

LCA della fase di produzione delle batterie della micromobilità: un confronto tra l'uso di dati primari e dati secondari

Andrea Temporelli¹, Maria Leonor Carvalho de Castro¹, Maria Anna Cusenza¹, Elisabetta Brivio¹, Paola Cristina Brambilla¹, Pierpaolo Girardi¹

Abstract:

La micromobilità rappresenta un nuovo paradigma di mobilità per la movimentazione di merci e lo spostamento di persone. In letteratura sono disponibili numerosi studi che valutano gli impatti lungo l'intero ciclo di vita di questi veicoli, spesso utilizzando dati secondari. Da questi studi si evince che le batterie installate a bordo dei veicoli generano degli impatti non trascurabili, per questo motivo sarebbe necessario analizzare con maggiore dettaglio questi dispositivi per valutare gli effettivi impatti. Questo studio presenta una LCA di batterie di veicoli della micromobilità (cargobike ed eBike) utilizzando dati primari. Si è realizzato il Bill of Materials delle batterie smontando i dispositivi e catalogando tutti i componenti presenti al loro interno.

1. Introduzione

Negli ultimi anni l'utilizzo di veicoli elettrici leggeri per la movimentazione merci (cargobike) e lo spostamento di persone (eBike) è diventata una pratica sempre più diffusa.

Questo fenomeno, indicato con il termine di micromobilità, rappresenta un nuovo paradigma di mobilità caratterizzato da spostamenti brevi, generalmente in ambito urbano, mediante l'uso di veicoli meno ingombranti e pesanti rispetto a quelli utilizzati in questo contesto. La diffusione di questi mezzi dovrebbe condurre a una transizione dall'uso di veicoli a combustione interna verso una micromobilità elettrica che potrebbe essere più sostenibile.

Considerata la rapida crescita di questi mezzi elettrici è fondamentale valutare la reale sostenibilità di queste modalità di trasporto, in relazione alle alternative esistenti. In letteratura sono presenti diversi studi che valutano l'impatto di questo genere di veicoli lungo il loro intero ciclo di vita (de Bortoli, 2021; Felipe-Falgas et al., 2022; Marques and Coelho, 2022). La maggior parte dei lavori presenti in letteratura mostra come l'uso di veicoli della micromobilità generi meno impatti rispetto a veicoli ICE (Internal Combustion Engine) che forniscono il medesimo servizio. L'impatto delle batterie installate a bordo di questi veicoli elettrici non è trascurabile ma la maggior parte degli studi considera dati secondari di letteratura per modellare questi dispositivi, rischiando di sottostimare o sovrastimare i reali impatti.

Per questo motivo si è realizzato uno studio LCA di batterie installate a bordo di veicoli di micromobilità utilizzando dati primari: i sistemi di accumulo analizzati sono stati smontati e sono

¹ Ricerca Sistema Energetico – RSE SpA, Dip. Sviluppo Sostenibile Fonti Energetiche, Via Raffaele Rubattino 54, 20134, Milano, Italia
Corresponding author e-mail: andrea.temporelli@rse-web.it

stati catalogati tutti i componenti presenti all'interno, in modo da realizzare i Bill of Materials relativi.

Questo studio rappresenta il proseguimento di due attività presentate nelle passate edizioni del convegno annuale della Rete italiana LCA, in cui si sono valutate le prestazioni ambientali di cargobike (Temporelli et al., 2022) ed eBike (Brambilla et al., 2021) rispetto a veicoli convenzionali a combustione interna in grado di fornire il medesimo servizio.

Le batterie modellate con dati primari sono state confrontate con dataset di batterie di veicoli elettrici disponibili nella nuova versione di Ecoinvent 3.9.1. In questo modo si è valutato come sarebbero variati gli impatti nel caso in cui si fossero utilizzati dati secondari, invece che primari, per modellare le batterie.

2. Obiettivo

L'obiettivo dello studio è quello di confrontare gli impatti ambientali, legati alla fase di produzione, di batterie installate su veicoli della micromobilità (cargobike ed eBike). L'analisi è realizzata considerando tre diversi scenari, in funzione dei dati utilizzati per modellare le batterie: *Batteria 2023*, *Batteria 2024* e *Batteria Ecoinvent*.

