



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazioni di ciclo di vita di batterie al litio

L. Cutaia, G. Barberio, R. Luciani, D. De Angelis

RAPPORTO SU VALUTAZIONI DI CICLO DI VITA DI BATTERIE AL LITIO

L. Cutaia, G. Barberio, R. Luciani, D. De Angelis (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

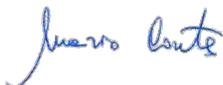
Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Studio ed analisi del recupero di materiali da batterie a fine vita

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
2 LA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA (LCA).....	6
2.1 DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI E DEL CAMPO DI APPLICAZIONE.....	8
2.2 ANALISI D'INVENTARIO.....	8
2.3 ANALISI DEGLI IMPATTI.....	8
2.3.1 <i>Classificazione</i>	9
2.3.2 <i>Caratterizzazione</i>	9
2.3.3 <i>Normalizzazione</i>	10
2.3.4 <i>Ponderazione</i>	10
2.3.5 <i>Metodo IMPACT 2002+</i>	10
2.4 INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO.....	13
3 BATTERIE AGLI IONI LITIO: CARATTERISTICHE GENERALI.....	13
4 IL LITIO NELLA STRATEGIA EUROPEA SUI RAW MATERIALS.....	15
5 STUDI LCA DI BATTERIE AL LITIO.....	17
5.1 INTRODUZIONE.....	17
5.2 LO STUDIO RDS/2011/70: APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA LIFE CYCLE ASSESSMENT PER LA VALUTAZIONE ENERGETICO AMBIENTALE DI BATTERIE PER AUTOTRAZIONE.....	17
5.3 LO STUDIO RDS/2012/93: LIFE CYCLE ASSESSMENT DI SISTEMI PER LE AUTO ELETTRICHE.....	18
5.4 LO STUDIO EPA “APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT TO NANOSCALE TECHNOLOGY: LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES”.....	20
5.5 LO STUDIO BIO “COMPARATIVE LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF NICKELCADMIUM (NiCd) BATTERIES USED IN CORDLESS POWER TOOLS (CPTs) vs. THEIR ALTERNATIVES NICKEL-METAL HYDRIDE (NiMH) AND LITHIUM-ION (LI-ION) BATTERIES” PER LA EC DG-ENV.....	25
6 VALUTAZIONE LCA DI BATTERIE AL LITIO.....	30
7 CONCLUSIONI.....	44
8 ALLEGATO: IL METODO RECIPE.....	46
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	46

Sommario

Il presente lavoro si inquadra nell'ambito dell'Accordo di programma Ministero dello sviluppo economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema elettrico. Il piano annuale di realizzazione 2013, parte 1, prevede al punto d. attività relative al recupero di materiali da batterie al litio a fine vita. La sottofase d.4. prevede la Valutazione del ciclo di vita (LCA) delle batterie al litio e degli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi idrometallurgici per il recupero di materiali con due deliverable rispettivamente sulla Valutazione di ciclo di vita di batterie al litio (cui il presente rapporto si riferisce) e sugli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi di tipo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie al litio a fine vita.

Nell'ambito della RdS sono stati già svolti nel recente passato due lavori collegati tra loro relativi alla valutazione di LCA di batterie:

- Cappellaro F., Masoni P., Buonamici R., "Applicazione della metodologia Life Cycle assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione", ENEA – MSE, RdS/2011/70
- Cellura M., Longo S. Orioli A., Panno D., "Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche", ENEA – MSE, RdS/2012/93

Lo studio "Applicazione della metodologia Life Cycle assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione" fornisce un primo inquadramento dell'applicazione della metodologia LCA al settore automotive ed in particolare alle batterie utilizzate da detto settore, con particolare riferimento batterie al litio del tipo con celle al LiFePO4.

Lo studio "Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche" ha riguardato:

1. la "Comparazione delle prestazioni energetico – ambientali della batteria Li-ione esaminata con quelle di altre batterie", relativa alla comparazione delle prestazioni energetico – ambientali della batteria Li-ione con quelle di altre batterie agli ioni di litio, i cui dati sono stati reperiti dall'analisi dello stato dell'arte internazionale.
2. l'"Analisi di sensibilità dei risultati della LCA", per valutare in che modo, cambiando le ipotesi iniziali riguardanti i dati sulla fase d'uso, i risultati subiscono delle variazioni, e di ottenere informazioni attendibili e rappresentative sull'eco-profilo della batteria Li-ione in esame.
3. la "Definizione di criteri di eco-design da applicare nella progettazione e realizzazione delle batterie Li-ione".

I risultati di questi due precedenti lavori sono riportati nel presente rapporto tecnico che include inoltre la più recente analisi della letteratura scientifica più aggiornata in materia:

- EPA, "Application of life cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles", 2013, EPA 744-R-12-001
- BIO, "Comparative Life-Cycle Assessment of nickelcadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries", December 2011, European Commission – DG ENV.

Le caratteristiche principali delle batterie al litio nonché le loro principali problematiche ambientali sono illustrate nel paragrafo 3, mentre il successivo riporta le principali conclusioni sul litio, come da aggiornamento del documento di valutazione della Strategia europea sui raw materials.

Infine si riporta una valutazione LCA finalizzata a valutare le prestazioni ambientali della produzione di una batteria agli ioni litio, condotta con il software SimaPro 8 e database Ecoinvent 3, tra i più recenti disponibili. Il metodo di valutazione degli impatti utilizzato è IMPACT 2002+ e lo studio è stato condotto per l'unità funzionale di 1 kg di batterie al Litio-ione. Il processo di DB considerato include: catodo, anodo e un separatore. Un elettrodo in alluminio è anche considerato. Le celle sono divise da un elettrolita (LiPF6 in etilencarbonato) in atmosfera inerte e provviste di imballo in polietilene. Dai risultati relativi alla prestazione ambientale, si può osservare che gli impatti associati alla produzione dell'anodo sono il 60% rispetto all'impatto totale, mentre il catodo contribuisce per circa il 24%.

La categoria di impatto verso la quale si manifesta il maggiore contributo di impatto è quella della salute umana.

Nella valutazione LCA sono mostrati gli impatti in fase di normalizzazione per categoria di impatto e di danno e per punteggio singolo (categorie di impatto e di danno), valutati secondo il metodo IMPACT 2002+

che consente di effettuare l'analisi midpoint (in 14 categorie di impatto) ed endpoint (in 4 categorie di danno) nonché una ulteriore valutazione effettuata con il metodo ReCiPe.

1 Introduzione

La metodologia LCA, Life cycle assessment – valutazione del ciclo di vita, regolata dalle norme della serie ISO 14040 e successivamente nell'International Life Cycle Data System Reference (ILCD), costituisce uno strumento ampiamente utilizzato a vari livelli, dalle policy alle strategie aziendali e di mercato, per valutare gli impatti ambientali legati al ciclo di vita di un prodotto o servizio. La metodologia infatti, con un approccio detto “dalla culla alla tomba” o anche meglio “dalla culla alla culla” (laddove le materie impiegate nel prodotto vengano reimpiegate in altri prodotti al termine della vita utile del prodotto di cui facevano parte) consente di visualizzare pienamente gli impatti di un prodotto/servizio, non limitandosi come spesso avveniva in passato, alla valutazione degli impatti generati esclusivamente in fase di produzione. La LCA valuta invece gli impatti complessivamente prodotti, dall'estrazione delle materie prime, dai trasporti, dalle varie trasformazioni intermedie subite dai materiali e componenti, dall'assemblaggio del prodotto e dalla sua distribuzione, dalla fase di uso del prodotto fino agli impatti generati dal suo fine vita. Nella fase di fine vita si possono generare, spesso, impatti negativi, ossia vantaggi ambientali derivanti dal recupero dei materiali. La LCA consente ad es. di osservare come gli impatti generati dalla fase di uso e di fine vita di un prodotto possano variare in funzione della variazione della fase di produzione (ad es. per la sostituzione di un materiale con un altro).

Tale metodologia di analisi è pertanto particolarmente adatta a valutare comparativamente gli impatti generati da due o più prodotti o servizi che abbiano la stessa funzione ma caratteristiche differenti, quali sono ad esempio batterie ricaricabili di varia tipologia.

Gli impatti generati da questi prodotti possono variare quindi non solo in fase di produzione, ma anche in fase di uso, per esempio al variare del mix elettrico della rete utilizzata per la ricarica, e in fase di fine vita (in funzione degli impatti generati dal trattamento di fine vita del prodotto e/o della sua dispersione nell'ambiente).

Il paragrafo 3 illustra brevemente le principali caratteristiche e problematiche ambientali delle batterie al litio, più ampiamente riportate nel rapporto tecnico d.4.2 (Rapporto sugli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi di tipo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie al litio a fine vita) mentre il paragrafo 4 riporta brevemente le principali risultanze sul litio come emerso dai più recenti sviluppi della strategia europea sui raw materials.

Il successivo paragrafo 5 riporta i risultati dei più recenti lavori di LCA sul tema delle batterie al litio di valenza nazionale (dalla Ricerca di Sistema Elettrico 2011 e 2012) ed internazionale (studio EPA del dicembre 2013 e studio BIO del 2011).

Uno specifico approfondimento LCA è stato svolto dall'Unità Tecnica Tecnologie Ambientali di ENEA (ENEA – UTTAMB) ed i suoi risultati principali sono esposti nel paragrafo 6. Tale approfondimento si è avvalso dell'ultima versione del DB Ecoinvent 3 del 2013 e del software SimaPro v.8.

2 La Valutazione del ciclo di vita (LCA)

LCA è l'acronimo di “Life Cycle Assessment”, ossia “Valutazione del Ciclo di Vita”. L'obiettivo di questo strumento a supporto delle decisioni è identificare e quantificare gli impatti generati da un prodotto o da un servizio lungo il suo ciclo di vita (produzione, uso, smaltimento) secondo l'approccio “dalla culla alla tomba” o, in ottica di economia circolare, “dalla culla, alla culla”.

La LCA può essere utilizzata a vari scopi:

- per confrontare alternative di prodotti o servizi analoghi, al fine di scegliere quello caratterizzato dal minor impatto ambientale;
- per individuare le fasi del Ciclo di Vita di un prodotto o servizio caratterizzate dal maggiore impatto ambientale e, conseguentemente, intervenire per ridurne gli impatti.

Nel 1993 la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) ha messo a punto delle linee guida (Code of Practice) ed ha definito la LCA come “quel *procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi ad un processo o ad un'attività, effettuato attraverso l'identificazione*

dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale" (SETAC, 1993).

Il processo di standardizzazione prosegue nel 1997 con la pubblicazione delle norme ISO 14040, appartenenti alla più generale serie ISO 14000 sulla gestione ambientale, recepita in Italia dall'Ente Nazionale di Unificazione UNI^a.

La procedura di LCA si compone di quattro fasi (in base alla norma ISO 14040):

1. *Definizione degli scopi e degli obiettivi* (Goal and Scope Definition): è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
2. *Analisi di Inventario* (Life Cycle Inventory Analysis, LCI): è la parte del lavoro dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività; lo scopo principale è quello di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell'energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto. Redigere un Inventario di ciclo vita significa pertanto costruire il modello analogico del sistema reale che si intende studiare.
3. *Analisi degli impatti* (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività, che ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell'Inventario. È questa la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di Inventario al giudizio di pericolosità ambientale.
4. *Interpretazione e Miglioramento* (Life Cycle Interpretation): è la parte conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA.

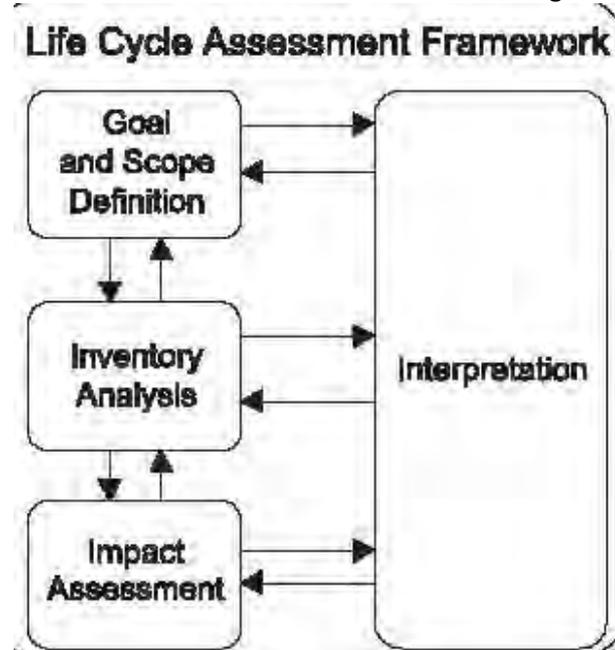


Figura 1: Fasi e applicazioni della LCA (ISO 14040, 2006)

Le citate norme ISO definiscono il LCA come una *compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema prodotto*. Questo quadro di riferimento, sebbene sia essenziale, lascia tuttavia una certa libertà su di una serie di scelte, che possono incidere sulla legittimità dei risultati. Per rispondere a queste esigenze e per armonizzare la metodologia è stato creato l'International Life Cycle Data System Reference (ILCD), che afferisce all'Istituto per l'Ambiente e la Sostenibilità, all'interno del Joint Research Centre della Commissione Europea. L'ILCD ha rilasciato il manuale ILCD (ILCD, 2010)^b: una serie di documenti tecnici che forniscono una guida, supportata

da modelli e strumenti, delle procedure raccomandate nella LCA. Vengono fornite ulteriori indicazioni su come condurre uno studio e sulle scelte da effettuare e in che priorità effettuarle in virtù dell'obiettivo dello studio stesso.

2.1 Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione

Nella prima fase della LCA si precisano le finalità dello studio: l'oggetto, i destinatari, le applicazioni e le motivazioni per cui si compie l'analisi. Da ciò ne consegue la definizione del sistema considerato, comprensivo dei confini geografici e temporali, dell'Unità Funzionale, l'individuazione dei dati e delle assunzioni necessarie.

Nella LCA viene definito "sistema" un qualsiasi insieme di dispositivi e/o operazioni, delimitato da appropriati confini fisici, che realizzano una o più precise funzioni; esso ha una serie di rapporti di scambio, caratterizzati da input e output, con il sistema ambiente.

Il sistema possiede un gran numero di operazioni collegate tra loro, anche in modo complesso, che producono flussi di materiale, di energia e di prodotti. Tali operazioni vengono in genere modellizzate tramite un *albero di processo* che racchiude tutti i processi rilevanti. Per ogni processo vengono raccolti tutti gli input e output rilevanti.

In linea generale, il ciclo di vita di un prodotto viene disaggregato nelle fasi di:

- acquisizione delle materie prime;
- produzione;
- trasporto / distribuzione;
- uso / riuso / manutenzione;
- gestione dei rifiuti.

Ad ogni fase sono legati input (energia e materie prime) e output (prodotti, effluenti liquidi, gassosi e altre emissioni).

Ai fini dell'analisi è necessario definire un'unità funzionale (ad esempio una certa quantità di prodotto) che serva da riferimento per tutti i flussi in entrata e in uscita rispetto al sistema e per i potenziali effetti ambientali. L'unità funzionale è di particolare importanza per il confronto di cicli di vita di prodotti diversi oltre che per esaminare nella maniera corretta il ciclo di vita di un prodotto o servizio.

2.2 Analisi d'inventario

La seconda fase della LCA comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita dal sistema. In questa fase si procede alla costruzione di un modello della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra il sistema e l'ambiente, da ciò ne deriva la grande importanza di questa fase per ottenere risultati aderenti alla realtà.

All'atto della raccolta i dati vengono organizzati in base alle diverse fasi che compongono il sistema studiato. La rappresentazione che ne deriva è dunque di tipo disaggregato, si può però pervenire ad una rappresentazione di tipo aggregato: In altre parole in ogni fase si possono dividere i parametri per categoria.

2.3 Analisi degli impatti

Le informazioni ottenute dall'Analisi d'Inventario costituiscono la base di partenza per le valutazioni di tipo ambientale, cui è dedicata la fase della LCA definita LCIA: Life Cycle Impact Assessment.

Tale norma definisce L'LCIA come la fase in una LCA finalizzata a capire e valutare l'importanza e la significatività dei potenziali impatti ambientali legati al sistema in modo da riassumerli e quantificarli.

Viene fatta una distinzione tra:

- *Elementi obbligatori*: Classificazione e Caratterizzazione;
- *Elementi opzionali*: Normalizzazione, Grouping and Ranking, Ponderazione (Weighting).

Sono stati sviluppati diversi metodi per l'analisi degli impatti.

