



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Applicazione della metodologia Life-Cycle Assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione

*Francesca Cappellaro, Paolo Masoni, Roberto Buonamici*

Report RdS/2011/70

APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA LIFE-CYCLE ASSESSMENT  
PER LA VALUTAZIONE ENERGETICO AMBIENTALE BATTERIE PER AUTOTRAZIONE

Francesca Cappellaro, Paolo Masoni, Roberto Buonamici (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile Progetto: Ing. Giovanni Pede, ENEA

## Sommario

1. Introduzione .....	4
2. La metodologia Life Cycle Assessment .....	5
2.1 I problemi ambientali.....	6
2.2 L'LCA secondo le norme ISO 14040 .....	15
2.3 L'ILCD Handbook e Data Network.....	22
3. Applicazioni dell'LCA nel settore automotive .....	24
3.1 Le fasi dell'analisi LCA.....	25
3.2 Esempi di metodologie di valutazione dell'impatto ambientale: criteri ..	27
3.3 Casi studio: metodi, scopi, finalità.....	28
3.4 LCA come supporto all'ecoprogettazione.....	32
3.5 Mobilità elettrica .....	32
4. Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche.....	33
4.1 Stato dell'arte internazionale sulla LCA applicata alle batterie .....	33
4.2 LCA delle batterie per autotrazione. ....	33
4.3 Organizzazione dei dati primari in formato ILCD-compliant.....	35
5. Divulgazione dei risultati delle attività .....	35
6. Conclusioni e sviluppi successivi.....	36

## 1. Introduzione

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

In particolare questo documento si riferisce all'**obiettivo D** del Progetto 3.5 *"Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto"* previsto nel Piano Annuale di Realizzazione Terza annualità (2008-2009), per quanto attiene all'Area "Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica", tematica di ricerca "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici".

Il documento intende descrivere la metodologia utilizzata per la valutazione delle prestazioni energetico – ambientali dei sistemi per l'alimentazione della propulsione elettrica pura che consta nella Valutazione del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA). Oggetto delle attività del progetto è la raccolta dati, la modellazione e la quantificazione del Life Cycle Assessment di batterie per autotrazione di ultima generazione.

Il presente rapporto fornisce un inquadramento di sintesi della metodologia LCA, una descrizione delle principali categorie di impatto quantificate dall'LCA, aspetti specifici relativi al rispetto della normativa vigente (ISO 14040 e 14044) e dei requisiti definiti dall'International reference Life Cycle Sata System (ILCD). La seconda parte contiene una breve rassegna dell'applicazione dell'LCA al settore automotive per poi entrare nel merito della applicazioni a batterie per autotrazione, con una sintesi dei risultati ottenuti nello studio di LCA di batterie a Litio i cui dettagli sono riportati in un rapporto separato.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

**Accordo di Programma MSE-ENEA:** Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

**Piano Triennale 2006-2008**

**Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009):** da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

**Attività:** Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Area di riferimento:** razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

**Tematica di ricerca:** risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

**Progetto 3.5:** studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Obiettivo D:** Life-Cycle Assessment energetico ambientale delle tecnologie suddette

## 2. La metodologia Life Cycle Assessment

La Valutazione del Ciclo di Vita (nota come LCA, Life Cycle Assessment) è conosciuta anche come Life Cycle Analysis, Ecobalance o analisi cradle-to-grave ed è una variante dell'analisi ambientale input-output, incentrata sulle relazioni tecnologiche ed i flussi materiali ad esse imputabili.

L'obiettivo dell'LCA è quello di quantificare l'intera gamma degli impatti ambientali imputabili a un prodotto o a un servizio a causa dei flussi materiali da e verso la natura (risorse estratte ed emissioni). L'LCA permette quindi di confrontare fra loro prodotti diversi con ugale funzione e di identificare gli impatti più rilevanti sul quale concentrare gli sforzi di riduzione. Il termine 'ciclo di vita' si riferisce al fatto che, per effettuare una valutazione imparziale ed "olistica", occorre eseguire un'indagine complessiva del problema prendendo in considerazione tutto il ciclo di vita del prodotto: dalla produzione di materie prime, alla fabbricazione, distribuzione, uso e smaltimento, compreso il trasporto e il consumo di energia.

L'insieme di queste macrofasi viene comunemente detto percorso "from cradle to grave", ossia "dalla culla alla tomba".

La quantificazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche, detti "input" e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci, detti "output". In particolare l'LCA valuta anche i "risparmi ambientali" dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, al riciclo o alla termovalorizzazione del prodotto considerato. Infatti, è proprio grazie all'identificazione di criticità ambientali, in gergo "bottleneck" cioè "colli di bottiglia", che si può mirare all'ottimizzazione dei processi e dell'uso delle risorse.

