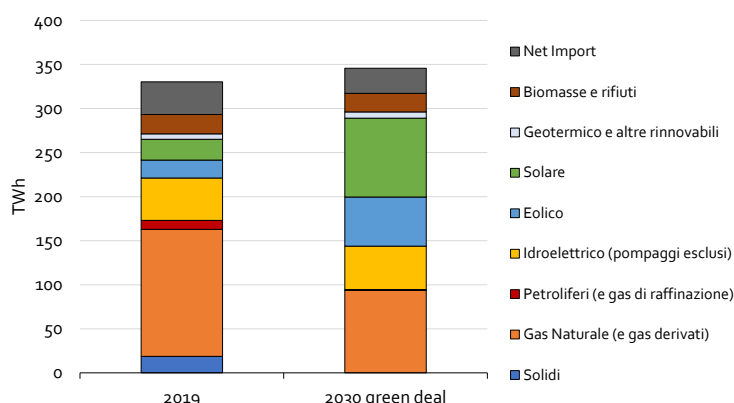


Figura 2.2 – Mix 2019 e mix 2030 per fonte (da progetto Scenari).

Per quanto riguarda le altre fasi del ciclo di vita, valgono le seguenti assunzioni:

1. I consumi elettrici in fase di manutenzione così come quelli legati alla raffinazione e distribuzione del Diesel sono rappresentati dal mix medio durante la vita del mezzo (così come il mix di ricarica delle batterie);
2. I consumi legati al fine vita di veicoli sono caratterizzati dal mix elettrico previsto per il 2030.

Relativamente alle fasi di produzione di veicoli e batteria, poiché per ipotesi queste avvengono fuori dall'Italia, si è fatto riferimento ai mix elettrici messi a disposizione da Ecoinvent (mix Europeo per la produzione del veicolo e l'assemblaggio della batteria e mix cinese per la produzione delle celle).

Il Diesel che alimenta il bus a combustione interna è costituito da un mix di Diesel minerale e di biodiesel con una miscelazione del 7% in volume (Norma UNI EN 590 [36]), così come definito nel rapporto di Ricerca di Sistema n. 21010643 [32]. La caratterizzazione del biodiesel immesso in consumo in Italia rispecchia i dati pubblicati dal GSE per l'anno 2019 [37].

⁶ I risultati dell'attività di modellazione del fine vita saranno pubblicati nel rapporto finale del progetto a fine 2024 (Fine vita delle batterie: un'analisi basata sulla LCA).

⁷ Ultimo mix energetico per cui si dispone di una analisi LCA al momento di redazione del presente lavoro



2.2.3 Uso e manutenzione dei veicoli

I consumi dei mezzi sono tratti da letteratura e sono assunti pari a 1.25 kWh/km per il bus elettrico [38] e 38.04 l/100km per il bus Diesel [39].

Le emissioni in fase d'uso dei veicoli comprendono le emissioni dirette dovute alla combustione del carburante (per il solo veicolo a combustione interna) e le emissioni dovute all'usura di freni, pneumatici e manto stradale.

Per le emissioni dirette, si è fatto uso della banca dati dei fattori di emissione medi del trasporto stradale in Italia pubblicata da ISPRA per il 2020 [39]. I bus presi a riferimento sono quelli appartenenti al segmento *Urban Buses Standard 15 - 18 t* caratterizzati dallo standard Euro VI D/E. I fattori emissivi utilizzati nello studio sono riportati in Appendice 7 -, Tabella 7.5.

Le emissioni da usura sono valutate grazie all'utilizzo degli specifici dataset messi a disposizione da Ecoinvent, basati sui dati pubblicati da EMEP/EEA nell'*Air pollutant emission inventory guidebook* [40], [41]. Tali emissioni sono proporzionali al peso del veicolo comprensivo dei passeggeri trasportati⁸.

La fase di manutenzione è modellata a partire dai dati pubblicati da GREET [31], adattati al presente caso studio e rende conto della sostituzione di pneumatici, fluidi, filtro dell'olio, spazzole tergicristalli e batterie al piombo (per ICEB) lungo la vita utile dei mezzi. In Appendice 7 - (Tabella 7.6) sono riportati il numero di sostituzioni e le quantità sostituite per i mezzi analizzati.

2.3 Analisi e interpretazione dei risultati

Il presente capitolo descrive i risultati ottenuti dal confronto tra bus elettrico e bus diesel in ottica di ciclo di vita ed in relazione al servizio offerto, ovvero il trasporto in ambito urbano di 1 passeggero per 1 chilometro. Il Paragrafo 2.3.1 evidenzia le prestazioni dei mezzi secondo il metodo EF 3.0 (indicatori di Tabella 2.1), mentre il Paragrafo 2.3.2 analizza il confronto sul consumo di risorse, con un focus sulle materie critiche, mediante gli indicatori CLCC e *critical-CLCC* descritti nel paragrafo 2.1.4. Le elaborazioni sono state effettuate utilizzando il software SimaPro, all'interno del quale è stato creato il metodo "CLCC" (comprensivo di entrambi gli indicatori) precedentemente sviluppato nel linguaggio di programmazione R.

2.3.1 Environmental Footprint

Il grafico di Figura 2.3 mostra le prestazioni dei bus analizzati sull'intero ciclo di vita e per le categorie di impatto significative. Nel grafico, il valore di riferimento (100%) è assegnato al bus Diesel. Dal confronto emerge come il bus elettrico abbia le potenzialità per contribuire alla decarbonizzazione del trasporto pubblico da un lato e al miglioramento della qualità della vita in area urbana dall'altra. Infatti, per il bus elettrico si osservano minori impatti potenziali in relazione a cambiamenti climatici (CC), acidificazione (A), formazione di particolato (PM), formazione di ozono fotochimico (POF) e consumo di risorse energetiche (RU-E). Si osserva però come le prestazioni del bus elettrico siano peggiori del Diesel in relazione alla tossicità umana cancerogena e non cancerogena (HT-C e HT-NC) e in misura molto più evidente al consumo di risorse minerali (RU-M).

⁸ I dataset che simulano le emissioni da usura sono i seguenti: Brake wear emissions, lorry {RER} | treatment of | Cut-off, U; Road wear emissions, lorry {RER} | treatment of | Cut-off, U; Tyre wear emissions, lorry {RER} | treatment of | Cut-off, U.

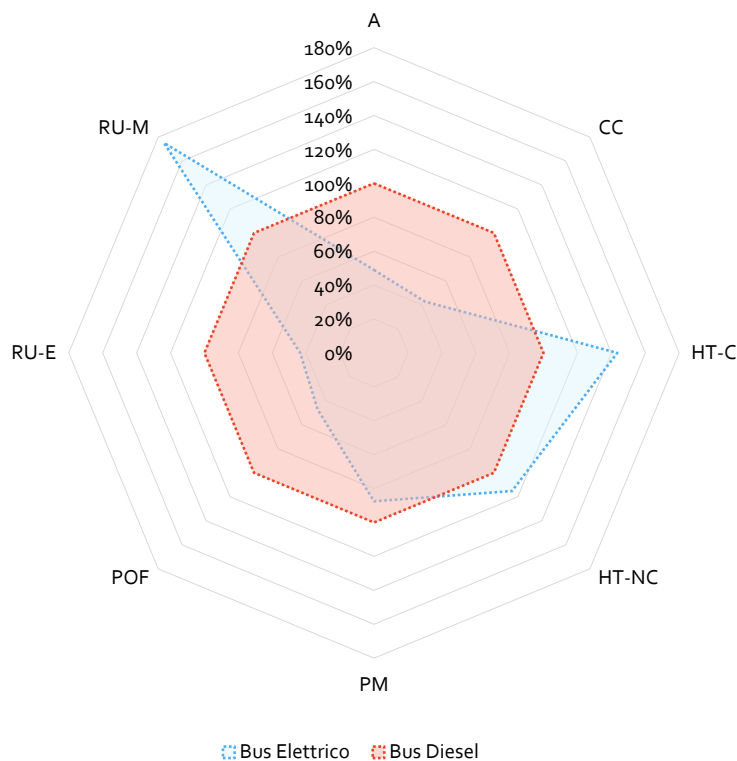


Figura 2.3 – Impatti potenziali relativi alle due motorizzazioni di bus in ciclo di guida urbano. Nel grafico, il riferimento (100%) è rappresentato dalle prestazioni del bus alimentato a Diesel. Indicatori di impatto: CC = Climate Change; HT-C = Human toxicity, cancer; HT-NC = Human toxicity, non-cancer; PM = Particulate matter; POF = Photochemical ozone formation; RU-E = Resource use, fossils; RU-M = Resource use, minerals and metals; A = Acidification.

L'analisi per fase è mostrata nei grafici di Figura 2.4. Per la categoria di impatto Cambiamenti Climatici (*Climate Change*), gli impatti potenziali di bus elettrico e Diesel sono rispettivamente di 28.5 e 66.7 g CO₂eq/p*km, con una differenza percentuale del 57%. Per il bus Diesel, il contributo maggiore è ascrivibile alla fase d'uso (75% del totale). Per quanto riguarda Acidificazione (*Acidification*) e Formazione di Ozono Fotochimico (*Photochemical ozone formation*), il bus elettrico mostra le prestazioni migliori e si osserva come per il bus Diesel abbiano una incidenza elevata gli impatti potenziali dovuti alla fase di approvvigionamento del vettore energetico. La categoria di impatto Formazione di particolato (*Particulate Matter*) mostra come le prestazioni dei due veicoli siano piuttosto simili. Infatti, per il bus elettrico, i minori impatti provenienti dal vettore elettrico sono compensati da quelli legati al ciclo di vita della batteria. Inoltre, il contributo proveniente dalla fase d'uso è confrontabile nei due casi ed è dovuto essenzialmente all'usura di freni, pneumatici e manto stradale (nel bus Diesel, il contributo da usura rappresenta il 90% del particolato potenziale complessivo della fase d'uso mentre nel bus elettrico il 100%). Il consumo di risorse energetiche (*Resource Use, Fossil*) ha un andamento del tutto analogo a quello dei cambiamenti climatici, mentre il consumo di risorse minerali (*Resource Use, Mineral*) mette in luce un punto di debolezza del mezzo ad alimentazione elettrica. Si osserva infatti, per il veicolo elettrico, un contributo determinante da produzione e fine vita della batteria, che da sola contribuisce per il 60% al valore complessivo dell'indicatore. Il valore dell'impatto è determinato in misura maggiore dal consumo di Oro, Tellurio, Argento e Rame impiegati nella produzione della batteria. La differenza percentuale complessiva tra i valori degli indicatori per i due veicoli è di circa il 75%. Anche gli impatti potenziali relativi alla tossicità umana (*Human toxicity, cancer e*



Human toxicity, non-cancer) penalizzano il mezzo elettrico, ancora una volta a causa degli impatti potenziali legati al ciclo di vita della batteria⁹.

⁹ A questo proposito, vale la pena sottolineare che la Commissione Europea, in una scala da I (molto robusto) a III (poco robusto), classifica questi indicatori come di livello III [20]. Inoltre, il peso associato a queste categorie in fase di aggregazione degli impatti è molto basso [42].

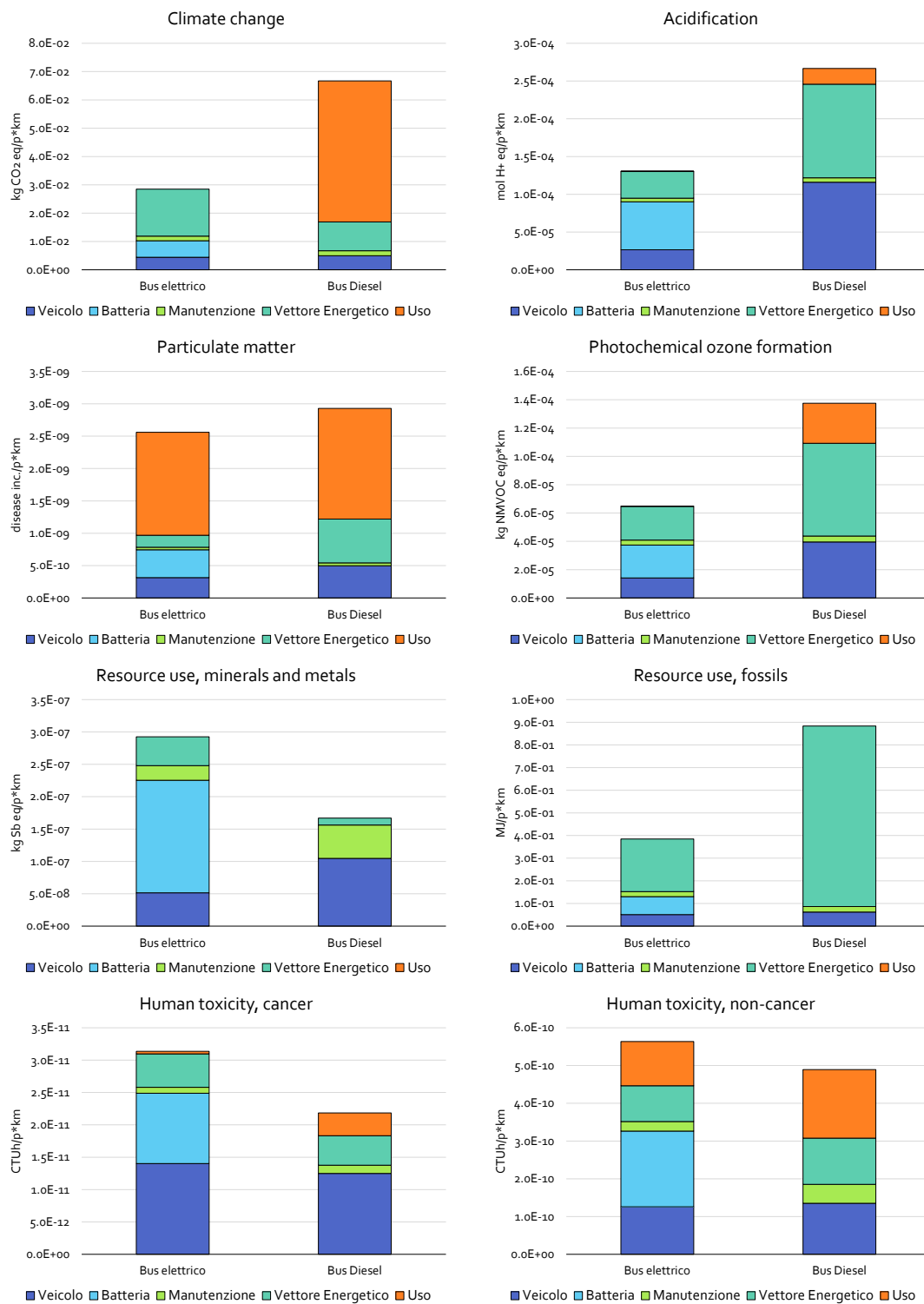


Figura 2.4 – Impatti potenziali dei veicoli analizzati per le categorie di impatto selezionate (metodo EF 3.0). I valori sono riferiti al trasporto di un passeggero per un chilometro. (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*).

Da una analisi degli studi presenti in letteratura, emerge una discreta variabilità dei consumi energetici in fase d'uso che vanno da 110 kWh/100km [6] a 170 kWh/100km [43] per i bus elettrici e da 26 l/100km [44] a 63.17 l/100km [30] per i bus Diesel (si veda Tabella 7.8 in Appendice 7 -). Tuttavia, l'analisi di incertezza, svolta con il metodo Monte Carlo, ha mostrato come l'ordinamento tra le prestazioni dei mezzi resti invariato al variare dei consumi. Per i dettagli relativi a tale analisi si consulti l'Appendice 7 -(Paragrafo 7.2).

2.3.2 CLCC e Critical CLCC

L'indicatore scelto dalla Commissione Europea per la quantificazione del consumo di risorse è classificato di livello III in una scala da I (molto robusto) a III (robustezza minima). Per questo, e per le criticità legate all'uso di tale indicatore nell'ambito di un sistema di allocazione economico [45] si è scelto di approfondire il tema attraverso gli indicatori CLCC e *critical*-CLCC così come formulati da Mela et al [14]. Dalle analisi emerge come il bus Diesel sia contraddistinto dal valore più alto dell'indicatore CLCC (Figura 2.5 (A)), a causa del contributo legato all'approvvigionamento del vettore energetico che costituisce oltre il 70% del valore complessivo dell'indicatore (Figura 2.5 (B)). Il valore dell'indicatore per il bus elettrico è dovuto per il 44% circa al ciclo di vita della batteria e per il 36% circa al vettore energetico.

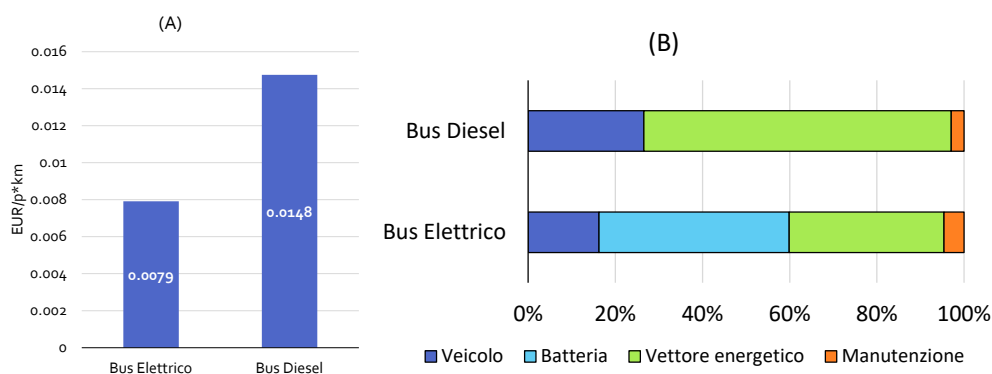


Figura 2.5 – Indicatore CLCC espresso in €/p*km (A) e contributo percentuale per fase del ciclo di vita per i bus analizzati (B). (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel).

Tuttavia, è il bus elettrico che presenta il maggior consumo di risorse critiche (Figura 2.6 (A)). Per questo indicatore, infatti, risulta preponderante il ruolo della batteria che costituisce l'84% circa del valore complessivo dell'indicatore. Questo rispecchia il fatto che le batterie sono ricche di materiali, quali litio e cobalto¹⁰, contraddistinti da un'offerta concentrata in pochi Paesi, spesso caratterizzati da situazioni geopolitiche difficili. Infine, dalle analisi risulta che l'importanza percentuale dei materiali critici sul valore complessivo dell'indicatore CLCC è pari al 34.5% per il bus elettrico e all'11.4% per il bus Diesel.

¹⁰ Futuri sviluppi potrebbero prevedere l'analisi di bus con batterie LFP che non necessitano l'uso di cobalto.

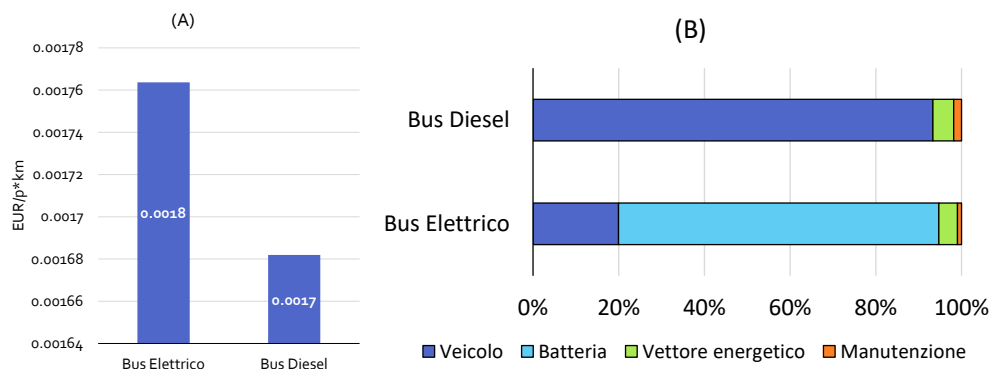


Figura 2.6 – Indicatore *critical-CLCC* espresso in €/p*km (A) e contributo percentuale per fase del ciclo di vita per i bus analizzati (B). (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel).

3 - AGGIORNAMENTO DEGLI STUDI PREGRESSI

L'attività svolta nel presente anno ha previsto, oltre alla modellazione dei bus elettrici, l'aggiornamento dei dataset riguardanti le batterie dei veicoli per la micromobilità e il motore presente nel monopattino elettrico.

I risultati ottenuti nel precedente triennio 19-21 avevano evidenziato un elevato impatto associato a tali componenti e poiché la modellazione implementata precedentemente si basava, in mancanza di dati più aggiornati, sulle informazioni presenti in letteratura e nel database Ecoinvent 3.8 [30], si è ritenuto necessario realizzare un approfondimento che fosse supportato dall'utilizzo di dati primari. Nei paragrafi che seguono, si riportano i dettagli delle attività sperimentali che hanno portato all'individuazione del *Bill of Materials* dei componenti e si descrive il processo di modellazione adottato.

3.1 Batterie di veicoli per la micromobilità

I veicoli analizzati sono equipaggiati con batterie agli ioni di litio con capacità pari a 0.50 kWh per la batteria Bosch dell'ebike, 0.54 kWh per la Greencell presente nella cargobike, e 0.36 kWh per la X8F del monopattino. L'attività svolta ha previsto lo smontaggio ed esame delle batterie Bosch e Greencell al fine di determinarne la geometria e la composizione chimica. Poiché non è stato possibile svolgere la medesima analisi anche sulla batteria X8F del monopattino, quest'ultima è stata modellata prendendo a riferimento la batteria Bosch. Un'analisi più dettagliata della batteria sarà oggetto di studi futuri.

Le batterie Bosch e Greencell sono state smontate e analizzate in laboratorio al fine di definire la natura del materiale e il peso di tutti i componenti presenti.

Dalle analisi è emerso che le due batterie presentano una prima differenza evidente nelle tipologie di materiali che le costituiscono: la batteria Bosch si compone infatti maggiormente di alluminio (materiale presente anche nell'involucro esterno), mentre la batteria Greencell è caratterizzata da un maggior quantitativo di materiale plastico. In Figura 3.1, si riporta la ripartizione dei materiali per le due batterie. La voce *Altro* fa riferimento a tutti i componenti elettronici, quali schede elettroniche e cavi presenti nei dataset. Considerata l'elevata percentuale in peso (circa il 70%) ricoperta dal pacco celle, si è deciso di rappresentare nel grafico la batteria ad esclusione delle celle, che verranno trattate dettagliatamente nel seguito.

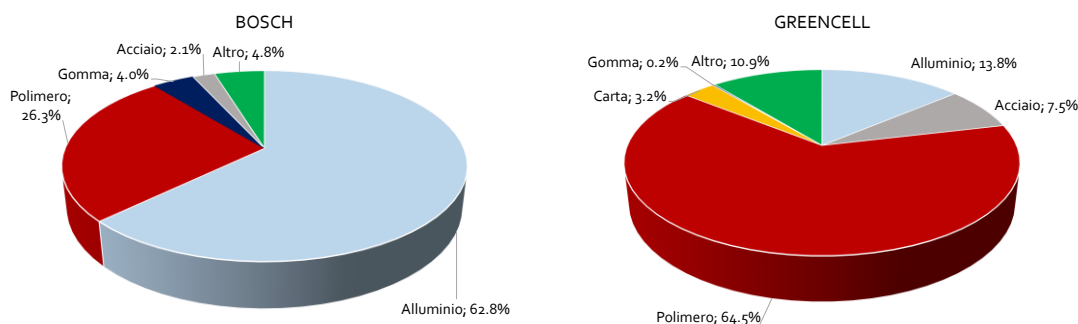


Figura 3.1 – Natura dei materiali e relativi quantitativi percentuali costituenti le due batterie Bosch e Greencell. Il grafico si riferisce alla sola batteria escludendo il pacco celle.

Per quanto concerne il pacco celle, la Greencell (Figura 3.2) si compone di un unico pacco costituito di 50 celle a differenza della batteria Bosch (Figura 3.3), che presenta quattro pacchi ognuno dei quali si compone di 10 celle Samsung modello INR18650-35E. Si noti che le celle sono di tipo cilindrico, mentre in precedenza le batterie erano state modellate ipotizzando celle NMC di tipo pouch [32].

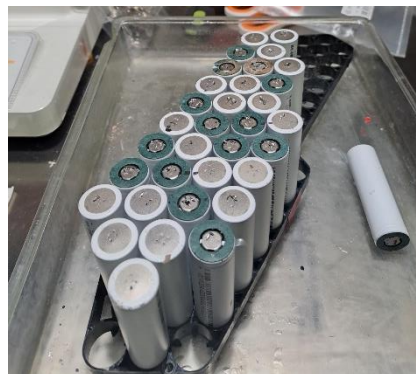
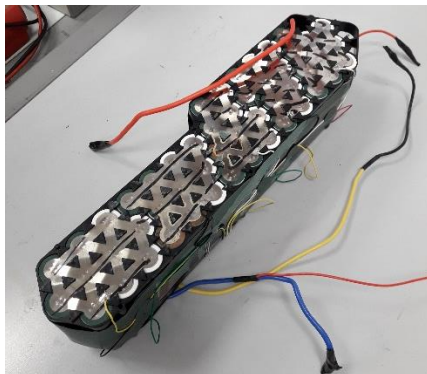


Figura 3.2 – Pacco celle della batteria Greencell con cui è equipaggiata la cargobike.