2.3.1 Classificazione

Tramite la fase di "Classificazione", i flussi di materiale ed energia esaminati nell'Analisi d'Inventario vengono raggruppati nelle categorie ambientali che sono state fissate in precedenza, come ad esempio:

- Riscaldamento globale
- Riduzione dell'ozono presente nella stratosfera
- Formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera
- Eutrofizzazione
- Acidificazione
- Tossicità per la salute umana
- Ecotossicità
- Utilizzo del suolo
- Consumo delle risorse idriche

Tali categorie d'impatto differiscono per la scala alla quale manifestano il loro effetto nei confronti dell'ambiente. In particolare possono essere definiti:

- Impatti globali: quelli che interessano tutto il pianeta
- Impatti regionali: quelli che interessano una vasta area (dell'ordine del migliaio di chilometri) attorno al luogo in cui si è manifestato
- Impatti locali: quelli che interessano esclusivamente l'area circostante il punto d'impatto

2.3.2 Caratterizzazione

Nella fase di Caratterizzazione vengono quantificate le porzioni precedentemente assegnate: con l'aiuto di fattori di equivalenza, infatti i differenti contributi dei materiali vengono aggregati in un determinato effetto ambientale e rapportati ad un sostanza presa come riferimento.

I flussi registrati nell'analisi d'inventario vengono moltiplicati per i rispettivi fattori di equivalenza (EQ) e sommati tra loro. Il potenziale d'impatto così determinato rappresenta la misura di un possibile danno ambientale.

I valori dei differenti potenziali d'impatto non sono però direttamente confrontabili tra loro.

Tra gli indicatori si fa riferimento a due tipologie diverse: i *midpoints* e gli *endpoints*.

- La metodologia ECM 92 è un tipico esempio di metodo che usa *midpoints*: gli indicatori di categoria d'impatto sono scelti relativamente vicini ai risultati dell'inventario. Ad esempio, le categorie d'impatto del Riscaldamento Globale e dell'Assottigliamento dello Strato di Ozono sono basate su fattori di equivalenza dell'IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change: il GWP (Global Warming Potential) e l'ODP (Ozone Depletion Potential). La categoria d'impatto dell'Acidificazione è basata sul numero di protoni H⁺ che possono essere rilasciati per chilogrammo di sostanza emessa. Queste categorie d'impatto hanno unità piuttosto astratte. Per esempio, l'unità del Riscaldamento globale è "kg di CO₂ equivalente" e l'unità dell'Acidificazione è kg di SO₂ equivalente.
- Metodi come l'Eco-indicator 99 utilizzano *endpoints*. L'indicatore per il Cambiamento Climatico è espresso come Disability Adjusted Life Years (DALY), in italiano "Attesa di Vita Corretta per Disabilità", espressa come il numero di anni persi a causa della malattia, per disabilità o per morte prematura. L'indicatore di categoria d'impatto per l'Acidificazione è espressa come percentuale di biodiversità diminuita in un'area durante un certo periodo. Questi indicatori sono certo più difficili da calcolare: in questo modello devono essere fatte molte ipotesi, sono perciò più incerti. Tuttavia il loro significato è più facile da capire e valutare.

2.3.3 Normalizzazione

Secondo la norma, la Normalizzazione è una fase opzionale, è quindi una scelta di chi compie l'analisi.

I valori precedentemente ottenuti vengono normalizzati, cioè divisi per un valore di riferimento in modo da poter stabilire la magnitudo di ciascun effetto ambientale rispetto ad un valore di riferimento, rappresentato in genere dai dati medi su scala mondiale, regionale, europea, e riferiti ad un determinato intervallo di tempo.

Attraverso la normalizzazione, quindi, si può stabilire l'entità relativa di ciascun problema ambientale.

La procedura più comune di Normalizzazione è basata sulla determinazione degli indicatori di categoria d'impatto per una regione durante l'anno e questo risultato può eventualmente essere diviso per il numero di abitanti dell'area.

La normalizzazione serve a due scopi:

- Le categorie d'impatto che contribuiscono solo a una piccola quantità rispetto alle altre categorie d'impatto possono essere lasciate fuori dalle considerazioni, al fine di ridurre il numero di problematiche da dover valutare;
- I risultati normalizzati mostrano l'ordine di grandezza dei problemi ambientali generati dal ciclo di vita del prodotto, comparati ai carichi ambientali totali europei.

2.3.4 Ponderazione

La procedura di "pesatura" è la fase più controversa e difficile dell'analisi d'impatto del ciclo di vita. Con tale metodo ogni indicatore delle diverse categorie d'impatto viene moltiplicato da uno specifico fattore di ponderazione che riflette l'importanza relativa tra le diverse categorie.

2.3.5 Metodo IMPACT 2002+

Nello studio LCA, che si riporta nel paragrafo 5, la valutazione degli impatti ambientali è stata svolta utilizzando il metodo IMPACT2002+ (Joliet O et al, 2003)^c in quanto consente di valutare gli effetti in linea con l'obiettivo dello studio. IMPACT 2002+ combina 4 metodi: IMPACT 2002, Eco-indicator 99 (seconda versione, Egalitarian Factors), CML e IPCC. Vengono sviluppati nuovi concetti relativamente alla tossicità umana e l'ecotossicità che si basano su risposte medie piuttosto che su assunzioni conservative; le categorie di danno sono implementate per i carcinogeni e i non-carcinogeni grazie a miglioramento di stime di frazioni di intake e curve di dose-risposta.

Questo metodo propone un approccio di uso combinato di impatti midpoint e di valutazione del danno correlando tutti i flussi dell'inventario a 14 categorie di impatto (midpoint, ovvero con modellizzazione ristretta ai primi stadi nella catena causa-effetto) e 4 categorie di danno, come presentato nella Tabella 1.

Tabella 1: Categorie di impatto e di danno di IMPACT 2002+ e relative unità di misura

Midpoint category	Midpoint substance	reference	Damage category	Damage unit
Human toxicity (carcinogens + non carcinogens)	kg _{eq} chloethylene into air		Human Health	DALY
Respiratory inorganics	kg _{eq} PM2.5 into air			
Ionizing radiations	Bq _{eq} carbon-14 into air			
Ozone layer depletion	kg _{eq} CFC 11 into air			
Respiratory organics	kg _{eq} ethylene into air			

Aquatic ecotoxicity	kg _{eq} triethylene glycol into water	Ecosystem quality	PDF*m ² *yr
Terrestrial ecotoxicity	kg _{eq} triethylene glycol into water		
Terrestrial acidification/nitrification	kg _{eq} SO ₂ into air		
Aquatic acidification	kg _{eq} SO ₂ into air		Under development
Aquatic eutrophication	kg _{eq} PO ₄ ³⁻ into water		Under development
Land occupation	m ² _{eq} organic arable land*year		PDF*m ² *yr
Global warming	kg _{eq} CO ₂ into air	Climate change	kg _{eq} CO ₂
Non-renewable energy	MJ total primary non-renewable or kg _{eq} crude oil (860 kg/m ³)	Resources	MJ
Mineral extraction	MJ additional energy or kg _{eq} iron (in ore)		

Infine il risultato può essere espresso in termini di ecopunto complessivo finale. Come già descritto nel paragrafo della caratterizzazione, per tutte le categorie d'impatto si fa riferimento sostanzialmente ad una unità di misura che si esprime come "kg eq substances" ovvero la quantità di una sostanza di riferimento necessaria per eguagliare l'impatto di un certo inquinante. Inoltre, ciascuna categoria è poi inclusa nelle categorie di danno di salute umana (espressa in DALY, Disability Adjusted Life Years), qualità dell'ecosistema (espressa in PDF, potential disappeared species), cambiamento climatico (espressa in kg CO₂) e risorse (espressa in MJ). La struttura del metodo è illustrata nella seguente Figura 2.

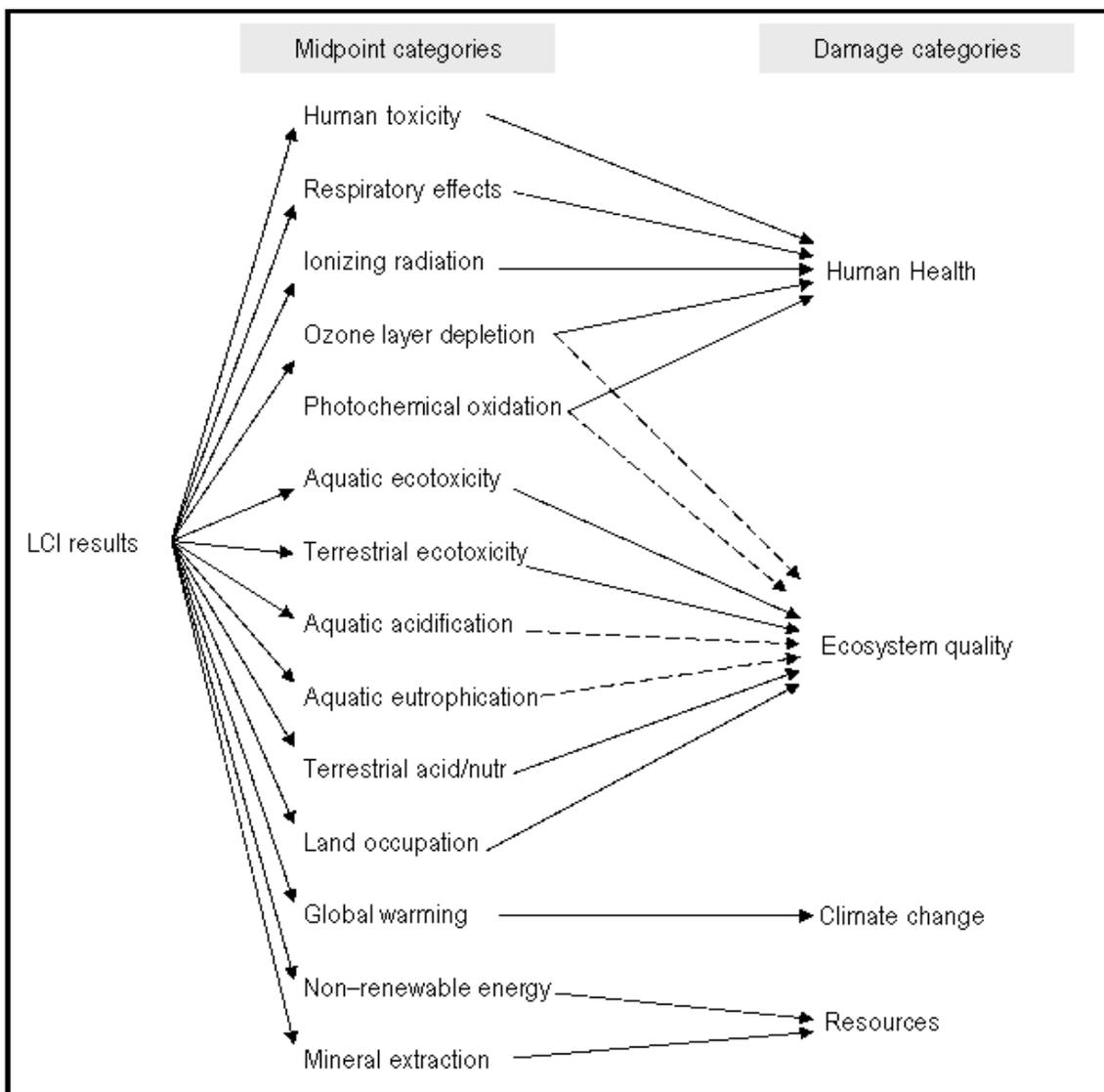


Figura 2: Struttura del metodo IMPACT 2002+. (Jolliet et al. 2003)

La fase del LCIA (Life Cycle Impact Assessment), dunque, è quella di quantificazione degli impatti per ogni flusso elementare presente nell'inventario, ottenuta moltiplicando le quantità emesse (o consumate) relative ad un determinato flusso per il suo fattore di caratterizzazione. L'impatto associato ad un flusso elementare può riguardare differenti categorie d'impatto contenute nella stessa categoria di danno così come differenti categorie di danno. È fondamentale la scelta di un metodo in quanto saranno scelte di conseguenza gli indicatori e le sostanze di riferimento per le categorie di impatto e di danno.

Fase di normalizzazione

Con il metodo IMPACT 2002+ La normalizzazione può essere effettuata a livello di categorie di danno con i fattori riportati nella sottostante Tabella 3 in cui sono riportati anche i valori di pesatura tra le categorie di danno (tutti pari a 1).

Tabella 2: Fattori di normalizzazione IMPACT 2002+.

Categorie di impatto	Fattori di normalizzazione West Europe 1995	Unità di misura	Pesatura
Human health	141	Pt/DALY	1
Ecosystem quality	0,000073	Pt/PDF*m ² *yr	1
Climate change	0,000101	Pt / kg CO ₂ eq.	1
Resources	6,58E-06	Pt/MJ	1

2.4 Interpretazione e miglioramento

Questa fase consiste nell'interpretazione dei risultati delle fasi di inventario e di valutazione degli impatti e nell'eventuale redazione di conclusioni e di raccomandazioni per il miglioramento della performance del sistema analizzato; si valutano quindi le opportunità per minimizzare l'impatto associato ad un sistema. L'analisi del ciclo di vita permette di identificare gli ambiti in cui si potrebbero attuare dei miglioramenti.

Si possono così valutare le varie proposte di miglioramento e, tenendo conto di altri criteri decisionali, si può scegliere l'alternativa più appropriata.

In questo passaggio devono essere richiamate le assunzioni fatte nella fase di definizione dell'obiettivo e dell'ambito dell'analisi: solo sulla base di questi presupposti, infatti, è possibile trarre delle conclusioni e fornire delle raccomandazioni.

Si utilizza, per l'interpretazione, un approccio iterativo: si fanno ipotesi alternative riguardo al ciclo di vita e si reintroducono i dati modificando i risultati delle fasi precedenti.

Per controllare l'influenza delle assunzioni più importanti, è fortemente consigliato eseguire un'analisi di sensitività tramite la quale si cambiano le ipotesi e si ricalcola la LCA. Con questo tipo di analisi si può avere una maggior comprensione sull'importanza degli effetti che hanno le ipotesi fatte. Si può così scoprire che il risultato della LCA è fortemente dipendente da alcune ipotesi ed è invece più stabile per quanto riguarda altre.

3 Batterie agli ioni Litio: caratteristiche generali

Una batteria litio/ioni è composta da sottili strati costituenti il catodo^d, il separatore e l'anodo, immersi in un elettrolita che permette il trasporto degli ioni litio. In una batteria litio/ioni il catodo è solitamente costituito da un ossido litiato di un metallo di transizione (LiTMO₂ con TM = Co, Ni, Mn), che garantisce una struttura a strati o a tunnel dove gli ioni litio possono essere inseriti ed estratti facilmente. L'anodo è generalmente costituito da grafite allo stato litiato, in cui ogni atomo è legato ad altri tre in un piano composto di anelli esagonali fusi assieme e che grazie alla delocalizzazione della nuvola elettronica conduce l'elettricità. L'elettrolita è composto tipicamente da sali di litio, come l'esafluorofosfato di litio (LiPF₆), disciolti in una miscela di solventi organici (carbonato di dimetile e di etilene) e la membrana separatrice è costituita normalmente da polietilene o polipropilene (fig. 3).

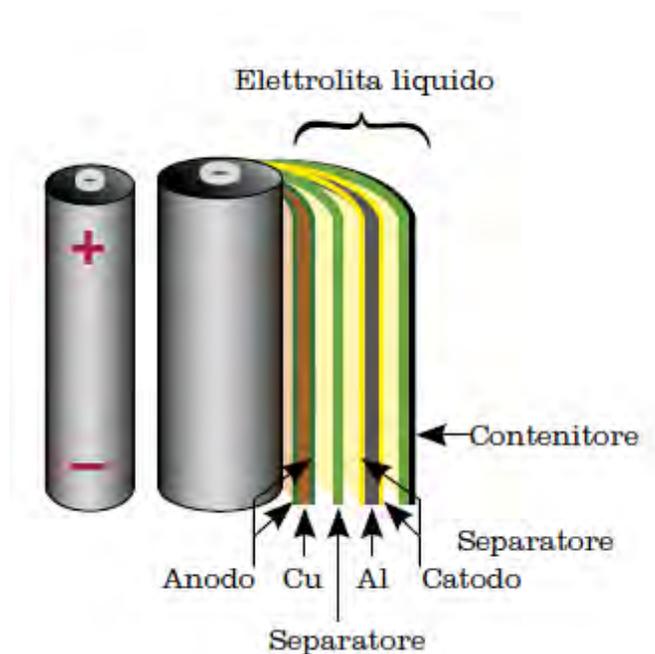


Figura 3: Struttura schematica di una batteria al litio

Negli elettroliti polimerici, l'elettrolita liquido viene fuso in una matrice polimerica ospitante per formare un gel, garantendo le medesime prestazioni dell'elettrolita liquido ma con un maggiore grado di sicurezza intrinseca. I collettori di corrente sono generalmente costituiti da metalli che non devono reagire con l'elettrolita e sono solitamente di rame per l'anodo e di alluminio per il catodo.