Nei primi due scenari le batterie sono state modellate utilizzando dati primari, considerando il Bill of Materials ottenuto smontando i dispositivi di accumulo. Questi dati primari sono stati inseriti all'interno di dataset Ecoinvent 3.9.1, opportunamente modificati per adattarli al caso reale analizzato. Lo scenario *Batteria 2023* include dataset che fanno riferimento a dati di letteratura (Ellingsen et al., 2013; Majeau-Bettez et al., 2011) per modellare tutti i componenti presenti nelle celle. Lo scenario *Batteria 2024* è analogo allo scenario *Batterie 2023*, ma non considera più i dati di (Ellingsen et al., 2013; Majeau-Bettez et al., 2011) per alcuni componenti. Separatore, elettrolita e precursori per il materiale attivo catodico (solfato di manganese, solfato di cobalto, solfato di nichel) sono stati modellati facendo riferimento ai dati disponibili in Ecoinvent 3.9.1 opportunamente modificati per i casi specifici. Si è realizzata questa modifica perché i nuovi dataset disponibili, per i cinque componenti sopra riportati, erano più aggiornati rispetto a quelli considerati in precedenza.

Nello scenario *Batteria Ecoinvent* le batterie sono state modellate partendo dal dataset *Battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic {CN}| battery production, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic* presente nella versione Ecoinvent 3.9.1.

Questo dataset, che rappresenta il proxy più adeguato all'analisi, è stato modificato in funzione della massa e della capacità energetica delle batterie della cargobike e della eBike.

Per quanto riguarda l'unità funzionale adottata, dato che i confronti sono realizzati per la stessa batteria ma modificando i dati di input, si è considerata la massa dei due sistemi di accumulo: 3,260 kg per la batteria della cargobike e 2,985 kg per la batteria della eBike.

Si è fatto riferimento all'approccio Cradle to Gate considerando tutti gli impatti connessi alla fase di produzione delle batterie: estrazione e lavorazione delle materie prime, produzione dei componenti delle batterie, fase di produzione dei sistemi di accumulo.

La valutazione degli impatti ambientali è effettuata selezionando gli indicatori midpoint e i relativi modelli di caratterizzazione proposti dal metodo Environmental Footprint Impact Assessment Method (EF Method) (Zampori & Pant, 2019; Fazio, et al., 2018). In base all'obiettivo del presente studio e coerentemente con la letteratura esistente, tra le quattordici categorie proposte dal metodo si sono selezionate tre categorie sull'ambiente (Climate Change/Cambiamento climatico; Photochemical Ozone Formation/Formazione di ozono fotochimico; Acidification/Acidificazione), tre sulla salute umana (Particulate matter/Particolato; Human toxicity, non-cancer/Tossicità umana, non cancerogena; Human toxicity, cancer/Tossicità umana, cancerogena) e due sul consumo di risorse (Resource use, fossils/Uso delle risorse fossili; Resource Use, Mineral and Metals/Uso delle risorse, minerali e metalli).

3. Inventario

I sistemi di accumulo considerati nell'analisi sono batterie agli ioni di litio: per la cargobike una Greencell modello *EBIKE47STD* con capacità di 0,54 kWh; per la eBike una Bosch modello *Power Tube 500* con capacità pari a 0.50 kWh. Le batterie sono state smontate presso i laboratori di RSE al fine di determinare la geometria, la natura e il peso dei componenti, la composizione chimica di anodo e catodo.

La batteria *Greencell* ha un peso di 3259,6 g, di cui 2384,7 g sono dovuti a un unico pacco celle con all'interno 50 celle cilindriche; la batteria *Bosch* pesa 2985,4 g e al suo interno sono presenti quattro pacchi celle con 10 celle cilindriche ciascuno, per un totale di 2157,6 g. In entrambe le batterie, la massa dei due pacchi celle è superiore al 70% della massa totale del sistema di accumulo. In Figura 1 e Figura 2 si riportano alcune immagini dei pacchi celle e delle celle cilindriche durante le operazioni di disassemblaggio.