Figura 3.3 – Pacco celle della batteria Bosch con cui è equipaggiata la ebike.

In riferimento alla composizione del catodo della cella Greencell (Tabella 3.1), la formulazione è stata ricavata grazie a misure di laboratorio, effettuate nell'ambito del progetto RdS *Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico*, che hanno permesso di rilevarne la composizione. Come riportato in Tabella 3.1, il catodo è costituito per il 44% da $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$, per il 10% da $\text{Li}_{1.25}\text{Mn}_{0.625}\text{Ni}_{0.125}\text{O}_2$ e per il 46% da $\text{Li}_{0.79}\text{Ni}_{1.01}\text{O}_2$. Il catodo della cella Samsung, batteria Bosch, è stato modellato in base alle informazioni disponibili sulla scheda tecnica [46].

Tabella 3.1 – Caratteristiche tecniche principali relative alle celle presenti nelle batterie Bosch e Greencell analizzate.

	Cella Bosch	Cella Greencell ¹¹
Capacità (mAh)	3350	-
Capacità (Ah)	3.35	-
Tensione (V)	3.6	-
Composizione anodo	Cu+grafite ¹²	Cu+grafite ¹²
Composizione catodo	AINCO ¹³	44% $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ 10% $\text{Li}_{1.25}\text{Mn}_{0.625}\text{Ni}_{0.125}\text{O}_2$ 46% $\text{Li}_{0.79}\text{Ni}_{1.01}\text{O}_2$

Per quanto concerne i consumi energetici in fase di produzione delle batterie, in mancanza di informazioni specifiche, per l'assemblaggio della batteria si sono adottati i dati disponibili in

¹¹ Le specifiche tecniche delle celle per la Greencell non sono disponibili, per la modellazione dei consumi si è fatto riferimento alla capacità dell'intera batteria scalata per il numero di celle.

¹² Modellati in accordo con [47]

¹³ Modellato in accordo con [46] e [47]



letteratura [47] mentre per il processo produttivo delle celle si è fatto riferimento alle informazioni contenute nel rapporto RdS [29].

Infine, i processi di smaltimento delle due batterie giunte a fine vita, modellate in accordo con quanto descritto nel paragrafo 2.2.1., prevedono ove presenti il recupero di rame, solfato di cobalto, solfato di nichel, solfato di manganese e acciaio.

Oltre alle attività appena descritte, sono stati effettuati dei test di laboratorio per valutare la vita utile delle batterie (numero di cicli effettuati dalla batteria durante la sua vita). Le attività sono iniziate nei primi mesi del 2023 e proseguiranno per tutto il 2024. Allo stato attuale, i risultati ottenuti non mostrano una diminuzione della capacità delle batterie, di conseguenza non è ancora possibile stabilire l'effettiva durata delle stesse. Per approfondimenti circa i test effettuati ed i risultati ottenuti, si faccia riferimento all'Appendice 8.2.

3.1.1 Impatti ambientali batterie per la micromobilità

Nel presente paragrafo si riportano i potenziali impatti ambientali ottenuti dalla valutazione delle diverse fasi incluse nel processo produttivo, ovvero dall'estrazione delle materie prime fino all'assemblaggio della batteria. Nello specifico si riporta, esclusivamente per le batterie Greencell e Bosch per le quali è stato possibile ottenere dati primari, il confronto tra le batterie e la rispettiva analisi dei contributi. I risultati sono riferiti a 1 kWh di capacità della batteria (Figura 3.4). L'analisi dei contributi ottenuti evidenzia l'elevato impatto associato al pacco celle, che genera circa l'80% degli impatti totali in tutte le categorie di impatto ad eccezione della categoria riferita all'uso di risorse minerali e metalli, ove ricopre il 60% dell'impatto totale. L'elevato impatto associato al pacco celle è riconducibile principalmente ai consumi energetici in fase di produzione (0.63 kWh cella Bosch e 0.56 kWh cella Greencell) per le categorie Cambiamento climatico (*Climate change*) e Formazione di particolato (*Particulate matter*) risulta considerevole anche il contributo del catodo (Formazione di ozono fotochimico – *Photochemical ozone formation*, Acidificazione - *Acidification* e Uso di risorse fossili – *Resource use, fossil*) e dell'anodo (Tossicità umana – *Human toxicity, non cancer e cancer* e Uso di risorse minerali e metalli – *Resource use, mineral and metals*). Focalizzando l'attenzione sui materiali che compongono la batteria (escludendo le celle), si riscontra un maggior contributo associato ai metalli per la batteria Bosch e ai materiali plastici per la batteria Greencell. Quest'ultima, a differenza della prima, ha un quantitativo maggiore di materie plastiche (5.62E+02 g/batteria Greencell e 2.46E+02 g/batteria Bosch) che costituiscono anche l'involucro esterno della batteria. Nella categoria riferita al consumo di risorse, minerali e metalli (*Resource use, mineral and metals*), si riscontra un contributo significativo associato al BMS (circa il 40% dell'impatto totale per la Bosch e 24% per la Greencell). Trascurabile risulta invece il consumo di energia elettrica associato alla fase di assemblaggio della batteria (1.9E-03 kWh Bosch e 2.1E-03 kWh Greencell).

Il confronto tra le due batterie evidenzia come la batteria Bosch sia caratterizzata da maggiori impatti in tutte le categorie analizzate. Tuttavia, la vita utile delle due batterie potrebbe non essere la stessa. Durante la sperimentazione per il monitoraggio dei consumi, la batteria Greencell è giunta a fine vita dopo circa 5500 km, mentre la batteria Bosch risulta essere tuttora funzionante (attualmente sono stati percorsi 3274.5 km). Diviene quindi ragionevole chiedersi come tale informazione possa influire sui risultati ottenuti. A tal scopo, si è effettuato un secondo confronto degli impatti associati alle due batterie utilizzando un'unità funzionale (UFbatt2) che tenga conto non solo della capacità (C), ma anche del peso trasportato (*P. transp.*) e del numero di chilometri percorsi prima di giungere a fine vita (D_{TOT}). Gli impatti sono quindi stati scalati considerando il parametro UFbatt2 calcolato come riportato in eq. 1.

$$UFbatt2 = \frac{C \text{ (kWh)}}{(P. \text{ transp (kg)} * D_{TOT} \text{ (km)})} \quad \text{eq. 1}$$

I valori delle singole variabili per le due batterie sono riportati in Tabella 3.2.

Tabella 3.2 – Variabili adottate per il calcolo degli impatti.

Variabile	Greencell	Bosch
Capacità (C) (kWh)	0.54	0.5
Peso trasportato (P. transp.) (kg) ¹⁴	261.7	91.8
Distanza complessiva (D _{TOT}) (km)	5500 ¹⁵	32000 ¹⁶

L'analisi ottenuta (Figura 3.5) sottolinea l'incidenza della vita utile della batteria sugli impatti generati dalla stessa. Infatti, considerando tale parametro, si evidenzia un'inversione dell'andamento ottenuto in precedenza che vede la Greencell caratterizzata dalle peggiori prestazioni ambientali (+40% degli impatti associati alla Bosch). Si sottolinea che il confronto agli impatti risulta simile tra le diverse categorie in quanto i valori ottenuti per i singoli indicatori sono stati scalati sulla base delle variabili riportate in Tabella 3.2, che risultano costanti indipendentemente dalla categoria analizzata.

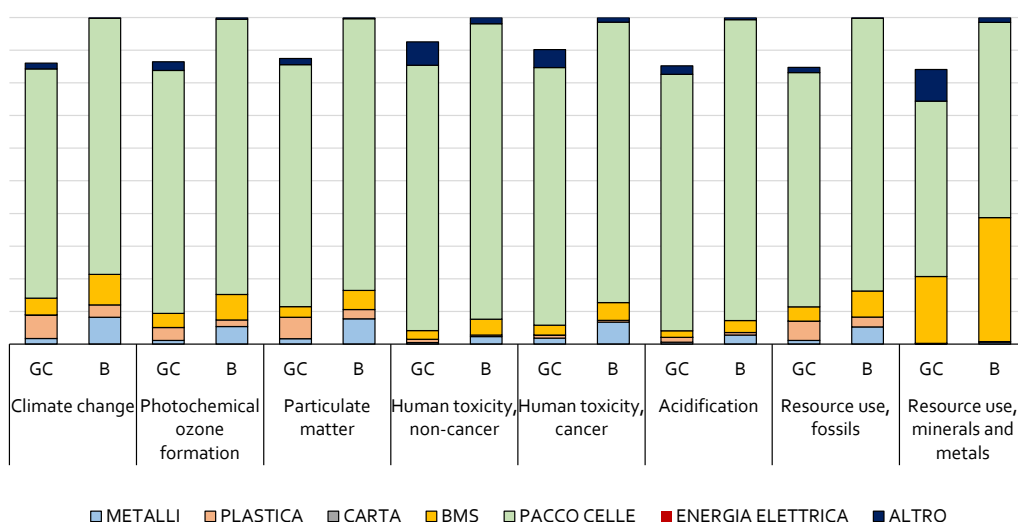


Figura 3.4 – Confronto potenziali impatti ambientali generati dalle due batterie (Greencell (GC) E Bosch (B)) in oggetto e analisi dei contribuiti. I risultati sono riferiti alla capacità della batteria (0.54 kWh Greencell e 0.5 kWh Bosch).

¹⁴ Il peso totale trasportato viene calcolato come la somma del peso del veicolo al netto della batteria, il peso dell'utilizzatore e il peso della merce trasportata (solo per la Greencell).

¹⁵ Tale valore, del tutto preliminare è stato ricavato dalla sperimentazione per il monitoraggio dei consumi della cargobike, durante i quali la batteria del mezzo è stata sostituita dopo circa 5500 km percorsi. I test di invecchiamento in corso in laboratorio potrebbero confermare questo valore quale vita utile della batteria Greencell.

¹⁶ Tale valore corrisponde al primo risultato preliminare ricavato dai test di invecchiamento per la batteria Bosch. Dal primo ciclo di test su banco, si è rilevato che le celle sono giunte a fine vita dopo 400 cicli. Considerando una percorrenza di circa 80 km per ogni ciclo, si ottiene la percorrenza complessiva di 3200 km.

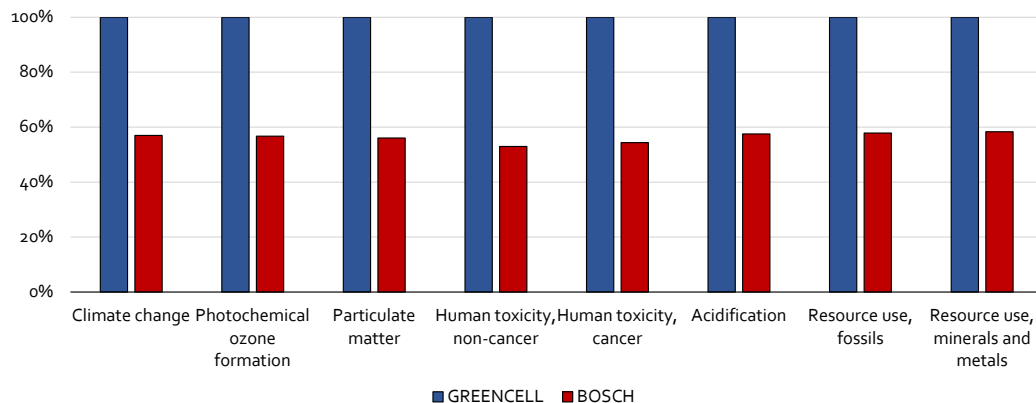


Figura 3.5 – Confronto dei potenziali impatti ambientali generati dalla produzione delle due batterie. I risultati sono espressi per capacità della batteria, peso trasportato e km percorsi durante la vita utile.

3.2 Motore monopattino

Le analisi svolte nel triennio 2019-2021 hanno evidenziato un contributo elevato del motore elettrico al ciclo di vita dei mezzi per la micromobilità. In particolare, nella categoria Tossicità umana e limitatamente alla fase di produzione, il contributo del motore è risultato essere superiore al 40%. La mancanza di informazioni primarie aveva reso necessario l'utilizzo del dataset di motore elettrico disponibile nel database Ecoinvent 3.8 [30].

Il motore in oggetto (Figura 3.6) è prodotto in Cina, è caratterizzato da una potenza pari a 350 W e da un peso di 2.25 kg.

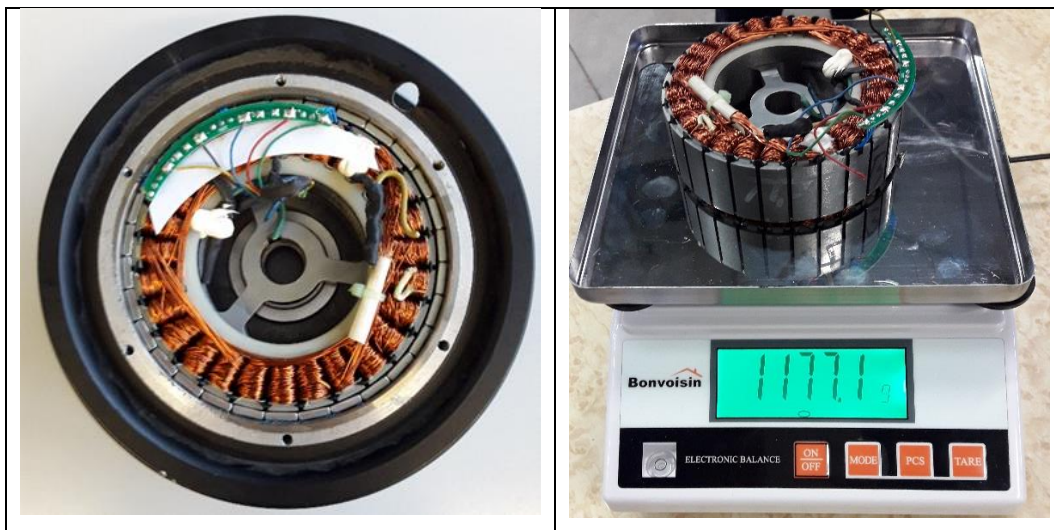


Figura 3.6 – Motore elettrico monopattino.

La fase di analisi del componente ha previsto una prima fase di smontaggio, seguita da una fase di pesatura e analisi dei singoli materiali (Figura 3.7) da cui è stato possibile ottenere il Bill Of Materials (BOMs) riportato in Appendice 9 -.

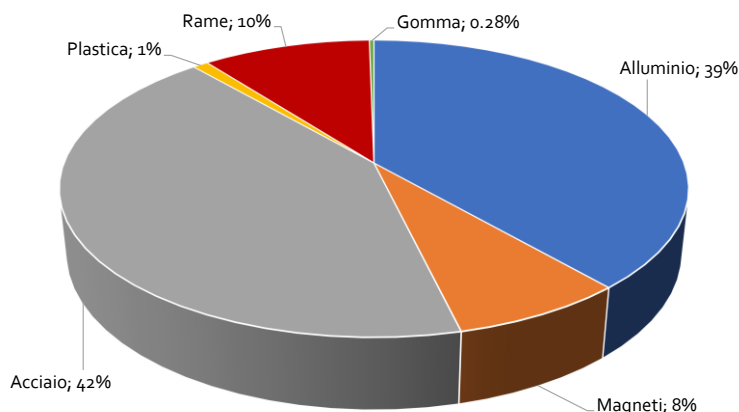


Figura 3.7 – Ripartizione percentuale dei materiali presenti nel motore elettrico del monopattino.

La modellazione dei consumi energetici e dei quantitativi di materiale scartato in fase di produzione è stata effettuata in accordo con il database Ecoinvent v3.8 [30] (dataset: *Electric motor, for electric scooter {GLO} production | Cut-off, U*). Nello specifico si considera, esclusivamente per i metalli coinvolti, una perdita dovuta agli scarti di lavorazione pari al 20% del materiale in ingresso.

3.2.1 Impatti ambientali

In Tabella 3.3 si riportano i potenziali impatti ambientali generati dalla produzione del motore elettrico in oggetto. I risultati ottenuti sottolineano l'elevato contributo associato ai metalli (alluminio, rame e acciaio) che ricoprono il 90% del peso totale del componente. Nello specifico si evidenzia un maggior contributo (circa 30% del totale dell'impatto) legato all'alluminio nelle categorie riferite al cambiamento climatico (*Climate change*), Formazione di ozono fotochimico (*Photochemical ozone formation*), Formazione di particolato (*Particulate matter*) e Uso di risorse energetiche (*Resource use, fossil*), mentre la presenza di rame interessa in particolar modo le categorie Tossicità umana non cancerogena (*Human toxicity, non-cancer*, 77% degli impatti) e cancerogena (*Human toxicity, cancer*, 42%), Acidificazione (*Acidification*, 50%) e Uso di risorse minerali e metalli (*Resource use, mineral and metals*, 90%). Il confronto tra l'impatto ottenuto e quello generato dal dataset adottato in precedenza, evidenzia una ripartizione simile tra i materiali rispetto all'impatto totale, tuttavia il maggior consumo di alluminio (+5%), la presenza di una scheda elettronica e il diverso mix energetico (Cinese per il dataset attuale e mix a livello globale per il dataset presente in Ecoinvent 3.8 [30]) comportano un aumento degli impatti in cinque su otto categorie (Figura 3.8). In conclusione, le modifiche che hanno portato a un peggioramento degli impatti hanno interessato i consumi relativi ad alluminio, magneti e materiali plastici, la presenza della scheda elettronica e un diverso mix energetico adottato in fase di produzione del componente.

Tabella 3.3 – Potenziali impatti ambientali generati dalla produzione del motore elettrico montato sul monopattino.

Categoria di impatto	TOTALE	METALLI	ELETTRONICA	PLASTICA	CONSUMO ENERGETICO	PROCESSI DI TRATTAMENTO
Climate change (kg CO ₂ eq)	2.79E+01	1.31E+01	6.90E+00	1.85E-01	7.66E+00	6.81E-03
Photochemical ozone formation (kg NMVOC eq)	1.13E-01	6.79E-02	2.19E-02	9.41E-04	2.25E-02	2.23E-06
Particulate matter (disease inc.)	2.43E-06	1.26E-06	6.37E-07	1.04E-08	5.23E-07	7.84E-12
Human toxicity, non-cancer (CTUh)	2.69E-06	2.36E-06	2.51E-07	5.41E-09	7.11E-08	1.55E-10
Human toxicity, cancer (CTUh)	6.73E-08	5.63E-08	8.13E-09	1.36E-09	1.53E-09	8.56E-13
Acidification (mol H+ eq)	3.07E-01	2.24E-01	4.35E-02	1.08E-03	3.76E-02	1.80E-06
Resource use, fossils (MJ)	2.82E+02	1.31E+02	7.58E+01	3.67E+00	7.12E+01	1.33E-03
Resource use, minerals and metals (kg Sb eq)	2.23E-03	2.07E-03	1.54E-04	1.56E-06	3.79E-06	2.41E-10

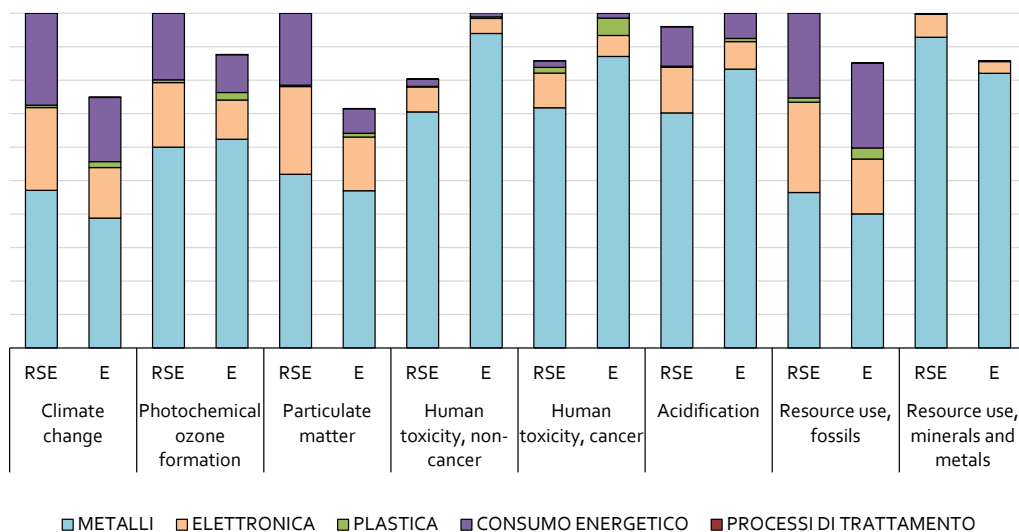


Figura 3.8 – Confronto degli impatti ambientali e relativo contributo agli impatti associati al motore elettrico in analisi (RSE nel grafico) e al motore elettrico presente in Ecoinvent 3.8 (E nel grafico).

3.3 Monitoraggio dei mezzi per la micromobilità

Anche durante la presente annualità sono proseguite le sperimentazioni iniziate a novembre 2020 per la Cargobike e a settembre 2021 per la ebike. Grazie a queste attività è stato possibile ottenere dati primari utilizzati per modellare al meglio alcune fasi del ciclo di vita di questi due veicoli. Nel seguito si riportano i dati aggiornati fino a novembre 2023.

3.3.1 Cargobike a pedalata assistita

In modo analogo a quanto già fatto negli anni precedenti, è proseguito il monitoraggio della Cargobike a pedalata assistita (modello SUM-X prodotto da One Less Van (OLV)) utilizzata per la consegna merci nel centro della città di Padova dalla società di logistica Triclò – Postex Srl. Il monitoraggio del veicolo, effettuato come precedentemente descritto nel Rapporto Ricerca di Sistema [32], ha consentito l'acquisizione di dati riferiti al periodo novembre 2020 – novembre 2023 ed utilizzati per la modellazione della fase d'uso. In Tabella 3.4 si riportano i valori monitorati in precedenza (e riportati nel deliverable [32]) e quelli utilizzati per il presente studio, aggiornati grazie al proseguimento della sperimentazione.

Tabella 3.4 – Parametri e valori medi ottenuti grazie alla campagna di monitoraggio della cargobike a pedalata assistita.

Parametro	Monitoraggio 11/2020 – 11/2021	Monitoraggio 11/2020 – 11/2022	Monitoraggio 11/2020 – 11/2023
Distanza media percorsa (km/giorno)	21.6	18.7	18.8
Durata media in movimento (hh:mm:ss)	01:29:06	01:26:12	01:26:53
Velocità media (km/h)	14.6	13.2	13.2
Consumo medio in uso (Wh/km)*	17.9	15.9	15.9
State of Charge a fine giornata (%)	58%	65%	66%
Consumo medio giornaliero in ricarica Wh/giorno	540	396	357
Consumo medio giornaliero in ricarica (Wh/km)*	22.3	20.1	19.6

*Prelievo dalla batteria del mezzo **Prelievo dalla rete elettrica

I valori monitorati nei tre anni non si discostano di molto e sembrano ormai essersi assestati su valori consolidati. La leggera diminuzione della distanza giornaliera percorsa determina una maggior percentuale di energia residua della batteria a fine giornata. Il consumo di energia per km percorso è diminuito, questo anche a causa della leggera diminuzione della massa trasportata. Così come già discusso [32], nonostante questa diminuzione del carico trasportato, il servizio fornito dal quadriciclo a pedalata assistita è ancora paragonabile a quello realizzato con van di piccola dimensione che operi nelle aree centrali delle città.

3.3.2 ebike

Il monitoraggio della ebike durante la tratta casa-lavoro di un dipendente RSE è proseguito anche nell'annualità 2023, andando a consolidare ulteriormente i dati raccolti a partire da settembre 2021 [49]. Il fine ultimo dell'attività di monitoraggio è infatti identificare dati di consumo energetico reali per i mezzi analizzati. Tali dati (Tabella 3.5) sono anch'essi utilizzati per la modellazione della fase d'uso di questo veicolo. Nella seguente tabella si riassumono i dati raccolti fino a novembre 2023.

Tabella 3.5 – Parametri e valori medi ottenuti grazie alla campagna di monitoraggio della ebike.