In tutte le batterie al litio, durante le reazioni di ossidoriduzione associate ai processi di carica e scarica, gli ioni litio migrano da un elettrodo all'altro reversibilmente. Quando la cella è completamente scarica, tutto il litio presente è contenuto nel catodo. Durante il processo di carica dell'accumulatore lo ione litio viene estratto dall'ossido metallico costituente il catodo e trasferito all'anodo, mentre gli elettroni migrano dal catodo all'anodo attraverso il circuito esterno e il metallo del catodo viene quindi ossidato. All'anodo, il processo di carica determina l'intrappolamento dello ione litio, che si riduce a litio nella matrice di grafite acquisendo gli elettroni provenienti dal circuito esterno. Durante la scarica, il litio intercalato nella matrice di grafite si ossida rilasciando all'esterno gli elettroni, mentre gli ioni litio migrano attraverso l'elettrolita al catodo, che viene ridotto. Durante il primo ciclo di carica, oltre al trasferimento degli ioni litio nella grafite, si forma anche uno strato passivante tra elettrolita ed elettrodo negativo, denominato SEI (Solid-Electrolyte Interface), e composto da ossidi, idrossidi, carbonati e fluoruri. Questo strato è importante per le prestazioni delle batterie poiché influenza il numero di cicli, la capacità e la sicurezza.

In generale il mercato delle batterie "primarie" (o "non ricaricabili") e "secondarie" (o "ricaricabili", più propriamente definite "accumulatori") può essere suddiviso in due gruppi principali: il settore "portatile", nel quale le batterie generalmente pesano meno di 1 kg ed il settore "industriale e da autotrazione", nel quale le batterie generalmente pesano più di 1 kg.

Considerando la grande diffusione delle diverse tipologie di batterie si comprende come queste rappresentino una fonte essenziale di energia per la nostra società: d'altro canto, proprio a causa della loro massiccia diffusione, al tempo stesso costituiscono un rischio ambientale qualora – a fine vita - vengano smaltite in maniera non rispettosa dell'ambiente.

La problematica dello smaltimento improprio di batterie a accumulatori nel flusso dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU) non riguarda tuttavia né il segmento "industriale" né il segmento "da autotrazione" in quanto, in relazione all'elevato valore del materiale in esse contenuto e per l'esistenza di validi strumenti legislativi e di modelli organizzativi ormai collaudati, si può ritenere che il prodotto esausto affluisca alla raccolta differenziata pressoché al 100%.

Diverso è il discorso relativamente al segmento “portatile” per il quale l’assenza di incentivi economici verso chi contribuisce alla raccolta differenziata, la mancanza di una adeguata informazione circa i rischi ambientali di uno smaltimento improprio e la facilità di stoccaggio in ambiente domestico hanno sino ad ora portato ad un massiccio afflusso di questo prodotto, quando esausto, nei Rifiuti Solidi Urbani.

I maggiori rischi per l’ambiente conseguenti a questo comportamento sono legati al contenuto in mercurio, piombo e cadmio che caratterizzano molte tipologie di pile ed accumulatori. Questi metalli, attraverso le diverse vie di smaltimento dei RSU (l’incenerimento o l’immissione in discarica), possono diffondere nell’ambiente dando luogo a fenomeni di accumulo e di ingresso nella catena alimentare.

In relazione ai dati disponibili degli effetti che hanno vari tipi di batterie (Pb – acido, Ni – Cd, NiMH, Li – polimero, Li – ion, Ni – Zn) sulla salute a breve termine in caso di esposizione, sulla salute a lungo termine in caso di esposizione e sull’ambiente, quelle al litio hanno un impatto minore. Il pericolo del litio è dovuto alla sua reattività con l’aria in quanto questo elemento reagisce con l’ossigeno, generando prodotti tossici.

Infatti, come gli altri metalli alcalini, il litio è altamente infiammabile e leggermente esplosivo se esposto all’aria e soprattutto all’acqua, con la quale reagisce in maniera violenta (produzione di H₂). Il litio è corrosivo e deve essere maneggiato con cura evitando il contatto con la pelle. Il litio è considerato leggermente tossico. Il suo impiego nelle batterie è dovuto alla bassa densità, buona conducibilità elettrica e semplicità di riciclaggio. Molti dei problemi delle vecchie generazioni di batterie al piombo (scarsa densità energetica e problemi di riciclaggio) o al nichel (elevate temperature di funzionamento) sono stati risolti grazie all’impiego di questo elemento.

Oltre al litio, altri composti pericolosi relativi alle batterie di questo tipo sono i sali che costituiscono l’elettrolita (miscela fra un solvente organico e un sale di litio), il quale è tossico e infiammabile. Il solvente contiene LiPF₆ (litio esafluorofosfato), LiClO₄ (litio perclorato) e LiBF₄ (litio tetrafluoroborato). Una esposizione a questo elettrolita nel breve periodo può causare effetti negativi sulla pelle, o all’intestino se ingerito.

La presenza di Li e gli alti valori di pH del lisciviato dimostrano la pericolosità di tali rifiuti se non correttamente gestiti e recuperati; grande cura è necessaria nel maneggiare tali prodotti, che a contatto con acqua e umidità danno luogo a condizioni altamente caustiche e corrosive. I risultati di questa ricerca confermano come le batterie al litio ricaricabili siano potenziali fonti di inquinamento e quindi pericolose per l’ambiente. Gli inquinanti presenti se rilasciati possono avere un impatto negativo sulla qualità ambientale e sulla salute umana, in particolare nelle regioni del mondo che mancano di valide infrastrutture per la raccolta dei rifiuti solidi, la loro cernita e riciclaggio^e.

4 Il litio nella Strategia europea sui Raw Materials

Secondo il più recente rapporto sulle Materie prime critiche per l’Unione europea del 2014^f, nonostante il litio non rientri tra le materie prime critiche (per importanza economica, rischio di approvvigionamento e basso indice di sostituibilità), risulta essere comunque una materia prima meritevole di attenzione dato il recente crescente trend di consumo derivante dagli molteplici impieghi che trova nelle più svariate applicazioni.

La figura seguente mostra il posizionamento del litio nella valutazione sulle materie prime critiche svolta dalla Commissione Europea nel 2010 ed aggiornata recentemente con il citato rapporto del maggio 2014.

Il litio viene valutato non critico sia perché è valutato un basso rischio di approvvigionamento, sia perché attualmente risulta sostituibile in molte sue applicazioni, comprese le batterie (Figura 5).

Tuttavia, il litio supera la soglia di criticità per quanto riguarda la sua importanza economica, visto l’andamento del mercato del litio negli ultimi anni che ha fatto impennare le quotazioni di questo metallo, i cui prezzi si prevede aumenteranno anche nei prossimi anni (Figura 6.a e 6.b). La figura 6.b mostra inoltre che il maggiore settore di impiego del litio da oggi al 2020 sarà in termini progressivamente crescenti proprio quello delle batterie.

L’Italia, come è noto, non ha giacimenti contenenti litio che, a livello mondiale, proviene principalmente da Cile ed Australia (rispettivamente 45% e 34% nel 2013) ed in misura minore da altri paesi (Argentina, USA, Cina, Brasile e Portogallo, unico paese europeo, con l’1%) (European Commission, 2014). In questo

scenario, ed anche secondo quanto emerge dallo studio EPA (EPA, 2013) illustrato nel paragrafo 5, sarebbe auspicabile aumentare il tasso di riciclaggio del litio dai prodotti a fine vita, tasso che al momento invece sembra trascurabile nonostante la Commissione Europea abbia posto l'obiettivo di raggiungere nel 2016 un tasso di riciclaggio del 45% del litio contenuto nelle batterie ricaricabili.

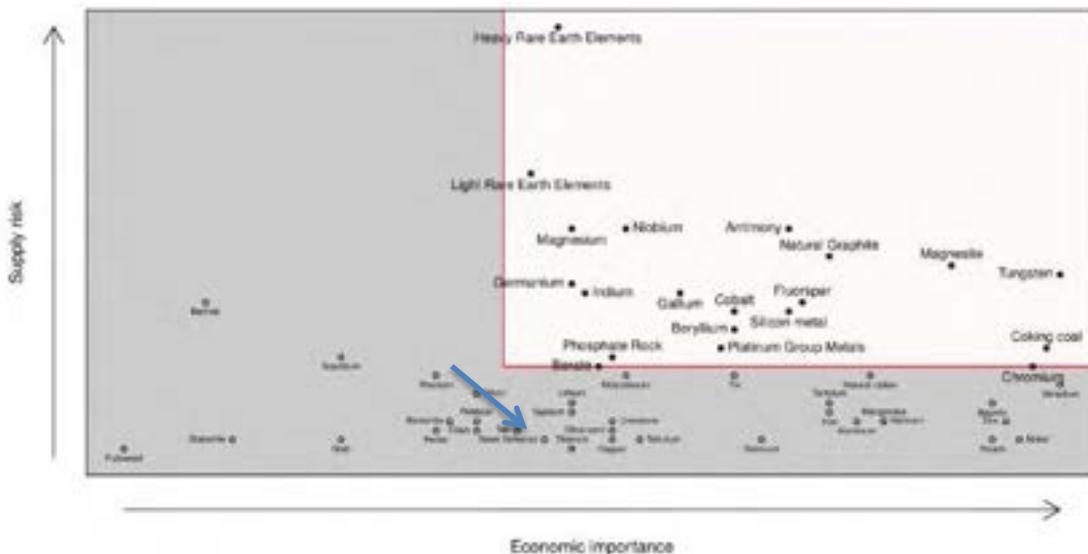


Figura 4: Valutazione delle materie prime critiche per l'EU (aggiornamento 2013) (Fonte: European Commission, 2014).

Use	Substitutability Index
Ceramics and glass	1
Batteries	1
Lubricating grease	0.7
Gas and air treatment	0.3
Continuous casting	0.7
Synthetic rubbers and plastic	0.7
Pharmaceuticals	0.3
Aluminium smelting	0.3

Figura 5: Indice di sostituibilità del litio per le sue diverse applicazioni (Fonte: European Commission, 2014)

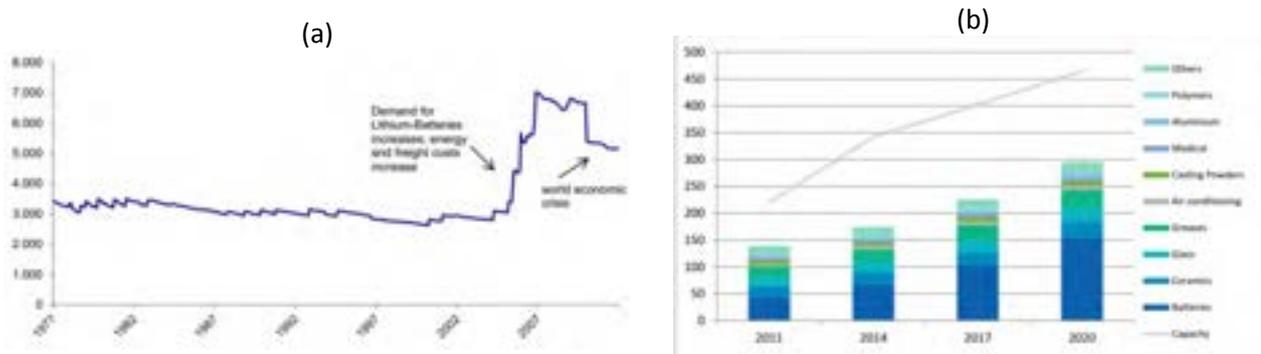


Figura 6: Andamento del prezzo del litio 1977 – 2011 (a) (\$/mt) e Previsioni di uso e capacità mondiale di carbonato di litio al 2020 nei diversi settori di applicazione (kt) (b) (Fonte: European Commission, 2014)

5 Studi LCA di batterie al litio

5.1 Introduzione

Il presente capitolo raggruppa la più recente letteratura scientifica nazionale ed internazionale che si è occupata di condurre valutazioni di LCA su batterie a ioni di litio.

Si tratta in particolare dei seguenti lavori:

- Cappellaro F., Masoni P., Buonamici R., “Applicazione della metodologia Life Cycle assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione”, ENEA – MSE, RdS/2011/70^g
- Cellura M., Longo S. Orioli A., Panno D., “Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche”, ENEA – MSE, RdS/2012/93^h
- EPA, “Application of life cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles”, 2013, EPA 744-R-12-001ⁱ
- BIO, “Comparative Life-Cycle Assessment of nickelcadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries”, December 2011, European Commission – DG ENV^j.

Occorre, inoltre, segnalare che le batterie fanno parte dei prodotti selezionati per gli studi pilota del primo pacchetto^k (avviatosi nel Novembre 2013) per testare la metodologia della impronta ambientale di prodotto, ovvero la Product Environmental Footprint^l (PEF).

Importanti sviluppi in ambito di valutazioni di impatto ambientale, e loro relativa comunicazione, sono stati forniti dalla pubblicazione nel 2012 della metodologia PEF, da parte della Commissione Europea che punta a stimolare l’adozione di criteri “ecologici” lanciati a livello Europeo. La PEF è un metodo di valutazione multi-criteri delle prestazioni ambientali di un prodotto, basato su approccio ciclo di vita. La metodologia PEF è stata sviluppata dal Joint Research Centre dell’Unione Europea sulla base di metodi esistenti e ampiamente testati ed utilizzati con l’obiettivo di definire una metodologia comune a livello europeo per il calcolo degli impatti ambientali di un prodotto. Con la Comunicazione Building the Single Market for Green Products e la raccomandazione della commissione sull’uso del metodo PEF, la Commissione promuove l’adesione volontaria per testare la metodologia stessa.

5.2 Lo studio RdS/2011/70: Applicazione della metodologia Life Cycle assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione

Lo studio “Applicazione della metodologia Life Cycle assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione” fornisce un primo inquadramento dell’applicazione della metodologia LCA al settore automotive ed in particolare alle batterie utilizzate da detto settore.

Lo studio di LCA, condotto in conformità alle norme della serie ISO 14040 (2006), ha riguardato in particolare la LCA di differenti tipologie di batterie di avviamento, per le quali sono state selezionate le seguenti Unità Funzionali:

- UF1: N.1 batteria con celle al LiFePO4 del tipo HP-PW-30AH;
- UF2: N.1 batteria con celle al LiFePO4 del tipo HP-PW-60AH;
- UF3: N.1 batteria con celle al LiFePO4 del tipo HP-PW-100AH.

Il dettaglio della LCA è illustrato nel successivo rapporto tecnico “Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche”, di Cellura M. et al., RdS/2012/93.

Secondo il lavoro svolto, per quanto riguarda il consumo di energia primaria, la fase di uso delle batterie è responsabile dei maggiori impatti energetico – ambientali (circa il 67-77%) durante l’intero ciclo di vita. Risulta trascurabile la fase di fine vita, i cui impatti sono inferiori al 2% del totale. La fase di produzione incide sul totale degli impatti energetico-ambientali per una percentuale variabile dal 21 al 31%.

5.3 o studio RdS/2012/93: Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche

Lo studio “Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche” ha riguardato:

1. la “Comparazione delle prestazioni energetico – ambientali della batteria Li-ione esaminata con quelle di altre batterie”, relativa alla comparazione delle prestazioni energetico – ambientali della batteria Li-ione con quelle di altre batterie agli ioni di litio, i cui dati sono stati reperiti dall’analisi dello stato dell’arte internazionale.
2. l’“Analisi di sensibilità dei risultati della LCA”, per valutare in che modo, cambiando le ipotesi iniziali riguardanti i dati sulla fase d’uso, i risultati subiscono delle variazioni, e di ottenere informazioni attendibili e rappresentative sull’eco-profilo della batteria Li-ione in esame.
3. la “Definizione di criteri di eco-design da applicare nella progettazione e realizzazione delle batterie Li-ione”.

L’attività sub.1 ha riguardato la LCA di tre differenti unità funzionali:

- UF₁: N.1 batteria con celle al LiFePO₄ del tipo HP-PW-30AH;
- UF₂: N.1 batteria con celle al LiFePO₄ del tipo HP-PW-60AH;
- UF₃: N.1 batteria con celle al LiFePO₄ del tipo HP-PW-100AH.

relativamente al confine del sistema descritto nella seguente figura (fig. 7). La tabella 4 illustra invece le caratteristiche tecniche delle batterie su cui è stata svolta la LCA.

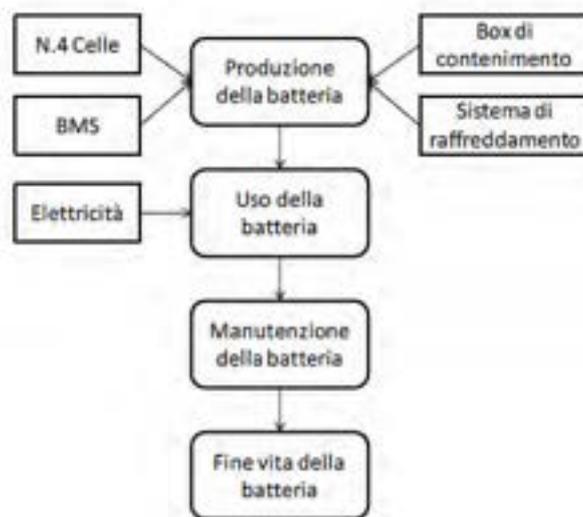


Figura 7: Confini del sistema esaminato (Fonte: Cellura et al., 2011)

Tabella 3: Caratteristiche tecniche delle celle (Fonte: Cellura et al., 2011)

Tipo di cella		HP-PW-30AH	HP-PW-60AH	HP-PW-100AH
Caratteristiche	U.M.	Valore	Valore	Valore
Capacità nominale	Ah	30	60	100
Voltaggio	V	3,2	3,2	3,2
Peso	kg	1,15	2,04	3,4
Dimensioni (incluse le parti terminali)	mm	103*58*168	114*61*203	163*51*278
Scarica (23 °C)				
Massima corrente continua	A	90	180	300
Corrente di picco (60 sec.)	A	150	300	500
Voltaggio di corto circuito	V	2,5	2,5	2,5
Carica				
Modalità di carica		CC/CV (3,65 V)	CC/CV (3,65 V)	CC/CV (3,65 V)
Massima corrente continua	A	30	60	100
Voltaggio di corto circuito	V	3,85	3,85	3,85

A titolo esemplificativo si riportano, in tabella 5, i risultati complessivi della LCA, riferiti alle tre unità funzionali sopra riportate. Dall'analisi dei dati si evince che la maggior parte del consumo di energia, rinnovabile o meno, avviene durante la fase di uso, con percentuali che sono dell'ordine del 60% del consumo totale. Gli altri impatti ambientali si manifestano invece principalmente durante la fase di produzione. La fase di fine vita mostra infine impatti e consumi energetici di gran lunga inferiori rispetto alle fasi precedenti.

