

LCA della micromobilità elettrica: monopattini elettrici e biciclette a pedalata assistita in sostituzione dell'auto privata per gli spostamenti casa-lavoro

Andrea Temporelli¹, Elisabetta Brivio¹, Paola Cristina Brambilla¹, Pierpaolo Girardi¹

Abstract: La micromobilità elettrica urbana può favorire il raggiungimento di obiettivi di decarbonizzazione, migliorare la qualità della vita e ridurre i problemi legati alla congestione. Dato il rapido diffondersi di monopattini elettrici e biciclette a pedalata assistita, sorge la necessità di effettuare una valutazione della reale sostenibilità di tali opzioni in relazione a modalità di trasporto tradizionali (auto private). Il presente studio ha l'obiettivo di valutare i possibili impatti ambientali della micromobilità urbana nell'ambito degli spostamenti casa-lavoro, secondo l'approccio del Life Cycle Assessment. Dall'analisi emerge come, in ambito urbano, i mezzi della micromobilità generino impatti minori rispetto all'uso delle auto private.

1. Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito a una sempre più intensa diffusione di veicoli elettrici leggeri per favorire gli spostamenti di persone: monopattini elettrici e biciclette a pedalata assistita. Questo fenomeno è indicato ormai comunemente con il termine di micromobilità, un nuovo modello di mobilità caratterizzato da spostamenti brevi in ambito urbano mediante l'utilizzo di mezzi di trasporto meno ingombranti e pesanti rispetto a quelli generalmente utilizzati in questo contesto. L'introduzione di questi mezzi di trasporto consente sempre più la transizione dall'uso di veicoli a combustione interna verso una mobilità elettrica sostenibile, che potrebbe avere un ruolo importante nel miglioramento della qualità della vita in aree urbane densamente abitate e congestionate. Considerata la rapida crescita di mezzi elettrici per la micromobilità dei passeggeri nelle città, è fondamentale valutare la reale sostenibilità di tali modalità di trasporto in relazione alle alternative esistenti. Nel presente lavoro si sono valutate le prestazioni ambientali e i potenziali impatti di monopattini elettrici (eScooter) e di biciclette a pedalata assistita (eBike), confrontandole con quelle di auto tradizionali (elettrica, ibrida plug-in, diesel, metano e benzina) secondo l'approccio del ciclo di vita (LCA-Life Cycle Assessment).

Punto di forza dello studio è l'utilizzo di dati primari per la modellizzazione di alcune fasi del ciclo di vita dei veicoli elettrici leggeri analizzati: si è definito il Bill of Materials dell'eBike e dell'eScooter, smontando e catalogando tutti i componenti dei due veicoli; si è realizzata una campagna sperimentale per monitorare la fase d'uso dei mezzi, rendendo questa fase e i relativi consumi dei veicoli il più possibile aderenti con la realtà.

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

2. Obiettivo

L'obiettivo dello studio è quello di valutare i potenziali impatti ambientali derivanti dall'utilizzo di eScooter ed eBike ad uso privato, in sostituzione ai mezzi convenzionali per coprire la distanza casa-lavoro.

L'unità funzionale adottata, sia per il monopattino che per la bici elettrica, è la distanza unitaria percorsa per la movimentazione di un passeggero (1 km per persona) ed è stata identificata a valle di un'analisi della letteratura disponibile (Coelho & Almeida, 2015; Cherry, 2007; Bonilla-Alicea, et al., 2020; Elliot, et al., 2018; Hollingsworth, et al., 2019; De Bortoli, 2021; Moreau, et al., 2020).

Per quanto riguarda le fasi e i processi da includere nell'analisi, si è fatto riferimento all'approccio Cradle to Grave considerando tutte le fasi del ciclo di vita: estrazione e lavorazione delle materie prime, produzione dei componenti e di eScooter ed eBike, fase di produzione delle batterie, fase d'uso con relativa manutenzione, fine vita dei mezzi e delle batterie.