Parametro	Monitoraggio 09/2021 - 11/2021	Monitoraggio 09/2021 - 11/2022	Monitoraggio 09/2021 - 11/2023
Distanza media percorsa (km/trattaWH o HW)	18.18	18.03	18.23
Durata media in movimento (hh:mm:ss)	00:50:01	00:49:33	00:49:52
Velocità media (km/h)	21.8	21.8	21.9
Autonomia pre-ricarica (WH+HW) % (km)	73% (55)	64% (50)	63% (48)
Consumo medio in ricarica (Wh)	307	312	293
Consumo al km (Wh/km)	6.61	7.25	7.14

La distanza media percorsa nella tratta casa-lavoro e viceversa è ormai consolidata sui 18 km circa, così come la durata dei tragitti è di circa 50 minuti. Il consumo di energia per km percorso è variato nel tempo, questo perché il motore del veicolo consente di modificare il livello di assistenza alla pedalata e nel tempo si sono testati questi diversi livelli di assistenza andando così a influenzare il parametro. Per quanto riguarda l'autonomia pre-ricarica, durante la sperimentazione il veicolo è stato sempre caricato solo presso la sede RSE, di conseguenza questo dato tiene conto che tra una ricarica e la successiva l'utente ha percorso due tratte: lavoro-casa (Work-Home - WH) e casa-lavoro (Home-Work - HW).

4 - CONFRONTO DEI MEZZI PER LA MOBILITÀ URBANA

Il presente capitolo è dedicato al confronto tra le prestazioni dei mezzi per la mobilità in area urbana dei passeggeri (Paragrafo 4.1) e delle merci (Paragrafo 4.2).

Le prestazioni dei mezzi sono state valutate in termini di *Environmental Footprint (EF)* e di *Commodity Life Cycle Costing (CLCC)*, con un focus sulle materie prime critiche.

4.1 Mobilità passeggeri

L'analisi sulla mobilità urbana dei passeggeri comprende i mezzi elencati in Tabella 4.1. Rispetto alle precedenti analisi, il set di tecnologie analizzate è stato ampliato per comprendere i bus.

Le emissioni in fase d'uso delle auto sono state aggiornate alla versione 2020 della banca dati dei fattori di emissione medi del trasporto stradale in Italia [39] e sono riportate in Appendice 10 - Tabella 10.1. Relativamente alla micromobilità, il confronto beneficia degli aggiornamenti descritti nel capitolo 3 - (BOMs di motore e batteria e consumi in fase d'uso).

L'unità funzionale adottata per il confronto è il passeggero*chilometro. Quindi, ai fini del confronto tra i differenti mezzi, si è adottato un fattore di riempimento medio di 1.38 passeggeri/veicolo per le auto (valore pubblicato da ISFORT nel 19° Rapporto sulla mobilità degli italiani [50]), di 20.4 passeggeri/veicolo per i bus (Paragrafo 2.1.1) e di 1 passeggero/veicolo per ebike e monopattino elettrico¹⁷.

Tabella 4.1 – Caratteristiche dei mezzi confrontati per la valutazione degli impatti potenziali del trasporto passeggeri in area urbana¹⁸.

Tipologia di mezzo	Alimentazione	Potenza max motore [kW]	Coppia max [Nm]	Capacità batteria [kWh]	Consumi	
Auto	Elettrica	110	310	45	14.59	kWh/100km
	Benzina	96	200 @ 1400	-	8.49	l/100km
	Diesel	96	320 @ 1750	-	6.05	l/100km
	Metano (CNG)	96	200@1400	-	6.14	Kg/100km
	Benzina/Elettrica Dom	150	250@1600	8.7	1.19/24.70	l/100km/kWh/100km
	Benzina/Elettrica Pub	150	250@1600	8.7	3.40/16.81	l/100km/kWh/100km
Bus	Elettrica	250	n.a.	395	115	kWh/100km
	Diesel	250	n.a.	-	38.04	l/100km
ebike	Elettrica	0.25	75	0.625	7.14E-03	kWh/km
escooter	Elettrica	0.35	n.a.	0.36	1.54E-02	kWh/km

4.1.1 Environmental Footprint

Le prestazioni complessive, lungo tutto il ciclo di vita dei mezzi, sono rappresentate nel diagramma di Figura 4.1, nel quale l'auto a benzina rappresenta il riferimento (100%). La figura evidenzia come l'utilizzo di autobus per gli spostamenti urbani porti ad un netto beneficio per tutte

¹⁷ Da qui in avanti, i termini "monopattino elettrico" ed "escoter" verranno utilizzati come sinonimi.

¹⁸ Le auto analizzate sono rappresentative di diverse motorizzazioni della Volkswagen Golf. L'auto elettrica è costituita dalla VW ID.3 che ha sostituito la eGolf, ormai fuori produzione e quindi poco rappresentativa della tecnologia attuale. Inoltre, l'auto Diesel è costituita da un'auto fittizia, costruita a partire dal modello TDI 2.0 considerando una potenza minore del motore, più simile a quella delle altre motorizzazioni. I valori numerici per tutte le auto, comprese quelle non mostrate nei grafici, sono riportati in Appendice 11 -.



le categorie di impatto considerate. Un beneficio ancora maggiore è associato all'utilizzo di mezzi per la micromobilità per i quali si ottengono prestazioni migliori su tutte le categorie di impatto ad eccezione del consumo di risorse. Per quest'ultimi, l'aggiornamento dei dataset rappresentativi di batteria e motore ha consolidato la validità di questo risultato, in quanto tali modelli sono ora basati su dati primari. In termini di gas climalteranti, un bus elettrico consente una riduzione delle emissioni del 65% rispetto ad un'auto elettrica. A sua volta, una ebike porta ad una riduzione delle emissioni del 59% rispetto ad un bus elettrico.

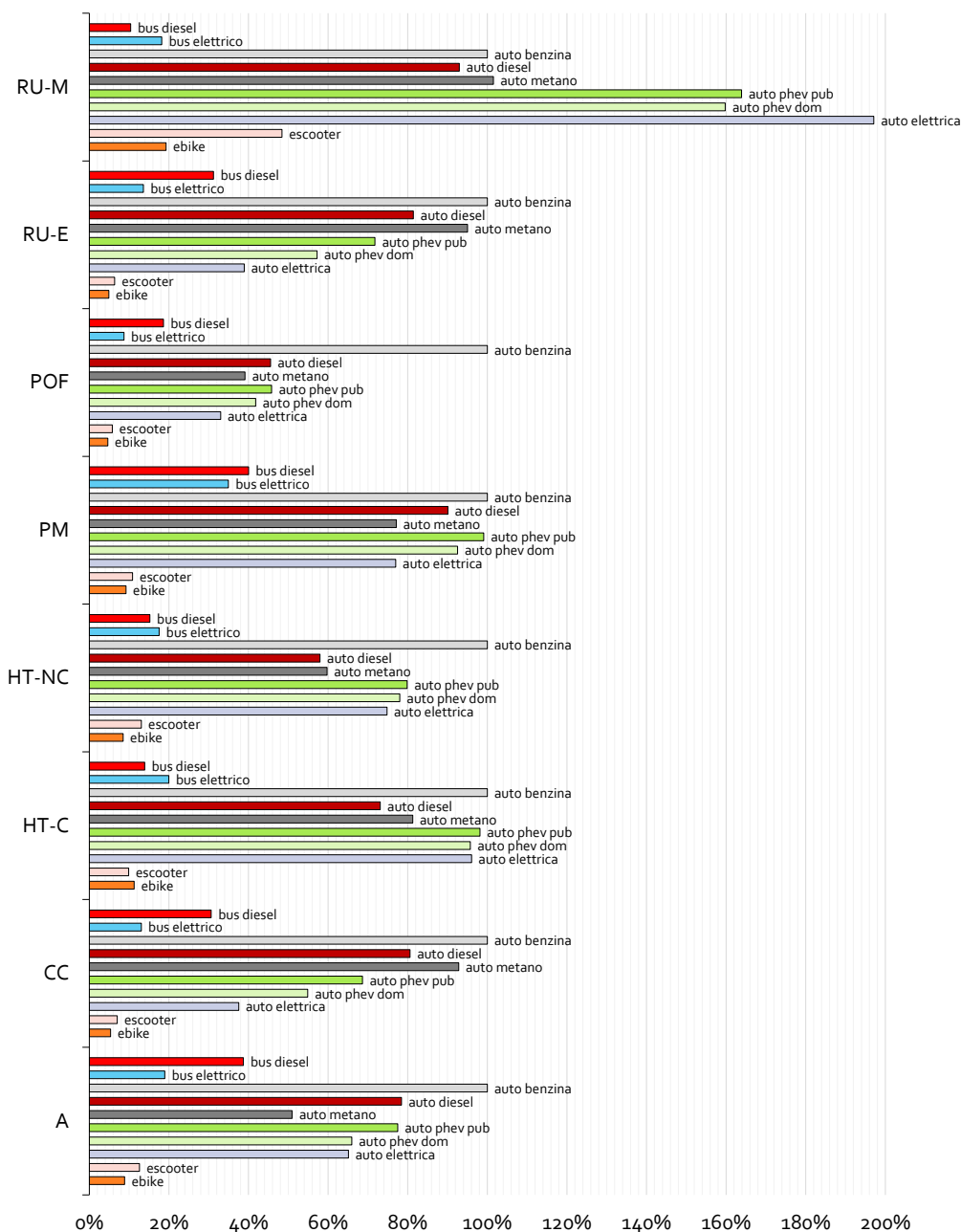


Figura 4.1 – Impatti potenziali dei mezzi adibiti al trasporto passeggeri in ambito urbano. Nel grafico, il riferimento (100%) è rappresentato dalle prestazioni dell'auto a benzina. Categorie di impatto: CC = Climate Change; HT-C = Human Toxicity, cancer; HT-NC = Human Toxicity, non cancer; PM = Particulate matter; POF = Photochemical ozone formation; RU-E = Resource use, energy carriers; RU-M = Resource use, mineral and metals; A = Acidification.

Il grafico di Figura 4.2 mostra, per ciascun mezzo il contributo per fase del ciclo di vita alla categoria di impatto Cambiamenti Climatici in ordine crescente. Le prestazioni delle auto confermano l'ordinamento già rilevato in passato, con l'auto elettrica che risulta essere la migliore (81.8 g CO₂eq/km) e l'auto a benzina la peggiore (217.8 g CO₂eq/km). Le due motorizzazioni di bus



si dimostrano essere preferibili a qualsiasi auto ed in particolare il bus elettrico, con 28.5 g CO₂eq/km, ha prestazioni confrontabili con quelle del monopattino elettrico (15.2 g CO₂eq/km). Il mezzo migliore per la decarbonizzazione del trasporto urbano si conferma la ebike, con 11.6 g CO₂eq/km, poiché l'utilizzo congiunto del motore elettrico e della pedalata contribuisce a una riduzione dei consumi elettrici. Per le auto a combustione interna, le emissioni in fase d'uso pesano tra il 65 e il 75% delle emissioni sull'intero ciclo di vita. Le prestazioni competitive dei bus dipendono dal fattore di utilizzo medio del mezzo, che per il caso in esame è stato assunto pari a 20.4 passeggeri/veicolo. Tuttavia, una analisi sui fattori di riempimento medi reperiti in letteratura (Tabella 7.4 di Appendice 7 -) ha dimostrato che anche dimezzando il fattore di riempimento, le prestazioni del bus elettrico restano comunque migliori di quelle di un'auto elettrica, con una riduzione percentuale delle emissioni climalteranti del 29% circa.

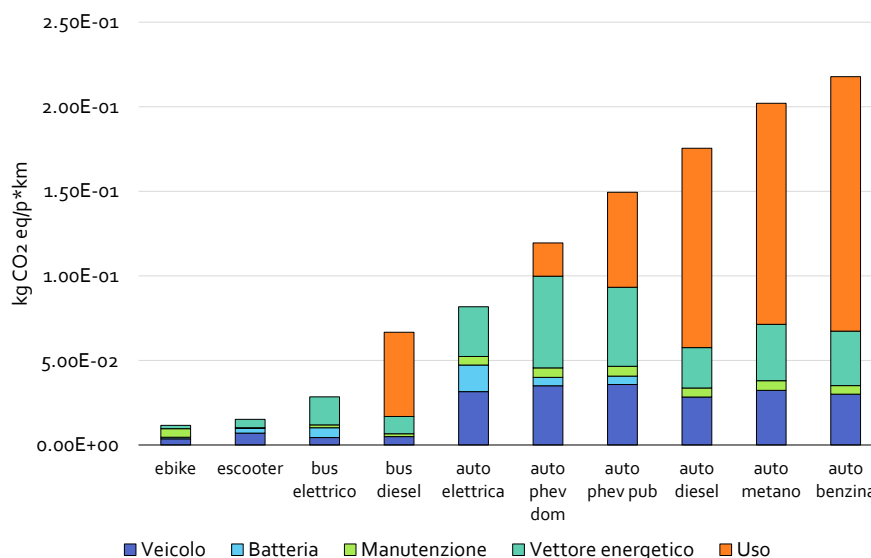


Figura 4.2 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Cambiamenti Climatici (Climate Change). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

Per quanto riguarda il consumo di risorse minerali (Figura 4.3), l'auto elettrica mostra le prestazioni peggiori, seguita dalle auto ibride plugin. Il valore dell'indicatore è determinato in larga misura dal contributo legato alla fase di produzione di veicolo e batteria che è oltre il doppio rispetto a quello di un'auto diesel. Si osserva come le prestazioni dei mezzi per la micromobilità siano, per questa categoria di impatto, peggiori rispetto a quelle del bus diesel. Questo risultato può essere dovuto in parte alle differenti fonti dei dati utilizzati per modellizzare i mezzi: dati per la micromobilità e dati di letteratura per tutti gli altri mezzi. Inoltre, si sottolinea che i bus, a differenza degli altri veicoli, vengono utilizzati da più persone contemporaneamente, tale caratteristica consente una riduzione degli impatti ambientali per km*persona percorso.

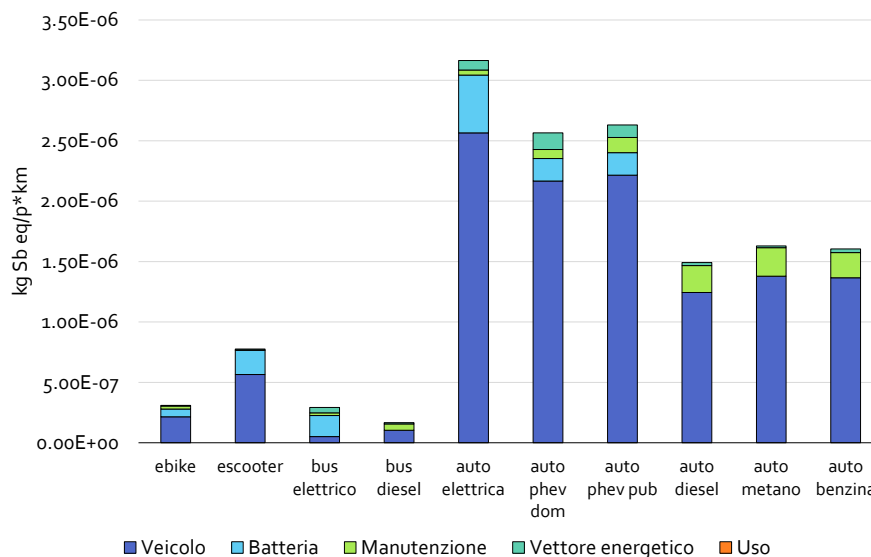


Figura 4.3 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Consumo di risorse minerali (Resource use, minerals and metals). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

In Figura 4.4 è rappresentata la categoria di impatto Particolato. Questo grafico mostra come il bus sia decisamente meno impattante rispetto ad una qualsiasi auto. L'impatto potenziale di un bus diesel, ad esempio corrisponde a circa la metà dell'impatto di un'auto elettrica. Il bus diesel, ad esempio, impatta per circa la metà di un'auto elettrica. Notevoli sono anche i vantaggi introdotti dai veicoli per la micromobilità: considerato il peso irrisorio di questi veicoli rispetto agli altri, le emissioni della fase d'uso generate dall'usura degli pneumatici, risultano nulle o trascurabili.

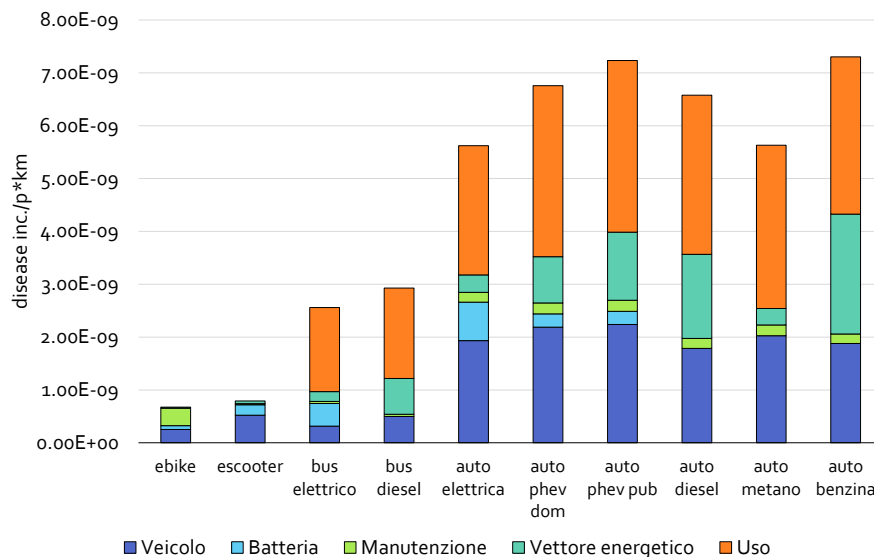


Figura 4.4 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Particolato (Respiratory inorganics). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

I grafici delle altre categorie di impatto, insieme ai relativi valori numerici sono riportati in Appendice 11 -.

4.1.2 CLCC e Critical CLCC

La Figura 4.5 mostra i risultati dell'analisi relativamente alla mobilità dei passeggeri.

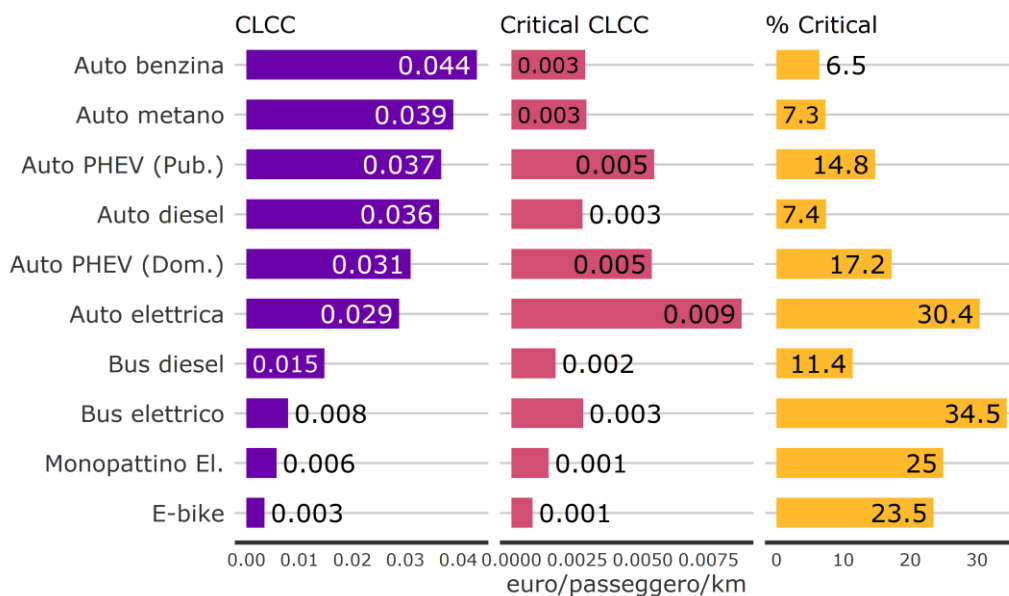


Figura 4.5 – Indicatore CLCC e Critical CLCC calcolato sull'intero ciclo di vita dei mezzi per la mobilità dei passeggeri.

Le auto, indipendentemente dal tipo di propulsione, sono i mezzi caratterizzati dai valori più elevati dell'indicatore CLCC di baseline, anche se le auto a combustione interna hanno valori superiori a quelli di ibride ed elettriche. Tra le auto, il valore massimo è quello dell'auto a benzina

(0.044 euro/passeggero-km) e il minimo quello dell'auto elettrica (0.029 euro/passeggero-km). L'indicatore CLCC di baseline è sensibilmente più basso (0.015 euro/passeggero-km: circa la metà di quello di auto ibride ed elettriche) nel caso del bus diesel (grazie all'elevato numero di passeggeri trasportati) e, ancora inferiore, nel caso del bus elettrico (0.008 euro/passeggero-km). I mezzi contraddistinti dai valori dell'indicatore più bassi tra quelli considerati sono la ebike e il monopattino (0.003 e 0.006 euro/passeggero-km). La situazione cambia radicalmente nel caso in cui l'indicatore CLCC venga calcolato sulla base dei soli materiali critici. In questo caso, infatti, sono le auto ibride – ed in misura maggiore le elettriche – ad essere contraddistinte dai valori più alti. Il bus elettrico ha un valore superiore a quello del bus diesel nonostante sia caratterizzato da un valore dell'indicatore di *baseline* più basso. Osservando, infine, il peso percentuale dell'indicatore Critical CLCC sul totale dell'indicatore di baseline, il quadro cambia ancora, con bus elettrico, auto elettrica, ebike e monopattino elettrico contraddistinti dai valori relativi più alti (rispettivamente 34.5, 30.4, 25 e 23.5%). Le percentuali più basse, invece, sono quelle delle auto a combustione interna.

La Figura 4.6 mostra il contributo di ciascuna fase del ciclo di vita nel computo dell'indicatore CLCC. Il vettore energetico è particolarmente importante nel caso delle auto a combustione interna, con punte del 72, 71 e 67% nel caso di Auto benzina, Bus diesel e Auto diesel rispettivamente. Il peso del vettore energetico varia considerevolmente, nel caso dell'auto PHEV, a seconda del fatto che la ricarica avvenga in ambito domestico (41%) o su strada (49%). La batteria è la fase contraddistinta dal peso percentuale maggiore nel caso del bus elettrico (44%) ma non dell'auto elettrica (35% contro il 42% della fase di produzione del veicolo). La fase di costruzione è preponderante nel caso del monopattino elettrico e molto importante, anche se in compartecipazione con la fase di manutenzione, nel caso dell'ebike.

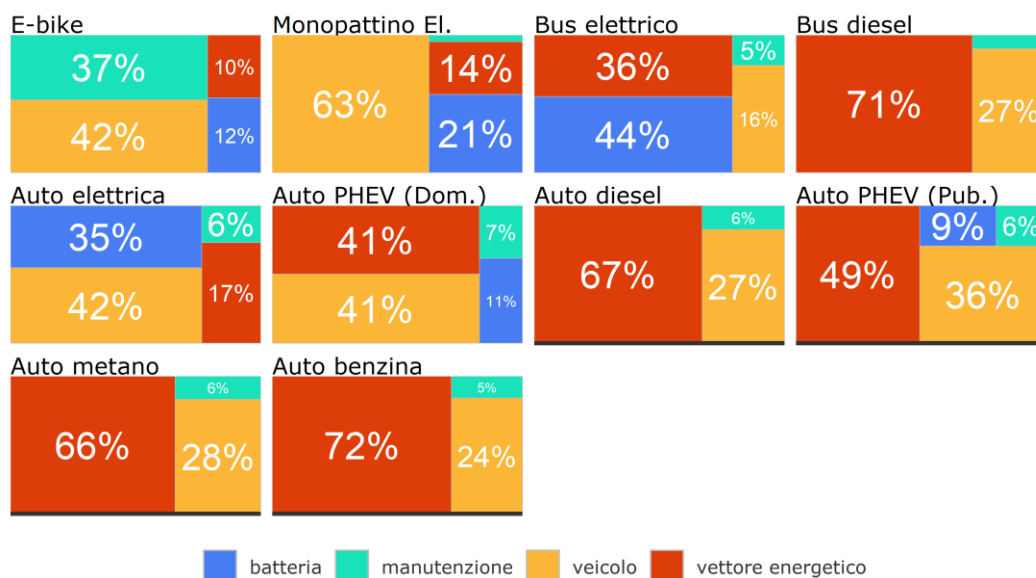


Figura 4.6 – Indicatore CLCC calcolato per le diverse fasi del ciclo di vita dei mezzi per la mobilità dei passeggeri.

I flussi che contribuiscono maggiormente all'indicatore CLCC baseline sono raffigurati nella Figura 4.7. Si osserva come i veicoli a combustione interna siano caratterizzati dalla grande importanza relativa degli idrocarburi (petrolio e gas naturale). Lo spodumene (minerale dal quale si estrae il litio) rientra tra i flussi più importanti per l'auto PHEV ed elettrica e bus elettrico, anche se non ai livelli degli idrocarburi per le auto a combustione interna. Molto eterogenea la composizione dell'indicatore CLCC nel caso di monopattino elettrico ed ebike.