Tabella 4: Consumi di energia ed impatti ambientali del ciclo di vita delle UF di riferimento (valore assoluto e percentuale) (Fonte: modificato da Cellura 2011).

		UF1	UF2	UF3		UF1	UF2	UF3
Produzione								
Energia non rinnovabile	MJ	964,06	1495,35	2308,74	(%)	41,1%	35,0%	32,9%
Energia rinnovabile	MJ	106,3	147,92	216,4	(%)	46,2%	37,2%	33,9%
GWP	kg CO _{2eq}	99,71	162,01	257,44	(%)	59,8%	54,5%	52,9%
ODP	kg CFC-11 _{eq}	2,4E-03	4,3E-03	7,2E-03	(%)	99,9%	99,8%	99,8%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	8,0E-02	1,3E-01	2,1E-01	(%)	79,5%	71,0%	74,7%
AP	kg SO _{2eq}	0,74	1,25	2,02	(%)	73,3%	69,8%	68,7%
EP	PO ₄ ³⁻ _{eq}	0,91	1,62	2,68	(%)	81,8%	80,1%	79,7%
Uso								
Energia non rinnovabile	MJ	1328,82	2683,99	4546,43	(%)	56,7%	62,8%	64,9%
Energia rinnovabile	MJ	120,75	243,9	413,15	(%)	52,4%	61,3%	64,6%
GWP	kg CO _{2eq}	66,03	133,36	225,91	(%)	39,6%	44,9%	46,4%
ODP	kg CFC-11 _{eq}	3,3E-06	6,7E-06	1,1E-05	(%)	0,1%	0,2%	0,2%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	2,0E-02	4,1E-02	6,9E-02	(%)	19,9%	22,4%	24,6%
AP	kg SO _{2eq}	0,26	0,52	0,89	(%)	25,7%	29,1%	30,3%
EP	PO ₄ ³⁻ _{eq}	0,2	0,4	0,68	(%)	18,0%	19,8%	20,2%
Fine Vita								
Energia non rinnovabile	MJ	51,93	92,12	153,54	(%)	2,2%	2,2%	2,2%
Energia rinnovabile	MJ	3,27	5,8	9,66	(%)	1,4%	1,5%	1,5%

GWP	kg CO _{2eq}	1,07	1,9	3,16	(%)	0,6%	0,6%	0,6%
ODP	kg CFC-11 _{eq}	5,6E-08	1,0E-07	1,7E-07	(%)	0,0%	0,0%	0,0%
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	6,8E-04	1,2E-02	2,0E-03	(%)	0,7%	6,6%	0,7%
AP	kg SO _{2eq}	0,01	0,02	0,03	(%)	1,0%	1,1%	1,0%
EP	PO ₄ ³⁻ _{eq}	2,0E-03	3,0E-03	2,0E-03	(%)	0,2%	0,1%	0,1%

Dall'analisi dei dati riportati nel citato studio, la maggior parte degli impatti ambientali e del consumo di energia in fase di produzione dipendono prevalentemente dalla produzione delle celle, all'aumentare della capacità nominale (e quindi del peso e delle dimensioni) della batteria. Nell'ambito della produzione delle celle i consumi energetici prevalenti sono da attribuire a litio ferro fosfato (che incide, ad es. per l'UF3, per il 40% circa), rame, tetrafluoroetilene, grafite e alluminio (che complessivamente incidono, sempre ad es. per l'UF3, per circa il 50%). Per quanto riguarda gli impatti ambientali della fase di produzione delle celle questi dipendono prevalentemente da tetrafluoroetilene e in misura minore da litio ferro fosfato per quanto riguarda il GWP, sempre da tetrafluoroetilene per l'ODP, da rame, tetrafluoroetilene, grafite, litio ferro fosfato per il POCP, da rame, tetrafluoroetilene e litio ferro fosfato per l'AP, da rame e liti ferro fosfato per l'EP.

5.4 Lo studio EPA "Application of life cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles"

Lo studio "Application of life cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles" è stato svolto dall'EPA e pubblicato nel dicembre 2013, con la partecipazione del Dipartimento dell'energia degli Stati Uniti (DOE); scopo del lavoro è stato identificare i materiali o processi all'interno del ciclo di vita di una batteria agli ioni di litio (dall'estrazione di materiali e lavorazione, la produzione, l'uso e il fine vita), che più contribuiscono agli impatti sulla salute pubblica e l'ambiente.

Le batterie Li-ione sono composte da tre strati (figura 8): un anodo, un catodo e un separatore poroso, che si trova tra gli strati anodo e catodo. L'anodo è composto di grafite e altri additivi conduttivi. Il catodo è costituito da ossidi di metalli di transizione a più livelli (ad esempio LiCoO₂ e LiFePO₄). Lo studio ha valutato tre batterie chimiche Li-ione per veicoli elettrico (EV) e due chimiche per veicoli elettrici ibridi *plug-in* (PHEV). Le batterie chimiche includono quelle a vari tipi di ossidi (LiMnO₂, LiNi_{0.4}Co_{0.2}Mn_{0.4}O₂, LiFePO₄).

Inoltre, è stata valutata la tecnologia di un anodo in nanotubo di carbonio a parete singola (SWCNT) per un suo futuro uso nelle batterie.

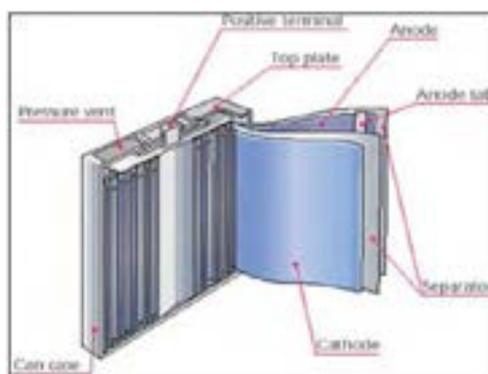


Figura 8: Schema di una batteria Li-ione (Fonte: EPA 2013)

Lo studio ha mostrato che le batterie che utilizzano catodi di nichel e cobalto hanno il più alto potenziale di impatto ambientale. Questi impatti comprendono l'esaurimento delle risorse, riscaldamento globale, la

tossicità ecologica, e gli impatti sulla salute umana. I più grandi processi che contribuiscono includono quelli associati con la produzione, la trasformazione, e l'uso di composti metallici del cobalto e nichel, che possono causare effetti negativi sul sistema respiratorio, polmonare e neurologico dei soggetti esposti.

Tra gli altri aspetti che influenzano gli impatti ambientali del ciclo di vita delle batterie, si trova anche il mix energetico utilizzato per il caricamento della batteria durante la sua fase di uso. Gli impatti della fase di uso dipendono, appunto, direttamente dagli impatti generati per la produzione di elettricità utilizzata per ricaricare la batteria.

Le applicazioni delle nanotecnologie SWCNT sembrano promettenti per migliorare la densità di energia e le prestazioni delle batterie; tuttavia, l'energia necessaria per produrre questi anodi è, in questa fase iniziale di sviluppo della tecnologia, significativa tanto da poter superare i potenziali benefici di efficienza energetica in fase di utilizzo.

La figura 9 mostra il layout del ciclo di vita di una generica batteria agli ioni di litio per i veicoli, illustrando le varie fasi di estrazione, trattamento dei materiali, produzione dei singoli componenti e poi del prodotto finito, uso e fine vita.

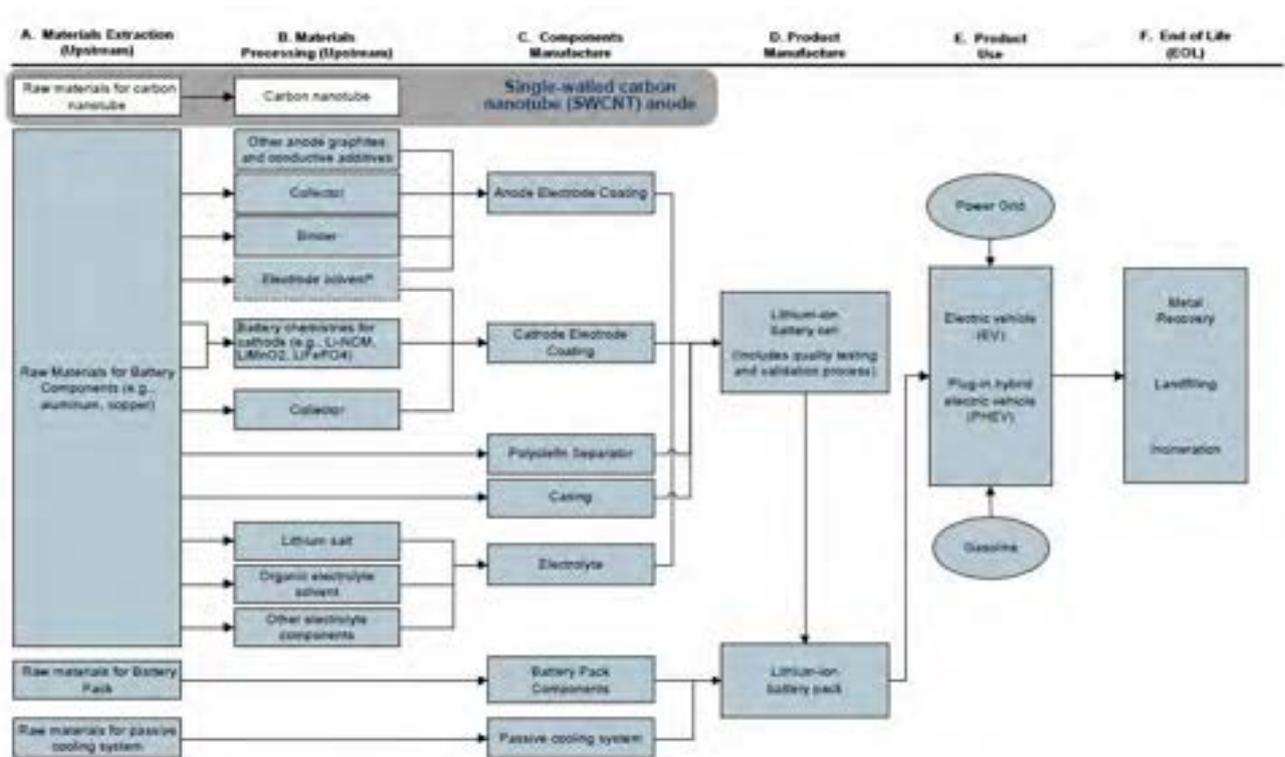


Figura 9: Layout di ciclo di vita di una batteria Li-ioni per autoveicoli (Fonte: EPA 2013)

Le figure 10 e 11 mostrano invece i risultati complessivi della LCA svolta sulle diverse tipologie di batterie prese in considerazione nello studio.

Alcuni dei risultati principali del lavoro possono essere riassunti come segue:

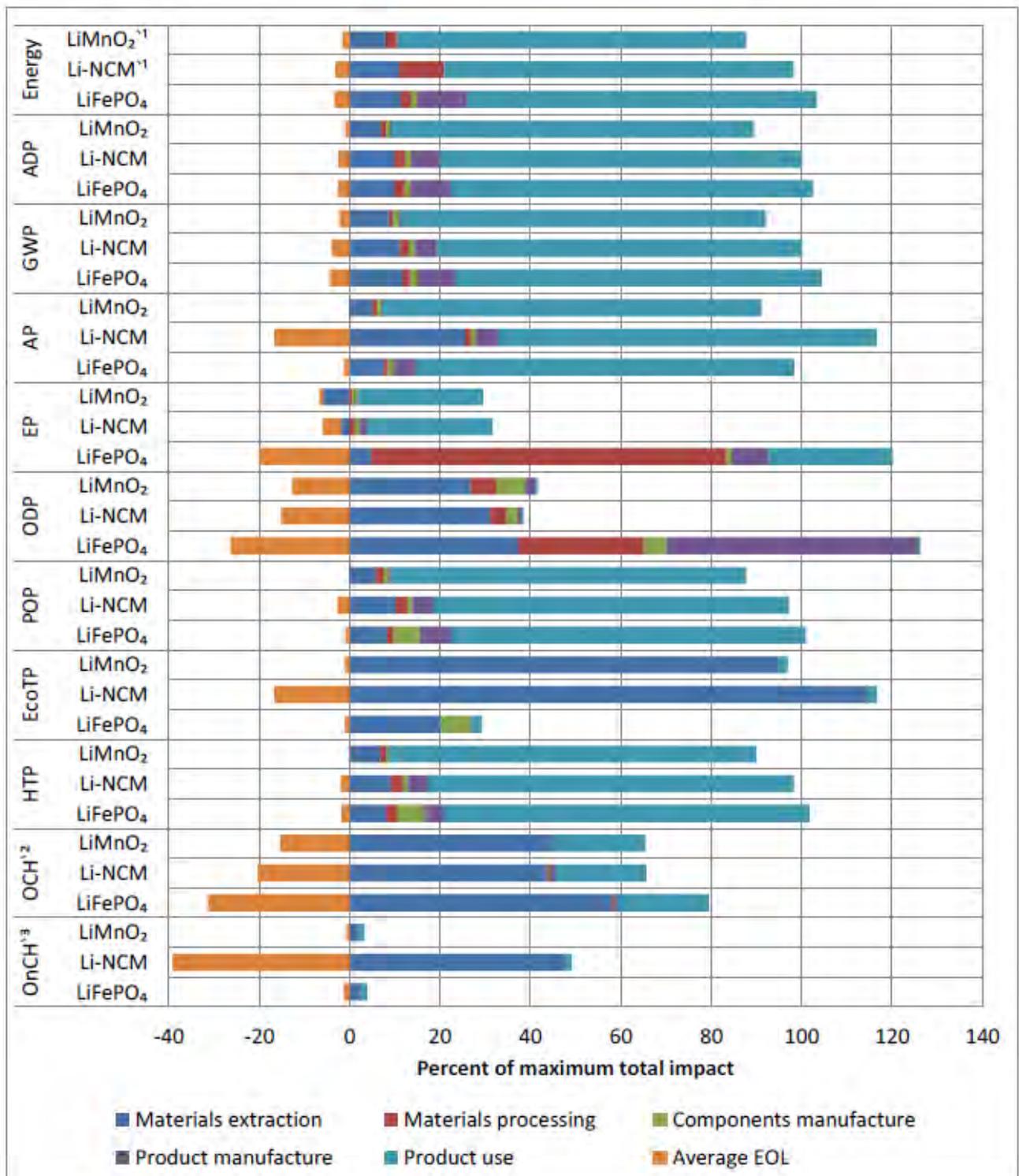
- Chimica delle batterie, componenti e materiali
 - o La scelta del materiale attivo per il catodo influisce sui risultati relativi alla salute umana ed alla tossicità; in particolare il Li-NCM risulta avere maggiori impatti rispetto al manganese e al ferro.
 - o La manifattura del materiale attivo del catodo richiede una grande quantità di energia; in particolare il Li-NCM richiede da 1,4 a 1,5 volte più energia primaria degli altri due materiali attivi.
- Tipologia di veicolo e di batteria

- IL GWP è una delle poche categorie di impatto in cui le batterie EV mostrano un minore impatto ambientale rispetto PHEV. Tuttavia, il beneficio GWP appare solo quando la rete elettrica si basa meno sul carbone e di più sul gas naturale e fonti rinnovabili. È importante notare, tuttavia, che questo studio e i dati contenuti in un precedente studio suggeriscono che, rispetto a veicoli a combustione interna, vi sono vantaggi significativi sul GWP per entrambi i veicoli elettrici (EV e PHEV), indipendentemente dalla intensità di carbonio del mix energetico.
- Fasi del ciclo di vita
 - Anche se la fase di utilizzo della batteria apporta i maggiori impatti ambientali nella maggior parte delle categorie di impatto, le fasi di produzione non sono trascurabili ed anzi sono relativamente importanti per quanto riguarda gli impatti potenziali di eutrofizzazione, riduzione dell'ozono, tossicità ecologica, ed il rischio professionale da cancro e non-cancro. L'estrazione e la lavorazione dei metalli, in particolare l'alluminio e l'acciaio, sono importanti fattori di impatto.
 - Il recupero dei materiali nella fase di fine vita (EOL) riduce significativamente gli impatti complessivi del ciclo di vita. Ciò è particolarmente vero per i componenti del catodo e della batteria dove sono utilizzati metalli. Pertanto, l'analisi sottolinea l'importanza di limitare l'estrazione del litio vergine, preservando risorse e riducendo gli impatti ambientali.
- Analisi di sensitività
 - I risultati della LCA sono sensibilmente influenzati dalla durata della vita utile della batteria. Ad esempio, il dimezzamento della vita utile, raddoppia, in proporzione, gli impatti delle altre fasi del ciclo di vita.
 - L'analisi di sensitività mostra inoltre che i risultati della LCA variano sensibilmente in funzione della scelta dell'energy mix utilizzato per la ricarica delle batterie, per quanto attiene agli impatti della fase di uso.