Dall'analisi di letteratura effettuata, è emerso come eventuali processi di allocazione siano assenti o non specificati in tutti i lavori analizzati. Per questo motivo, anche in questo studio non si considerano processi di allocazione e come approccio generale si utilizza il metodo cut-off.

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 (Respiratory inorganics/Inalazione di particolato; Non Cancer Human Health Effects/Tossicità umana, non cancerogena; Cancer Human Health Effects/Tossicità umana, cancerogena) e due sul consumo di risorse (Resource Use, Energy Carries/Usò delle risorse, vettori energetici; Resource Use, Mineral and Metals/Usò delle risorse, minerali e metalli).

3. Inventario

Per realizzare uno studio il più aderente possibile alla realtà, si è svolta una campagna sperimentale con un monopattino elettrico e una bicicletta a pedalata assistita. I due veicoli sono stati utilizzati per coprire gli spostamenti giornalieri casa-lavoro di alcuni dipendenti di RSE che generalmente utilizzano l'auto a combustione interna per percorrere queste distanze.

Nei paragrafi che seguono si descrivono tutte le ipotesi adottate e i flussi di massa ed energia coinvolti nel ciclo di vita dei due veicoli. Le diverse fasi sono state modellizzate secondo il sistema di allocazione Cut-off e utilizzando il software SimaPro, che permette di modellizzare il sistema e di quantificarne le prestazioni ambientali.

3.1. Produzione

I dati utilizzati per modellizzare la fase di produzione sono stati acquisiti analizzando i veicoli in dotazione. Per quanto riguarda l'eScooter, si è smontato il veicolo catalogando ogni componente e realizzando il Bill of Materials: i pezzi sono stati pesati e si è identificata la natura dei materiali. Questa operazione è stata realizzata presso le officine di RSE. In questo modo si è modellizzata la fase di produzione del monopattino utilizzando dati primari. Per quanto riguarda il Paese di produzione dei singoli componenti, si sono considerate le informazioni relative a veicoli analoghi presenti sul mercato, con caratteristiche simili. In base alle informazioni raccolte, si è riscontrato che la maggior parte dei componenti risulta prodotta in Cina. La modellizzazione dei singoli componenti comprende le fasi di estrazione e lavorazione delle materie prime, i consumi e le specifiche relative al processo produttivo dei componenti considerati. Tali fasi sono state modellizzate con il supporto del database Ecoinvent v3 (Wernet, et al., 2016). Per quanto

riguarda i contributi in peso dei diversi materiali, l'alluminio rappresenta la percentuale più rilevante (44% del peso totale), seguito dai componenti multimateriale batteria e motore (rispettivamente il 20% e il 16% del peso totale del veicolo). Il restante 20% è ripartito tra i polimeri plastici (11%), l'acciaio (8%) e l'elettronica (1%).

Il fornitore della eBike ha realizzato una operazione analoga a quanto fatto per l'eScooter, smontando, pesando e catalogando tutti i componenti del mezzo presso la sua officina. Il processo produttivo prevede inizialmente l'approvvigionamento di tutti i componenti del mezzo, che sono prodotti prevalentemente all'estero (in particolare in Europa e Asia). Successivamente, si procede al loro assemblaggio con l'ausilio di automazioni caratterizzate da bassi consumi. Per tale motivo si è ritenuto ragionevole trascurare, in mancanza di informazioni più dettagliate, i consumi relativi all'assemblaggio dei componenti della eBike. Per ognuno dei componenti è stato fornito il peso, la natura dei materiali, la numerosità. Il Paese di provenienza dei componenti è stato stimato dal fornitore del veicolo. Inoltre, è stata fatta una ricerca sui siti online dei produttori di ogni componente, per verificare l'accuratezza delle informazioni condivise. La modellizzazione dei singoli componenti comprende le fasi di estrazione e lavorazione delle materie prime, i consumi e le specifiche relative al processo produttivo scelto. Tali fasi sono state modellizzate con il supporto del database Ecoinvent. Le informazioni direttamente fornite dal produttore hanno permesso di identificare il dataset più opportuno. Analizzando la natura e i quantitativi dei materiali coinvolti nella produzione dei singoli componenti, emerge che i metalli rappresentano una percentuale rilevante (26% acciaio e 40% alluminio) del peso totale del veicolo. I componenti in gomma, inclusa quella degli pneumatici, sono il 7% mentre i componenti multimateriali ed elettronici costituiscono il 21% del peso. Il restante 6% è associato a materiali plastici quali poliuretano, polietilene e nylon.