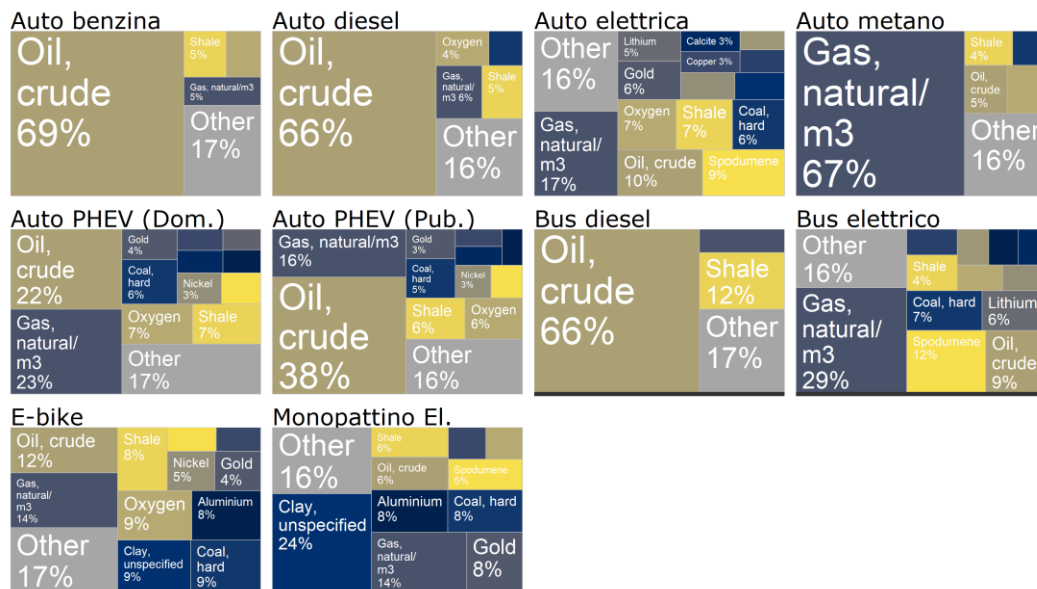


Figura 4.7 – Flussi di materiali principali nel calcolo dell'indicatore CLCC per i mezzi per la mobilità delle persone¹⁹.

Prendendo in considerazione i soli materiali critici (Figura 4.8)²⁰, emerge, nel caso delle auto a combustione interna, l'importanza di nickel, alluminio e, in misura minore, del rame. I mezzi ibridi o elettrici, invece, sono caratterizzati dalla grande importanza del litio, materia prima fondamentale per le batterie. Nel caso del bus diesel, invece, i materiali critici più importanti sono palladio, platino e rodio, presenti nella filiera produttiva del motore del mezzo. Infine, l'alluminio è il materiale critico più importante nel calcolo dell'indicatore Critical CLCC di ebike e monopattino elettrico (in quest'ultimo caso insieme al litio).

¹⁹ Il flusso Shale che compare in figura fa parte della filiera del carbone, utilizzato nello specifico per la lavorazione dell'acciaio.

²⁰ Nel caso dell'analisi dei soli flussi di materiali critici, questi sono stati raggruppati in macro-categorie. Ad esempio nickel e nickel ore (minerale di nickel) sono raggruppati nella macro-categoria "nickel" o, in maniera analoga, litio e spodumene (principale minerale dal quale si ricava il litio) sono raggruppati nella macro-categoria "litio".

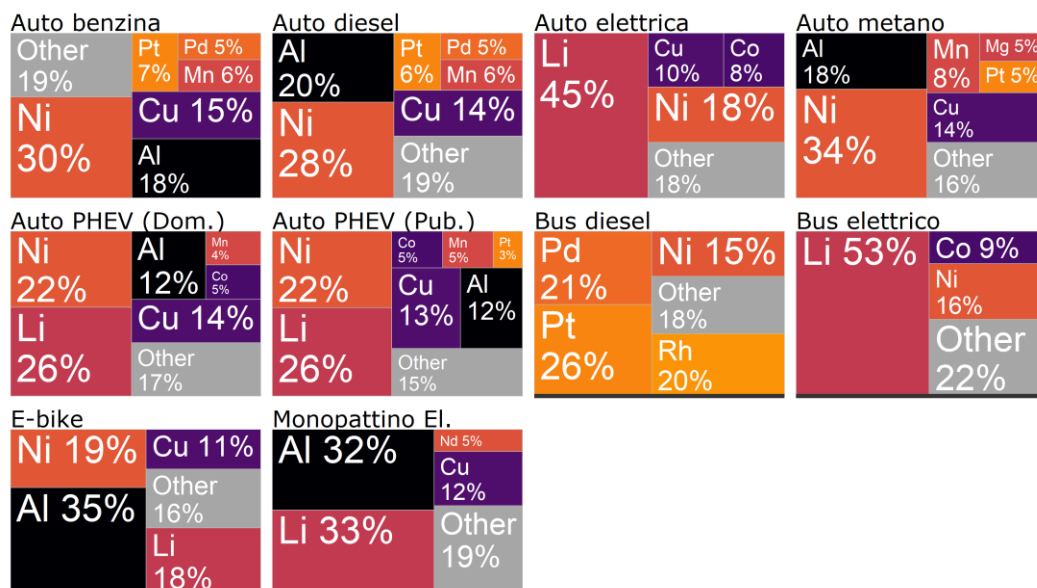


Figura 4.8 – Flussi di materiali principali nel calcolo dell'indicatore Critical CLCC per i mezzi per la mobilità delle persone.

L'analisi dell'incertezza sulla volatilità dei prezzi delle commodity è riportata in Appendice 11 - (Paragrafo 11.1.2).

4.2 Mobilità merci

Il presente paragrafo confronta le prestazioni dei mezzi per la mobilità delle merci in area urbana. La Tabella 4.2 riporta le caratteristiche dei mezzi analizzati nella applicazione relativa alla consegna merci dell'ultimo miglio. L'unità funzionale del confronto è il chilometro percorso in una missione di consegna merci in area urbana.

Tabella 4.2 – Caratteristiche dei mezzi confrontati per la valutazione degli impatti potenziali del trasporto merci in area urbana.

Tipologia di mezzo	Alimentazione	Potenza max motore [kW]	Coppia max [Nm]	Capacità batteria [kWh]	Consumi	
Van	Elettrica	80	254	40	21.98	kWh/100km
	Diesel	73	360@2000	-	9.03	l/100km
	Benzina//Elettrica	116	144@3200	9.8	3.74/17.97	l/100km//kWh/100km
Cargobike	Elettrica	0.25	n.a.	0.54	1.96	kWh/100km

Relativamente alla cargobike, le analisi riportate nel seguito fanno uso degli aggiornamenti al modello LCA di batterie e motore, nonché del proseguimento delle attività di monitoraggio dei consumi. Tali attività sono state descritte nel Capitolo 3 -.

Gli aggiornamenti ai modelli LCA dei van hanno riguardato esclusivamente le emissioni in fase d'uso, che sono conformi ai fattori emissivi ISPRA 2020 per il trasporto su strada [39]. Per maggiori dettagli circa i fattori emissivi si faccia riferimento all'Appendice 10 -, Tabella 10.2.

Nella analisi, vengono considerati due scenari relativi alla cargobike a pedalata assistita: il primo, denominato SCo, per il quale si ipotizza che la batteria abbia una vita utile pari a quella del mezzo; il secondo, denominato SCB, nel quale si ipotizza di dover sostituire la batteria una volta lungo la vita del mezzo, scenario che per altro si è verificato, durante la sperimentazione in atto, dopo circa



5500 km (corrispondenti a circa 330 giorni di utilizzo effettivo) che, considerando una vita del mezzo pari a 6 anni (dati del costruttore), corrisponde a circa il 20% della vita del mezzo.

4.2.1 Environmental Footprint

Il quadro complessivo del confronto tra le prestazioni dei mezzi è rappresentato nel grafico di Figura 4.9. Anche in questo caso, i mezzi per la micromobilità urbana si dimostrano competitivi rispetto ai mezzi tradizionali poiché risultano migliori per tutte le categorie di impatto considerate. Relativamente ai van, come già osservato per le auto, si evidenzia un vantaggio per categorie di impatto quali il cambiamento climatico, la formazione di particolato o la formazione di ozono fotochimico ma appare anche evidente come la categoria di impatto legata al consumo di risorse non rinnovabili (RU-M) rappresenti un punto di debolezza (il valore raggiunto dal van elettrico è circa il 400% di quello del van diesel).

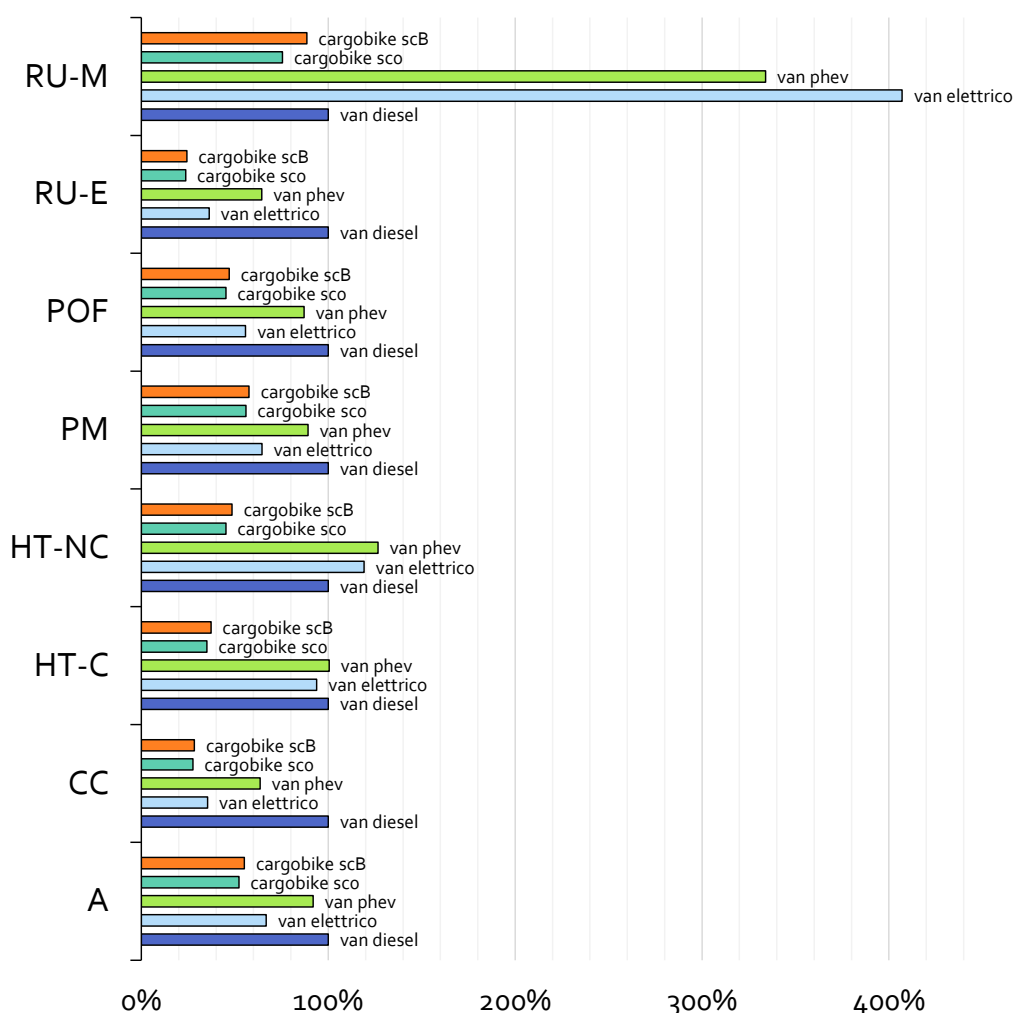


Figura 4.9 – Impatti potenziali dei mezzi adibiti al trasporto merci in ambito urbano. Nel grafico, il riferimento (100%) è rappresentato dalle prestazioni del van diesel. Categorie di impatto: CC = Climate Change; HT-C = Human toxicity, cancer; HT-NC = Human toxicity, non-cancer; PM = Particulate matter; POF = Photochemical ozone formation; RU-E = Resource use, energy carriers; RU-M = Resource use, mineral and metals; A = Acidification.

I grafici che seguono mostrano il contributo per fase del ciclo di vita. Relativamente all'indicatore sul Cambiamento Climatico (Figura 4.10), si nota come i due scenari della cargobike abbiano un



forte potenziale per contribuire alla decarbonizzazione nell'ambito urbano, con circa 90 g CO₂eq/km contro i 330 g CO₂eq/km del van Diesel. Segue il van elettrico, con 117 g CO₂eq/km. Ciò si traduce in una riduzione percentuale delle emissioni climalteranti del 72% nel caso si sostituisse un van diesel con una cargobike e del 65% nel caso in cui il van diesel venga sostituito con un van elettrico.

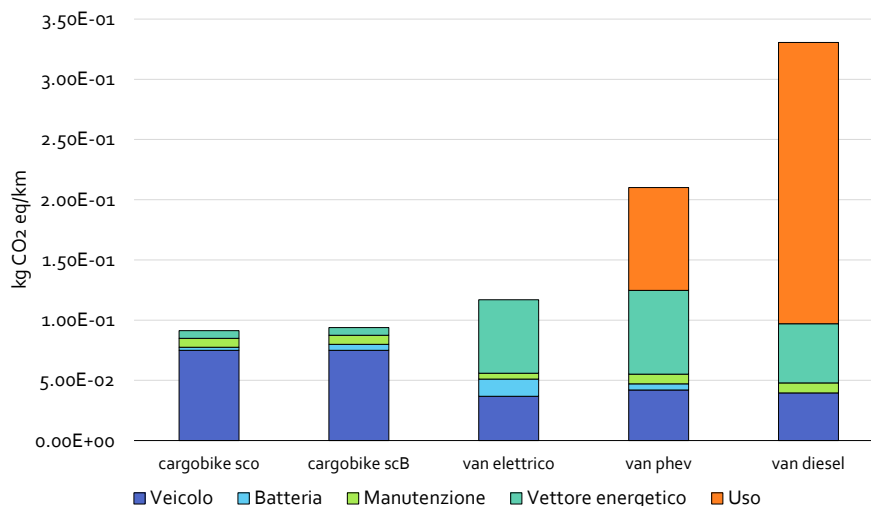


Figura 4.10 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Cambiamenti Climatici (Climate Change). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

Circa la categoria d'impatto *Consumo di Risorse Minerali* (Figura 4.11), appare evidente come per il van elettrico gli impatti potenziali dovuti alle fasi di produzione e fine vita di veicolo e batteria abbiano un peso determinante. Questo è dovuto alla presenza di minerali preziosi (ad esempio oro) nelle componenti elettroniche, per i quali il fattore di caratterizzazione è particolarmente elevato.

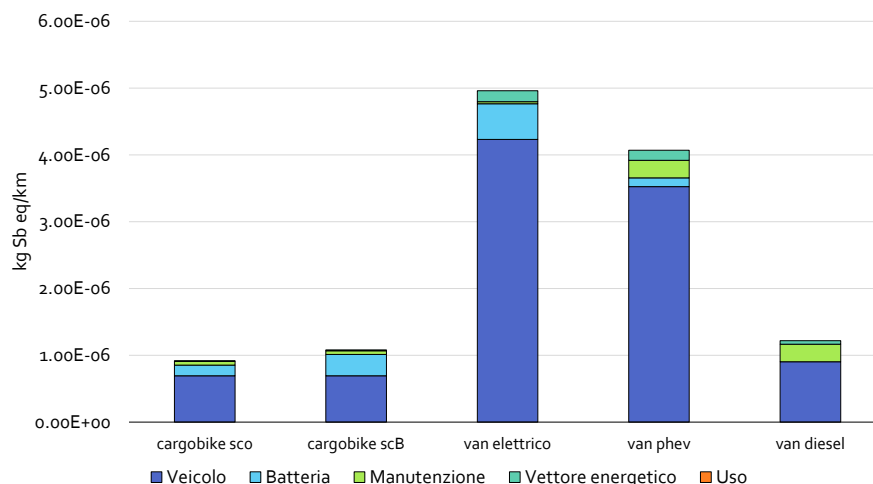


Figura 4.11 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Consumo di risorse minerali (Resource use, minerals and metals). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

In analogia con quanto ottenuto per la mobilità dei passeggeri, anche in questo caso i veicoli per la micromobilità, grazie alle ridotte emissioni, generano i minori impatti nella categoria Formazione di particolato (Figura 4.12), seguiti dal van elettrico in cui le emissioni in fase d'uso sono legate esclusivamente all'usura degli pneumatici e del manto stradale.

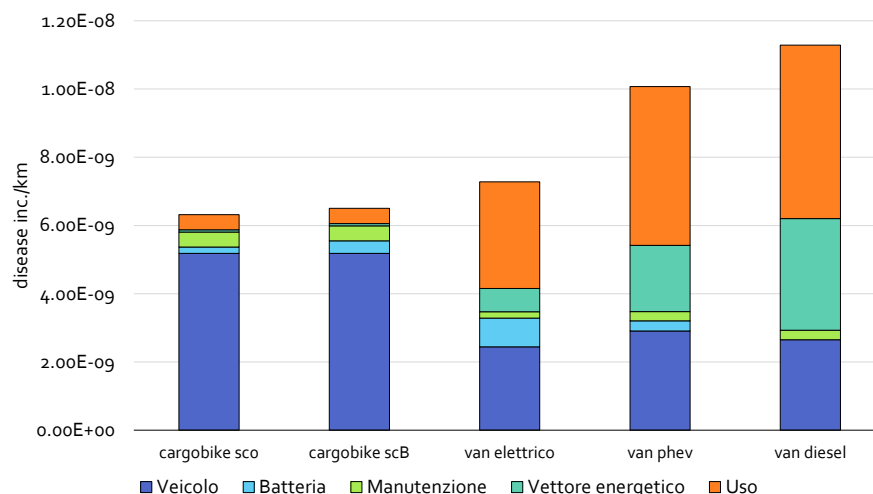


Figura 4.12 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Formazione di particolato (Particulate matter). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

I grafici delle altre categorie di impatto, insieme ai relativi valori numerici sono riportati in Appendice 11 -.

4.2.2 CLCC e Critical CLCC

La

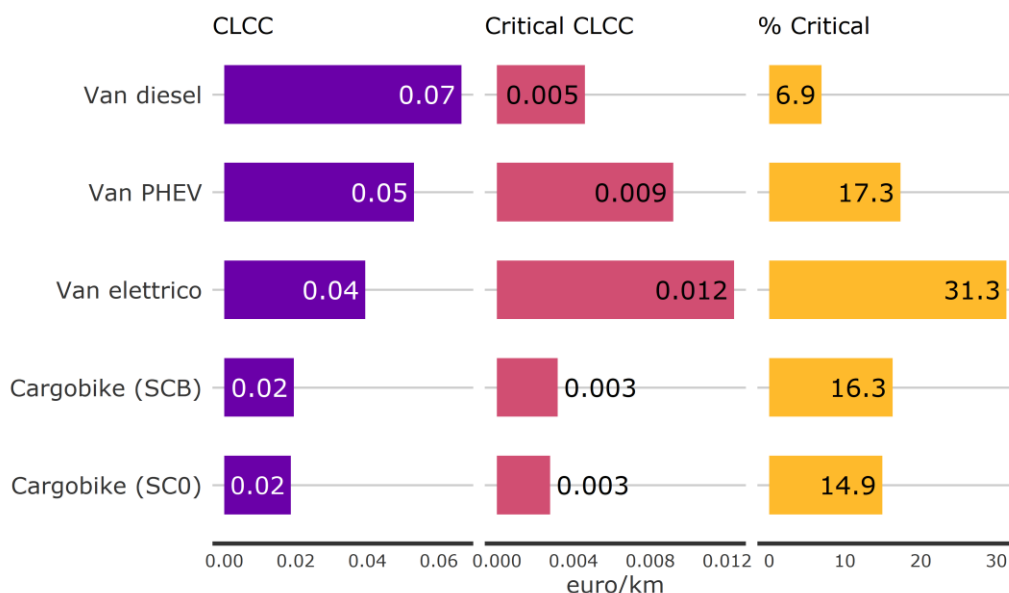


Figura 4.13 illustra i risultati riguardanti l'intero ciclo di vita dei mezzi per la logistica dell'ultimo miglio in area urbana.

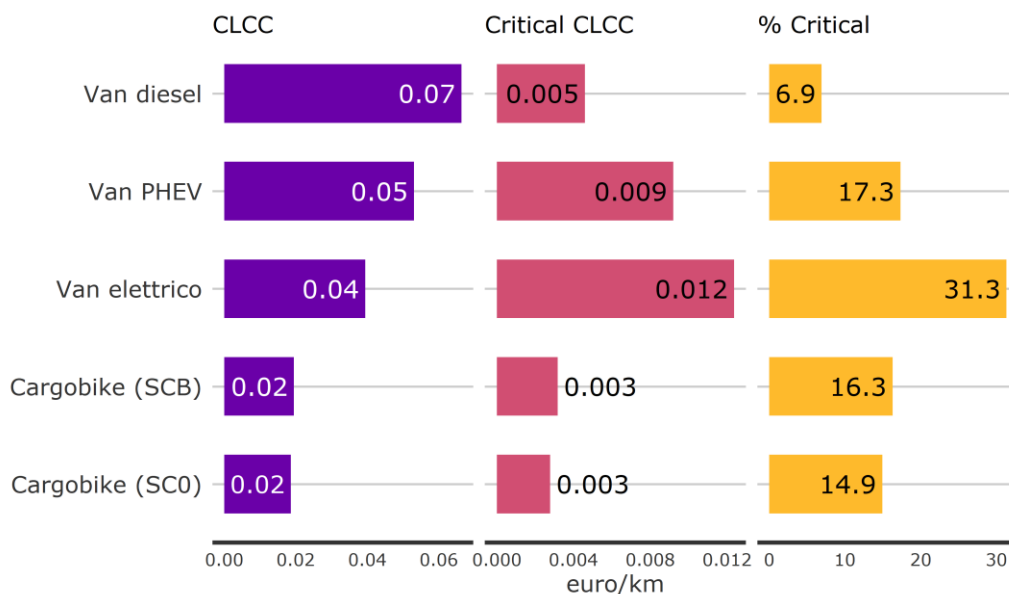


Figura 4.13 – Indicatore CLCC e Critical CLCC calcolato sull'intero ciclo di vita dei mezzi per la movimentazione delle merci.

I van, data la maggior dimensione, sono i mezzi contraddistinti da valori dell'indicatore CLCC più elevati e compresi tra i 0.07 euro/km del Van diesel e gli 0.04 euro/km del Van elettrico. Molto più bassi i valori della cargobike (circa 0.02 euro/km), date le ridotte dimensioni. Il valore dell'indicatore non differisce molto nei due casi esaminati (con o senza sostituzione della batteria). Il quadro cambia nel caso in cui si prenda in considerazione l'indicatore Critical CLCC che tiene conto solamente dei materiali critici. In questo caso, infatti, è il Van elettrico il mezzo contraddistinto dal valore più elevato (0.012 euro/km), mentre il Van diesel è quello con il valore

più basso (0.005 euro/km), ovviamente escludendo le cargobike che sono caratterizzate da un valore molto inferiore e, anche in questo caso, molto simile tra i due casi analizzati (circa 0.003 euro/km). Raffrontando, infine, il peso relativo dell'indicatore *Critical* sul totale dell'indicatore CLCC a primeggiare è sempre il Van elettrico, per il quale tale percentuale raggiunge il 31.3%. Percentuali piuttosto elevate caratterizzano anche Van PHEV, Cargobike (SCo) e Cargobike (SCB) con percentuali pari al 17.3, 16.3 e 14.9% rispettivamente. Molto più basso il peso relativo dei materiali critici nel caso del Van diesel e pari al 6.9%.

La Figura 4.14 mostra il contributo di ciascuna fase del ciclo di vita nel computo dell'indicatore CLCC.

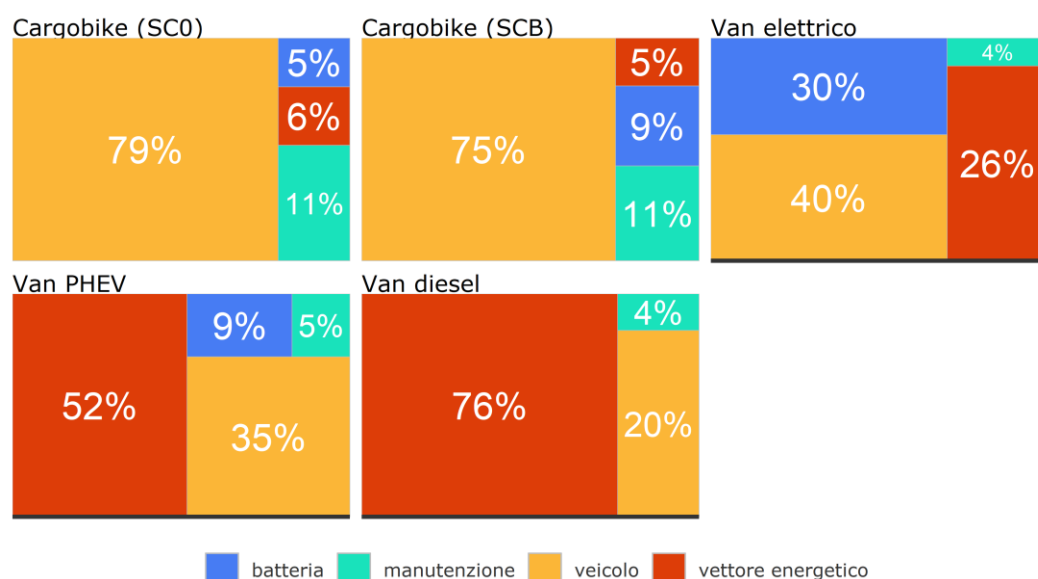


Figura 4.14 – Indicatore CLCC calcolato per le diverse fasi del ciclo di vita dei mezzi per la movimentazione delle merci.