Lo studio EPA suggerisce una serie di azioni per il miglioramento delle performance ambientali delle batterie Li-ion, sia EV, sia PHEV:

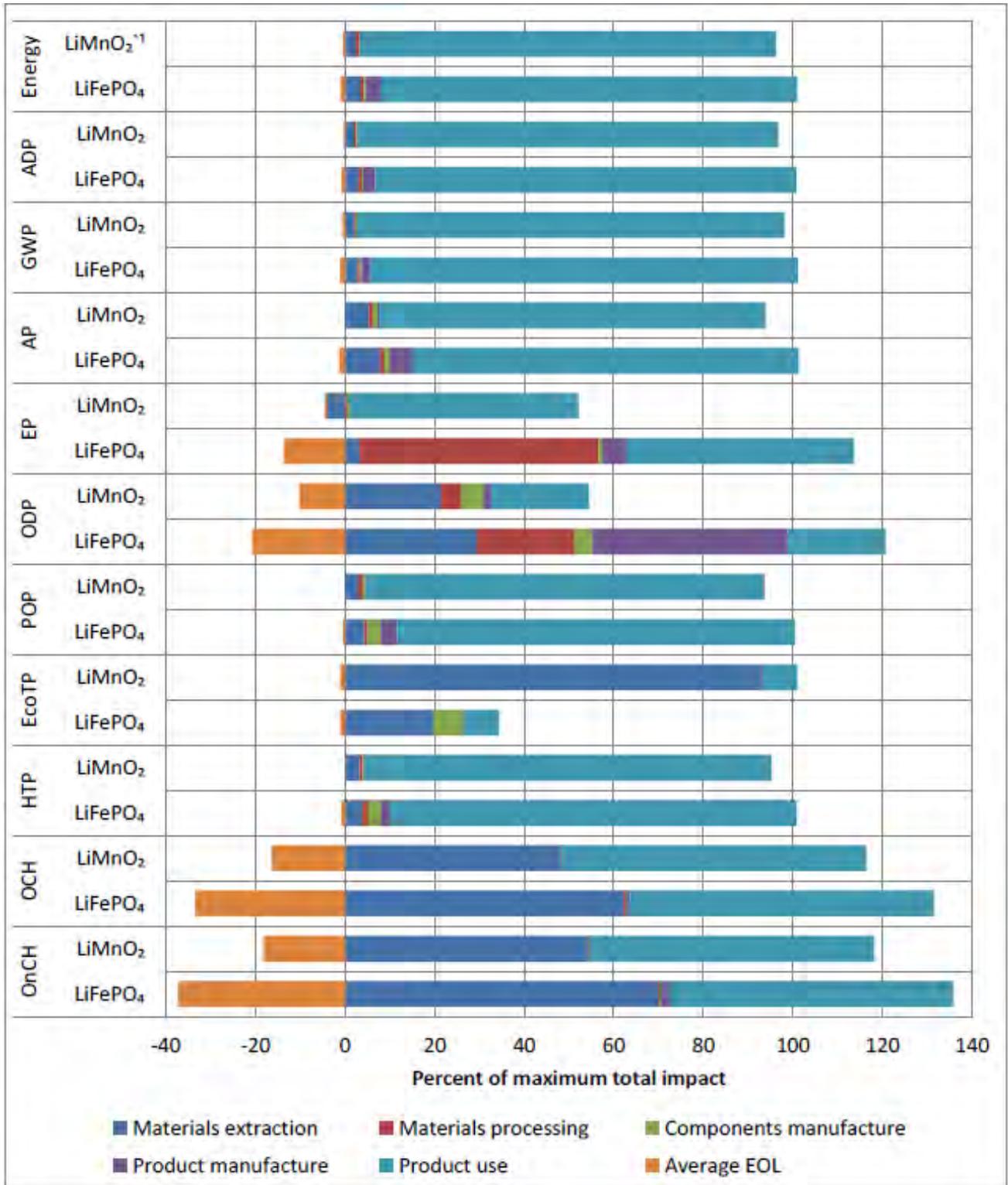
- Aumentare la vita utile delle batterie;
- Ridurre l'uso di cobalto e nichel;
- Ridurre la percentuale in peso di metalli;
- Utilizzare i materiali recuperati per produzione di nuove batterie.

Figura 10: Risultati della valutazione del ciclo di vita di batterie per veicoli elettrici (EV) a ioni Litio per tipologia (Fonte: EPA 2013)



Nota: ADP = abiotic depletion potential; AP = acidification potential; EcoTP = ecological toxicity potential; EP = eutrophication potential; GWP = global warming potential; HTP = human toxicity potential; OCH = occupational cancer hazard; ODP = ozone depletion potential; OnCH = occupational non-cancer hazard; POP = photochemical oxidation potential

Figura 11: Risultati della valutazione del ciclo di vita di batterie veicoli elettrici ibridi *plug-in* (PHEV) a Ioni Litio per tipologia (Fonte: EPA 2013)



Nota: ADP = abiotic depletion potential; AP = acidification potential; EcoTP = ecological toxicity potential; EP = eutrophication potential; GWP = global warming potential; HTP = human toxicity potential; OCH = occupational cancer hazard; ODP = ozone depletion potential; OnCH = occupational non-cancer hazard; POP = photochemical oxidation potential

5.5 Lo studio BIO “Comparative Life-Cycle Assessment of nickelcadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries” per la EC DG-Env

Lo studio di cui si riportano le principali conclusioni è stato commissionato a *BIO Intelligence Service* dalla Direzione Generale Ambiente della Commissione Europea (attraverso il contratto 07.0307/2010/573669/ETU/C2) per supportare decisioni politiche associate alle proposte di modifica della direttiva sulle batterie (2006/66/EC) in cui vi è una deroga di utilizzo di Cadmio nelle batterie per utensili elettrici senza fili (Cordless Power Tools, CPTs).

Infatti il report ha l’obiettivo di valutare gli impatti ambientali attraverso uno studio di Life Cycle Assessment (LCA) comparativo di batterie Nickel-Cadmio (NiCd), ibrido Nickel-Metalli (NiMH) e Li-ione (Lithium Iron Phosphate, LiFePO₄) e loro applicazione in utensili elettrici senza fili, al fine sia di indentificare gli hot spot che di delineare suggerimenti, utilizzabili a livello di policy Europea, per la riduzione degli impatti e dell’esposizione umana al cadmio presente in tali apparecchiature.

L’unità funzionale dello studio di LCA è 1 kWh di energia fornita ai CPTs da parte di tre tipologie di batterie:

- Nickel-Cadmio (NiCd),
- ibrido Nickel-Metalli (NiMH)
- Li-ione (Lithium Iron Phosphate, LiFePO₄).

Nell’analisi comparativa si includono due “battery pack” ma non apparecchiature CPTs in quanto tali impatti sono uguali e si elidono e perciò non influenzano i risultati dello studio stesso. I dati derivano da aziende e associazioni di settore e anche dal database Ecoinvent 2 (del 2010) e i metodi selezionati per la valutazione degli impatti sono: ReCiPe, CML, USEtox e gli indicatori e le relative unità di misura sono dettagliati nella tabella sottostante.

Le figure 12-15, con la tabella 6 , riportano la definizione dei confini del sistema oggetto di studio e le principali caratteristiche delle tre tipologie di batteria analizzate.

Tabella 5: metodi utilizzati nello studio con dettaglio di categorie di impatto e relative unità di misura

Metodo	Categoria di impatto	Unità di misura
ReCiPe	Global Warming Potential (GWP)	kg CO ₂ eq
	Metal Depletion Potential (MDP)	kg Fe eq
	Fossil Depletion Potential (FDP)	kg oil eq
	Particulate Matter Formation Potential (PMFP)	kg PM10 eq
	Photochemical oxidant formation Potential (POFP)	kg NMVOCeq
	Terrestrial Acidification Potential (TAP)	kg SO ₂ eq
	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq
	Ionising Radiation Potential (IRP)	kg U235 eq
	Freshwater Eutrophication Potential (FEP)	kg P eq
	Marine Eutrophication Potential (MEP)	kg N eq
CML	Abiotic resource depletion potential (ADP)	kg Sb eq
USEtox	Human Toxicity Potential (HTP)	cases
	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAEP)	PAF m ³ day

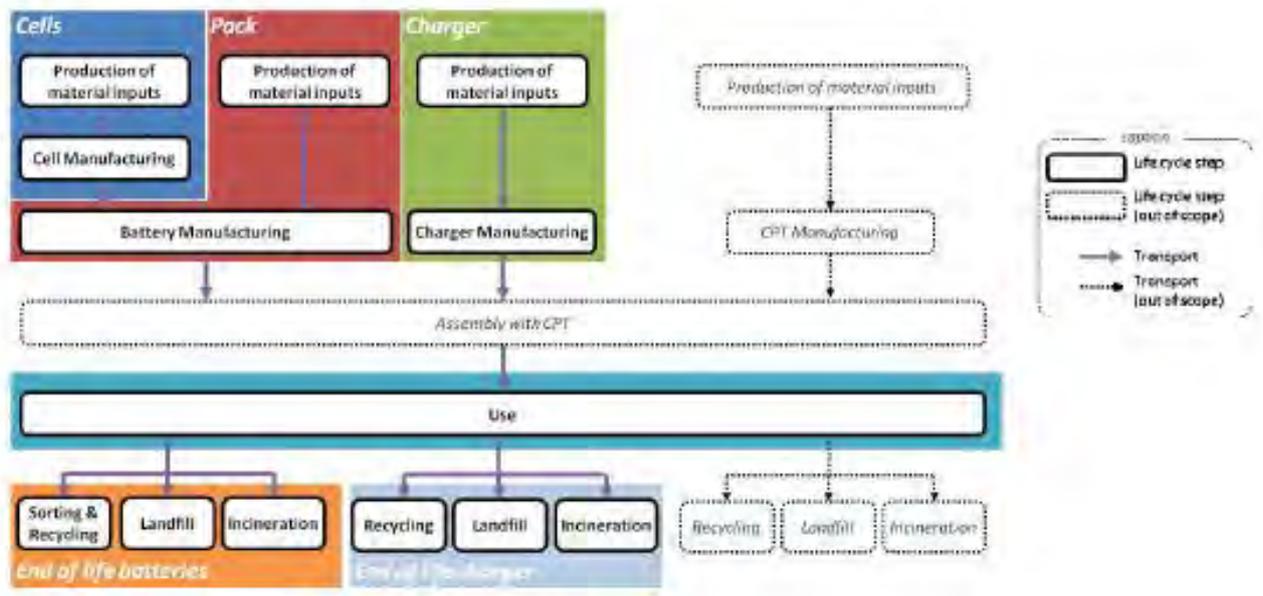


Figura 12: Confini del sistema delle tre tipologie di batterie

Pertanto 7 fasi del ciclo di vita sono valutate:

- “celle” (produzione di materiali e assemblaggio delle batterie);
- “pack” (produzione di materiali e assemblaggio del pack);
- “caricatore” (produzione di materiali e assemblaggio);
- “uso” (consumi energetici per ricaricare batterie);
- “trasporto”
- “fine vita batterie” (discarica, incenerimento o riciclo);
- “fine vita caricatore” (discarica, incenerimento o riciclo).

Molto interessanti sono le valutazioni dell’effetto “hoarding” ovvero di accumulazione delle batterie prima di giungere realmente al loro fine vita. Questo influisce sul numero di batterie che vanno annualmente a fine vita e quindi sul tasso di raccolta. Su questo punto lo studio di LCA include un’analisi di sensibilità in cui vengono costruiti differenti scenari che, seguendo diversi approcci, variano nella percentuale di tasso di raccolta, rispondendo in diverso modo alle indicazioni fornite nella Direttiva Europea.

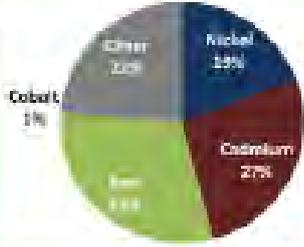
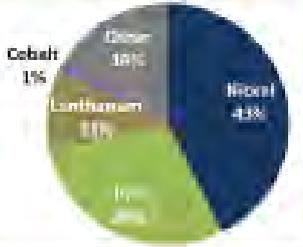
	NiCd	NiMH	LiFePO ₄
Cells			
	15 x 51.6 g	15 x 58 g	12 x 38.3 g
	1.2 V - 2400 mAh	1.2 V - 3200 mAh	3.3 V - 2000 mAh
Pack	1P - 1 pack of 15 cells in series		2P - 2 packs of 6 cells in parallel
	Same pack for NiCd and NiMH - No electronic components		Contains electronic components
	194 g (excluding cells)		220 g (excluding cells)
	365 g (with cells)	4064 g (with cells)	670 g (with cells)
	18 V - 2400 mAh	18 V - 3200 mAh	19.8 V - 4000 mAh
Charger	Same charger for NiCd and NiMH (contains about 20% of electronic components in mass)		contains about 40% electronic components in mass)
Depth of discharge	100% of the nominal capacity is used		85% of the nominal capacity is used
Use phase	1.48 kWh/FU		1.44 kWh/FU No maintenance charging
	Batteries stop being used after 165 h of use of the IPT		
	Theoretical lifespan: 800 cycles		
	No capacity fade considered		15% capacity fade at 800 th cycle
Collection rate	10% (based on cat.5 WEEE collection rate for 2008)		
Recycling	Recovery of cadmium, nickel and iron (57% of the pack = 77% of the cells)	Recovery of nickel, cobalt and iron (59% of the pack = 73% of the cells)	Recovery of iron, copper and aluminium (32% of the pack = 45% of the cells)

Figura 13: Principali caratteristiche delle tre tipologie di batterie, per l'intero ciclo di vita

I risultati dello studio (figura 14) in termini di impatto per categorie di indicatori analizzati sono mostrati in figura ponendo al 100% il riferimento (NiCd) per ogni categoria.

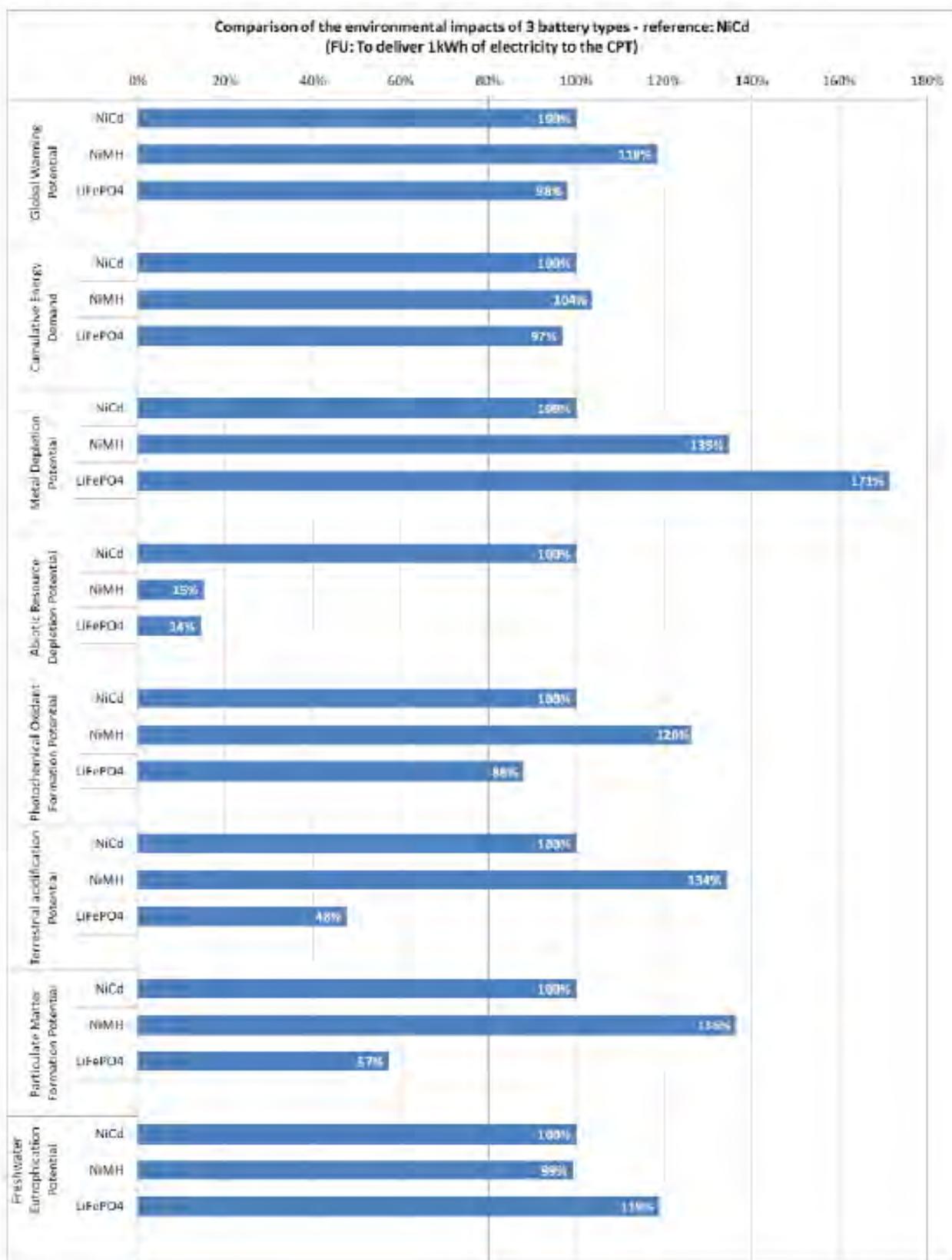


Figura 14: Risultati dell'analisi comparativa per i diversi indicatori (eccetto tossicità). Il riferimento è il NiCd

I risultati per le categorie di tossicità sono di seguito forniti, con il dettaglio sugli orizzonti temporali di breve periodo (ST), 5% del lungo periodo (5% LT) e la restante parte del lungo periodo (95% LT).

