

Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche

*Francesca Cappellaro francesca.cappellaro@enea.it, Paolo Masoni – ENEA, Bologna
Maurizio Cellura, Sonia Longo – Università di Palermo*

Riassunto

Lo sviluppo della trazione elettrica stradale, in particolare con l'uso di batterie al litio, è uno degli approcci più promettenti alle problematiche di carattere ambientale e per la diversificazione delle fonti di energia. Il lavoro descrive una delle attività svolta nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA sulla ricerca del sistema elettrico. In particolare l'ENEA e il Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo hanno condotto uno studio di LCA delle batterie per autotrazione per valutare le prestazioni energetico-ambientali di questi sistemi.

Summary

The electric mobility development, especially using the lithium-ion batteries for electric vehicles, is one of the most promising approach to solve the environmental issues and for the differentiation of the energy sources. The work describes one of the activities carried out in the context of the research of electric system under the national programme of the Italian Ministry of Economic Development and ENEA, Italian Agency for New Technology, Energy and Sustainable economic development. ENEA and Energy Department of University of Palermo realized an LCA study on the batteries with the aim to assess the energy and environmental performances of these systems.

1. Introduzione

Sulla mobilità elettrica, a livello internazionale, il dibattito scientifico è intenso e numerose sono le attività di ricerca in corso. Sono molteplici anche le potenziali aree di miglioramento delle prestazioni energetico-ambientali, alcune delle quali riguardano il peso del veicolo, la produzione della batteria, il mix energetico di generazione dell'energia elettrica impiegata per alimentare l'autotrazione, l'efficienza energetico-ambientale del sistema e anche i diversi stili di vita e di mobilità [1]. Con riguardo agli aspetti più propriamente ingegneristici, il ruolo della batteria elettrica è uno dei parametri significativi nel miglioramento dell'eco-profilo della "mobilità elettrica". Per tale ragione, studi sulle batterie elettriche incentrati su un approccio di ciclo di vita appaiono importanti, anche per evitare di spostare gli impatti ambientali da una fase all'altra del ciclo di vita della tecnologia indagata. L'ENEA e il Dipartimento dell'Energia dell'Università degli Studi di Palermo hanno condotto uno studio di Life Cycle Assessment (LCA) per valutare gli impatti energetico – ambientali connessi alle batterie di avviamento costituite da celle basate sulla tecnologia ferro-fosforo da impiegare nelle auto elettriche. La ricerca è stata svolta nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA che prevede diversi

studi ed applicazioni relativi al settore dei nuovi materiali e dei componenti innovativi per il sistema elettrico. Tra le attività previste dall'Accordo di Programma vi sono una ricerca dedicata allo sviluppo di metodologie di progettazione, realizzazione ed assemblaggio di materiali e strutture leggere e riciclabili; un'altra sul tema dei sistemi di accumulo elettrico (sviluppo di batterie modulari di piccola taglia e/o a ricarica rapida) e delle infrastrutture di ricarica; infine una linea di ricerca è rivolta al tema dell'azionamento (sviluppo di prototipi di veicoli e sistemi di trazione) ed è all'interno di quest'ultima che è stato realizzato lo studio di LCA delle batterie per autotrazione.

2. Relazione

2.1. Le batterie al Li-Ione

Le batterie al litio costituiscono un sistema complesso ed integrato di chimica, elettrochimica, ingegneria ed elettronica. Il sistema "batteria" è costituito dalle singole celle o moduli, dal sottosistema di gestione e controllo (BMS, Battery Management System) e dal sottosistema di condizionamento termico. L'uso di batterie al litio nei veicoli elettrici ed ibridi è uno degli approcci più promettenti per la soluzione dei problemi di carattere ambientale e per la diversificazione delle fonti di energia [1]. I costi attuali delle batterie al litio non consentono però una massiccia diffusione dei sistemi elettrici, per cui, vista anche l'assenza di produttori nazionali per le batterie avanzate, si è reso quindi necessario un ulteriore sforzo di ricerca e sviluppo mirato a creare le giuste condizioni per la penetrazione nel mercato nazionale. Un valido approccio per conseguire la diminuzione dei prezzi è rappresentato dall'adozione di elementi modulari standard, che consentirebbero ad un ipotetico operatore economico di poter soddisfare le esigenze delle varie applicazioni gestendo un medesimo prodotto e ciò si tradurrebbe in alti volumi di produzione, o acquisto, e quindi in un contenimento dei prezzi. La modularità, associata ad infrastrutture di ricarica rapida, permetterebbe anche di conseguire una riduzione del peso del pacco batterie e dell'intero veicolo, altro fattore limitante delle prestazioni dei mezzi in quanto peggiorativo dal punto di vista dei consumi in fase d'uso.