Il vettore energetico è particolarmente importante nel caso del van diesel e, seppur in maniera minore, nel caso del van PHEV. La batteria aumenta sensibilmente il proprio peso percentuale nel caso del van elettrico. La fase che, invece, contribuisce maggiormente all'indicatore CLCC, nel caso della cargobike, è quella di costruzione del veicolo.

La Figura 4.15 mostra l'importanza relativa dei vari flussi di materiali nella composizione dell'indicatore CLCC di *baseline*. Colpisce la grande importanza del petrolio nel caso del van diesel e, in parte, del van PHEV, specularmente rispetto all'importanza del vettore energetico (vedi Figura 4.14). Il numero di materie prime che concorrono al calcolo dell'indicatore CLCC è molto maggiore nel caso dei van PHEV ed elettrico nonché della cargobike, a riflettere la complessità costruttiva dei sistemi di accumulo. Rilevante nei mezzi elettrici e ibridi l'importanza dello spodumene, dal quale si ricava il litio.

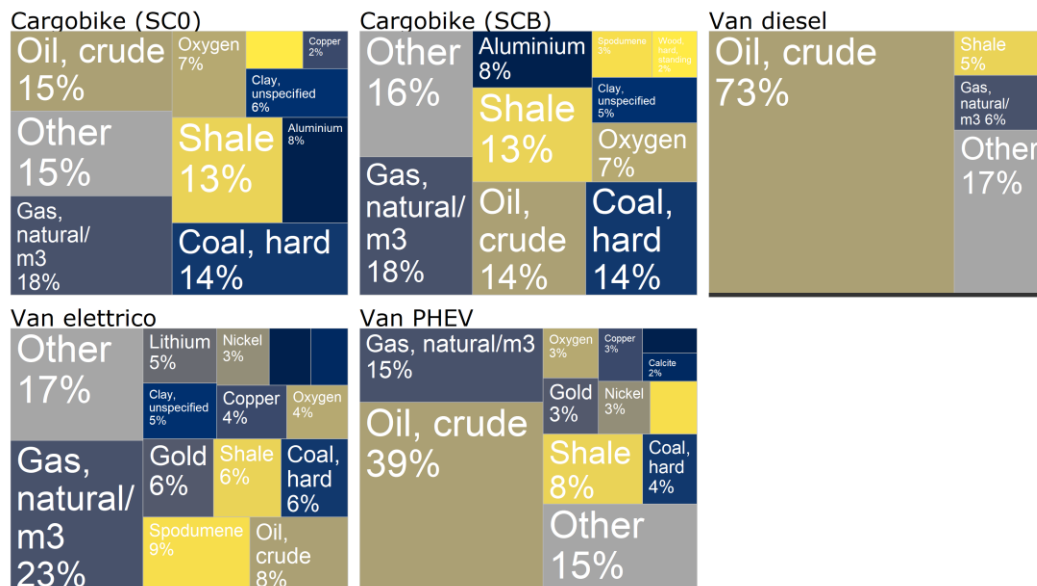


Figura 4.15 – Flussi di materiali principali nel calcolo dell'indicatore CLCC per i mezzi per la movimentazione delle merci.

Restringendo l'analisi dei flussi all'indicatore *Critical CLCC* (Figura 4.16 - aggregati in macro-categorie come nel caso della mobilità delle persone), emerge, nel caso della cargobike, la grande importanza percentuale di alluminio e rame, elementi importanti anche per i van elettrico e PHEV sebbene, in questi casi, sia il litio il materiale più importante, in quanto componente fondamentale per le batterie. I materiali critici che compongono l'indicatore *Critical CLCC* sono più numerosi nel caso dei van, a causa delle maggiori dimensioni dei mezzi e al maggior numero di componenti.

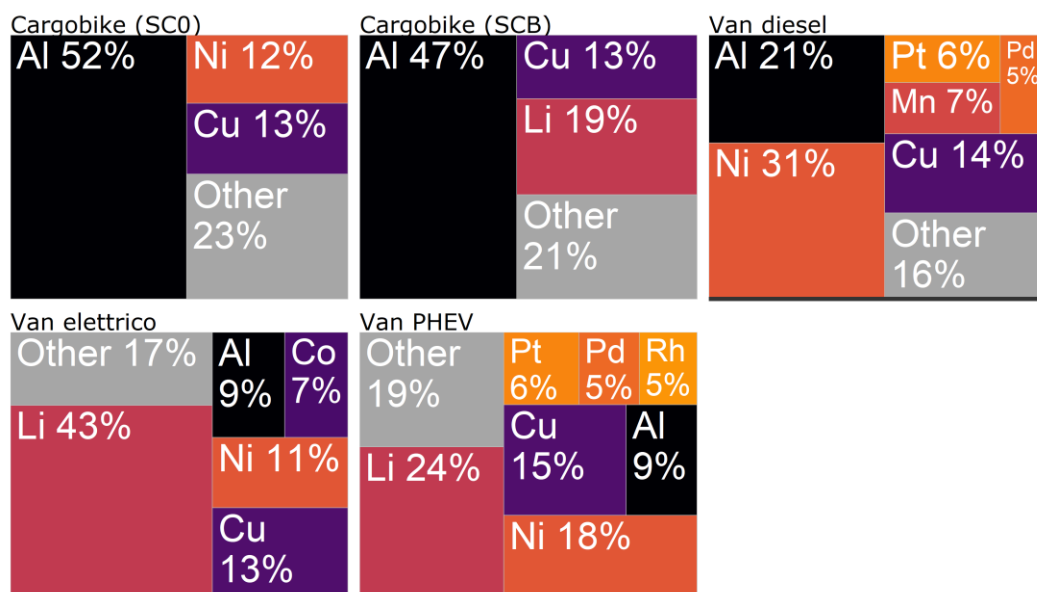


Figura 4.16 – Flussi di materiali principali nel calcolo dell'indicatore Critical CLCC per i mezzi per la movimentazione delle merci.



5 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Lo studio sviluppato nel presente periodo di ricerca ha consentito di ampliare il set di tecnologie a disposizione per la valutazione degli impatti potenziali della mobilità dei passeggeri, sviluppando lo studio LCA dei bus per il trasporto dei passeggeri in ambito urbano. Sono inoltre stati approfonditi gli aspetti più rilevanti legati alla micromobilità mediante attività sperimentali che hanno portato ad una definizione più precisa del *Bill Of Materials* di batterie e motori utilizzati per questi mezzi. Contemporaneamente, è proseguita l'attività di monitoraggio dei consumi di ebike e cargobike a pedalata assistita, al fine di definire con precisione sempre maggiore il fabbisogno energetico di tali mezzi.

In linea generale, l'attività ha messo in luce come i mezzi per la micromobilità siano in assoluto la migliore alternativa sia dal punto di vista della decarbonizzazione, sia dal punto di vista del miglioramento della qualità della vita in area urbana.

Relativamente alla mobilità dei passeggeri, ebike e monopattino elettrico risultano essere la migliore alternativa per tutti gli indicatori considerati ma l'introduzione dei bus ha messo in luce come questi siano una alternativa preferibile all'utilizzo delle auto, qualsiasi sia la motorizzazione, confermando come le azioni di molte amministrazioni comunali volte alla sostituzione di mezzi per il TPL tradizionali con mezzi ad alimentazione elettrica vada nella direzione del raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica che si pone il *Green Deal* Europeo. Lo spostamento modale da auto privata Diesel a bus elettrico porterebbe ad una riduzione percentuale delle emissioni climalteranti dell'84%. Se si passasse da un'auto elettrica ad un bus elettrico il vantaggio sarebbe comunque consistente (53%). Inoltre, anche lo spostamento modale da auto elettrica a bus Diesel porterebbe ad un vantaggio del 18% in termini di decarbonizzazione. Questo risultato mette in luce l'importanza delle politiche locali che dovrebbero andare nella direzione di un potenziamento del TPL, con il vantaggio massimo ottenibile dalla elettrificazione della flotta. L'utilizzo di bus elettrici per il trasporto di passeggeri in ambito urbano risulta sostenibile anche dal punto di vista del consumo di risorse.

L'indicatore CLCC conferma come ebike e monopattino elettrico siano i mezzi dalle prestazioni migliori. Bus elettrico, ma anche bus Diesel, grazie all'elevato numero di passeggeri trasportati, presentano valori paragonabili a quelli della ebike mentre le auto sono caratterizzate dai valori più elevati dell'indicatore. L'analisi dell'indicatore *Critical* CLCC conferma come le auto a propulsione elettrica siano caratterizzate dal valore maggiore dell'indicatore, a causa dei materiali critici, principalmente litio, presenti nelle batterie. Il bus elettrico presenta valori simili a quelli delle auto a combustione interna. L'analisi Monte Carlo evidenzia come l'ordinamento dei mezzi considerati sia stabile in relazione a bus e micromobilità ma possa risentire dell'andamento dei prezzi delle materie prime per quanto riguarda le autovetture. In definitiva, quindi, l'analisi conferma come micromobilità e trasporto pubblico locale rappresentino una valida alternativa anche per superare il problema legato al consumo di materiali critici, la cui disponibilità potrebbe rappresentare, nei prossimi anni, il principale ostacolo al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione nel settore dei trasporti.

Relativamente alla consegna delle merci in ambito urbano, si confermano, migliorandoli, i risultati già ottenuti in precedenti studi, ovvero come la soluzione migliore, ove possibile, sia rappresentata da cargobike a pedalata assistita. Poiché tale soluzione appare percorribile per lo più nei centri storici delle città, occorrerebbe affiancare, nelle aree a minore densità urbana, le cargo bike a furgoni elettrici. Gli approfondimenti sperimentali, che hanno consentito di utilizzare dati primari per rappresentare i modelli LCA di batterie e motori per la micromobilità, confermano questi risultati.

Analogamente a quanto riscontrato per il trasporto passeggeri, le prestazioni migliori per l'indicatore CLCC sono legate alle cargobike, grazie alle ridotte dimensioni del mezzo. Tra i furgoni, i van diesel sono caratterizzati dai valori più alti, mentre i van elettrici mostrano i valori più bassi. Il van elettrico, tuttavia, rappresenta una criticità in relazione al consumo di materiali critici, mentre i due scenari della cargobike sono caratterizzati dai valori più bassi in assoluto. In



conclusione, anche per la logistica urbana, la micromobilità rappresenta una valida alternativa per la decarbonizzazione.

L'attività ha inoltre messo in luce l'importanza dell'uso di dati primari. Le celle utilizzate nelle batterie delle bici a pedalata assistita (sia cargo che passeggeri) sono infatti profondamente diverse da quelle ipotizzate in passato sia per configurazione che per chimica. In futuro potrebbe essere utile fare una similia analisi per auto e bus.

6 - BIBLIOGRAFIA

- [1] European Environment Agency, «Digitalisation in the mobility system: challenges and opportunities», European Environment Agency, Luxembourg, Report EEA Report No 07/2022, 2022. [Online]. Disponibile su: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2022>
- [2] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, «EU transport in figures – Statistical pocketbook 2023». Publications Office of the European Union, 2023. [Online]. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/319371>
- [3] «The European Green Deal - European Commission». Consultato: 29 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [4] «Transport and the Green Deal - European Commission». [Online]. Disponibile su: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/transport-and-green-deal_en
- [5] Motus-E, «Autobus elettrici nel trasporto pubblico. Un vademecum». 2022. [Online]. Disponibile su: https://www.motus-e.org/studi_e_ricerche/autobus-elettrici-nel-trasporto-pubblico-un-vademecum-2/
- [6] A. Nordelöf, M. Romare, e J. Tivander, «Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 75, pp. 211–222, ott. 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.08.019.
- [7] E. Zhao, P. Walker, e N. Surawski, «Emissions life cycle assessment of diesel, hybrid and electric buses», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 236, p. 095440702110343, lug. 2021, doi: 10.1177/09544070211034318.
- [8] S. Jakub, L. Adrian, B. Mieczysław, B. Ewelina, e Z. Katarzyna, «Life cycle assessment study on the public transport bus fleet electrification in the context of sustainable urban development strategy», *Science of The Total Environment*, vol. 824, p. 153872, giu. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153872.
- [9] A. Lubecki, J. Szczurowski, e K. Zarębska, «A comparative environmental Life Cycle Assessment study of hydrogen fuel, electricity and diesel fuel for public buses», *Applied Energy*, vol. 350, p. 121766, nov. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121766.
- [10] G. Cooney, T. R. Hawkins, e J. Marriott, «Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, fasc. 5, pp. 689–699, 2013, doi: 10.1111/jiec.12024.
- [11] DIRETTIVA (UE) 2019/1161 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 20 giugno 2019 che modifica la direttiva 2009/33/CE relativa alla promozione di veicoli puliti e a basso consumo energetico nel trasporto su strada, vol. PE/57/2019/REV/2. 2019. [Online]. Disponibile su: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj>
- [12] Decreto legislativo del 09/11/2021 n. 187 - Attuazione della direttiva (UE) 2019/1161 che modifica la direttiva 2009/33/CE relativa alla promozione di veicoli puliti e a basso consumo energetico nel trasporto su strada. 284d.C. Consultato: 29 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/29/21G00197/sg>
- [13] Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations, vol. 471. 2021.
- [14] G. Mela, M. L. Carvalho, A. Temporelli, e P. Girardi, «The Commodity Life Cycle Costing Indicator. An Economic Measure of Natural Resource Use in the Life Cycle», *Sustainability*, vol. 13, fasc. 9, Art. fasc. 9, gen. 2021, doi: 10.3390/su13094870.
- [15] ISO - International Organization for Standardization, «ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework». 2006.
- [16] The International EPD System, «Environmental Product Declaration according to ISO 14025 for: Solaris Urbino 12 hybrid bus». 2022.
- [17] Directorate-General for Climate Action (European Commission) et al., *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA: final report*. LU: Publications Office of the European Union, 2020.



- [18] T. Ekvall, A. Azapagic, G. Finnveden, T. Rydberg, B. P. Weidema, e A. Zamagni, «Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook», *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, fasc. 3, pp. 293–296, mar. 2016, doi: 10.1007/s11367-015-1026-0.
- [19] M. L. Carvalho, B. Marmiroli, G. Mela, e A. Molocchi, «Elementi per l'integrazione della LCA di scenari energetici con la modellistica energetica e la valutazione monetaria delle esternalità», *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 21010395, Milano, 2021.
- [20] S. Fazio, F. Biganzoli, V. De Laurentiis, L. Zampori, S. Sala, e E. Diaconu, «Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods», European Union, Luxembourg, 2018, EUR 29600 EN JRC114822, gen. 2019. doi: 10.2760/002447.
- [21] T. F. Stocker *et al.*, «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [22] R. van Zelm *et al.*, «European characterization factors for human health damage of PM₁₀ and ozone in life cycle impact assessment», *Atmospheric Environment*, vol. 42, fasc. 3, pp. 441–453, gen. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.09.072.
- [23] M. Posch, J. Seppälä, J.-P. Hettelingh, M. Johansson, M. Margni, e O. Jolliet, «The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA», *Int J Life Cycle Assess*, vol. 13, fasc. 6, pp. 477–486, set. 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0025-9.
- [24] J. Seppälä, M. Posch, M. Johansson, e J.-P. Hettelingh, «Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 pp)», *Int J Life Cycle Assessment*, vol. 11, fasc. 6, pp. 403–416, nov. 2006, doi: 10.1065/lca2005.06.215.
- [25] P. Fantke *et al.*, «Health impacts of fine particulate matter», in *Global guidance for life cycle impact assessment indicators*, vol. 1, SETAC, 2016, pp. 76–99.
- [26] R. K. Rosenbaum *et al.*, «USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment», *Int J Life Cycle Assess*, vol. 13, fasc. 7, pp. 532–546, nov. 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0038-4.
- [27] L. van Oers, A. De Koning, J. B. Guinée, e G. Huppes, «Abiotic resource depletion in LCA», *Road and Hydraulic Engineering Institute, Ministry of Transport and Water, Amsterdam*, 2002.
- [28] PBL, «Share of raw material costs in total production costs», PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Consultato: 15 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.pbl.nl/en/publications/share-of-raw-material-costs-in-total-production-costs>
- [29] A. Temporelli, M. L. Carvalho, e G. Mela, «LCA e LCC di batterie stazionarie basate sugli ioni di sodio», *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 21010615 / *Ricerca Sistema Energetico (RSE)*, Milano, Italy, 2021.
- [30] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, e B. Weidema, «The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology», *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, fasc. 9, pp. 1218–1230, set. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [31] R. K. Iyer, J. C. Kelly, e A. Elgowainy, «Vehicle-Cycle Inventory for Medium- and Heavy-Duty Vehicles», Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (United States), ANL/ESD-21/18, 2021.
- [32] P. C. Brambilla, E. Brivio, B. Marmiroli, G. Mela, A. Molocchi, e A. Temporelli, «LCA della mobilità urbana dalle persone alle merci», *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 21010643, Milano, 2021.
- [33] P. C. Brambilla, E. Brivio, A. Temporelli, G. Mela, e A. Molocchi, «Mobilità urbana: le esternalità di veicoli privati in ottica di ciclo di vita», *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 22014037, Milano, 2022.
- [34] M. A. Cusenza, S. Bobba, F. Ardente, M. Cellura, e F. Di Persio, «Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles», *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, pp. 634–649, apr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.056.
- [35] M. L. Carvalho, B. Marmiroli, e P. Girardi, «Life cycle assessment of Italian electricity production and comparison with the European context», *Energy Reports*, vol. 8, pp. 561–568, giu. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.252.
- [36] U.N.I. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN 590:2017 - Combustibili per autotrazione - Gasolio per motori diesel - Requisiti e metodi di prova». 2017.
- [37] GSE, «Energia nel settore trasporti 2005-2019», 2020.



- [38] G. Mastinu e L. Solari, «Electric and biomethane-fuelled urban buses: comparison of environmental performance of different powertrains», *Int J Life Cycle Assess*, vol. 27, fasc. 2, pp. 238–254, feb. 2022, doi: 10.1007/s11367-021-02013-w.
- [39] ISPRA, «La banca dati dei fattori di emissione medi per il parco circolante in Italia (FE2020)». 2020. [Online]. Disponibile su: <https://fettransp.isprambiente.it/#/>
- [40] European Environment Agency, «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2009», Publication, 2009.
- [41] L. Ntziachristos e P. Boulter, «Road vehicle tyre and brake wear. Road surface wear», in *EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook*, Copenhagen, Denmark: European Environment Agency, 2009.
- [42] S. Sala, E. Crenna, M. Secchi, e R. Plant, «Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment», EUR (28984), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, JRC Technical Report n. 109878. doi: 10.2760/88930.
- [43] H. Basma, C. Mansour, M. Haddad, M. Nemer, e P. Stabat, «Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses», *Energy*, vol. 207, p. 118241, set. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118241.
- [44] L. Q. Luu, E. Riva Sanseverino, M. Cellura, H.-N. Nguyen, H.-P. Tran, e H. A. Nguyen, «Life Cycle Energy Consumption and Air Emissions Comparison of Alternative and Conventional Bus Fleets in Vietnam», *Energies*, vol. 15, fasc. 19, Art. fasc. 19, gen. 2022, doi: 10.3390/en15197059.
- [45] B. Marmioli, M. L. Carvalho, G. Mela, e P. Girardi, «Evoluzione del consumo di risorse nella generazione elettrica», in *30 anni di Life Cycle Assessment: sviluppi metodologici e applicativi*, Milano: Associazione Rete Italiana LCA, giu. 2023.
- [46] «Datasheet cella Samsung modello INR18650-35E». [Online]. Disponibile su: <https://bateriasonline.com/it/batterie-al-litio-ricaricabili/batteria-al-litio-samsung-inr-18650-35e-3450mah-samsung-batterie-al-litio-ricaricabili.html>
- [47] L. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A. Srivastava, L. Valøen, e A. Strømman, «Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, ott. 2013, doi: 10.1111/jiec.12072.
- [48] T. L. Varlet, O. Schmidt, A. Gambhir, S. Few, e I. Staffell, «Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage», *Journal of Energy Storage*, vol. 28, p. 101230, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101230>.
- [49] P. C. Brambilla, A. Temporelli, E. Brivio, G. Mela, e A. Molocchi, «Il contributo della micromobilità elettrica alla sostenibilità dei trasporti: un'analisi basata sul ciclo di vita», *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 21010644, Milano, 2021.
- [50] ISFORT - Istituto Superiore di formazione e ricerca per i trasporti, «19° Rapporto sulla mobilità degli italiani», ISFORT - Istituto Superiore di formazione e ricerca per i trasporti, 2022.
- [51] Green, Università Bocconi, «Scenari e prospettive dell'elettrificazione del trasporto pubblico su strada», 2021.
- [52] P. Söderena, N.-O. Nylund, e R. Mäkinen, *City bus performance evaluation*. in VTT Customer Report. VTT Technical Research Centre of Finland, 2019.
- [53] B. Zhou *et al.*, «Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions», *Energy*, vol. 96, pp. 603–613, feb. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.041.
- [54] S. Doulgeris *et al.*, «Evaluation of energy consumption and electric range of battery electric busses for application to public transportation», *Transportation Engineering*, vol. 15, p. 100223, mar. 2024, doi: 10.1016/j.treng.2023.100223.

7 - APPENDICE: APPROFONDIMENTO LCA DI BUS URBANI

7.1 Informazioni di dettaglio per la redazione dell'inventario

Di seguito sono riportate alcune informazioni di dettaglio ad integrazione del quadro modellistico descritto nel Capitolo 2 -.

La Tabella 7.1 riporta un elenco dei componenti presenti in GREET ed una loro descrizione. Tali componenti sono stati utilizzati come base di partenza per la modellazione del BOMs dei bus.

Tabella 7.1 – Componenti presenti nel modello GREET e loro descrizione.

System	Subsystems	Description of Individual Parts
Body system	Cab-in-white	Primary MHDV structure, i.e., a single-body assembly to which the other major components are attached
	Body Panels and Fairings	Closure and hang-on panels, including hood, roof, decklid, doors, quarter panels, and fenders, as well as fairings
	Front/Rear Bumpers	Impact bars, energy absorbers, and mounting hardware
	Glass	Front windshield, and windows (door, side, and sleeper)
	Lighting	Exterior: Head lamps, fog lamps, turn signals, side markers, front top markers, and rear light assemblies Interior: Wiring and controls for interior lighting, instrumentation, and power accessories
	Heating, Ventilation, Air Conditioning (HVAC) Module	Air flow system, heating system, and air conditioning system (includes a condenser, fan, heater, ducting, and controls)
	Seating and Restraint System	Seat tracks, seat frames, foam, trim, restraints, anchors, head restraints, arm rests, seat belts, tensioners, clips, air bags, and sensor assemblies
	Door Module	Door insulation, trim assemblies, speaker grills, and switch panels and handles (door panels are part of body panels)
	Instrument Panel	Panel structure, knee bolsters and brackets, instrument cluster (including switches), exterior surface, console storage, glove box panels, glove box assembly and exterior, and top cover
	Trim and Insulation	Emergency brake cover, switch panels, ash trays, cup holders, headliner assemblies, overhead console assemblies, assist handles, overhead storage, pillar trim, sun visors, carpet/rubber, padding, insulation, and accessory mats
	Body Hardware	Miscellaneous body components
Powertrain system	Engine Unit	Engine block, cylinder heads, shafts, fuel injection, engine air system, ignition system, manifolds, alternator, containers and pumps for the lubrication system, gaskets, and seals
	Engine Fuel Storage System	Fuel tank, tank mounting straps, tank shield, insulation, filling piping, and supply piping
	Powertrain Thermal System	Water pump, radiator, and fan
	Exhaust System	Catalytic converter, muffler, heat shields, and exhaust piping
	Powertrain Electrical System	Control wiring, sensors, switches, and processors
	Emission Control Electronics	Sensors, processors, and engine emission feedback equipment
Transmission Unit		Clutch, gear box, final drive, and controls Use of automated manual transmission system

System	Subsystems	Description of Individual Parts
Chassis system	Cradle	Frame assembly, front rails and cross-members, and cab and body brackets (the cradle bolts to cab-in-white and supports the mounting of engine)
	Driveshaft/Axle/ Inter-axle Shaft	Propeller shaft that connects gearbox to the differential Half shaft that connects wheels to the differential; Shafts that connect front and rear parts of a tandem drive axle
	Axles	Steer (single) and drive (tandem) axles
	Differential	A gear set that transmits energy from driveshaft to axles and allows for each of the driving wheels to rotate at different speeds while supplying them with an equal amount of torque
	Suspensions	Upper and lower shock brackets, shock absorbers, springs, steering knuckle, and stabilizer shaft
	Braking System	Hub, disc, rotor, splash shield, and calipers
	Wheels and Tires	Steer and drive axle wheels and tires
	Auxiliary	Steering wheel, column, joints, linkages, bushes, housings, and hydraulic- assist equipment
Electric drive system	Generator	Power converter that takes mechanical energy from the engine and produces electrical energy to recharge batteries and power the electric motor for series
Electric drive system	Traction Motor	Electric motor used to drive the wheels
Electric drive system	Electronic Controller	Power controller/phase inverter system that converts power between the batteries and motor/generators for electric drive vehicles
Battery system	ICEV	Pb-acid battery to handle startup and accessory load
Battery system	EV	Pb-acid battery to handle mainly startup load, Li-ion battery for use in electric drive system
Fluid system	ICEV	Engine oil, engine/powertrain coolant with coolant cleaner, brake fluid, windshield fluid, transmission fluid, power steering fluid, lubricant oils, and adhesives
Fluid system	EV	Powertrain coolant with coolant cleaner, power steering fluid, brake fluid, transmission fluid, windshield fluid, lubricant oils, adhesives
Van/Box system	Body	Front, sides, floor, and roof of van/box, along with auxiliary parts
Lift-gates system	Lift-gates	Gates used for loading/unloading of goods, along with their hydraulic systems and other constituent parts

Le Tabella 7.2 e Tabella 7.3 riportano la composizione per materiale dei componenti costitutivi rispettivamente del bus elettrico e del bus diesel. Tale composizione è frutto di una elaborazione dei dati pubblicati da GREET per il modello di MHDV denominato Class 6 PhD, basata sui risultati della EPD dell'autobus ibrido Urbino 12 della casa produttrice Solaris [16].