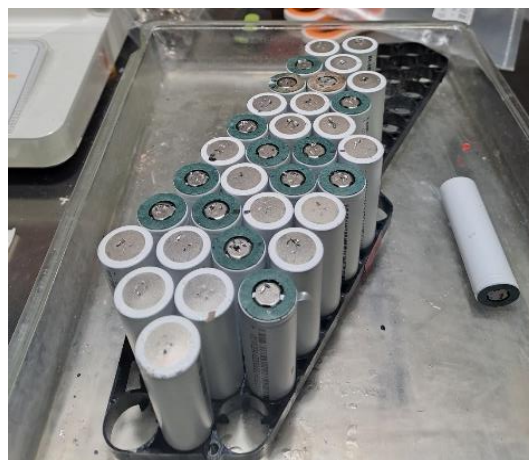
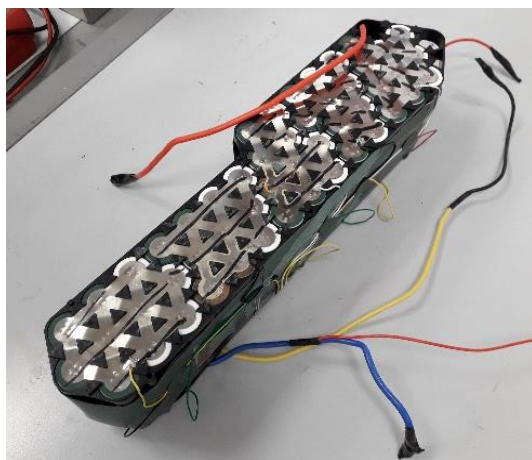


Figura 1. Pacco celle della batteria Greencell della cargobike



Figura 2. Pacco celle della batteria Bosch della eBike

In Figura 3 i grafici a torta mostrano la ripartizione percentuale delle masse dei materiali per le due batterie. Considerata l'elevata percentuale in peso ricoperta dal pacco celle, nel grafico sono riportati i contributi in massa di tutti i materiali della batteria ad esclusione delle celle. La voce *Altro* fa riferimento a tutti i componenti elettronici, quali schede elettroniche e cavi.

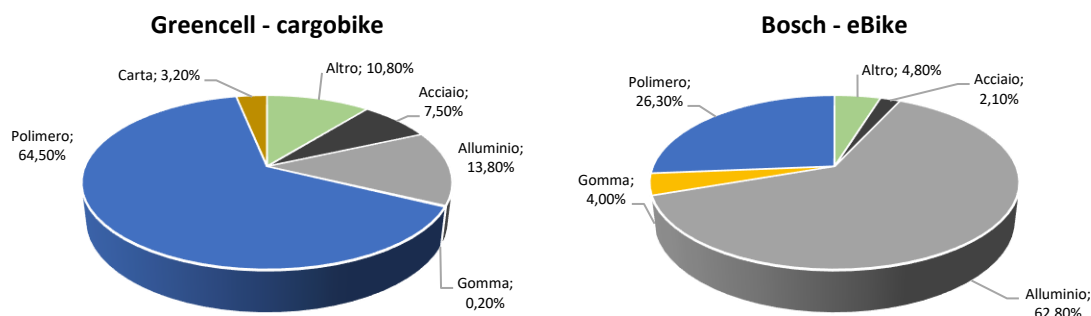


Figura 3. Natura dei materiali e percentuali in peso dei componenti delle batterie analizzate. Il grafico si riferisce a tutti i materiali delle batterie escludendo il pacco celle.

In riferimento alla composizione del catodo della cella *Greencell* (Tabella 1), la formulazione è stata ricavata grazie ad analisi chimica (microanalisi) con microscopio elettronico (SEM - Scanning Electron Microscope) e diffrazione a raggi X (XRD - X-ray diffraction). In questo modo è stato possibile ottenere informazioni circa la struttura dei materiali cristallini presenti. Le analisi hanno permesso di definire la composizione del catodo, che 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 della batteria *Bosch* è stato modellato consultando le informazioni presenti nella scheda tecnica del prodotto.