2.1.1 Aspetti energetico-ambientali delle batterie

La possibilità di riduzione dei consumi energetici, delle emissioni di gas serra e di altri impatti ambientali legati all'elettrificazione del trasporto sono dipendenti dai *pathway* di produzione e di utilizzo dell'energia elettrica, nonché dal ciclo di produzione di componenti innovativi come le batterie di nuova generazione. La realizzazione di veicoli a basso impatto ambientale con caratteristiche competitive in termini di prestazioni e sostenibilità, quest'ultima intesa come costi economici ed impatto ambientale, dipende quindi dai materiali, componenti, tecnologie e processi ad alto grado di innovazione, per i quali vi è la necessità di valutare gli impatti e i benefici ambientali in maniera scientificamente affidabile. Come dimostrano anche le recenti politiche europee su ambiente, energia, risorse e rifiuti [2,3,4,5,6], a cui si sono affiancate anche numerose iniziative private, la metodologia Life Cycle Assessment è diventata sempre più uno strumento necessario per valutare i potenziali impatti di prodotti industriali già in fase di progettazione, considerando tutte le fasi della loro vita, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento finale. Attraverso questa visione olistica e di sistema, l'LCA consente infatti di evitare lo spostamento dei carichi ambientali da uno stadio all'altro del ciclo di vita, ottenendo una valutazione complessiva delle prestazioni energetico-ambientali di processi, prodotti, sistemi e tecnologie.

2.1.2 Studi di LCA sulle batterie

A livello internazionale esistono studi di LCA sui combustibili per i veicoli elettrici, ma tra questi sono ancora pochi quelli che si focalizzano sugli impatti energetico-ambientali delle batterie [7,8]. I risultati sono presentati in forma altamente aggregata e senza riportarne gli inventari e ciò ne limita fortemente l'usabilità e la significatività fisica. Dagli studi, in particolare i più recenti [9, 10, 11, 12], risulta che la fase d'uso ha un significativo impatto sul ciclo di vita della batteria. In particolare, sebbene il litio (Li) sia presente nella crosta terrestre con una concentrazione inferiore a 0,01% e quindi si debba considerarlo un metallo a scarsa disponibilità, in una batteria a Li-Ione il contenuto di litio è molto piccolo (circa 0,7% – 1,4% in peso) e quindi è piccolo anche il suo impatto sulla categoria Abiotic Resource Depletion. Inoltre, essendo il processo di estrazione e raffinazione del litio non particolarmente energivoro, è minimo anche il suo contributo ad altre categorie di impatto correlate con il consumo energetico. Invece gli altri metalli presenti nella batteria e nel BMS e i relativi processi di produzione danno un contributo significativo agli impatti complessivi. Un aspetto ancora da approfondire riguarda infine il potenziale di risparmio di risorse derivanti dal riciclaggio delle batterie.

2.3 Caso studio di LCA delle batterie Li-Ione

Lo studio di Life Cycle Assessment delle batterie di avviamento per autotrazione di ultima generazione è stato realizzato dal Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo e da ENEA, in accordo alle norme della serie ISO 14040 [13,14] e all'International Reference Life Cycle Data System ILCD Handbook[15, 16, 17, 18], linee guida internazionali per redigere studi LCA. In conformità con lo standard internazionale ISO 14040 la realizzazione dello studio di LCA ha comportato la raccolta dei dati relativi a tutte le fasi del ciclo di vita, la valutazione degli impatti e l'interpretazione dei risultati.

2.3.1 Obiettivo dello studio e campo di applicazione

L'obiettivo dello studio è l'applicazione della metodologia LCA per la valutazione degli impatti energetico – ambientali connessi al ciclo di vita di tre tipologie di batterie di avviamento costituite da tre differenti tipologie di celle basate sulla tecnologia ferro-fosforo (LiFePO_4) del tipo HP-PW prodotte da un'azienda leader a livello mondiale. In particolare sono state selezionate le seguenti Unità Funzionali:

- UF_1 : N.1 batteria con celle al LiFePO_4 del tipo HP-PW-30AH;
- UF_2 : N.1 batteria con celle al LiFePO_4 del tipo HP-PW-60AH;
- UF_3 : N.1 batteria con celle al LiFePO_4 del tipo HP-PW-100AH.

Ogni unità funzionale è costituita dai seguenti componenti principali:

- N.4 celle del tipo HP-PW;
- Box di contenimento della batteria, in acciaio inox;
- Sistema di raffreddamento della batteria, in acciaio inox;
- Battery Management System, costituito da una scheda elettronica, un lettore di corrente e dai cavetti per le connessioni alle singole celle.

I confini del sistema includono (Figura 1):

- Produzione dei principali componenti della batteria;
- Uso della batteria;
- Manutenzione della batteria;
- Processo di trattamento alla fine della vita utile della batteria.