Tabella 7.2 – Composizione per materiale dei componenti del bus elettrico.

	kg
Body	5.05E+03
Cast aluminum	2.39E+02
Copper	2.37E+01
Cotton paper	6.21E+00
Glass	3.63E+02
Glass fiber-reinforced plastic	7.65E+02
Graphite	7.50E+00
Latex	2.21E+02

	Leather	1.15E+02
	Plastic	6.76E+02
	Rubber	1.36E+02
	Silica	7.50E+00
	Stainless steel	1.84E+02
	Steel	1.88E+03
	Wrought aluminum	4.27E+02
Chassis (w/o battery)		3.72E+03
	Brass	2.78E-01
	Cast aluminum	1.89E+02
	Cast iron	3.43E+02
	Copper	8.83E-01
	Magnet	5.37E-01
	Plastic	2.17E+00
	Rubber	2.50E+02
	Steel	2.93E+03
Electronic Controller		1.30E+01
	Alumina	3.89E-02
	Average Plastic	1.31E-01
	Cast aluminum	6.95E+00
	Copper/Brass	3.95E+00
	Epoxy resin	2.55E-02
	Fiberglass	8.04E-02
	Nickel	2.14E-02
	Nylon	9.38E-03
	PET	3.59E-01
	Polypropylene	5.12E-01
	Polyurethane	2.55E-01
	Rubber	1.61E-01
	Steel	3.66E-01
	Zinc	1.33E-01
	Zinc oxide	2.68E-03
Lead-Acid Battery		3.13E+01
	Fiberglass	6.63E-01
	Lead	2.18E+01
	Plastic (polypropylene)	1.92E+00
	Sulfuric Acid	2.49E+00
	Water	4.45E+00
Li-Ion Battery		3.00E+03
Traction Motor		1.34E+02
	Cast aluminum	4.23E+01
	Copper/Brass	1.16E+01
	Enamel	5.23E-01
	Epoxy resin	1.03E+00
	Glass fiber	1.34E-02
	Methacrylate ester resin	1.74E-01
	Mica	4.02E-02
	Nd(Dy)FeB magnet	3.85E+00
	Nickel	4.02E-02
	Nylon	1.34E-02
	Paint/Varnish	4.29E-01
	PBT	2.14E-01
	PET	4.29E-01
	Phenolic resin	6.70E-02
	Silicone	5.36E-02
	Stainless steel	8.98E-01
	Steel	7.23E+01
	Zinc	1.34E-02
Transmission System/Gearbox		9.00E+01
	Brass	1.95E-01
	Cast aluminum	5.28E+00
	Cast iron	2.18E+01

	Magnet	1.90E-02
	Plastic	9.55E-02
	Rubber	9.55E-02
	Steel	6.21E+01
	Wrought aluminum	3.60E-01
Fluids		8.76E+01
	Steer axle	7.00E+00
	Drive axle	5.87E+00
	Inter-axle/Drive shafts	1.40E+01
	Wheel-end: Steer axle	8.62E+00
	Wheel-end: Drive axle	8.62E+00
	Transmission Fluid	2.35E+00
	Powertrain Coolant	1.68E+01
	Coolant cleaner	1.71E+01
	Windshield Fluid	7.19E+00
Total		1.21E+04

Tabella 7.3 – Composizione per materiale dei componenti del bus Diesel.

		kg
Body		5.05E+03
	Cast aluminum	2.39E+02
	Copper	2.37E+01
	Cotton paper	6.21E+00
	Glass	3.63E+02
	Glass fiber-reinforced plastic	7.65E+02
	Graphite	7.50E+00
	Latex	2.21E+02
	Leather	1.15E+02
	Magnet	0.00E+00
	Plastic	6.76E+02
	Rubber	1.36E+02
	Silica	7.50E+00
	Stainless steel	1.84E+02
	Steel	1.88E+03
	Wrought aluminum	4.27E+02
Chassis (w/o battery)		3.72E+03
	Brass	2.78E-01
	Cast aluminum	1.89E+02
	Cast iron	3.43E+02
	Copper	8.83E-01
	Magnet	5.37E-01
	Plastic	2.17E+00
	Rubber	2.50E+02
	Steel	2.93E+03
Lead-Acid Battery		6.26E+01
	Fiberglass	1.33E+00
	Lead	4.35E+01
	Plastic (polypropylene)	3.85E+00
	Sulfuric Acid	4.98E+00
	Water	8.90E+00
Powertrain System (including BOP)		6.45E+02
	Bronze	5.05E-02
	Cast aluminum	2.69E+01
	Cast iron	2.37E+02
	Ceramic	4.75E+01
	Copper & Brass	1.96E-01
	Graphite	1.88E-02
	Nichrome	1.68E+00
	Plastic	4.29E+01
	Platinum	3.16E-01
	Rubber	2.06E+00

	<i>Stainless steel</i>	<i>2.67E+01</i>
	<i>Steel</i>	<i>1.85E+02</i>
	<i>Wrought aluminum</i>	<i>7.42E+01</i>
Transmission System/Gearbox		2.21E+02
	<i>Brass</i>	<i>4.78E-01</i>
	<i>Cast aluminum</i>	<i>1.30E+01</i>
	<i>Cast iron</i>	<i>5.36E+01</i>
	<i>Magnet</i>	<i>4.67E-02</i>
	<i>Plastic</i>	<i>2.35E-01</i>
	<i>Rubber</i>	<i>2.35E-01</i>
	<i>Steel</i>	<i>1.53E+02</i>
	<i>Wrought aluminum</i>	<i>8.84E-01</i>
Fluids		1.24E+02
	<i>Engine Oil</i>	<i>1.53E+01</i>
	<i>Steer axle</i>	<i>7.00E+00</i>
	<i>Drive axle</i>	<i>5.87E+00</i>
	<i>Inter-axle/Drive shafts</i>	<i>1.40E+01</i>
	<i>Wheel-end: Steer axle</i>	<i>8.62E+00</i>
	<i>Wheel-end: Drive axle</i>	<i>8.62E+00</i>
	<i>Transmission Fluid</i>	<i>7.65E+00</i>
	<i>Powertrain Coolant</i>	<i>2.45E+01</i>
	<i>Coolant cleaner</i>	<i>2.50E+01</i>
	<i>Windshield Fluid</i>	<i>7.19E+00</i>
Total		9.82E+03

La Tabella 7.4 riporta alcuni fattori di riempimento utilizzati in studi relativi a LCA di autobus urbani.

Tabella 7.4 – Fattori di riempimento medio per autobus urbani reperiti in letteratura.

	Person/vehicle medium
Nordelöf et al, 2019 [6]	16.04
Ecoinvent [30]	21.1
Luu et al., 2022 [44]	17.8

Il valore utilizzato nel presente studio corrisponde al 20% del fattore di riempimento massimo, come suggerito dalla Commissione Europea [17].

I fattori emissivi in ciclo di guida urbano per il bus diesel sono riportati in Tabella 7.5 e sono tratti dagli ultimi dati pubblicati da ISPRA [39] per la categoria denominata "Urban Buses Standard 15 - 18 t". Lo standard emissivo corrisponde Euro VI D/E.

Tabella 7.5 – Fattori emissivi in ciclo di guida urbano per il bus Diesel.

	Emission Factor [t/t] Urban
CO	8.85E-04
NOx	1.64E-03
NM VOC	1.29E-04
CH ₄	1.65E-05
N ₂ O	1.31E-04
NH ₃	2.83E-05
PM exhaust	2.80E-05
CO ₂	3.16E+00
SO ₂	1.43E-05
Pb Exhaust	4.89E-11
Cadmium exhaust	6.76E-09
Copper exhaust	1.15E-06
Chromium exhaust	3.68E-08
Nickel exhaust	4.72E-08
Selenium exhaust	6.79E-09
Zinc exhaust	6.81E-07
Benzene	9.04E-08
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	4.65E-09
Benzo(k)fluoranthene	2.02E-08
Benzo(b)fluoranthene	1.81E-08

	Emission Factor [t/t] Urban
Benzo(a)pyrene	2.99E-09
Dioxins	5.31E-16
Furans	7.97E-16

La Tabella 7.6 mostra i componenti sostituiti in fase di manutenzione e il numero di sostituzioni effettuate lungo la vita utile del mezzo. I valori sono stati calcolati, a partire da quelli pubblicati da GREET, considerando la vita utile ipotizzata per i bus.

Tabella 7.6 – Componenti sostituiti in fase di manutenzione e numero di sostituzioni.

		N. substitution
Fluids		
	Engine Oil (ICEB only)	13
	Steer axle	6
	Drive axle	0
	Inter-axle/Drive shafts	16
	Wheel-end: Steer axle	0
	Wheel-end: Drive axle	0
	Transmission Fluid	5
	Powertrain Coolant	2
	Coolant cleaner	2
	Windshield Fluid	73
Battery		
	Lead Acid	6
	Li-Ion	1
Tyre		
	Steer Tire	3
	Drive Tyre	2
Other components		
	Windshield Wiper Blades	25
	Engine oil filter (ICEB only)	10

I consumi energetici in fase di manutenzione (Tabella 7.7) sono tratti da Ecoinvent, riparametrati rispetto alla diversa vita utile dei mezzi.

Tabella 7.7 – Consumi energetici in fase di manutenzione (p=80000 km).

	UM	Value
Electricity	kWh/p	45765
Heat	MJ/p	51813

7.2 Analisi di incertezza

La Tabella 7.8 mostra i consumi energetici di bus elettrici e Diesel secondo alcuni studi di letteratura.

Tabella 7.8 – Consumi energetici di bus elettrici e Diesel secondo alcuni studi di letteratura.

	Diesel (l/100km)	Elettrico (kWh/100km)
Nordelöf et al, 2019 [6]	45	110
Basma et al., 2020 [43]	55.7	170
ISPRA 2020 [39]	38.04	n.a.
Ecoinvent [30]	63.17	n.a.
Jakub et al., 2022 [8]	42	150
Luu et al., 2022 [44]	26	136
Mastinu e Solari, 2022 [38]	n.a.	125
Green Bocconi, 2021 [51]	n.a.	115
Söderena et al., 2019 [52]	28	n.a.

	Diesel (l/100km)	Elettrico (kWh/100km)
Motus-E, 2022 [5]	n.a.	127
Zhou et al., 2016 [53]		138
Zhou et al 2016 [53]		175
Zhao et al., 2021 [7]	29.20	120
Doulgeris et al., 2024 [54]	n.a.	96
Doulgeris et al., 2024 [54]	n.a.	220
Min value	26	96
Max value	63.17	220
Best guess value	38.04	115

La robustezza dell'ordinamento ottenuto per le prestazioni dei bus è stata valutata mediante una analisi di incertezza basata sul metodo Monte Carlo. A tale scopo, è stato ipotizzato che i consumi seguano una distribuzione di probabilità di tipo triangolare, con valori minimi e massimi corrispondenti ai valori minimi e massimi (per i due veicoli) riscontrati in letteratura (Tabella 7.8). La simulazione è stata effettuata con un numero di iterazioni pari a 10000 con un livello di confidenza del 95%.

La Figura 7.1 mostra l'esito della analisi Monte Carlo per il trasporto di 1 passeggero per 1 chilometro mediante bus elettrico (A) e bus diesel (B) per le categorie di impatto del metodo EF 3.0.

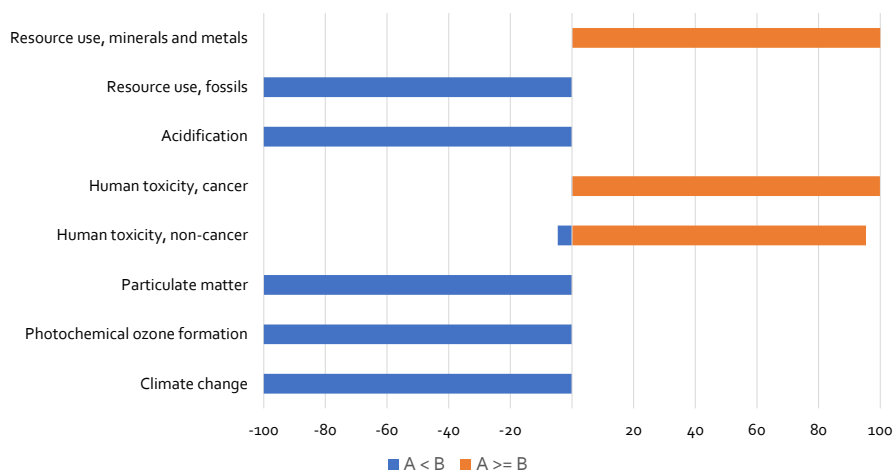


Figura 7.1 – Analisi Monte Carlo per il trasporto di 1p*km con bue elettrico e Diesel. I valori raffigurati rappresentano la probabilità della differenza tra gli impatti potenziali del bus elettrico (A) e quelli del bus Diesel (B).

Dal grafico si evince che per tutti gli indicatori ad eccezione della tossicità umana non cancerogena, si conferma l'ordinamento ottenuto con la analisi di baseline (Paragrafo 2.3.1). Considerando ad esempio l'indicatore Cambiamenti Climatici (*Climate Change* nel grafico), la probabilità che il valore dell'indicatore calcolato per il bus elettrico sia inferiore a quello calcolato per il bus Diesel ($A < B$) è pari al 100%. Risultato del tutto analogo si ottiene per le categorie di impatto *Acidification*, *Resource Use*, *Fossil*, *Particulate Matter* e *Photochemical ozone formation*. Esiste invece una probabilità, seppur esigua (4.6%) che la tossicità umana non cancerogena (*Human toxicity, non-cancer* nel grafico) dovuta al bus elettrico sia inferiore a quella dovuta al bus Diesel. Infine, la probabilità che le categorie di impatto *Resource use*, *minerals and metals* e *Human toxicity, cancer* siano favorevoli al bus elettrico è pari a zero.

Si riportano di seguito i grafici delle distribuzioni di probabilità per le categorie di impatto *Climate Change*, *Human toxicity, non cancer* e *Resource use, minerals and metals* esportati da SimaPro.

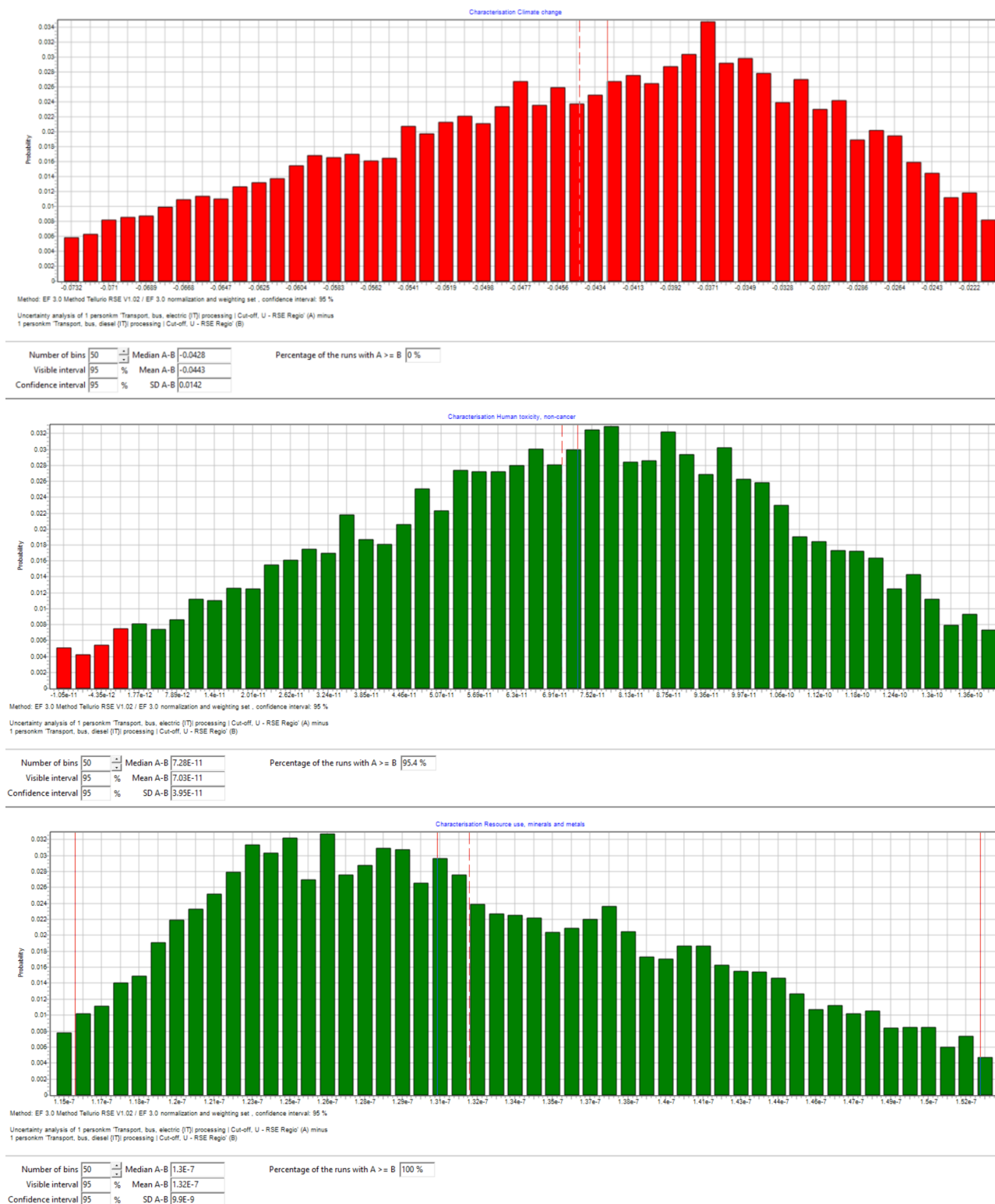


Figura 7.2 – Grafici delle distribuzioni di probabilità per le categorie di impatto *Climate Change, Human toxicity, non cancer e Resource use, minerals and metals.*

8 - APPENDICE: AGGIORNAMENTO BATTERIE MICROMOBILITÀ

8.1 Dati di inventario

La fase di sperimentazione atta alla modellazione dei dataset delle due batterie si è articolata in due fasi. La prima fase è consistita nell'implementazione di test di laboratorio effettuati sulle singole celle che hanno consentito l'acquisizione di dati relativi alle caratteristiche tecniche della batteria. La seconda fase, invece, ha previsto una fase di smontaggio delle batterie seguita da uno studio dettagliato di tutti i componenti.

Si riportano nelle tabelle a seguire i dataset delle batterie Cargobike (Tabella 8.1 - Tabella 8.6) ed eBike (Tabella 8.7 - Tabella 8.12). Si ricorda che la batteria del monopattino elettrico è stata modellata scalando i quantitativi sulla base del peso del componente (2.85 kg).

Tabella 8.1 – Dataset per la produzione della batteria Greencell. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione di una batteria.

Output	Quantità (g)
Greencell - Lithium battery_RSE	3.26E+03
Input	Quantità (g)
Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U	1.13E+02
Metal working, average for aluminium product manufacturing {MY} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	1.13E+02
Cable, unspecified {GLO} market for Cut-off, U	8.12E+01
Nylon 6 {RoW} market for nylon 6 Cut-off, U	1.05E+02
Injection moulding {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	5.62E+02
Silicone product {RoW} market for silicone product Cut-off, U	1.00E+00
Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for Cut-off, U	6.52E+01
Metal working, average for steel product manufacturing {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	5.02E+01
0.7-PC+0.3-ABS_RSE	4.52E+02
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} production GREENCELL Cut-off, U - RSE	2.80E+00
Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for Cut-off, U	3.50E+00
Greencell BMS_RSE	2.36E+01
Kraft paper {RoW} market for kraft paper Cut-off, U	2.76E+01
Greencell battery pack_RSE	2.38E+03
Consumi energetici	Quantità (kWh)
Electricity, medium voltage {CN} market group for Cut-off, U	2.10E-03
Emissioni in aria	Quantità (MJ)
Heat, waste	1.40E-03

Tabella 8.2 – Dataset per la produzione del BMS presente nella batteria Greencell. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione dell'intero componente.

Output	Quantità (g)
Greencell BMS_RSE	2.36E+01
Input	Quantità (g)
Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U	8.30E+00
Metal working, average for aluminium product manufacturing {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	8.30E+00
Nylon 6 {RER} market for nylon 6 Cut-off, U	1.30E+00
Injection moulding {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	3.10E+00

Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U	1.80E+00
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} production GREENCELL BMS Cut-off, U - RSE	1.22E+01
Consumi energetici	Quantità (kWh)
Electricity, medium voltage {CN} market group for Cut-off, U	2.10E-03
Emissioni in aria	Quantità (MJ)
Heat, waste	1.40E-03

Tabella 8.3 – Dataset per la produzione di un pacco batteria presente nella batteria Greencell. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione dell'intero componente.

Output	Quantità (g)
Greencell battery pack_RSE	2.38E+03
Input	Quantità (g)
Greencell cell_RSE	2.26E+03
Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, U	1.04E+02
Injection moulding {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	1.04E+02
Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U	2.11E+01
Metal working, average for aluminium product manufacturing {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	2.11E+01

Tabella 8.4 – Dataset per la produzione di un pacco batteria presente nella batteria Greencell. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione dell'intero componente.

Output	Quantità (g)
Greencell cell_RSE	2.38E+03
Input	Quantità (g)
Extrusion, plastic film {GLO} market for Cut-off, U	5.45E-01
Sheet rolling, steel {GLO} market for Cut-off, U	7.26E+00
Anode for Li-Ion battery_NCM {CN} Alloc Rec, U_Ellingsen_RSE	1.24E+01
Cathode for Li-Ion battery_GreenCell {CN} Alloc Rec, U_RSE	2.07E+01
Li-Ion battery production_Battery cell sub-component: electrolyte {CN} Alloc Rec, U_Ellingsen_RSE	1.59E+00
Li-Ion battery production_Battery cell sub-component: separator {CN} Alloc Rec, U_Ellingsen_RSE	2.68E+00
Consumi energetici	Quantità (kWh)
Electricity, medium voltage {CN} market group for Cut-off, U	5.61E-01

Tabella 8.5 – Dataset per la produzione del catodo della cella presente nella batteria Greencell. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE qualora presentino anche la dicitura Ellingsen sono stati modellati in accordo con [29]. Il dataset si riferisce alla produzione di 1 kg.

Output	Quantità (kg)
Cathode for Li-Ion battery_GreenCell {CN} Alloc Rec, S_RSE	1.00E+00
Input	Quantità (kg)
Positive current collector for Li-Ion battery_NCM {CN} Alloc Rec, S_Ellingsen_RSE	1.90E-01
Positive electrode paste for Li-Ion battery_GreenCell Alloc Rec, S_RSE	8.10E-01
Trasporti	Quantità (tkm)
Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for Cut-off, S	5.50E-01
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cut-off, S	1.00E-01

Tabella 8.6 – Dataset per la produzione dell’elettrodo positivo della cella presente nella batteria Greencell. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione di 1 kg.