Per la modellizzazione delle batterie installate a bordo dei due veicoli, in mancanza di informazioni, si è utilizzato il modello di batteria NMC 532 pouch studiato nel progetto RdS 1.2 *Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti* descritto in (Carvalho, et al., 2021) e basato su dati primari ottenuti grazie ad una collaborazione con il produttore italiano FAAM. A partire dai dati di questo lavoro si è proceduto alla modifica del dataset in funzione delle specifiche tecniche (massa e capacità energetica della batteria in analisi) e delle percentuali in peso dei singoli componenti.

Per il motore dell'eScooter e della eBike, la modellizzazione è stata realizzata in accordo con le informazioni contenute nel dataset di Ecoinvent specifico per motori elettrici (*Electric motor, for electric scooter {GLO}| market for | Alloc Rec, U*). Il dataset, opportunamente modificato al fine di rappresentare i casi in esame, include sia le fasi di lavorazione della materia prima sia la produzione e il montaggio del motore stesso.

Infine, il display di entrambi i veicoli è stato modellizzato partendo da un database già presente in Ecoinvent, adattandolo al caso in esame (*Liquid crystal display, unmounted {GLO}| market for*) e considerando un adeguato processo di assemblaggio del componente (*Assembly of liquid crystal display, auxiliaries and energy use {GLO}| processing*).

3.2. Fase d'uso

Questa fase è stata modellizzata utilizzando i dati rilevati durante la sperimentazione in cui eScooter ed eBike sono stati guidati per coprire la distanza casa-lavoro. Il monitoraggio dei mezzi è stato possibile grazie all'installazione di un sistema GPS in grado di tracciare i tragitti, registrare le distanze percorse e fornire tutte le informazioni necessarie per lo studio.

Per il monitoraggio dei consumi in ricarica dei veicoli, è stato predisposto, presso la sede di RSE, un sistema di raccolta dati in grado di trasmettere quotidianamente i dati energetici misurati. Il dispositivo di monitoraggio è stato posizionato tra la batteria del veicolo e la presa elettrica, misurando l'energia erogata ai veicoli durante la fase di ricarica dei mezzi. Tutti i dati sono stati registrati e organizzati all'interno di un cloud accessibile online. I dati acquisiti sono stati opportunamente analizzati e le giornate anomale eliminate dal dataset al fine di ottenere una

giornata tipo. Dopo aver identificato la giornata tipo, si è stimato il numero di giorni in cui un generico dipendente è più propenso a recarsi al lavoro con l'eScooter o l'eBike. Per fare ciò, si sono considerate le serie storiche di precipitazione sulla città di Milano, riferite al periodo 2010-2020, ipotizzando che il dipendente preferisca utilizzare un altro mezzo in caso di pioggia nelle fasce orarie 6:00-10:00 e 16:00-19:00. Considerando una vita utile dei veicoli di 10 anni (valore desunto da giudizi di esperti nel settore), si è stimato in 1.730 il numero di giorni in cui il dipendente potrebbe coprire la distanza casa-lavoro con i due veicoli. Nel calcolo dei giorni in cui si ipotizza che il dipendente utilizzi il monopattino o la bicicletta, si è tenuto conto solo dei fenomeni piovosi, senza considerare le temperature percepite. In effetti, anche le giornate di freddo potrebbero scoraggiare l'utente all'uso dei due veicoli, ma si è ritenuto che questa ulteriore ipotesi fosse troppo stringente. Tale scelta permette di considerare sia i dipendenti che si recherebbero quotidianamente al lavoro in eScooter o eBike, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche avverse, sia i dipendenti la cui scelta è prevalentemente orientata verso l'uso dei veicoli elettrici leggeri solo in caso di condizioni meteorologiche favorevoli.