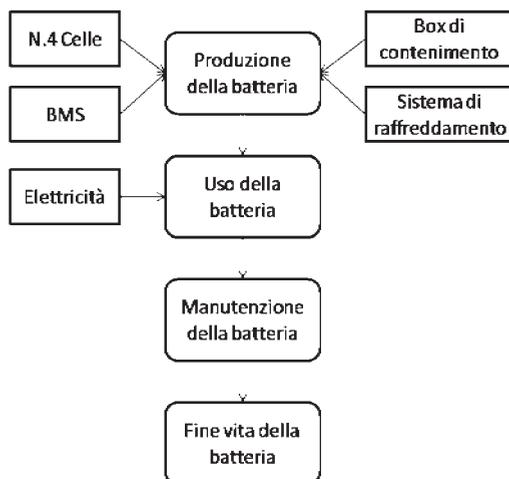


Fig. 1 – Confini del sistema della batteria.

A causa di carenza di dati rappresentativi, sono state escluse dall'analisi le seguenti fasi:

- Assemblaggio della cella;
- Trasporti delle materie prime dal luogo di produzione a quello di utilizzo;
- Trasporto della batteria dal luogo di assemblaggio a quello di utilizzo;
- Trasporto della batteria dal luogo di utilizzo all'impianto di trattamento/smaltimento;
- Consumo degli imballaggi, sia quelli utilizzati per l'approvvigionamento dei componenti necessari a realizzare la batteria, sia quelli impiegati per la batteria stessa.

2.3.2 Analisi d'inventario e valutazione degli impatti

Come indicato in precedenza la metodologia LCA è stata applicata a 3 differenti tipologie di batterie di avviamento al LiFePO_4 del tipo HP-PW. I dati dello studio sono stati forniti dall'azienda produttrice che però ha comunicato solo le informazioni relative ai materiali che costituiscono la cella e al loro peso percentuale sul totale. Per gli altri dati si è fatto riferimento a stime (materiali e relative masse del box batteria e consumo di energia in fase d'uso) e a dati di letteratura (Battery Management System, sistema di raffreddamento, impatti connessi al fine vita, eco-profilo di materiali ed energia). Gli indici energetico-ambientali selezionati per sintetizzare i dati di inventario e per stimare gli impatti connessi al ciclo di vita delle batterie in esame sono stati:

- Consumo di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile;
- Potenziale del riscaldamento globale (Global Warming Potential – GWP);
- Distruzione dello strato di ozono (Ozone Depletion Potential – ODP);
- Formazione di ossidanti fotochimici (Photochemical Ozone Creation Potenzial – POCP);
- Eutrofizzazione potenziale (Eutrophication Potential – EP);
- Acidificazione potenziale (Acidification Potential – AP).

I dati relativi al ciclo di vita del sistema in esame, una volta raccolti, sono stati implementati nel software LCA SimaPro7, utilizzando come metodi di valutazione degli impatti il Cumulative Energy Demand (CED) per la stima del consumo di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile e l'EDP 2008 per gli altri impatti ambientali.

I risultati sono illustrati in Tabella 1 e 2.

	UF ₁	UF ₂	UF ₃
GWP (kgCO ₂ _{eq})	166,8	297,2	486,5
POCP (kg C ₂ H ₄ _{eq})	0,10	0,17	0,28
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,4E-03	4,3E-03	7,2E-03
AP (kg SO ₂ _{eq})	1,01	1,79	2,94
EP (kg PO ₄ ³⁻ _{eq})	1,11	2,02	3,37

Tab. 1 – Valutazione degli impatti ambientali (EDP, 2008).

	UF ₁	UF ₂	UF ₃
Consumo di energia primaria totale (MJ)	2575,13	4669,08	7647,94 MJ
Consumo di energia primaria per la fase di produzione (MJ)	1070,40	1643,30	2525,14
Consumo di energia primaria per la fase d'uso (MJ)	1449,60	2927,90	4959,60
Consumo di energia primaria per la fase di fine vita (MJ)	55,20	97,90	163,20

Tab. 2 – Consumo di energia primaria (CED).