Output	Quantità (kg)
Positive electrode paste for Li-Ion battery_GreenCell Alloc Rec, S_RSE	1
Input	Quantità (kg)
Polyvinylfluoride {GLO} market for Cut-off, S	2.00E-02
Lithium Nickel Cobalt Manganese oxide_333 production {CN} Alloc Rec, S_RSE	4.12E-01
Lithium _{1,25} Nickel _{0,125} Manganese _{0,625} oxide production {CN} Alloc Rec, S_RSE	9.21E-02
Lithium _{0,79} Nickel _{1,01} oxide production {CN} Alloc Rec, S_RSE	4.36E-01
N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for Cut-off, S	4.10E-01
Carbon black {GLO} production Alloc Rec, S_RSE	4.00E-02
Infrastruttura	Quantità (p)
Chemical factory, organics {RoW} construction Cut-off, S	4.00E-10

Tabella 8.7 – Dataset per la produzione della batteria Bosch. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione di una batteria.

Output	Quantità (g)
Bosch - Lithium battery_RSE	2.98E+03
Input	Quantità (g)
Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U	5.20E+02
Metal working, average for aluminium product manufacturing {MY} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	5.20E+02
Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, U	1.12E+02
Injection moulding {MY} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	2.46E+02
Silicone product {RoW} market for silicone product Cut-off, U	3.29E+01
Polyurethane, flexible foam {RoW} market for polyurethane, flexible foam Cut-off, U	7.40E+00
Nylon 6 {RoW} market for nylon 6 Cut-off, U	9.42E+01
Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for Cut-off, U	1.74E+01
Metal working, average for steel product manufacturing {MY} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	1.74E+01
Cable, unspecified {GLO} market for Cut-off, U	2.00E+01
Bosch BMS_RSE	2.40E+01
Bosch battery pack_RSE	2.16E+03
Consumi energetici	Quantità (kWh)
Electricity, medium voltage {CN} market group for Cut-off, U	1.94E-03
Emissioni in aria	Quantità (MJ)
Heat, waste	1.40E-03

Tabella 8.8 – Dataset per la produzione del BMS montato nella batteria Bosch. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione del componente.

Output	Quantità (g)
Bosch BMS_RSE	2.40E+01
Input	Quantità (g)
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} production Bosch BMS Cut-off, U - RSE	1.95E+01
Polyurethane, flexible foam {RoW} market for polyurethane, flexible foam Cut-off, U	4.50E+00
Injection moulding {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	4.50E+00

Tabella 8.9 – Dataset per la produzione del pacco celle montato sulla batteria Bosch. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione del componente.

Output	Quantità (g)
Bosch battery pack_RSE	5.39E+02
Input	Quantità (g)
Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, U	4.81E+01
Injection moulding {CN} processing Alloc Rec, U_RSE_regio	4.81E+01
Bosch battery cell_RSE	4.91E+02*

*Il pacco batteria si compone di 10 celle.

Tabella 8.10 – Dataset per la produzione di una cella samsung presente nella batteria Bosch. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE.

Output	Quantità (g)
Bosch battery cell_RSE	4.91E+01
Input	Quantità (g)
Extrusion, plastic film {GLO} market for Cut-off, U	3.43E-01
Silicone product {RoW} market for silicone product Cut-off, U	1.20E-01
Sheet rolling, steel {GLO} market for Cut-off, U	9.00E+00
Li-Ion battery production_Battery cell sub-component: separator {CN} Alloc Rec, U_Ellingsen_RSE	2.79E+00
Anode for Li-Ion battery_NCM Alloc Rec, U_Ellingsen_RSE	1.46E+01
Cathode for Li-Ion battery_NCO Alloc Rec, U_RSE	2.01E+01
Li-Ion battery production_Battery cell sub-component: electrolyte {CN} Alloc Rec, U_Ellingsen_RSE	2.70E+00
Consumi energetici	Quantità (kWh)
Electricity, medium voltage {CN} market group for Cut-off, U	6.63E-01

Tabella 8.11 – Dataset per la produzione del catodo della cella presente nella batteria Bosch. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE qualora presentino anche la dicitura Ellingsen sono stati modellati in accordo con [29]. Il dataset si riferisce alla produzione di 1 kg.

Output	Quantità (kg)
Cathode for Li-Ion battery_NCO Alloc Rec, S_RSE	1.00E+00
Input	Quantità (kg)
Positive current collector for Li-Ion battery_NCM {CN} Alloc Rec, S_Ellingsen_RSE	1.90E-01
Positive electrode paste for Li-Ion battery_NCO {CN} Alloc Rec, S_RSE	8.10E-01
Trasporti	Quantità (tkm)
Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for Cut-off, S	5.50E-01
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cut-off, S	1.00E-01

Tabella 8.12 – Dataset per la produzione dell'elettrodo positivo della cella presente nella batteria Bosch. I dataset con la dicitura RSE sono stati appositamente creati nel presente progetto da RSE. Il dataset si riferisce alla produzione di 1 kg.

Output	Quantità (kg)
Positive electrode paste for Li-Ion battery_NCO {CN} Alloc Rec, S_RSE	1.00E+00
Input	Quantità (kg)
Polyvinylfluoride {GLO} market for Cut-off, S	2.00E-02
Lithium Nickel Cobalt oxide_LiNi0,85Co0,15O2_NCO {CN} production Alloc Rec_S_RSE	9.40E-01
N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for Cut-off, S	4.10E-01



Carbon black {GLO} production Alloc Rec, S RSE	4.00E-02
Infrastruttura	Quantità (p)
Chemical factory, organics {RoW} construction Cut-off, S	4.00E-10

8.2 Test di laboratorio per l'individuazione della vita utile delle batterie

I test di laboratorio, condotti dai colleghi RSE del laboratorio batterie del dipartimento TGM (Tecnologie di Generazione e Materiali), hanno lo scopo di valutare l'invecchiamento delle batterie nel tempo e di stabilirne la vita utile.

I test riguardano le batterie Bosch (bici elettrica) e Green Cell (cargobike a pedalata assistita).

Per le batterie Green Cell, sono in corso prove di caratterizzazione dello stato di salute delle batterie, allo scopo di ricostruire la curva di invecchiamento in funzione di un utilizzo reale delle batterie stesse. Il processo di caratterizzazione avviene ogni tre mesi circa ed è tuttora in atto. Lo stato iniziale è stato determinato con test di caratterizzazione sulle batterie nuove, appositamente acquistate. Al momento, dopo circa un anno di prove, non è stata rilevata una significativa diminuzione della capacità di carica della batteria.

Per le batterie Bosch non è stato possibile realizzare dei test analoghi, collegando direttamente la batteria ai dispositivi che ne valutino lo stato di salute, a causa di un sistema di sicurezza della batteria stessa attivato dal BMS; quindi, si è optato per il test di invecchiamento delle celle su banco. Le celle sono state caricate e scaricate in modo da simularne l'utilizzo, includendo anche le pause che generano un raffreddamento della batteria. È stata effettuata una prima stima della RUL (*Remaining Useful Life*), ipotizzando un profilo di lavoro che parte da un SOC (*State Of Charge*) iniziale del 100%, con microcicli che simulano la frenata rigenerativa e termina la fase di scarica con un SOC del 65%, seguita da una ricarica a bassa potenza fino al 100%. Si è ipotizzato che venga completato un ciclo al giorno e che la condizione di *End of Life* equivalga alla riduzione della capacità all'80% rispetto alla capacità iniziale.

In queste condizioni la batteria completerebbe 400 cicli equivalenti con una vita utile di 1051 giorni, corrispondenti a 2.9 anni se utilizzata tutti i giorni, circa 4 anni se utilizzata 5 giorni a settimana.

Questi risultati preliminari saranno approfonditi proseguendo i test di laboratorio anche nel prossimo anno di ricerca di sistema.

9 - APPENDICE: AGGIORNAMENTO MOTORE MONOPATTINO

La presente fase sperimentale ha permesso l'acquisizione di dati primari e informazioni di dettaglio e, quindi, di sviluppare un dataset ad-hoc del componente prendendo a riferimento il dataset presente in Ecoinvent 3.8 (*Electric motor, for electric scooter {GLO} | production | Cut-off, U*). L'attività ha inizialmente previsto lo smontaggio, acquisizione e analisi di tutti i componenti costituenti il motore al fine di identificarne natura del materiale e origine.

Successivamente si è proceduto alla costruzione del dataset con l'ausilio del database di Ecoinvent 3.8 nello specifico per quanto riguarda sia i processi di trattamento degli scarti prodotti in fase di produzione sia per i consumi energetici associati a tale fase. In Tabella 9.1 si riportano i materiali e rispettivi quantitativi coinvolti nella produzione del motore elettrico, per motivi di *copyright* non è possibile pubblicare l'intero dataset.

Tabella 9.1 – Dataset motore elettrico monopattino.

Output	Quantità (g)
Electric motor, for electric scooter {GLO} production Cut-off, U - RSE	2.25E+03
Input	
Aluminium, cast alloy	5.44E+02 ²¹
Aluminium, wrought alloy	2.96E+02 ²¹²¹
Permanent magnet, for electric motor	2.01E+02
Steel, low-alloyed	9.50E+02
Synthetic rubber	7.38E+00
Copper	2.22E+02 ²¹²¹
Polyphenylene sulfide	2.45E+01
Printed wiring board	2.4E+00
Energia	Quantità (kWh)
Electricity, medium voltage {CN}	6.69E+00
Heat	4.02E+00
Scarti	Quantità (g)
Waste plastic, industrial electronics	2.23E+00

²¹ Quantitativo al netto degli scarti prodotti in fase di lavorazione pari a circa 20%.

10 - APPENDICE: FATTORI EMISSIVI IN FASE D'USO AUTO, BUS E FURGONI

Tabella 10.1 – Fattori emissivi in fase d'uso [kg/km] per auto e bus analizzati in questo studio. I valori sono in parte tratti da ISPRA (FE 2020) e in parte desunti dalla sperimentazione effettuata nel triennio 2019-2021.

	Auto						Bus
Fuel	Petrol	Petrol Hybrid	Petrol Hybrid	Diesel	Diesel	CNG Bifuel	Diesel
Segment	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium	Urban Buses Standard 15 - 18 t
Euro Standard	Euro 6 d-temp	Euro 6 d-temp	Euro 6 d-temp	Euro 6 d-temp	Euro 6 d-temp	Euro 6 d-temp	Euro VI D/E
Veicolo SimaPro	Petrol	Petrol Hybrid caso1	Petrol Hybrid caso2	Diesel	Diesel Sens	CNG Bifuel	Diesel
CO kg/km	1.45E-03	1.71E-04	1.45E-04	2.72E-05	2.36E-05	1.41E-04	2.83E-04
NOx kg/km	1.04E-04	1.08E-05	8.07E-06	6.58E-05	5.70E-05	2.71E-05	5.26E-04
NMVOG kg/km	4.19E-04	2.08E-05	1.66E-05	1.84E-06	1.60E-06	1.02E-05	4.13E-05
CH ₄ kg/km	5.12E-05	1.37E-06	1.09E-06	1.11E-07	9.63E-08	4.21E-05	5.29E-06
N ₂ O kg/km	1.74E-06	4.16E-07	1.21E-06	1.33E-05	1.16E-05	7.02E-06	4.18E-05
NH ₃ kg/km	1.35E-05	8.69E-07	2.52E-06	1.04E-05	8.99E-06	5.35E-06	9.07E-06
PM _{exhaust} kg/km	2.30E-07	7.20E-09	4.56E-09	1.28E-07	1.11E-07	4.13E-08	8.96E-06
CO ₂ kg/km	2.03E-01	2.67E-02	7.69E-02	1.84E-01	1.59E-01	1.77E-01	1.01E+00
SO ₂ kg/km	6.43E-07	9.01E-08	2.57E-07	8.32E-07	7.21E-07	0.00E+00	4.57E-06
Pb _{Exhaust} 2019 kg/km	3.02E-12	6.44E-13	1.84E-12	3.76E-12	3.26E-12	2.89E-12	1.56E-11
Cadmium _{Exhaust} 2019 kg/km	4.27E-10	9.03E-11	2.58E-10	5.20E-10	4.51E-10	3.97E-10	2.16E-09
Copper _{Exhaust} 2019 kg/km	7.10E-08	1.51E-08	4.32E-08	8.85E-08	7.67E-08	6.77E-08	3.68E-07
Chromium _{Exhaust} 2019 kg/km	2.15E-09	4.29E-10	1.23E-09	2.67E-09	2.32E-09	1.67E-09	1.18E-08
Nickel _{Exhaust} 2019 kg/km	3.05E-09	6.39E-10	1.83E-09	3.63E-09	3.14E-09	2.78E-09	1.51E-08
Selenium _{Exhaust} 2019 kg/km	4.25E-10	8.99E-11	2.57E-10	5.21E-10	4.51E-10	3.95E-10	2.17E-09
Zinc _{Exhaust} 2019 kg/km	4.30E-08	9.03E-09	2.58E-08	5.21E-08	4.51E-08	3.92E-08	2.18E-07
Benzene kg/km	1.11E-05	1.44E-06	4.10E-06	3.65E-08	3.16E-08	0.00E+00	2.89E-08
indeno_1_2_3_cd_pyrene kg/km	1.17E-09	1.71E-10	4.88E-10	1.69E-09	1.47E-09	8.19E-10	1.49E-09
benzo_k_fluoranthene kg/km	7.83E-10	1.14E-10	3.25E-10	4.92E-10	4.27E-10	5.46E-10	6.47E-09
benzo_b_fluoranthene kg/km	1.08E-09	1.58E-10	4.50E-10	1.44E-09	1.25E-09	7.56E-10	5.79E-09
benzo_a_pyrene kg/km	9.63E-10	1.40E-10	4.00E-10	7.88E-10	6.83E-10	6.72E-10	9.56E-10
dioxins kg/km	8.13E-15	1.18E-15	3.38E-15	4.92E-16	4.27E-16	5.67E-15	1.70E-16
furans kg/km	1.23E-14	1.80E-15	5.13E-15	7.22E-16	6.26E-16	8.62E-15	2.55E-16

Tabella 10.2 – Fattori emissivi in fase d'uso [kg/km] per i van analizzati in questo studio. I valori sono in parte tratti da ISPRA (FE 2020) e in parte desunti dalla sperimentazione effettuata nel triennio 2019-2021.

	Van	
Fuel	Diesel	Petrol Hybrid
Segment	N1-II	Medium
Euro Standard	Euro 6 d-temp	Euro 6 d-temp
Veicolo SimaPro	Diesel	Petrol Hybrid
CO kg/km	7.82E-05	1.59E-04
NOx kg/km	2.17E-05	8.88E-06
NMVOG kg/km	3.09E-06	1.82E-05
CH ₄ kg/km	1.15E-06	1.20E-06
N ₂ O kg/km	1.03E-05	1.33E-06
NH ₃ kg/km	1.64E-07	2.77E-06
PM_exhaust kg/km	1.70E-07	5.02E-09
CO ₂ kg/km	2.30E-01	8.46E-02
SO ₂ kg/km	1.08E-06	2.83E-07
Pb_Exhaust 2019 kg/km	3.35E-12	2.02E-12
Cadmium_Exhaust 2019 kg/km	4.64E-10	2.84E-10
Copper_Exhaust 2019 kg/km	7.89E-08	4.75E-08
Chromium_Exhaust 2019 kg/km	2.58E-09	1.35E-09
Nickel_Exhaust 2019 kg/km	3.23E-09	2.01E-09
Selenium_Exhaust 2019 kg/km	4.66E-10	2.82E-10
Zinc_Exhaust 2019 kg/km	4.68E-08	2.84E-08
Benzene kg/km	6.30E-09	4.52E-06
indeno_1_2_3_cd_pyrene kg/km	2.26E-09	5.37E-10
benzo_k_fluoranthene kg/km	2.14E-09	3.58E-10
benzo_b_fluoranthene kg/km	2.73E-09	4.95E-10
benzo_a_pyrene kg/km	2.43E-09	4.40E-10
dioxins kg/km	4.19E-16	3.72E-15
furans kg/km	6.15E-16	5.64E-15

11 - APPENDICE: LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT

11.1 Mobilità dei passeggeri

11.1.1 Environmental Footprint

Tabella 11.1 – Valori delle categorie di impatto per i veicoli analizzati (CC = Climate Change; HT-C = Human toxicity, cancer; HT-NC = Human toxicity, non cancer; PM = Particulate matter; POF = Photochemical ozone formation; RU-E = Resource use, energy carriers; RU-M = Resource use, mineral and metals; A = Acidification terrestrial and freshwater).

	A	CC	HT-C	HT-NC	PM	POF	RU-F	RU-M
UM	mol H+ eq/p*km	kg CO ₂ eq/p*km	CTUh/p*km	CTUh/p*km	disease inc./p*km	kg NMVOC eq/p*km	MJ/p*km	kg Sb eq/p*km
ebike	6.11E-05	1.16E-02	1.77E-11	2.73E-10	6.75E-10	3.42E-05	1.39E-01	3.10E-07
escooter	8.67E-05	1.52E-02	1.55E-11	4.19E-10	7.94E-10	4.25E-05	1.81E-01	7.77E-07
bus diesel	2.67E-04	6.67E-02	2.18E-11	4.89E-10	2.92E-09	1.37E-04	8.84E-01	1.67E-07
bus elettrico	1.31E-04	2.85E-02	3.14E-11	5.63E-10	2.55E-09	6.44E-05	3.85E-01	2.92E-07
auto elettrica	4.48E-04	8.18E-02	1.51E-10	2.40E-09	5.62E-09	2.43E-04	1.10E+00	3.16E-06
auto phev dom	4.54E-04	1.20E-01	1.50E-10	2.50E-09	6.76E-09	3.08E-04	1.62E+00	2.57E-06
auto phev pub	5.34E-04	1.49E-01	1.54E-10	2.56E-09	7.23E-09	3.37E-04	2.03E+00	2.63E-06
auto diesel	5.40E-04	1.75E-01	1.15E-10	1.86E-09	6.58E-09	3.35E-04	2.31E+00	1.49E-06
auto benzina	6.89E-04	2.18E-01	1.57E-10	3.21E-09	7.30E-09	7.36E-04	2.83E+00	1.61E-06
auto metano	3.51E-04	2.02E-01	1.28E-10	1.92E-09	5.63E-09	2.88E-04	2.69E+00	1.63E-06
auto diesel 2.0	5.93E-04	1.97E-01	1.18E-10	1.92E-09	6.85E-09	3.66E-04	2.60E+00	1.50E-06
auto elettrica egolf	3.74E-04	7.84E-02	1.35E-10	2.14E-09	5.03E-09	2.21E-04	1.08E+00	2.87E-06

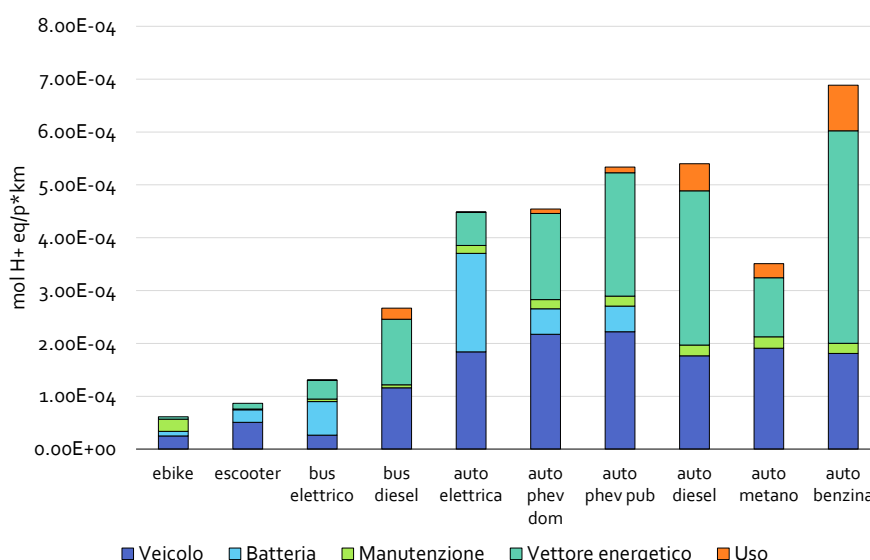


Figura 11.1 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Acidificazione (Acidification). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

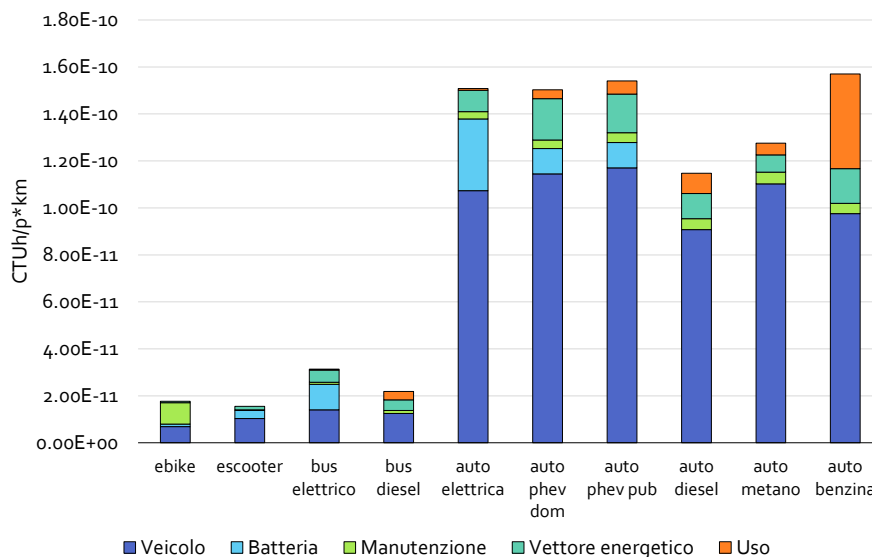


Figura 11.2 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Tossicità Umana – effetti cancerogeni (Human Toxicity – Cancer). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

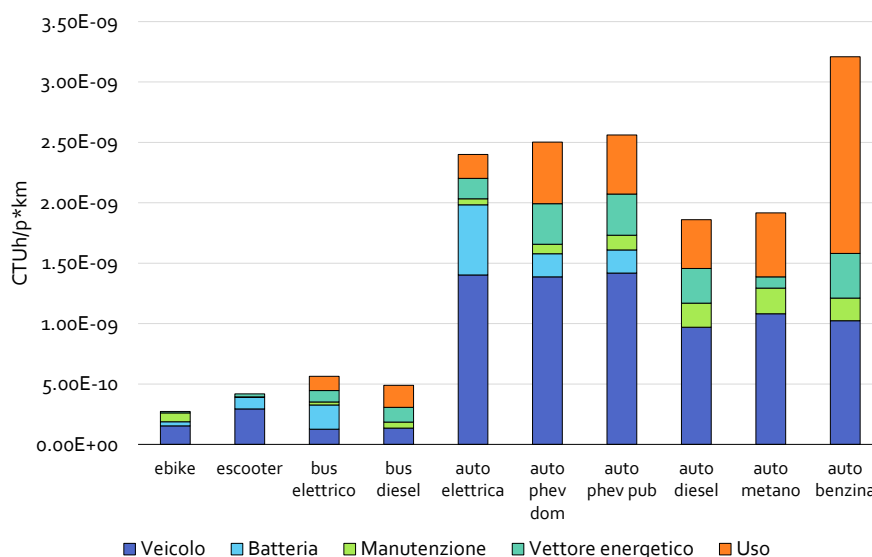


Figura 11.3 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Tossicità Umana – effetti non cancerogeni (Human Toxicity – Non Cancer). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

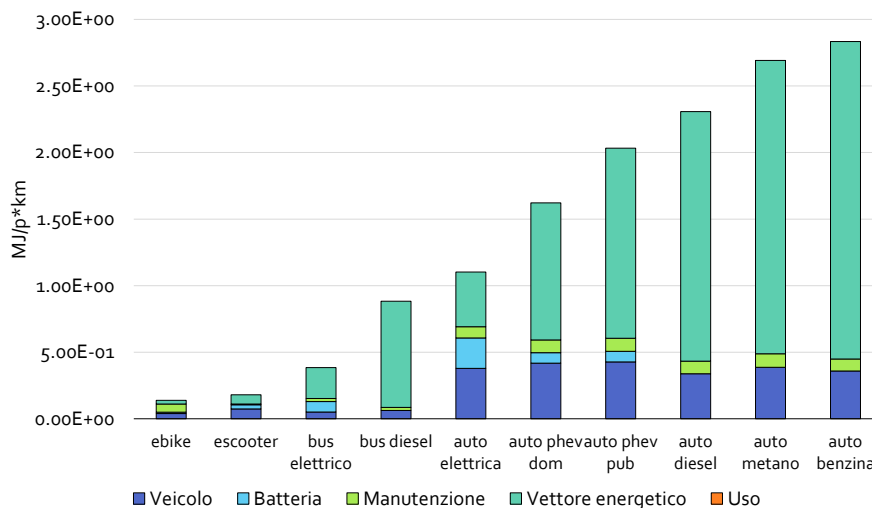


Figura 11.4 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto **Uso di risorse energetiche (Resource Use - Fossils)**. Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

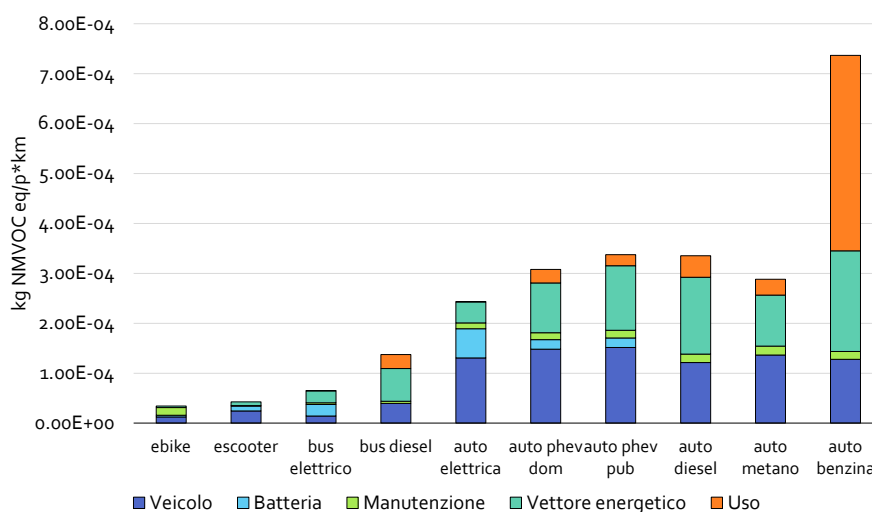


Figura 11.5 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto **Formazione di ozono fotochimico (Photochemical Ozone Formation)**. Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al trasporto di un passeggero per un chilometro.