A causa della mancanza di informazioni adeguate, si è preferito trascurare le emissioni relative all'usura delle pastiglie dei freni e degli pneumatici e considerare, per la fase d'uso, esclusivamente il consumo energetico stimato durante il monitoraggio.

Per la modellizzazione dei consumi energetici in fase d'uso sono stati considerati due differenti mix di ricarica, definiti nell'ambito del progetto *Scenari energetici e supporto alla governance* (Carvalho, et al., 2021) (Carvalho, et al., 2022): Mix elettrico di produzione italiano al 2019, ricostruito secondo i dati statistici Eurostat (Eurostat, 2020) e TERNA (Terna, 2019); Mix elettrico italiano di produzione al 2030 secondo le indicazioni dello scenario di policy Green Deal, basato sul raggiungimento contemporaneo degli obiettivi 2030 (vincolanti per l'Italia) già previsti dal PNIEC e di un target emissivo derivante dal programma Green Deal europeo, che innalza l'obiettivo europeo dal -40% al -55% dei GHG rispetto ai livelli del 1990 (Gaeta, et al., 2020). L'obiettivo è quello di caratterizzare in termini LCA un mix elettrico di consumo variabile nel tempo, che tenga conto della progressiva decarbonizzazione del mix stesso. Quindi, la fase d'uso dei veicoli considera un vettore elettrico dato dalla media dei due mix al 2019 e al 2030 e rappresentativo di una decarbonizzazione lineare nel tempo del mix, dalla situazione attuale a quella al 2030.

3.3. Manutenzione

La fase di manutenzione di eScooter ed eBike considera tutti gli interventi di natura ordinaria o programmata durante la vita utile dei mezzi. Le informazioni per questa fase sono state reperite consultando siti online specialistici o sono state fornite da tecnici del settore. La manutenzione del monopattino prevede la sostituzione degli pneumatici, delle pastiglie dei freni e delle camere d'aria, in funzione del numero di chilometri percorsi. La manutenzione della bici, invece, prevede la sostituzione delle pastiglie dei freni, degli pneumatici, delle camere d'aria, della catena, dei pedali, della corona, del pignone e del mozzo.

3.4. Fine vita

Il fine vita prevede i processi di smaltimento dei componenti dei veicoli in esame e di quelli sostituiti durante i processi di manutenzione dei mezzi. Tale fase considera inizialmente la separazione e suddivisione di tutti i componenti, in funzione della natura dei materiali. Per la modellizzazione del fine vita si è fatto riferimento alle informazioni contenute nel Rapporto rifiuti speciali 2020 di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca, 2020) e a quelle derivanti dai siti dei consorzi dedicati al trattamento e smaltimento rifiuti. Si è ipotizzato un trattamento di incenerimento per i polimeri plastici e un recupero di materia per i metalli. Per la modellizzazione del fine vita del motore di entrambi i veicoli, in assenza di informazioni più dettagliate, si è fatto riferimento a quanto presente nel database Ecoinvent. Il dataset selezionato

è stato opportunamente modificato per adattarlo ai casi in esame. Il fine vita delle batterie è stato modellizzato, come nel caso della produzione, facendo riferimento a (Carvalho, et al., 2021).

4. Analisi dei risultati

Il presente paragrafo descrive i risultati della LCA comparativa, attraverso la stima dei potenziali impatti sull'ambiente e sulla salute umana generati dal consumo di risorse e dalle emissioni durante l'intera vita utile dei mezzi. Il confronto degli impatti ambientali potenziali tra i veicoli analizzati considera come unità funzionale dello studio 1 km per passeggero percorso. Poiché il modello LCA delle auto fa riferimento ad un fattore di riempimento medio, gli impatti potenziali risultanti sono stati riscaldati considerando un valore di 1,18 passeggeri per veicolo (ISFORT - Competenze e Risorse per la Mobilità, 2021). In Figura 1 sono riportati i risultati ottenuti per le categorie di impatto *Climate change* e *Particulate matter*.