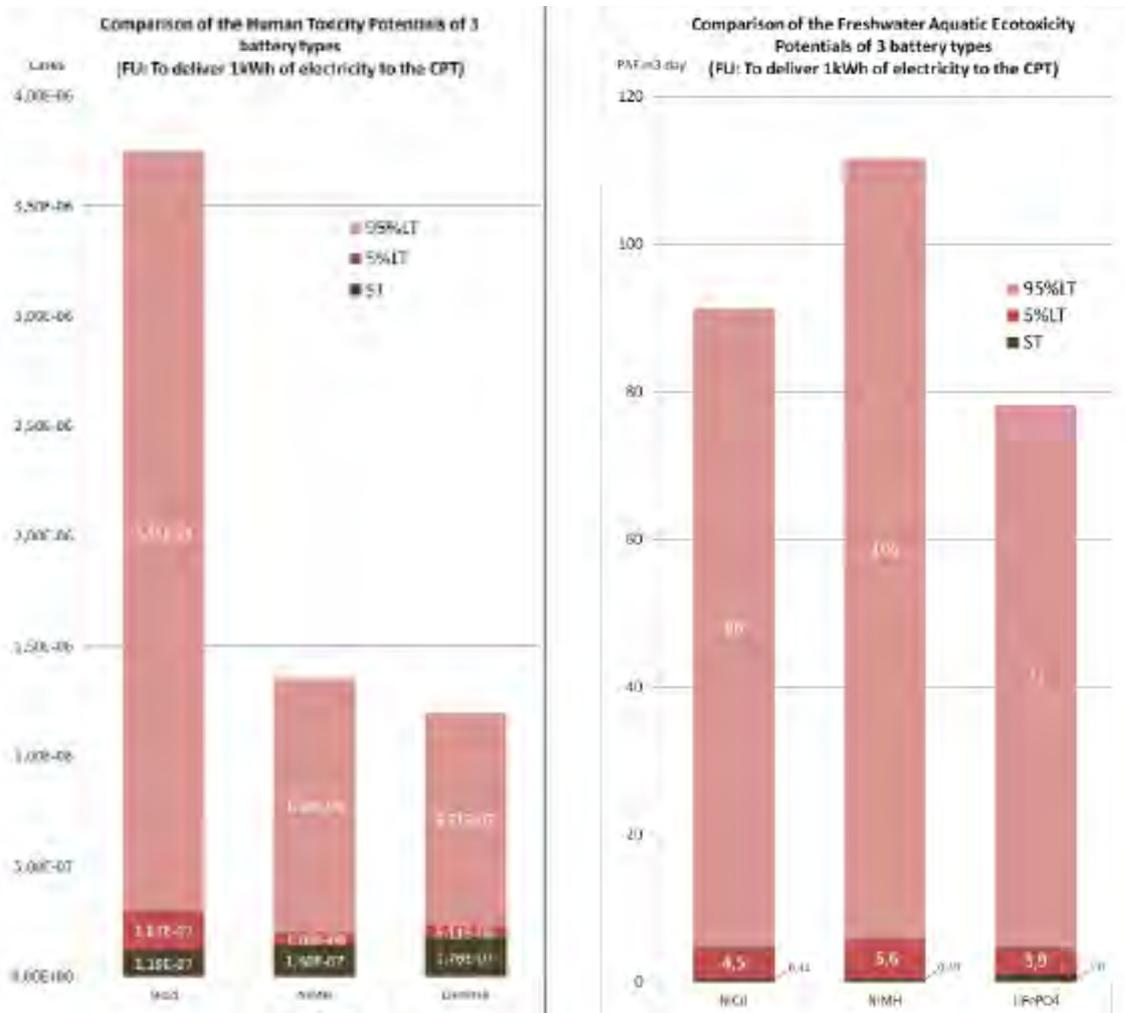


Figura 15: Risultati dell’analisi comparativa per la tossicità umana, a destra, e la tossicità acquatica, a sinistra nel breve periodo (ST), 5% del lungo periodo (5%LT) e restante parte del lungo periodo (95%LT).

Dai risultati si evince che non vi è una chiara gerarchia di migliori prestazioni ambientali tra le batterie analizzate e quindi non ve ne è una preferibile ma alcune indicazioni possono essere fornite in merito a specifici indicatori ambientali. In particolare la cella LiFePO₄ presenta più bassi impatti nella categoria dell’*acidificazione terrestre* e *formazione di particolato* rispetto alle altre due celle che devono il loro impatto in questa categoria alle emissioni di SO₂ correlate alla produzione di Nickel necessario; quest’ultimo aspetto potrebbe essere influenzato dalla variazione dei tassi di raccolta che, grazie al recupero di Nickel, porterebbero ad una diminuzione di produzione dello stesso. La cella Li-ione ha invece più alti impatti per l’eutrofizzazione di acque dolci rispetto alle altre due.

Altro aspetto di rilevanza nella valutazione degli impatti è l’*orizzonte temporale*. Infatti, sul medio termine, per la categoria di *depauperamento dei metalli* (dal metodo ReCiPe) NiCd ha impatti più bassi delle altre due tipologie. Sul lungo termine per la categoria di *depauperamento delle risorse* (dal metodo CML) NiMH e LiFePO₄, aventi impatti tra loro simili, hanno impatti più bassi del NiCd.

Infine per le categorie di *tossicità umana e acquatica*, per il breve/medio termine NiCd e NiMH hanno impatti più bassi del LiFePO₄, mentre per il lungo termine, NiMH e LiFePO₄ hanno impatti più bassi rispetto a NiCd.

Infine lo studio mette in evidenza la necessità di maggiori dati sulle emissioni di metalli in fase di produzione, per rendere più robusti i risultati soprattutto per le categorie di tossicità.

6 Valutazione LCA di batterie al litio

Lo studio di LCA è stato finalizzato a valutare le prestazioni ambientali della produzione di una batteria al litio. Per la valutazione sono stati utilizzati il software SimaPro 8 e il database Ecoinvent 3 (2013), che sono i più recenti disponibili^{m,n}.

Per la valutazione degli impatti è stato utilizzato il metodo IMPACT 2002+ e l'unità funzionale di riferimento è pari ad 1 kg di batterie al Litio.

Il dato scelto come rappresentativo nel database Ecoinvent 3 (2013) include: catodo, anodo e un separatore. Le celle sono divise da un elettrolita (LiPF₆ in etilencarbonato) in atmosfera inerte e provviste di imballo in polietilene. Si tiene conto della quota parte per le infrastrutture ("chemical plant, organics") e dei trasporti, basandosi su stime e standard presenti nel DB scelto.

Nella prima delle seguenti figure ("ad albero") si può osservare il diagramma di flusso che, fatto 100 l'impatto generato dalla produzione della batteria, ripartisce la responsabilità di questo impatto tra le varie componenti che contribuiscono alla realizzazione del prodotto nel suo complesso. Dalla figura si ricava che gli impatti associati alla produzione dell'anodo sono pari al 60% rispetto all'impatto totale e che invece l'anodo contribuisce all'impatto per circa il 24%.

La figura 16 può essere ulteriormente "esplosa" per mostrare gli altri processi che concorrono alla produzione di una batteria a litio secondo quanto descritto nel modulo scelto; alcune rappresentazioni di dettaglio ulteriore sono riportate nel seguito, per mostrare in particolare il contributo agli impatti delle componenti contenenti litio. In ogni caso va specificato che i vari moduli che compongono l'albero a loro volta richiamano ulteriori moduli sempre secondo l'approccio di ciclo di vita (dalla fase di estrazione delle materie prime in poi, a seconda dei confini del sistema rappresentato).

Nelle successive figure si mostrano gli impatti in fase di normalizzazione per categoria di impatto e di danno e per punteggio singolo (categorie di impatto e di danno), valutati secondo il metodo IMPACT 2002+.

Si può notare che la categoria di danno che risente degli impatti maggiori è quella delle patologie respiratorie associate a inalazione di sostanze inorganiche, che va a fornire un forte contributo alla categoria di danno della salute umana. Gli impatti sono dovuti al processo di produzione di rame, necessario per l'anodo, seguito dagli impatti per il consumo energetico.

La categoria della salute umana risulta la prevalente rispetto alle altre tre, aventi lo stesso valore sull'impatto finale. Per la categoria dei cambiamenti climatici, gli impatti sono associati al consumo energetico (come spesso avviene in tale categoria).

Questa valutazione di LCA tiene conto degli impatti associati alla fase di produzione di una batteria a Li-ion ma non tiene conto di quelli associati alle fasi di uso e di fine vita.

Tali impatti, anche secondo quanto valutato dagli studi esposti nel presente rapporto tecnico, dipendono principalmente dal mix energetico che approvvigiona la rete elettrica cui la batteria viene collegata per la ricarica; inoltre, la durata della vita utile della batteria influenza direttamente i rapporti relativi tra gli impatti delle varie fasi del ciclo di vita, in rapporto alla funzione della batteria stessa.

Gli impatti associati alla fase di fine vita sono invece illustrati, oltre che negli studi riportati nel presente rapporto tecnico, anche nel rapporto tecnico d.4.2.

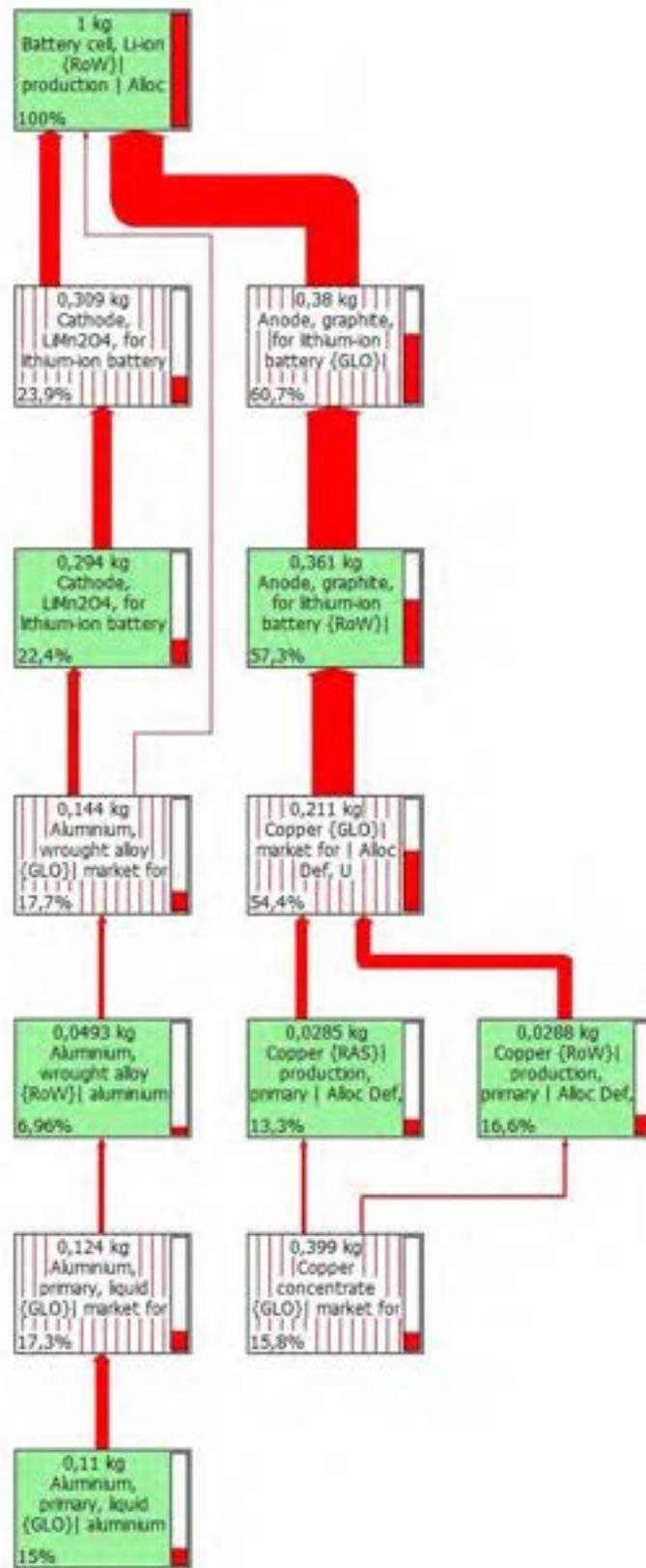


Figura 16: LCA della produzione di una batteria al litio: contributo percentuale dei processi per l'impatto complessivo (metodo IMPACT 2002+)

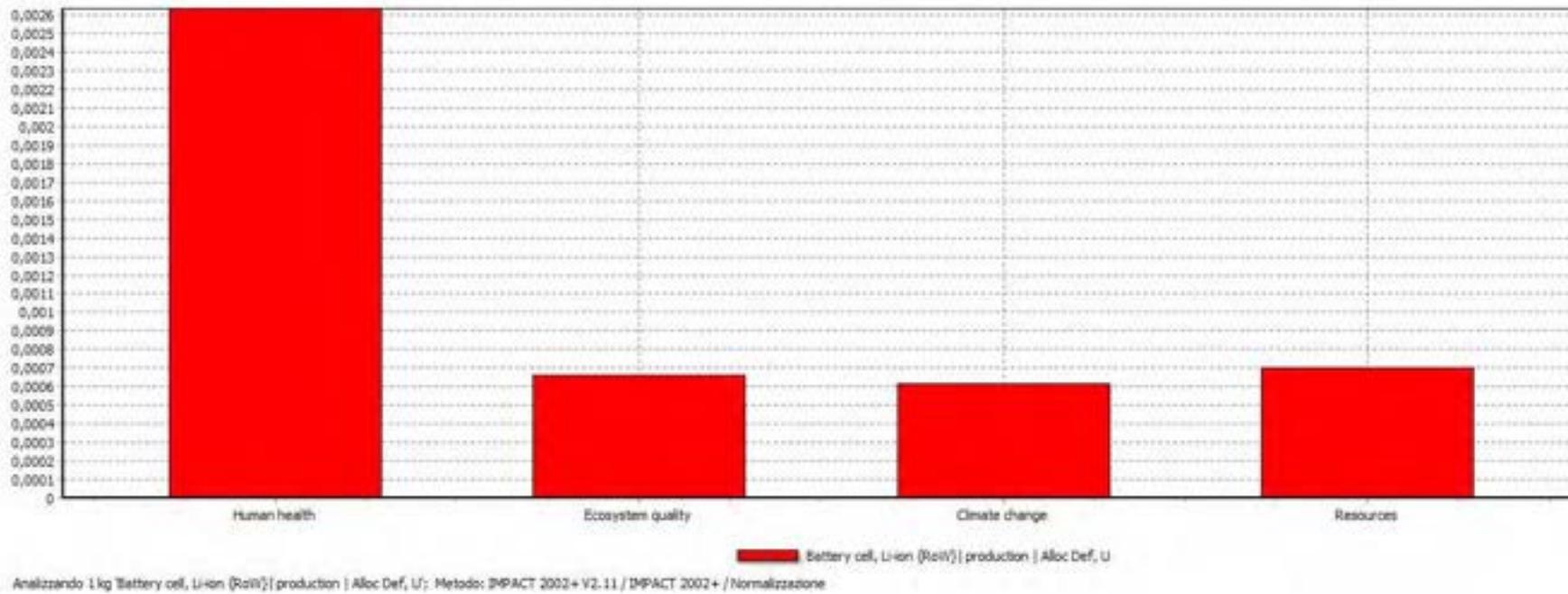


Figura 17: LCA della produzione di una batteria al litio: Normalizzazione per categorie di danno (metodo IMPACT 2002+)