11.1.2 CLCC e Critical CLCC – Analisi dell'incertezza

L'analisi dell'incertezza è stata svolta utilizzando un approccio probabilistico con il metodo Monte Carlo. L'indicatore CLCC di *baseline* (riferito al ciclo di vita nel suo complesso) è stato calcolato un grande numero di volte (10000) utilizzando, ogni volta, un set diverso di prezzi. Questi ultimi sono stati generati a partire da distribuzioni triangolari aventi come parametri i valori minimi e massimi dei dieci anni antecedenti al 2022 e la media dello stesso decennio (che è anche il valore utilizzato per l'analisi di *baseline*). I prezzi di mercato, infatti, sono caratterizzati da una forte volatilità che potrebbe, in determinate circostanze, rendere i valori di *baseline* poco affidabili e/o modificare l'ordinamento delle alternative confrontate.

La Figura 11.6 illustra i risultati delle simulazioni per quanto riguarda i mezzi per la mobilità delle persone.

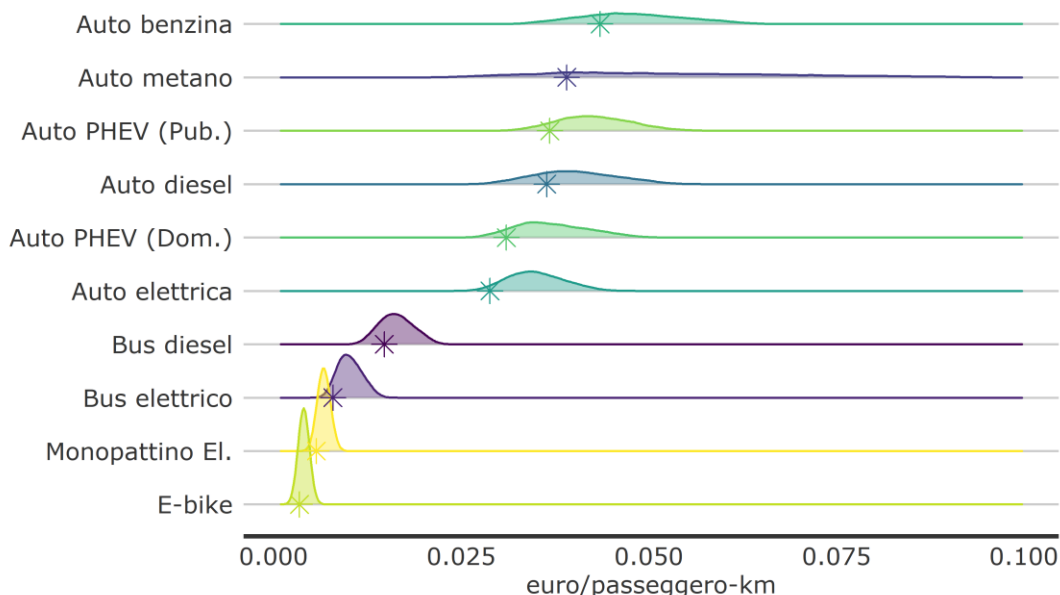


Figura 11.6 – Mezzi per la mobilità delle persone: analisi dell'incertezza con il metodo Monte Carlo.

I mezzi contraddistinti dalla variabilità maggiore dell'indicatore CLCC sono quelli a combustione interna, presumibilmente a causa della grande volatilità che contraddistingue le quotazioni di petrolio e gas naturale. I valori baseline, (asterischi di Figura 11.6) inoltre, sono in genere posizionati vicino alle code di sinistra delle varie di distribuzioni di probabilità, ad indicare come, stante la volatilità dei prezzi degli ultimi dieci anni, è piuttosto probabile che il valore dell'indicatore risulti più elevato di quello stimato nell'analisi di baseline.

La Figura 11.7 fornisce informazioni sulla robustezza dell'ordinamento delle alternative: i valori in ciascuna delle celle della matrice esprimono la probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per il mezzo sulle righe sia superiore a quello del mezzo indicato sulle colonne.

Auto benzina	100%	100%	100%	100%	98.9%	97.4%	100%	89%	42.3%	
Auto metano	100%	100%	100%	100%	93.5%	92.8%	76.4%	74.9%		57.7%
Auto PHEV (Pub.)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	78.3%		25.1%	11%
Auto diesel	100%	100%	100%	100%	84%	73.4%		21.7%	23.6%	0%
Auto PHEV (Dom.)	100%	100%	100%	100%	86.8%		26.6%	0%	7.2%	2.6%
Auto elettrica	100%	100%	100%	100%		13.2%	16%	0%	6.5%	1.1%
Bus diesel	100%	100%	100%		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Bus elettrico	100%	100%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Monopattino El.	100%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
E-bike		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	E-bike	Bus elettrico	Auto elettrica	Auto diesel	Auto metano					
	Monopattino El.	Bus diesel	Auto PHEV (Dom.)	Auto PHEV (Pub.)	Auto benzina					

Figura 11.7 – Probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per ciascuno dei mezzi considerato risulti inferiore/superiore a quello calcolato per gli altri mezzi.

Monopattino elettrico ed ebike risultano i mezzi con i valori dell'indicatore CLCC più bassi nel 100% degli scenari. Anche la classificazione dei bus, sia l'elettrico che il diesel, è molto robusta pur variando i prezzi delle materie prime: rimangono i mezzi con l'indicatore CLCC più basso (esclusi monopattino ed ebike) in tutti gli scenari. Nel caso delle autovetture, invece, il quadro è più eterogeneo e l'ordinamento appare meno robusto, al variare dei prezzi. Ad esempio, la probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per l'auto diesel risulti inferiore a quello dell'auto elettrica è superiore al 16%. L'auto a benzina e quella a metano sono quelle che tendono a essere caratterizzate dai valori più elevati dell'indicatore CLCC nella maggior parte degli scenari e la probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per questi mezzi sia più basso di quello di auto ibride ed elettriche è molto bassa. Infine, la probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per l'auto a benzina risulti inferiore a quello dell'auto a metano è superiore al 50%, un dato che sorprende in quanto il valore di baseline (calcolato coi prezzi medi del decennio 2013-2022) del veicolo a metano è più basso di quello del veicolo a benzina. La spiegazione di un risultato così apparentemente controintuitivo risiede, con tutta probabilità, nel fortissimo rialzo delle quotazioni del gas naturale avvenute nel 2022 a causa della guerra in Ucraina. Le quotazioni più bassa e più alta del decennio, infatti, vengono utilizzate come estremi minimo e massimo della distribuzione di probabilità triangolare dalla quale vengono generati i valori casuali delle quotazioni per la simulazione.

Di fatto, l'ordinamento delle varie tipologie di autovettura può risentire dell'andamento dei prezzi delle materie prime.

11.2 Mobilità delle merci

11.2.1 Environmental Footprint

Tabella 11.2 – Valori delle categorie di impatto per i veicoli analizzati.

	A	CC	HT-C	HT-NC	PM	POF	RU-F	RU-M
UM	mol H+ eq/km	kg CO ₂ eq/km	CTUh/km	CTUh/km	disease inc./km	kg NMVOC eq/km	MJ/km	kg Sb eq/km
Van diesel	9.38E-04	3.31E-01	1.88E-10	3.14E-09	1.13E-08	5.38E-04	4.46E+00	1.22E-06
Van elettrico	6.26E-04	1.17E-01	1.77E-10	3.74E-09	7.28E-09	3.00E-04	1.62E+00	4.96E-06
Van phev	8.62E-04	2.10E-01	1.89E-10	3.98E-09	1.01E-08	4.69E-04	2.88E+00	4.07E-06
Cargobike sco	4.90E-04	9.13E-02	6.60E-11	1.42E-09	6.32E-09	2.44E-04	1.06E+00	9.20E-07
Cargobike scB	5.17E-04	9.38E-02	7.02E-11	1.52E-09	6.50E-09	2.53E-04	1.09E+00	1.08E-06

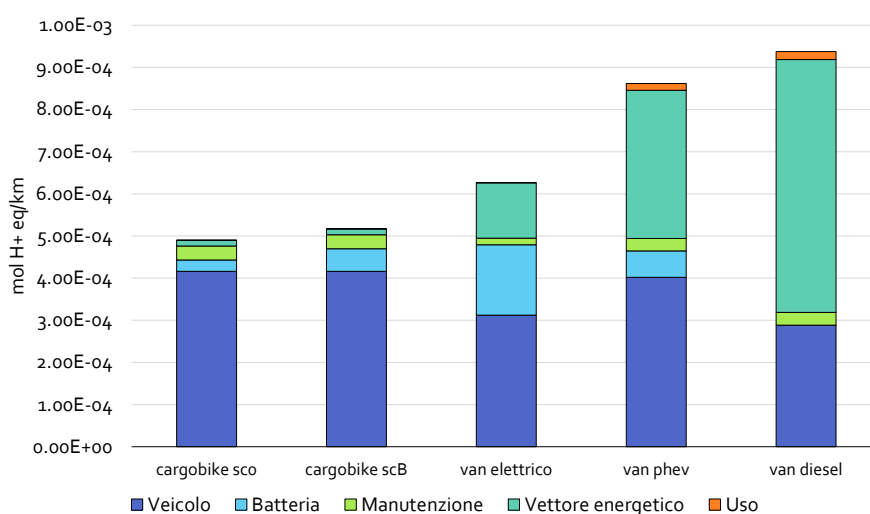


Figura 11.8 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Acidificazione (Acidification). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

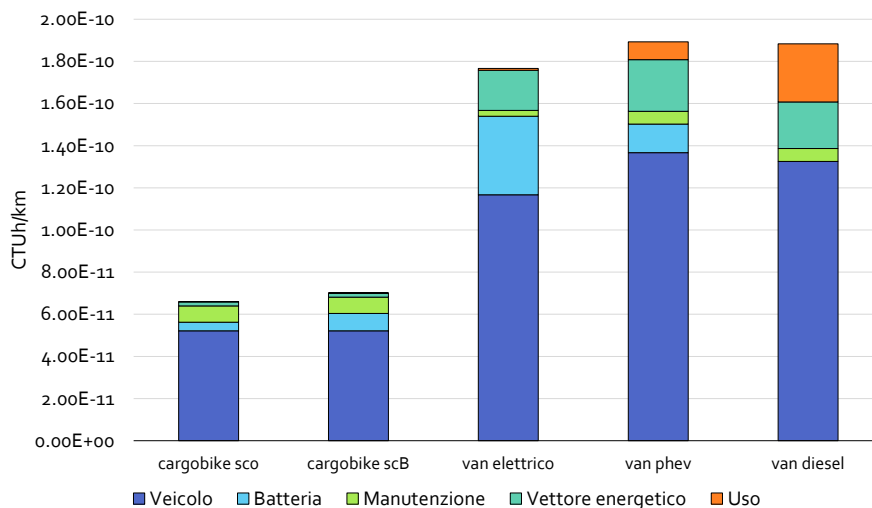


Figura 11.9 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Tossicità umana, effetti cancerogeni (Human Toxicity - Cancer). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

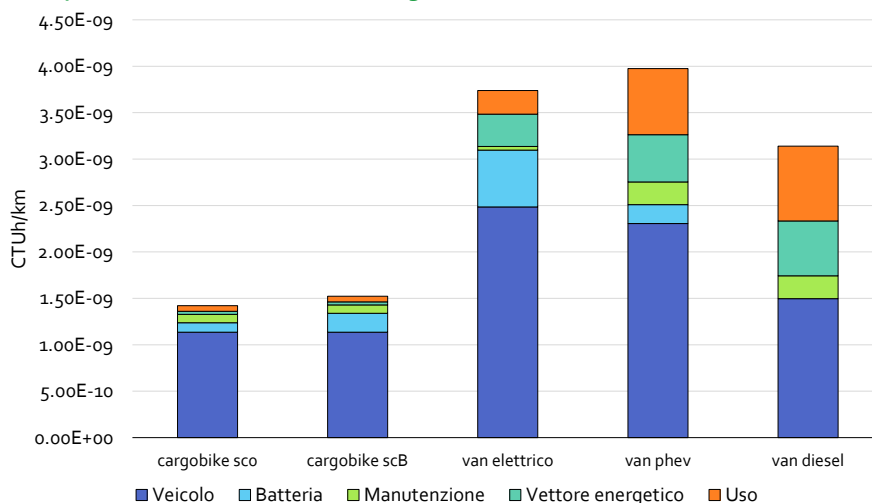


Figura 11.10 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Tossicità umana, effetti non cancerogeni (Human Toxicity - Non Cancer). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

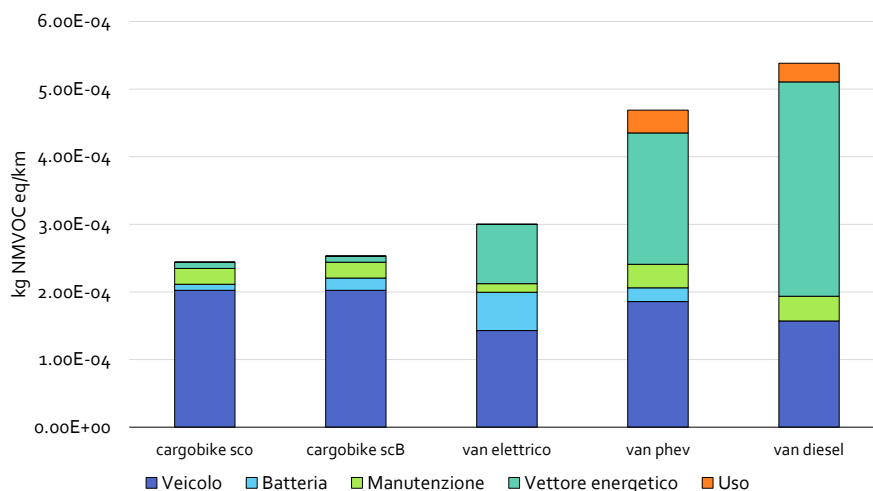


Figura 11.11 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Formazione di ozono fotochimico (Photochemical ozone formation). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

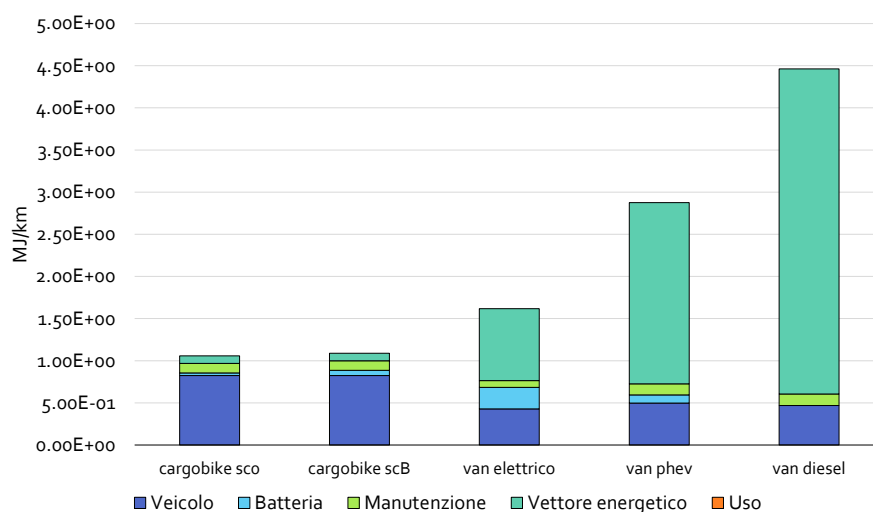


Figura 11.12 – Prestazioni dei mezzi analizzati rispetto alla categoria di impatto Uso di risorse energetiche (Resource use, fossils). Sono evidenziati i contributi per fase del ciclo di vita (veicolo=produzione e fine vita veicolo; batteria=produzione e fine vita batteria NMC; Manutenzione=manutenzione dei mezzi e smaltimento dei componenti sostituiti; Vettore energetico=approvvigionamento di energia elettrica e Diesel; Uso=emissioni *exhaust* e *non-exhaust*), con riferimento al chilometro percorso in una missione di consegna in area urbana.

11.2.2 CLCC e critica CLCC – Analisi dell'incertezza

L'analisi dell'incertezza effettuata con il metodo Monte Carlo è stata realizzata anche per i mezzi destinati alla consegna merci dell'ultimo miglio in area urbana (Figura 11.13).

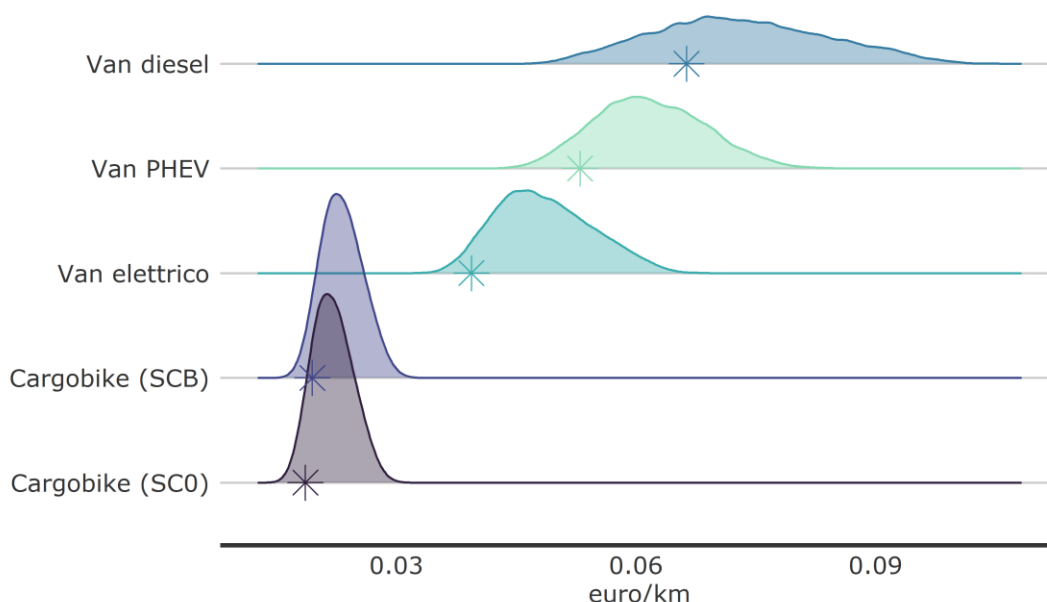


Figura 11.13 – Mezzi per la consegna delle merci: analisi dell'incertezza con il metodo Monte Carlo.

Dalla figura è possibile osservare come, nel caso dei van (specialmente il diesel) i valori tendano a essere molto più dispersi rispetto alle cargobike, indice del fatto che le materie prime che rientrano nel ciclo di vita dei van tendono a essere caratterizzate da prezzi relativamente più volatili. Come nel caso dei mezzi per la mobilità delle persone, la probabilità che l'indicatore, stante la volatilità dei prezzi, risulti inferiore al valore di *baseline* è molto bassa per la maggior parte delle alternative e comunque sempre inferiore al 30%.

La Figura 11.14 fornisce una misura della robustezza dell'ordinamento delle alternative confrontate, stante la volatilità dei prezzi. La figura mostra, infatti, la probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per ciascuno dei mezzi confrontati risulti superiore (o inferiore) a quello di tutti gli altri mezzi. La tabella va letta come segue: in ciascuna cella è riportata la probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per il mezzo situato sulle righe risulti superiore a quello situato sulle colonne. Le cargobike, date le ridotte dimensioni sono, in ogni caso, i mezzi contraddistinti dai valori dell'indicatore più bassi. L'ordinamento è molto stabile anche nel caso dei van, anche se esiste una piccola probabilità (circa 3.1%) che il CLCC di *baseline* del van PHEV risulti più elevato di quello del van diesel. Trascurabile, infine, la probabilità che il van elettrico risulti caratterizzato da un valore dell'indicatore CLCC più alto di quello del van diesel.

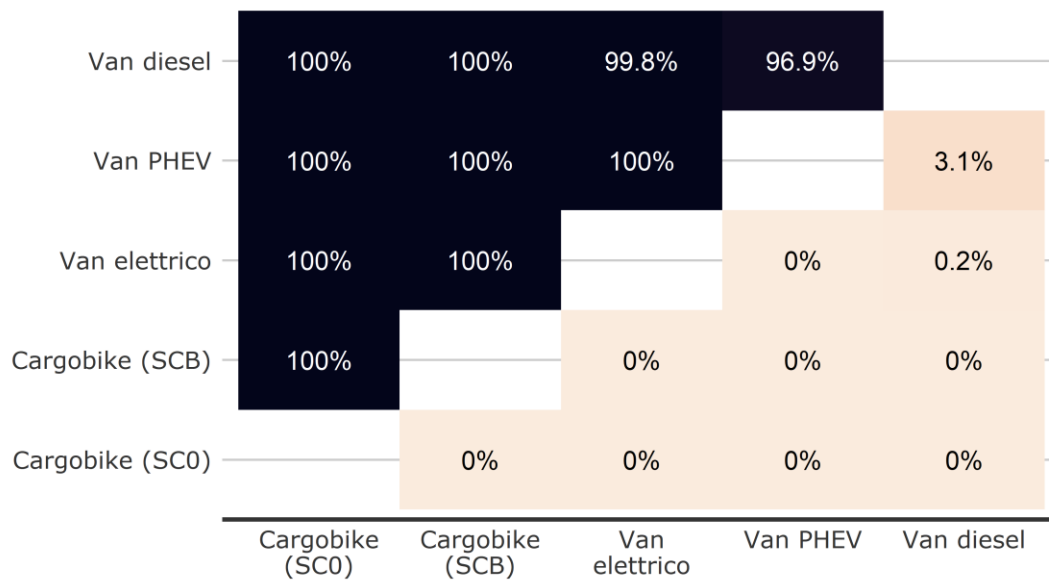


Figura 11.14 – Probabilità che l'indicatore CLCC calcolato per ciascuno dei mezzi considerato risulti inferiore/superiore a quello calcolato per gli altri mezzi.



12 - ACRONIMI

Acronimo	Descrizione
A	Acidification
AE	Accumulated Exceedance
BMS	Battery Management System
BOM	Bill Of Materials
CC	Climate Change
CLCC	Commodity Life Cycle Costing
CTUh	Comparative Toxic Unit for human
EEA	European Environment Agency
EF	Environmental Footprint
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EPD	Environmental product Declaration
GREET	The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model
GWP ₁₀₀	Global Warming Potential 100 years
HT-C	Human toxicity, cancer
HT-NC	Human toxicity, non-cancer
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MHDV	Medium Heavy Duty Vehicles
NMC ₇₁₂	Lithium Nickel Manganese Cobalt oxide $\text{LiNi}_{0.7}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.2}$
PM	Particulate matter
POF	Photochemical ozone formation
RU-F	Resource use, fossils
RU-M	Resource use, minerals and metals
RdS	Ricerca di Sistema
RSE	Ricerca Sistema Energetico
TPL	Trasporto Pubblico Locale