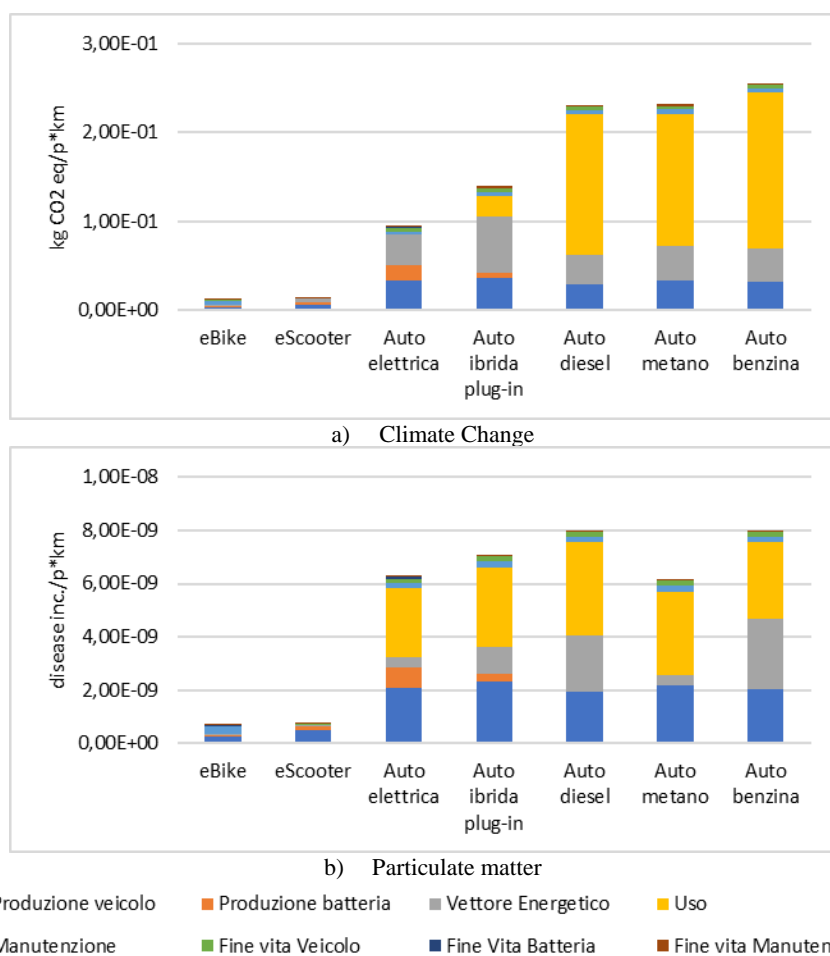


Figura 1. Confronto dei potenziali impatti ambientali per *Climate change* e *Particulate matter*.

Nella categoria di impatto *Climate Change*, le emissioni di eBike ed eScooter sono rispettivamente di 12 e 14 gCO₂eq/psg*km, contro i circa 96 e 139 gCO₂eq/psg*km dell'auto elettrica e dell'ibrida plug-in, le auto con le migliori prestazioni. Le auto diesel e metano presentano valori intermedi (rispettivamente 231 e 232 gCO₂eq/psg*km) mentre l'auto benzina genera i maggiori impatti (256 gCO₂eq/psg*km).

Considerando invece la categoria di impatto *Particulate matter*, i risultati mostrano ancora le migliori prestazioni per eBike ed eScooter (6,72E-10 e 7,26E-10 disease inc./p*km) con auto

elettrica e metano le meno impattanti tra le auto (6,29E-09 e 6,14E-09 disease inc./p*km) seguite da auto ibrida plug-in, diesel e benzina (7,08E-09, 7,94E-09 e 7,95E-09 disease inc./p*km).