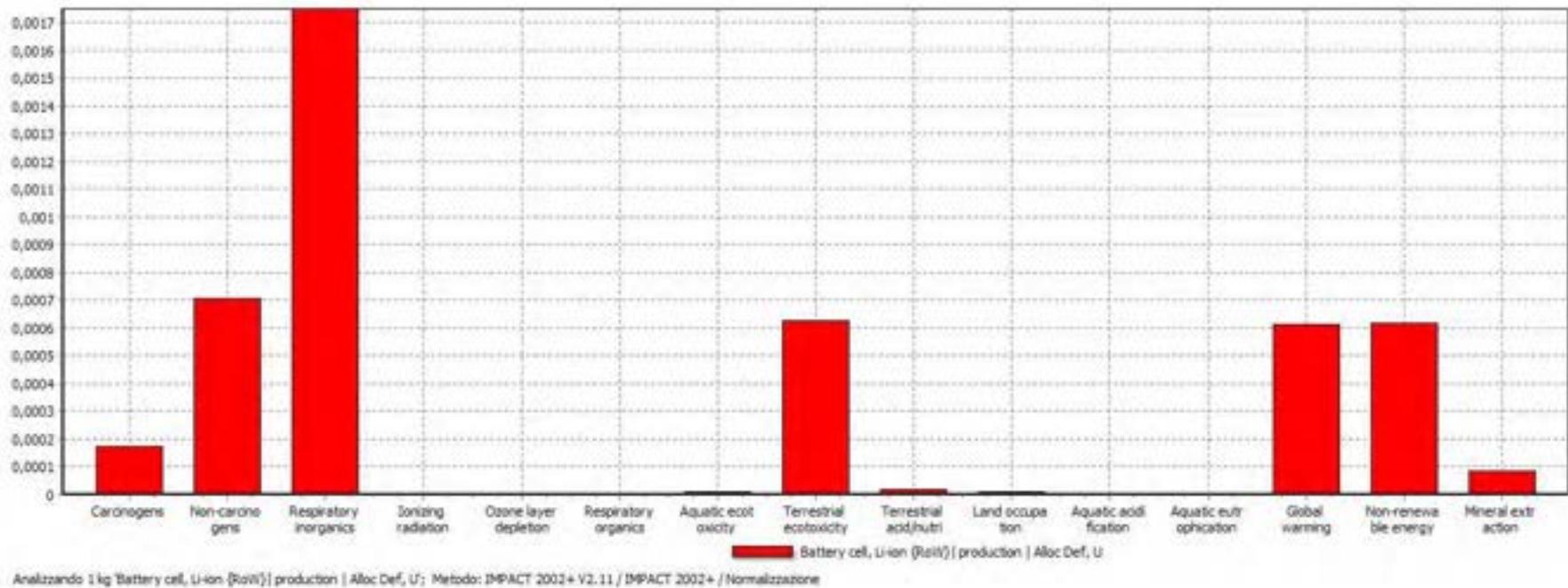


Figura 18: LCA della produzione di una batteria al litio: Normalizzazione per categorie di impatto (metodo IMPACT 2002+)

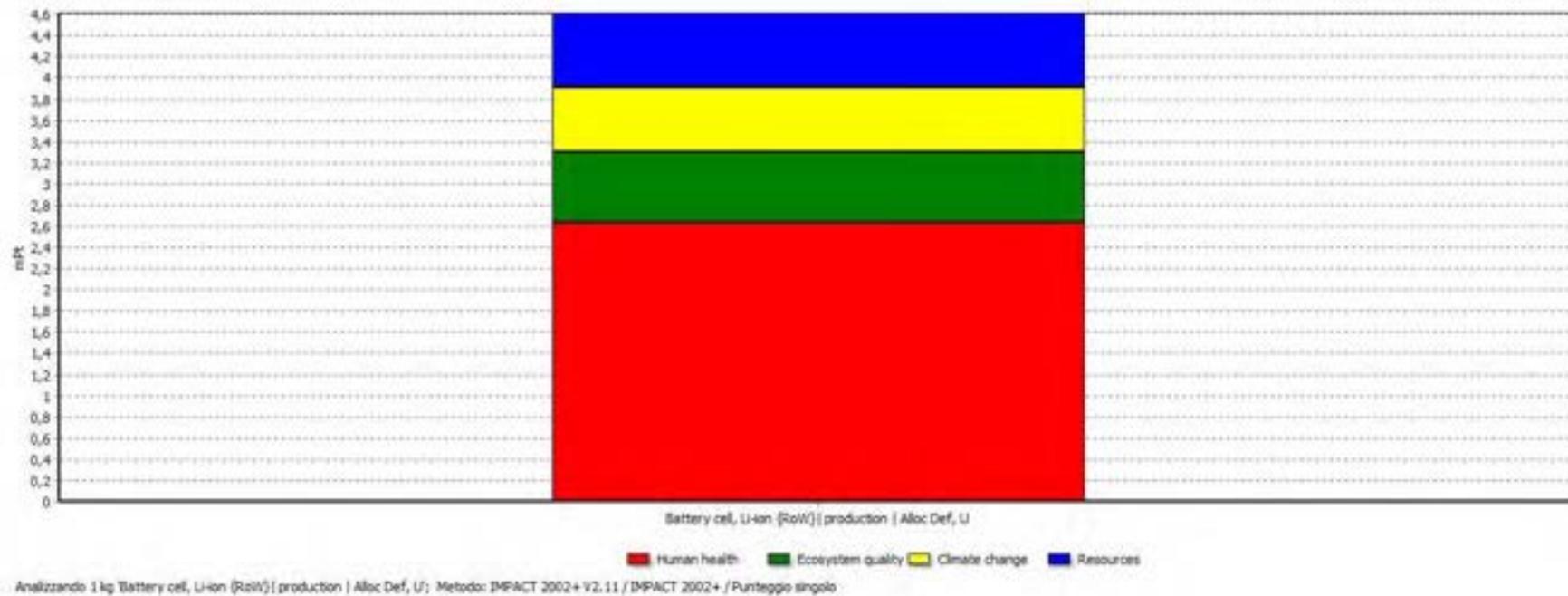


Figura 19: LCA della produzione di una batteria al litio: Punteggio singolo per categorie di danno (metodo IMPACT 2002+)

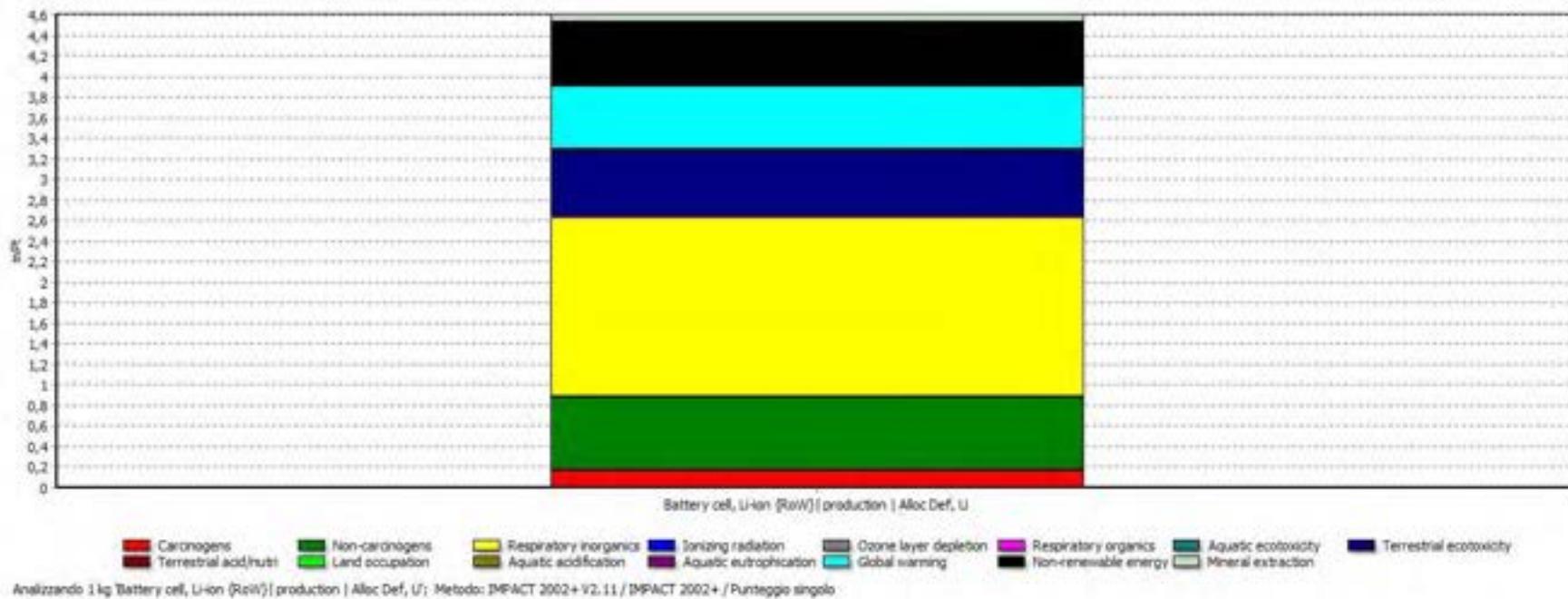


Figura 20: LCA della produzione di una batteria al litio: Punteggio singolo per categorie di impatto (metodo IMPACT 2002+)

La visualizzazione ad “albero” (con cut off del 4%) mostrata nella figura seguente, rende percepibile l'impatto dei processi associati alla produzione del litio, pari al 4% circa rispetto agli impatti totali. I contributi di tali impatti sono associati alle categorie di impatto delle patologie respiratorie per inalazione di composti organici e effetto serra, ovvero nelle categorie di danno relative alla salute umana e ai cambiamenti climatici, di cui si mostrano le immagini relative alla rappresentazione ad albero (figg. 22 e 23 rispettivamente) e da cui si possono evincere i contributi relativi rispetto al totale di danno per ciascuna categoria.

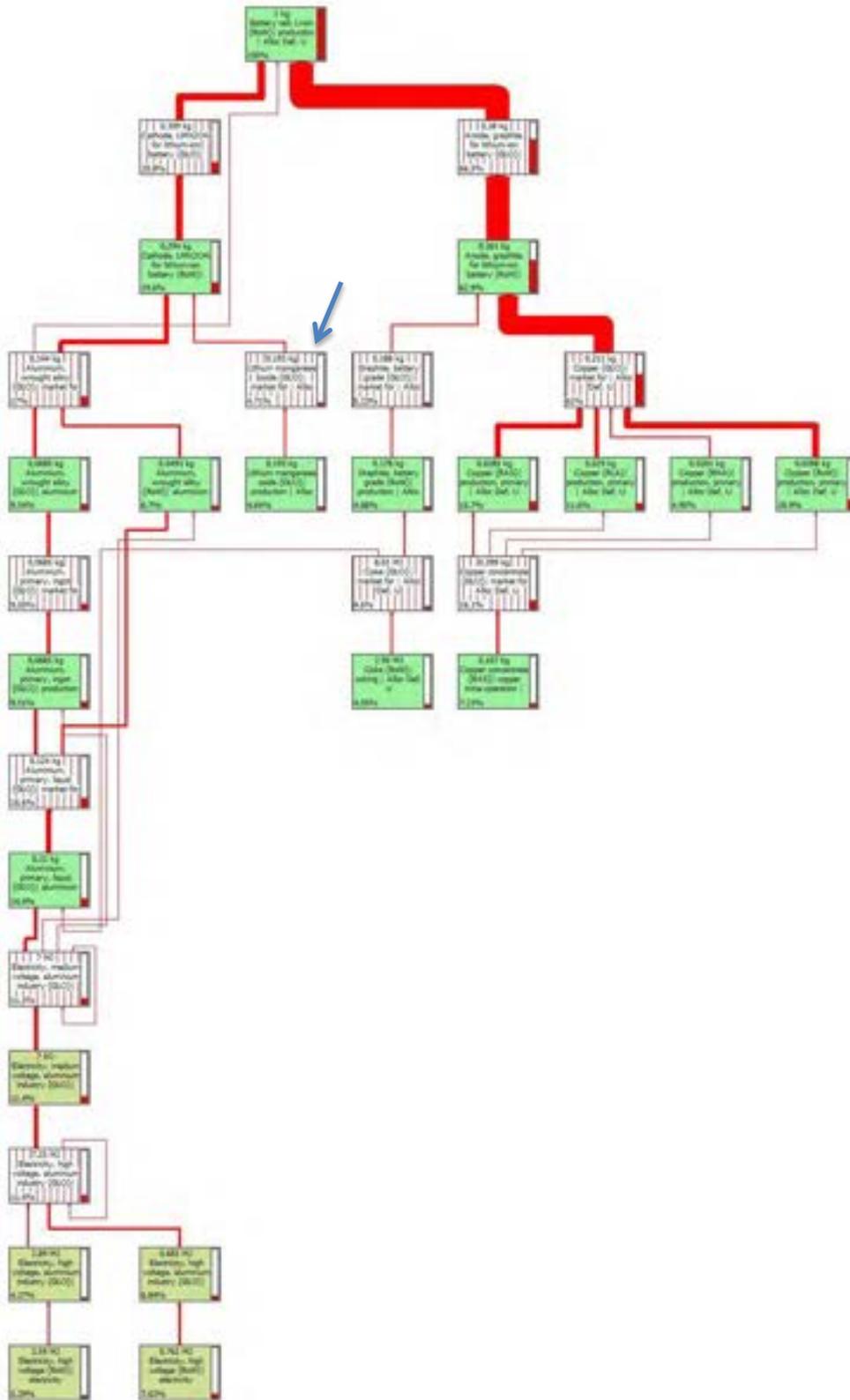


Figura 22: Albero del processo di produzione batterie, normalizzazione per la categoria di danno relativa alla salute umana (cut off 4%), secondo il metodo IMPACT 2002+.

Si mostrano, inoltre, i risultati di una seconda valutazione di impatto dello stesso processo effettuata con il metodo ReCiPe (le cui caratteristiche sono riportate in allegato). La figura seguente mostra la valutazione degli impatti per il punteggio singolo da cui si evince che la categoria con maggiori impatti è quella del depauperamento di risorse, seguita da salute umana e infine da danni all'ecosistema.

Come si evince dal confronto tra la figura 24 (risultati in termini di ecopunto secondo il metodo ReCiPe) e la figura 19 (risultati in termini di ecopunto secondo il metodo Impact 2002+), l'utilizzo di due diversi metodi di valutazione del danno può portare a risultati in parte non coincidenti: secondo il metodo IMPACT 2002+ infatti l'impatto prevalente è relativo alla categoria di danno "salute umana", mentre secondo il metodo ReCiPe l'impatto prevalente è relativo alla categoria di danno "consumo di risorse" e secondariamente dalla "salute umana". Ciò dipende dai vari fattori di caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione che vengono utilizzati nei due metodi che possono portare a risultati anche non coincidenti, però partendo sempre dagli stessi dati di impatto complessivi.

Sovente peraltro i risultati di una LCA si esprimono utilizzando metodi differenti, proprio per valutare la sensibilità del dato.

Nel caso delle batterie al litio inoltre, la letteratura scientifica così come i dati secondari disponibili nelle banche dati, non consentono di avere uno storico sufficiente a dare stabilità ai risultati, né sono ancora disponibili linee guida per la realizzazione di studi di LCA mirati verso questo gruppo di prodotti.

Probabilmente un'indicazione in tal senso dovrebbe arrivare da una attività promossa dalla Commissione europea sulla Product Environmental Footprint (PEF), già citata (§ 5.1) e che presuppone studi LCA, con la realizzazione di alcuni studi pilota finalizzati alla definizione di CR (Category Rules); questa attività è tuttora in corso. Tra i prodotti che sono oggetto della prima fase di consultazione con le parti interessate, avviata nel febbraio 2014, ci sono anche le batterie ricaricabili tra le quali anche le batterie al litio¹.

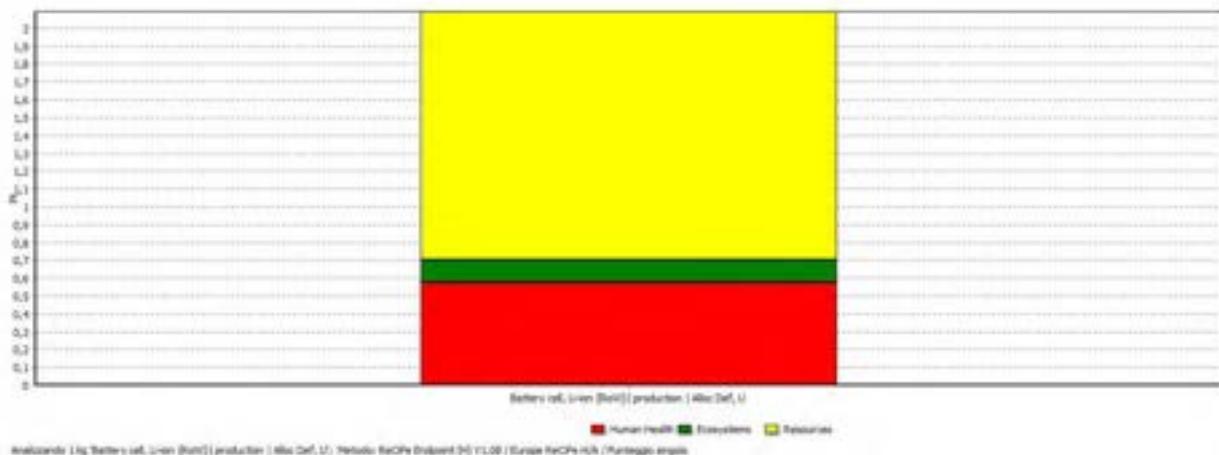


Figura 24: valutazione degli impatti della produzione di batterie, punteggio singolo, metodo ReCiPe.