Parametro	Cella Greencell	Cella Bosch
Composizione anodo	Cu+grafite	Cu+grafite
Composizione catodo	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% $\text{Li}_{0.79}\text{Ni}_{1.01}\text{O}_2$	AlNCO

Tabella 1. Composizione chimica di anodo e catodo delle celle cilindriche presenti nelle batterie analizzate

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 letteratura (Ellingsen et al., 2013) mentre per il processo produttivo delle celle si è fatto riferimento alle informazioni contenute in (Carvalho et al., 2022).

4. Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati è stata realizzata inserendo i dati raccolti all'interno del software SimaPro 9.5.0.2.

In Tabella 2 e in Figura 4 sono riassunti i risultati ottenuti per la batteria Greencell nei tre diversi scenari in base ai dati di input.

Categoria d'impatto	U.M.	Batteria Ecoinvent	Batteria Greencell 2023	Batteria Greencell 2024
Climate change	kg CO ₂ eq	6,61E+01	6,62E+01	7,14E+01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	2,92E-01	3,47E-01	2,91E-01
Particulate matter	disease inc.	6,03E-06	5,15E-06	5,54E-06

Categoria d'impatto	U.M.	Batteria Ecoinvent	Batteria Greencell 2023	Batteria Greencell 2024
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6,40E-06	6,04E-06	6,84E-06
Human toxicity, cancer	CTUh	9,92E-08	9,72E-08	1,04E-07
Acidification	mol H ⁺ eq	7,77E-01	1,20E+00	7,75E-01
Resource use, fossils	MJ	8,27E+02	9,85E+02	8,65E+02
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	9,01E-03	6,81E-03	8,30E-03

Tabella 2. Risultati relativi ai tre diversi scenari, in base ai dati di input, per la modellazione della batteria Greencell installata sulla cargobike

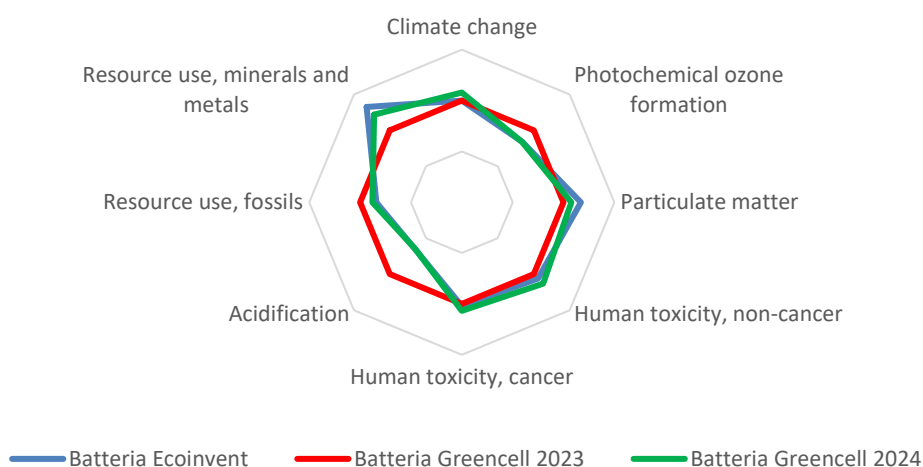


Figura 4. Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti per la modellazione della batteria Greencell installata sulla cargobike

I risultati ottenuti mostrano che, per le otto categorie di impatto considerate, nessuno dei tre scenari risulta migliore degli altri due.

Lo scenario *Batteria Greencell 2024* risulta essere quello con l'impatto maggiore per la categoria di impatto *Climate change* ($7,14\text{E}+01$ kg CO₂ eq) mentre gli altri due scenari sono allineati ($6,62\text{E}+01$ kg CO₂ eq *Batteria Greencell 2023* e $6,61\text{E}+01$ kg CO₂ eq *Batteria Ecoinvent*). Lo scenario *Batteria Greencell 2024* mostra i maggiori impatti anche per le categorie *Human toxicity, non-cancer* e *Human toxicity, cancer*; lo scenario *Batteria Greencell 2023* ha i maggiori impatti per le categorie di impatto *Photochemical ozone formation*, *Acidification*, *Resource use, fossils*; lo scenario *Batteria Ecoinvent* primeggia per impatti nelle categorie *Particulate matter* e *Resource use, minerals and metals*.