Il grafico a radar di Figura 2 riassume gli impatti per tutte le categorie di impatto considerate nell'analisi. Nel grafico, per ciascuna categoria di impatto, il valore 100% è riferito al veicolo che presenta le prestazioni peggiori.

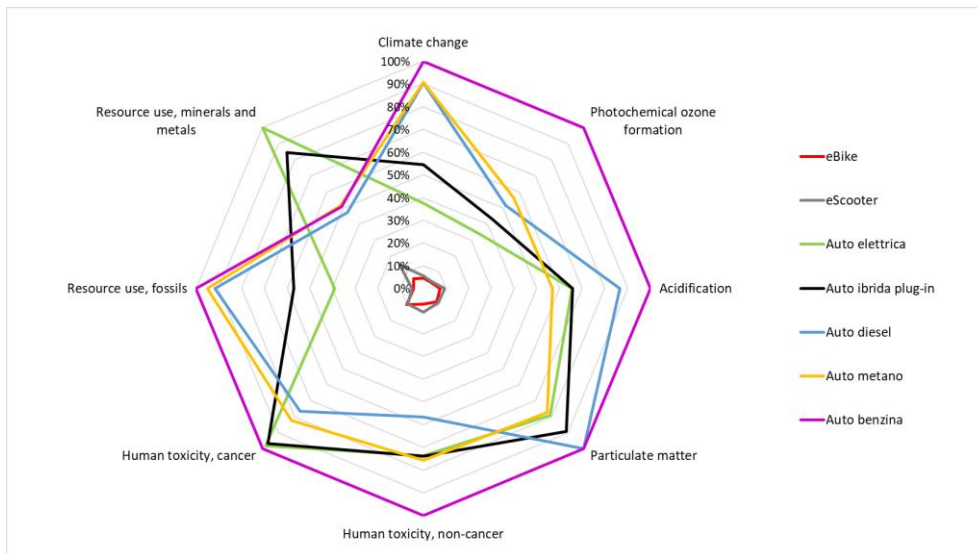


Figura 2. Impatti percentuali per i veicoli analizzati nello studio

Si nota come nella categoria di impatto *Resource use, minerals and metals* l'auto elettrica e la ibrida plug-in presentano gli impatti maggiori. Questo risultato è legato ai contributi delle fasi di produzione dei veicoli e delle batterie, nello specifico a causa della produzione del motore elettrico (principalmente inverter e unità di distribuzione dell'alimentazione elettrica) e ai minerali preziosi (ad esempio oro) contenuti nei componenti elettronici dei sistemi di accumulo.

In Figura 3, si riassumono i risultati ottenuti confrontando gli impatti di eBike ed eScooter.

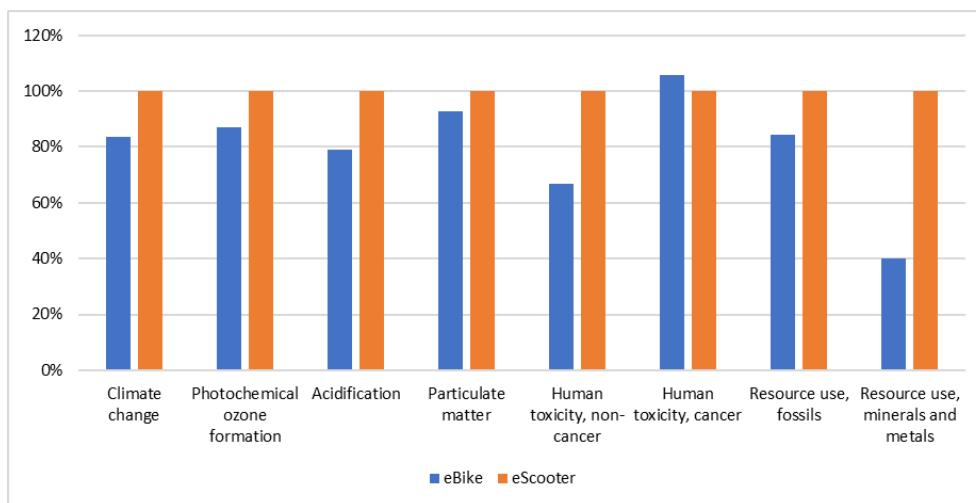


Figura 3. Confronto percentuale dei potenziali impatti ambientali generati da eBike ed eScooter. L'impatto dell'eScooter è stato fissato al 100%.