Il contributo dei processi relativi alla produzione di litio, mostrati nella figura seguente attraverso la rappresentazione ad albero, sono del 2,5% rispetto a quelli totali. I contributi sono soprattutto nelle categorie di impatto di effetto serra², formazione di ossidanti fotochimici, tossicità umana (che

¹ Codice NACE:

- 27.2 Batteries and accumulators
- 27.20.21 Lead-acid accumulators for starting piston engines
- 27.20.22 Lead-acid accumulators, excluding for starting piston engines
- 27.20.23 Nickel-cadmium, nickel metal hydride, lithium-ion, lithium polymer, nickel-iron and other electric accumulators
- 27.20.24 Parts of electric accumulators including separators

² La categoria di impatto di effetto serra fornisce duplice contributo sia alla categoria di danno della salute umana che di danno all'ecosistema.

contribuiscono alla categoria di danno salute umana) e categorie di impatto quali eutrofizzazione, trasformazione del territorio e effetto serra (che contribuiscono a categorie di danno ecosistema). La rappresentazione ad albero delle categorie di danno salute umana ed ecosistema sono nelle due figure successive rispettivamente.

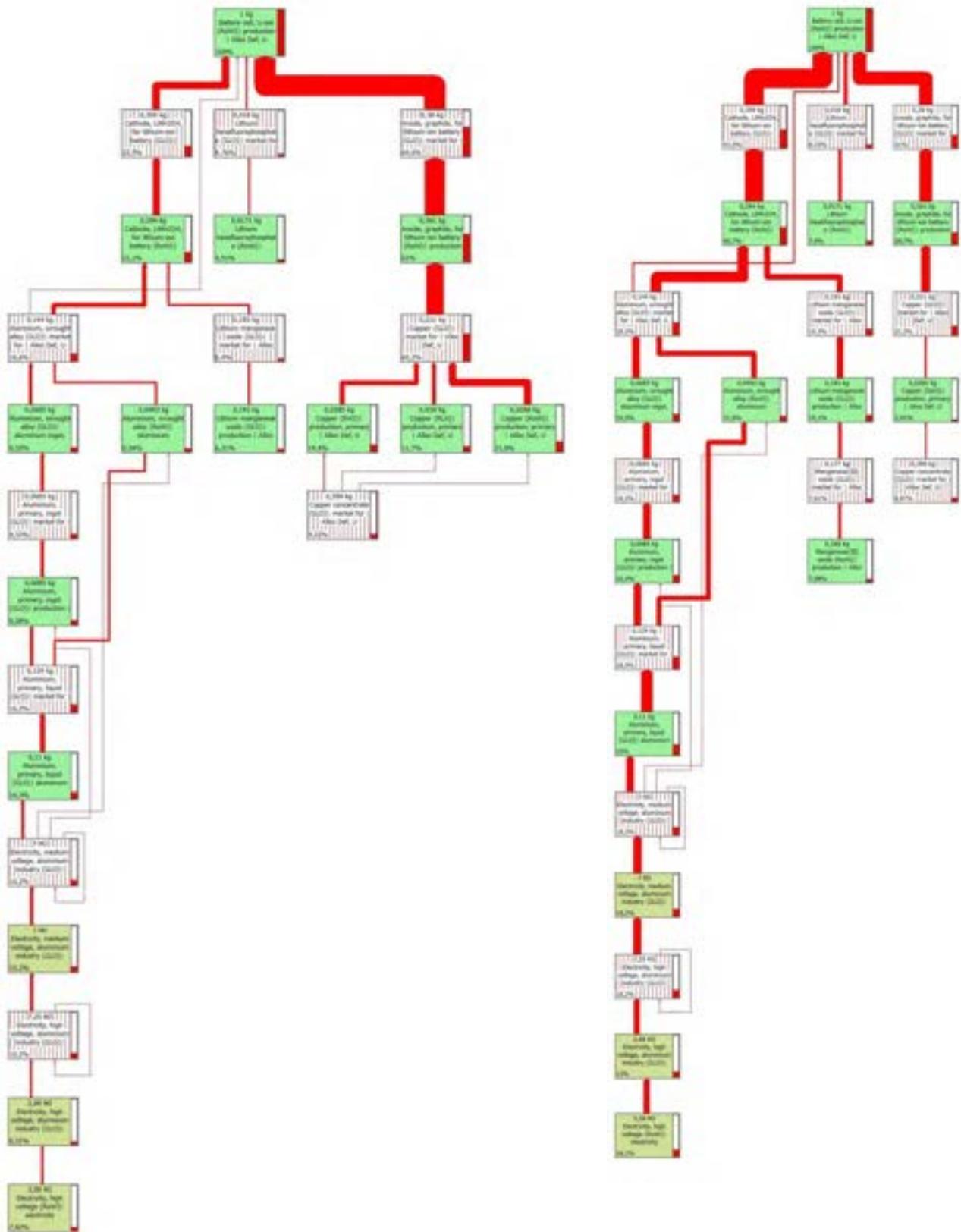


Figura 26: Albero del processo di produzione batterie
 a) normalizzazione per la salute umana secondo il metodo ReCiPe (cut off 4,5%);
 b) normalizzazione per danno all'ecosistema, secondo il metodo ReCiPe (cut off 7).

7 Conclusioni

L'analisi della letteratura scientifica nazionale ed internazionale che si è occupata di condurre valutazioni di LCA su batterie a ioni di litio, consente in sintesi di evidenziare:

- Cellura M., Longo S. Orioli A., Panno D., "Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche", ENEA – MSE, RdS/2012/93

Lo studio mostra che la maggior parte degli impatti ambientali e del consumo di energia in fase di produzione dipendono prevalentemente dalla produzione delle celle, all'aumentare della capacità nominale (e quindi del peso e delle dimensioni) della batteria. Nell'ambito della produzione delle celle i consumi energetici prevalenti sono da attribuire a lito ferro fosfato (che incide, ad es. per l'UF3, per il 40% circa), rame, tetrafluoroetilene, grafite e alluminio (che complessivamente incidono, sempre ad es. per l'UF3, per circa il 50%). Per quanto riguarda gli impatti ambientali della fase di produzione delle celle questi dipendono prevalentemente da tetrafluoroetilene e in misura minore da lito ferro fosfato per quanto riguarda il GWP, sempre da tetrafluoroetilene per l'ODP, da rame, tetrafluoroetilene, grafite, lito ferro fosfato per il POCP, da rame, tetrafluoroetilene e lito ferro fosfato per l'AP, da rame e liti ferro fosfato per l'EP.

- EPA, "Application of life cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles", 2013, EPA 744-R-12-001.

La scelta del materiale attivo per il catodo influisce sui risultati relativi alla salute umana ed alla tossicità; in particolare il LI-NCM risulta avere maggiori impatti rispetto al manganese e al ferro.

IL GWP è una delle poche categorie di impatto in cui le batterie EV mostrano un minore impatto ambientale rispetto PHEV. Tuttavia, il beneficio GWP appare solo quando la rete elettrica si basa meno sul carbone e di più sul gas naturale e fonti rinnovabili. È importante notare, tuttavia, che questo studio e i dati contenuti in un precedente studio suggeriscono che, rispetto a veicoli a combustione interna, vi sono vantaggi significativi sul GWP per entrambi i veicoli elettrici (EV e PHEV), indipendentemente dalla intensità di carbonio del mix energetico.

Anche se la fase di utilizzo della batteria apporta i maggiori impatti ambientali nella maggior parte delle categorie di impatto, le fasi di produzione non sono trascurabili ed anzi sono relativamente importanti per quanto riguarda gli impatti potenziali di eutrofizzazione, riduzione dell'ozono, tossicità ecologica, ed il rischio professionale da cancro e non-cancro. L'estrazione e la lavorazione dei metalli, in particolare l'alluminio e l'acciaio, sono importanti fattori di impatto.

Il recupero dei materiali nella fase di fine vita (EOL) riduce significativamente gli impatti complessivi del ciclo di vita. Ciò è particolarmente vero per i componenti del catodo e della batteria dove sono utilizzati metalli. Pertanto, l'analisi sottolinea l'importanza di limitare l'estrazione del litio vergine, preservando risorse e riducendo gli impatti ambientali.

I risultati della LCA sono sensibilmente influenzati dalla durata della vita utile della batteria. L'analisi di sensitività mostra inoltre che i risultati della LCA variano sensibilmente in funzione della scelta dell'energy mix utilizzato per la ricarica delle batterie, per quanto attiene agli impatti della fase di uso. Lo studio EPA suggerisce una serie di azioni per il miglioramento delle performance ambientali delle batterie Li-ion, sia EV, sia PHEV:

- Aumentare la vita utile delle batterie;
- Ridurre l'uso di cobalto e nichel;
- Ridurre la percentuale in peso di metalli;
- Utilizzare i materiali recuperati per produzione di nuove batterie.

- BIO, "Comparative Life-Cycle Assessment of nickelcadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries", December 2011, European Commission – DG ENV.

Dai risultati di tale studio si evince che non vi è una chiara gerarchia di migliori prestazioni ambientali tra le batterie analizzate e quindi non ve ne è una preferibile, ma alcune indicazioni possono essere fornite in merito a specifici indicatori ambientali. In particolare la cella LiFePO_4 presenta più bassi impatti nella categoria dell'acidificazione terrestre e formazione di particolato rispetto alle altre due

celle e più alti impatti per l'eutrofizzazione di acque dolci rispetto alle altre due. Altro aspetto di rilevanza nella valutazione degli impatti è l'orizzonte temporale.

Lo studio di LCA condotto da ENEA – UTTAMB per valutare le prestazioni ambientali della produzione di una batteria al litio, utilizzando i più recenti software e database disponibili (SimaPro 8 database Ecoinvent 3, 2013) mostra che gli impatti associati alla produzione dell'anodo sono pari al 60% rispetto all'impatto totale, mentre quelli imputabili alla produzione del catodo sono pari a circa il 24%.

In particolare, i risultati della valutazione di impatto effettuata usando il metodo IMPACT 2002+, mostrano che la categoria che risente degli impatti maggiori è quella delle patologie respiratorie associate a inalazione di sostanze inorganiche, che va a fornire un forte contributo alla categoria di danno della salute umana. Gli impatti sono dovuti al processo di produzione del rame, necessario per l'anodo, seguito dagli impatti per il consumo energetico. La categoria della salute umana risulta la prevalente rispetto alle altre. Per la categoria dei cambiamenti climatici, gli impatti sono associati al consumo energetico (come spesso avviene in tale categoria). Il risultato complessivo della valutazione in termini di ecopunto se effettuato secondo il metodo ReCiPe mostra risultati non corrispondenti dal momento che il consumo di risorse risulta la categoria di danno maggiormente colpita, seguita dagli impatti sulla salute umana. Tale risultato, come accennato, dipende dai vari fattori di caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione che vengono utilizzati nei due metodi che possono portare a risultati anche non coincidenti, però partendo sempre dagli stessi dati di impatto complessivi. L'utilizzo di due metodi di valutazione può servire per valutare la sensibilità del risultato, posto che l'ecopunto finale non costituisce il risultato della LCA ma consente solo di avere una sua rappresentazione di sintesi (che contiene al suo interno tutte le assunzioni, le ipotesi e le scelte via via fatte durante lo svolgimento dello studio).

Peraltro, non è possibile effettuare confronti dicotomici tra i vari lavori esaminati poiché le ipotesi di base, i confini del sistema, la stessa unità funzionale non coincidono.

Nel caso delle batterie al litio inoltre, la letteratura scientifica così come i dati secondari disponibili nelle banche dati, non consentono di avere uno storico sufficiente a dare stabilità ai risultati, né sono ancora disponibili linee guida per la realizzazione di studi di LCA mirati verso questo gruppo di prodotti.

Probabilmente un'indicazione in tal senso dovrebbe arrivare da una attività promossa dalla Commissione europea sulla Product Environmental Footprint (PEF), già citata (§ 5.1) e che presuppone studi LCA, con la realizzazione di alcuni studi pilota finalizzati alla definizione di CR (Category Rules); questa attività è tuttora in corso. Tra i prodotti che sono oggetto della prima fase di consultazione con le parti interessate, avviata nel febbraio 2014, ci sono anche le batterie ricaricabili tra le quali anche le batterie al litio³.

³ Codice NACE:

- 27.2 Batteries and accumulators
- 27.20.21 Lead-acid accumulators for starting piston engines
- 27.20.22 Lead-acid accumulators, excluding for starting piston engines
- 27.20.23 Nickel-cadmium, nickel metal hydride, lithium-ion, lithium polymer, nickel-iron and other electric accumulators
- 27.20.24 Parts of electric accumulators including separators

8 Allegato: Il metodo ReCiPe

Nota sul metodo ReCiPe. Creato da RIVM, CML, PRé Consultants, Radboud Universiteit Nijmegen e CE Delft, il metodo offre possibilità di effettuare valutazioni con indicatori midpoint o endpoint e possibilità di valutare secondo 3 prospettive E= ugualitaria, H= gerarchica, I=invidualista). Maggiori info su: www.lcia-ReCiPe.net. Di seguito la classificazione delle categorie di impatto e di danno e i fattori di normalizzazione nel caso scelto di visione gerarchica con i fattori di peso consigliati.

The figure consists of four screenshots of the ReCiPe software interface, showing the configuration of impact assessment parameters. The screenshots are arranged vertically and show the following data:

Screenshot 1: Impact Categories

Categoria d'impatto	Unità di misura	Fattore	Unità di misura
Climate change Human health	1 DALY	1	DALY / DALY
Climate change	1	1	DALY / DALY
Human health	1	1	DALY / DALY
Photochemical oxidant formation	1	1	DALY / DALY
Particulate matter formation	1	1	DALY / DALY
Sonamp radiation	1	1	DALY / DALY

Screenshot 2: Impact Categories

Categoria d'impatto	Unità di misura	Fattore	Unità di misura
Climate change Ecosystems	1 species yr / species of	1	species yr / species of
Terrestrial acidification	1	1	species yr / species of
Freshwater eutrophication	1	1	species yr / species of
Terrestrial eutrophication	1	1	species yr / species of
Freshwater ecotoxicity	1	1	species yr / species of
Marine ecotoxicity	1	1	species yr / species of
Agricultural land occupation	1	1	species yr / species of
Urban land occupation	1	1	species yr / species of
Natural land transformation	1	1	species yr / species of

Screenshot 3: Impact Categories

Categoria d'impatto	Unità di misura	Fattore	Unità di misura
Human health	1 DALY	1	1/1
Ecosystems	1 species yr	1	1/1
Resources	1	1	1/1

Screenshot 4: Normalization Weights

Category	Weight	Unit
Human health	100	1/1
Ecosystems	400	1/1
Resources	300	1/1

9 Riferimenti bibliografici

- ^a ISO (UNI EN) 14040, 2006. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, ISO 14040:2006(E), ISO (International Organization for Standardization), Geneva, Switzerland
- ^b ILCD (International Reference Life Cycle Data System) Handbook: general guide for Life Cycle Assessment and detailed guidance, 2010, JRC European Commission.
- ^c Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003). IMPA New Life Cycle Impact Assessment Methodology. International Journal of Life Cycle Assess 8 (6) 324-334.
- ^d Ricerca sul Sistema Energetico – RSE. “L’accumulo di energia elettrica”, 2011.
- ^e Daniel Hsing Po Kang, Mengjun Chen, Oladele A. Ogunseitan, “Potential Environmental and Human Health Impacts of Rechargeable Lithium Batteries in Electronic Waste” Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 5495–5503.
- ^f European Commission, REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, May 2014.

- ^g Cappellaro F., Masoni P., Buonamici R., “Applicazione della metodologia Life Cycle assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione”, ENEA – MSE, RdS/2011/70
- ^h Cellura M., Longo S. Orioli A., Panno D., “Life cycle assessment di sistemi per le auto elettriche”, ENEA – MSE, RdS/2012/93
- ⁱ EPA, “Application of life cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles”, 2013, EPA 744-R-12-001
- ^j BIO, “Comparative Life-Cycle Assessment of nickelcadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries”, December 2011, European Commission – DG ENV
- ^k ec.europa.eu/environment/eusdd/smgp/pef_pilots.htm
- ^l http://ec.europa.eu/environment/eusdd/smgp/dev_pef.htm
- ^m <http://www.pre-sustainability.com/simapro>
- ⁿ <http://www.pre-sustainability.com/ecoinvent-high-quality-lci-database-integrated-in-simapro>