Per quest'ultima categoria si nota come il dataset con dati secondari *Batteria Ecoinvent* sovrastimi gli impatti rispetto agli scenari con dati primari ($9,01\text{E}-03$ kg Sb eq contro $8,30\text{E}-03$ kg Sb eq di *Batteria Greencell 2024* e $6,81\text{E}-03$ kg Sb eq di *Batteria Greencell 2023*).

In Tabella 3 e in Figura 5 sono riassunti i risultati ottenuti per la batteria Bosch nei tre diversi scenari in base ai dati di input.

Categoria d'impatto	U.M.	Batteria Ecoinvent	Batteria Bosch 2023	Batteria Bosch 2024
Climate change	kg CO ₂ eq	6,02E+01	6,59E+01	6,93E+01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	2,65E-01	3,44E-01	2,78E-01
Particulate matter	disease inc.	5,62E-06	5,05E-06	5,29E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6,23E-06	5,52E-06	6,24E-06
Human toxicity, cancer	CTUh	8,96E-08	9,17E-08	9,75E-08
Acidification	mol H ⁺ eq	7,37E-01	1,19E+00	7,24E-01
Resource use, fossils	MJ	7,70E+02	9,84E+02	8,26E+02
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	8,02E-03	6,86E-03	8,23E-03

Tabella 3. Risultati relativi ai tre diversi scenari, in base ai dati di input, per la modellazione della batteria Bosch installata sulla eBike

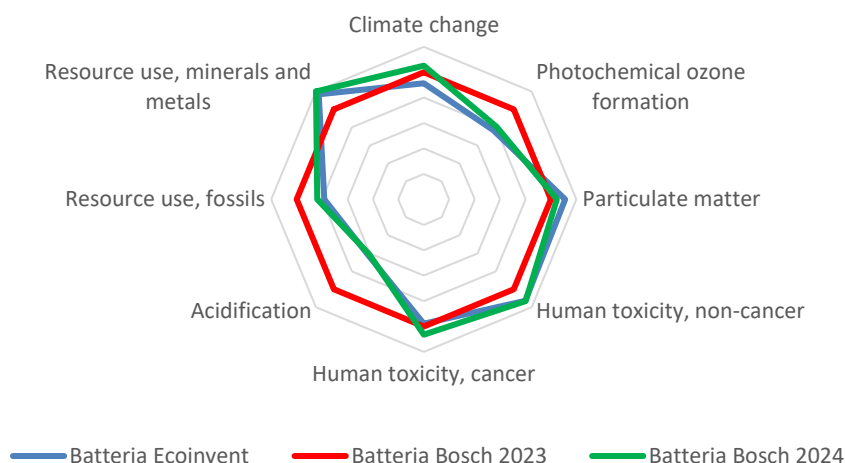


Figura 5. Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti per la modellazione della batteria Bosch installata sulla eBike

Anche per la batteria Bosch, i risultati ottenuti mostrano che, per le otto categorie di impatto considerate, nessuno dei tre scenari risulta migliore degli altri due.

Come per la Greencell, lo scenario *Batteria Bosch 2024* risulta essere quello con l'impatto maggiore per la categoria di impatto *Climate change* (6,93E+01 kg CO₂ eq) mentre gli altri due scenari sono meno impattanti (6,59E+01 kg CO₂ eq *Batteria Greencell 2023* e 6,02E+01 kg CO₂ eq *Batteria Ecoinvent*). Lo scenario *Batteria Greencell 2024* mostra i maggiori impatti anche per le categorie *Human toxicity, non-cancer*, *Human toxicity, cancer*, *Resource use, minerals and metals*; lo scenario *Batteria Greencell 2023* ha i maggiori impatti per le categorie di impatto *Photochemical ozone formation*, *Acidification*, *Resource use, fossils*; lo scenario *Batteria Ecoinvent* ha i maggiori impatti solo per la categoria *Particulate matter*.