L'eScooter presenta le peggiori prestazioni ambientali in tutte le categorie di impatto analizzate, ad eccezione di *Human toxicity, cancer*. Focalizzandosi sulle singole fasi del ciclo di vita, emerge che gli oneri ambientali relativi alla fase di produzione siano, per tutte le categorie, maggiori nel monopattino rispetto alla bicicletta elettrica. Il risultato ottenuto è riconducibile al numero di chilometri percorsi dai due veicoli. Infatti, sebbene il monopattino sia caratterizzato da un peso pari a circa la metà del peso della bicicletta (14,3 kg l'eScooter e 29,7 kg la eBike), la distanza media giornaliera percorsa è nettamente inferiore, meno di un terzo della distanza percorsa dalla bicicletta (10,6 km l'eScooter e 34,6 km l'eBike). Poiché tutti gli impatti sono relativi all'unità funzionale di 1 km percorso per persona, ne consegue che la distanza percorsa dai mezzi durante l'intera vita utile influenzi molto i risultati finali.

Per quanto concerne il vettore energetico, ovvero gli impatti relativi all'energia elettrica consumata in fase d'uso, si evince che ancora una volta la bicicletta elettrica, grazie all'utilizzo congiunto del motore elettrico e della pedalata durante lo spostamento, garantisce un minor consumo, che si traduce in una riduzione degli impatti rispetto al monopattino elettrico.

Di particolare interesse si presenta il risultato ottenuto per la batteria dei due veicoli. Infatti, nonostante le masse delle due batterie siano simili (2,85 kg l'eScooter e 3,16 kg la eBike) la capacità energetica del sistema di accumulo del monopattino è inferiore a quella della bicicletta (0,36 kWh contro 0,50 kWh). Questo aspetto contribuisce a incidere negativamente sugli impatti della batteria del monopattino, che risultano superiori per tutte le categorie considerate.

Nella categoria *Human toxicity, cancer* è invece la eBike a presentare i maggiori impatti a causa dell'elevato contributo della fase di manutenzione (circa il 50% dell'impatto totale). Nella presente categoria, di particolare rilievo risultano le emissioni di arsenico, cromo e mercurio derivanti dai processi di lavorazione dell'acciaio presente nei componenti catena, pignone e pneumatici che devono essere sostituiti durante la vita della bicicletta.

5. Conclusioni

Lo studio ha consentito di analizzare, in un'ottica di ciclo di vita, la reale sostenibilità ambientale di mezzi elettrici per la micromobilità urbana, confrontandoli con auto tradizionali per la mobilità privata. Il caso studio ha riguardato la mobilità privata casa-lavoro in ambito urbano, con due campagne di monitoraggio che hanno consentito di raccogliere dati di consumi energetici reali dei due mezzi analizzati. Tali veicoli sono stati confrontati con cinque diverse motorizzazioni di automobili, prendendo in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita.

L'analisi degli impatti potenziali ha mostrato come eScooter ed eBike presentino le prestazioni migliori per tutte le categorie di impatto considerate. Tra i due, risulta migliore la eBike per tutte le categorie di impatto ad eccezione di *Human toxicity, cancer* a causa dei maggiori impatti derivanti dalla fase di manutenzione. Per quanto riguarda la categoria di impatto *Climate Change*, le emissioni di eBike ed eScooter ammontano rispettivamente 12 e 14 gCO₂eq/psg*km. Tra le auto, le motorizzazioni elettrica e ibrida plug-in, risultano essere le migliori (96 e 139 gCO₂eq/psg*km), seguite da motorizzazione diesel, metano e benzina (rispettivamente 231, 232 e 256 gCO₂eq/psg*km).