3. Conclusioni

Lo studio di LCA ha permesso di stimare le prestazioni energetico- ambientali connesse al ciclo di vita di batterie di avviamento basate sulla tecnologia ferro-fosforo da impiegare nelle auto elettriche. Relativamente al consumo di energia primaria i risultati ottenuti hanno evidenziato che la fase d'uso delle batterie è responsabile dei maggiori impatti energetico-ambientali (dal 56 al 65%) durante l'intero ciclo di vita. Trascurabile risulta invece la fase di fine vita, i cui impatti sono pari circa al 2% del totale. La fase di produzione incide sul totale degli impatti energetico-ambientali per una percentuale variabile dal 35 al 44%. I parametri che maggiormente influenzano l'eco-profilo della batteria sono la vita utile, le dimensioni, il processo produttivo, i materiali impiegati per la produzione, oltre che il mix energetico impiegato per alimentare la batteria, nel caso in specie si è ipotizzato che la batteria utilizzi energia elettrica prodotta considerando il mix energetico europeo. Occorre sottolineare che nel corso dello studio di LCA si sono riscontrate alcune limitazioni causate dalla scarsa disponibilità di dati primari, ossia dei dati ottenuti dai produttori che hanno fornito solo alcune informazioni relative ai materiali e ai componenti delle celle, che rappresentano l'elemento fondamentale della batteria. Ulteriori sviluppi della ricerca potrebbero consistere nell'utilizzare l'analisi di LCA per valutare le prestazioni energetico-ambientali di altri componenti e materiali innovativi sviluppati nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA, come ad esempio i moduli integrati completi di BMS, i sistemi di ricarica rapida, i materiali metallici cellulari, i materiali cellulari ibridi polimero metallo, i materiali compositi a base di fibre naturali e le schiume metalliche ad Aluminum Foam Sandwich AFS. La LCA può infatti costituire un valido strumento di supporto per valutare le potenzialità dei componenti e dei materiali innovativi al fine di ridurre l'impatto ambientale complessivo di un veicolo.

Bibliografia

- [1] **Frischknecht R., Flury K.**, “Life cycle assessment of electric mobility: answers and challenges”, Zurich, April 6, 2011, *Int J Life Cycle Assess* (2011) 16:691–695 DOI 10.1007/s11367-011-0306-6;
- [2] **COM (2005) 666, 2005**, “Portare avanti l'utilizzo sostenibile delle risorse – Una strategia tematica sulla prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti”;
- [3] **COM(2003) 302, 2003**, “Politica integrata dei prodotti – sviluppare il concetto di ciclo di vita dei ambientale. Comunicazione sulla IPP”;
- [4] **COM(2004) 38 , 2004**, “Incentivare le tecnologie per lo sviluppo sostenibile: piano d'azione per le tecnologie ambientali nell'Unione europea” ETAP (Environmental Technologies Action Plan);
- [5] **COM(2008) 397, 2008**, “Piano di azione per la produzione e il consumo sostenibile e Politica industriale sostenibile”;
- [6] **EUP Dir (2005)** “Direttiva quadro 2005/32/CE– (EuP) Definizione di specifiche per l'eco-design e per la certificazione di prodotti con elevati consumi energetici.”
- [7] **Hawkins, T. R.; Gausen, O. M.; Strømman, A. H.** “Environmental Impacts of Hybrid and Electric Vehicles: A Critical Review”. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2011 in review;
- [8] **Delogu M., Berzi L.** “Metodologie ed applicazioni di LCA al settore automobilistico”. In (a cura di) Cappellaro F. e Scalbi S. “La Rete Italiana LCA: prospettive e sviluppi del Life Cycle Assessment in Italia”. 2011;
- [9] **Majeau-Bettez G., Hawkins T.R., Stromman A.H.**, “Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hibryd and battery electric vehicles”, *Environmental Science & Technology*, doi: 10.1021/ es 103607 c , April 20, 2011, available on: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es103607c>;
- [10] **Matheys J., Van Mierlo J., Timmermans J.M.**, “Life-cycle assessment of batteries in the context of the EU Directive on end-of-life vehicles”, *Int. J. Vehicle Design*, Vol.46 No., 2008, 189-203;
- [11] **Van den Bossche P, Vergels F, Van Mierlo J, Matheys J, Van Autenboer W.**, “SUBAT: an assessment of sustainable battery technology”, *Journal of Power sources* 162 (2006) 913-919;
- [12] **Zackrisson M., Avellàn L., Orlenius J.**, “Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues”, *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 1519-1529;
- [13] **ISO (UNI EN) 14040**, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, ISO 14040:2006(E), International Organization for Standardization, 2006, Geneve, Switzerland;
- [14] **ISO (UNI EN) 14044**, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, ISO 14040:2006(E), International Organization for Standardization, 2006, Geneve, Switzerland;
- [15] **JRC-IES** European Commission Ispra, Italy. (2010) “ILCD Handbook: General guide for life cycle assessment – provisions and action steps.” <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-PROVISIONS-online-12March2010.pdf>;
- [16] **JRC-IES** European Commission Ispra, Italy. (2010) “ILCD Handbook: Reviewer qualification for Life Cycle Inventory data sets.” <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-PROVISIONS-online-12March2010.pdf>;
- [17] **JRC-IES** European Commission Ispra, Italy. (2010) “ILCD Handbook: Specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets.” <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-Specific-guide-for-LCI-online-12March2010.pdf>;
- [18] **JRC-IES** European Commission Ispra, Italy. (2010) “ILCD Handbook: Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment (LCIA) models and indicators” <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-requirements-online-12March2010.pdf>.