A differenza della Greencell, lo scenario *Batteria Bosch 2023* sottostima gli impatti della categoria *Resource use, minerals and metals* (6,86E-03 kg Sb eq) che risultano essere maggiori per lo scenario *Batteria Bosch 2024* (8,23E-03 kg Sb eq). Invece, lo scenario *Batteria Ecoinvent* mostra un valore intermedio (8,02E-03 kg Sb eq).

5. Conclusioni

Lo studio ha permesso di valutare i potenziali impatti ambientali connessi alla fase di produzione di batterie installate su veicoli della micromobilità (cargobike ed eBike). Per le due tipologie di batterie analizzate si sono considerati tre diversi scenari in funzione dei dati utilizzati per modellare la fase di produzione dei sistemi di accumulo, considerando il software SimaPro 9.5.0.2: lo scenario *Batteria Greencell/Bosch 2023* e *Batteria Greencell/Bosch 2024* considerano dati primari, mentre lo scenario *Batteria Ecoinvent* considera dati secondari.

Per entrambe le batterie i risultati mostrano che, per le otto categorie di impatto considerate, nessuno dei tre scenari risulta migliore degli altri due.

L'utilizzo dei dati primari, ottenuti grazie allo smontaggio delle batterie e la definizione dei Bill of Materials, consente di modellare al meglio la fase di produzione delle batterie rendendola più aderente alla realtà. A seconda della categoria di impatto considerata, i dataset con i dati primari consentono di evitare di sovrastimare o sottostimare i potenziali impatti, rispetto all'uso del dataset presente in Ecoinvent e che fa riferimento a dati secondari.

Questo aspetto è assai più rilevante nel caso in cui, durante la vita utile di un veicolo, sia necessario procedere alla sostituzione della batteria prima della dismissione del mezzo su cui è installata. Infatti, in questo caso il peso degli impatti generati dalla batteria aumenta a seconda del numero di sostituzioni effettuate.

6. Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito del Piano Triennale 2022-2024 (DM MITE n. 337, 15.09.2022), in ottemperanza al DM 16 aprile 2018".

7. Bibliografia

- Brambilla, P.C., Temporelli, A., Brivio, E., Mela, G., Molocchi, A., 2021. Il contributo della micromobilità elettrica alla sostenibilità dei trasporti: un'analisi basata sul ciclo di vita. *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 21010644, Milano.
- Carvalho, M.L., Mela, G., Temporelli, A., Brivio, E., Girardi, P., 2022. Sodium-Ion Batteries with Ti1Al1TiC1.85 MXene as Negative Electrode: Life Cycle Assessment and Life Critical Resource Use Analysis. *Sustainability* 14, 5976. <https://doi.org/10.3390/su14105976>
- de Bortoli, A., 2021. Environmental performance of shared micromobility and personal alternatives using integrated modal LCA. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 93, 102743. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102743>
- Ellingsen, L., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A., Valøen, L., Strømman, A., 2013. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *J. Ind. Ecol.* 18. <https://doi.org/10.1111/jiec.12072>
- Felipe-Falgas, P., Madrid-Lopez, C., Marquet, O., 2022. Assessing Environmental Performance of Micromobility Using LCA and Self-Reported Modal Change: The Case of Shared E-Bikes, E-Scooters, and E-Mopeds in Barcelona. *Sustainability* 14, 4139. <https://doi.org/10.3390/su14074139>

- Majeau-Bettez, G., Hawkins, T.R., Strømman, A.H., 2011. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 45, 4548–4554. <https://doi.org/10.1021/es103607c>
- Marques, D.L., Coelho, M.C., 2022. A Literature Review of Emerging Research Needs for Micromobility—Integration through a Life Cycle Thinking Approach. *Future Transp.* 2, 135–164. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2010008>
- Temporelli, A., Brambilla, P.C., Brivio, E., Girardi, P., 2022. Last Mile Logistics Life Cycle Assessment: A Comparative Analysis from Diesel Van to E-Cargo Bike. *Energies* 15, 7817. <https://doi.org/10.3390/en15207817>