Questo risultato dimostra che l'utilizzo di veicoli per la micromobilità privata in sostituzione di auto possa contribuire all'obiettivo della decarbonizzazione delle città, poiché sostituendo ad esempio un'auto a benzina (la peggiore delle auto) con una eBike si otterrebbe una riduzione percentuale delle emissioni di gas climalteranti del 95%. Nel caso di sostituzione eBike – auto elettrica (la migliore delle auto), la riduzione percentuale sarebbe comunque molto elevata, di circa l'88%.

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

- Bonilla-Alicea, R. J. et al., 2020. Life cycle assessment to quantify the impact of technology improvements in bike-sharing systems. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), pp. 138-148.
- Brambilla, C. et al., 2021. *LCA della mobilità urbana dalle persone alle merci*, Milano: Ricerca di Sistema, RSE, n. 21010643.
- Brambilla, P. C., Temporelli, A. & Mela, G., 2019. *Analisi LCA di veicoli elettrici, ibridi plug-in e a combustione interna a fronte dell'evoluzione dei veicoli e del parco di generazione elettrico*, Milano: Ricerca di Sistema, RSE, n. 20000379.
- Carvalho, M. L., Marmiroli, B. & Girardi, P., 2022. Life cycle assessment of Italian electricity production and comparison with the European context. *Energy Reports*, Volume 8, pp. 561-568.
- Carvalho, M. L., Marmiroli, B., Mela, G. & Molocchi, A., 2021. *Elementi per l'integrazione della LCA di scenari energetici con la modellistica energetica e la valutazione monetaria delle esternalità*, Milano: Ricerca di Sistema, RSE, n. 21010395.
- Carvalho, M. L., Temporelli, A. & Girardi, P., 2021. Life cycle assessment of stationary storage systems within the Italian electric network. *Energies*, pp. 14(8), 2047.
- Cherry, C., 2007. *Electric bike use in China and their impacts on the environment, safety, mobility and accessibility*, s.l.: s.n.
- Coelho, M. C. & Almeida, D., 2015. Cycling mobility—a life cycle assessment based approach. *Transportation research procedia*, Volume 10, pp. 443-451.
- De Bortoli, A., 2021. Environmental performance of shared micromobility and personal alternative using integrated modal LCA. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 93, p. 102743.
- Elliot, T., McLaren, S. J. & Sims, R., 2018. Potential environmental impacts of electric bicycles replacing other transport modes in Wellington, New Zealand. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 16, pp. 227-236.
- Eurostat, 2020. *Energy balances June 2020 edition*, s.l.: s.n.
- Fazio, S. et al., 2018. *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods*, JRC109369: EUR 28888 EN, European Commission, Ispra.
- Gaeta, M., Nsangwe Businge, C., Gelmini, A. & Lanati, F., 2020. *Scenari di neutralità climatica a supporto della long term strategy*, Milano: RSE, protocollo 20010221.
- Hollingsworth, J., Copeland, B. & Johnson, J. X., 2019. Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters.. *Environmental Research Letters*, 14(8).
- ISFORT - Competenze e Risorse per la Mobilità, 2021. *18° Rapporto sulla mobilità degli italiani*, s.l.: s.n.
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca, 2020. *Rapporto rifiuti speciali*, s.l.: s.n.
- Moreau, H. et al., 2020. Dockless E-Scooter: A Green Solution for Mobility? Comparative Case Study between Dockless E-Scooter, Dispaced Transport, and Personal E-Scooters. *Sustainability*, 12(5), p. 1803.
- Terna, 2019. *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*, s.l.: s.n.
- Wernet, G. et al., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Ass.*, 21(9), p. 1218–1230.
- Zampori, L. & Pant, R., 2019. *Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF)*, s.l.: JRC Technical Reports.