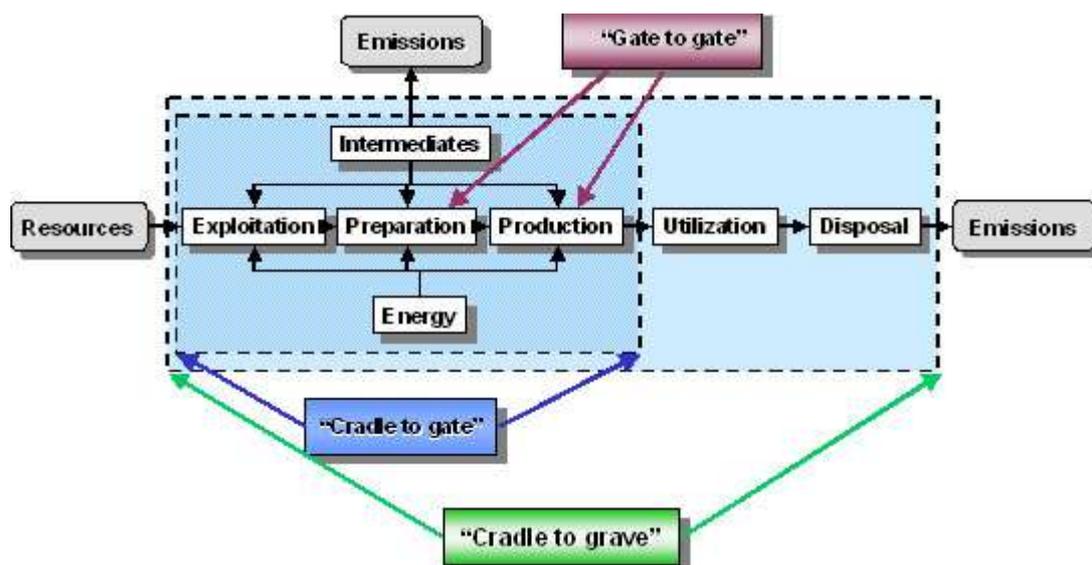
Il sopra citato approccio "from cradle to grave" favorisce una descrizione accurata degli impatti ambientali del sistema in studio nell'LCA.

La scelta di seguire l'oggetto dello studio dalla culla alla tomba è dettata principalmente da due ragioni: in primo luogo, una singola operazione industriale può apparentemente essere resa più efficiente e "più pulita" trasferendo l'inquinamento in altri comparti ambientali, così che i benefici derivanti da queste azioni vengono controbilanciati da problemi generati altrove, senza conseguire nel complesso alcun reale miglioramento; in secondo luogo tale approccio permette di passare da una tipologia di studio tipica dell'ingegneria tradizionale, focalizzata sull'efficienza dei singoli sistemi produttivi, ad una visione globale dell'intera catena produttiva.

Si possono distinguere varie tipologie di LCA sulla base del tipo di dati a disposizione, della loro qualità e dello scopo per il quale lo studio viene eseguito. Inoltre a seconda dello scopo e degli obiettivi dello studio, l'LCA può essere condotta più o meno dettagliatamente. Le strategie semplificative possono riguardare la limitazione degli obiettivi, la riduzione della quantità di dati richiesti o il restringimento dei confini del sistema.

In quest'ultimo caso le semplificazioni introdotte producono degli studi di LCA definiti come segue:

- "from cradle to gate" (dalla culla al cancello): lo studio inizia con l'approvvigionamento delle materie prime e delle fonti di energia e si conclude con l'immissione del prodotto finito sul mercato, escludendo quindi la fase di utilizzo e di smaltimento dello stesso;
- "from gate to gate" (dal cancello al cancello): lo studio analizza unicamente la realtà aziendale, quindi comprende le fasi di fabbricazione e assemblaggio del prodotto.



**Figura 1 : Schema di sintesi di vari approcci di uno studio LCA.**

Recentemente si è diffuso anche un approccio del tipo "from cradle to cradle" (McDonough&Braungart, 2002) che comprende anche la rivalorizzazione del prodotto a fine vita attraverso il recupero di energia e materiali, nell'ottica di diminuire progressivamente la quantità di rifiuti da inviare allo smaltimento in discarica. Conferire valore intrinseco a un qualsiasi prodotto a fine vita vuol dire promuovere ogni attività di recupero, reimpiego e riciclaggio, considerando lo smaltimento finale in discarica una fase residuale da attuare in condizioni di massima sicurezza che arrechi il minor danno possibile all'ambiente.

Nella pratica, chi conduce l'LCA col fine di progettare o riprogettare un prodotto ecosostenibile non è interessato tanto alle quantità dettagliate, quanto piuttosto alle differenze tra le possibili alternative di progettazione in esame. Inoltre la progettazione di un processo o di un prodotto attraversa varie fasi prima di arrivare alla sua conclusione e non è detto che l'LCA relativa ad esso debba essere compiuta solo alla fine, poiché tale analisi può essere importante anche nelle fasi intermedie di progettazione per indirizzare le scelte dei progettisti. In queste fasi non sarà naturalmente possibile eseguire uno studio completo visto che il prodotto o processo in esame è ancora in fase di definizione.

## 2.1 I problemi ambientali

Negli ultimi anni le organizzazioni mondiali hanno sviluppato la consapevolezza che l'ambiente è un bene prezioso e il suo continuo impoverimento e sfruttamento creano danni enormi alla popolazione mondiale. L'allarme per le questioni ambientali non riguarda soltanto le implicazioni sulla vita del pianeta, ma anche quella di natura economica. Negli anni dal 2000 al 2004 gli indennizzi assicurativi per eventi climatici hanno raggiunto una media di 17 milioni di dollari l'anno 5 volte più alta del dato rispetto al quadriennio 1996-1999 (UNDP 2007)

I cambiamenti climatici hanno un impatto negativo anche sulla perdita di biodiversità, il degrado delle risorse idriche e la diffusione di epidemie. Un'ulteriore prova che gli ecosistemi in tutto il mondo continuano ad essere sovra-utilizzati viene dalla pubblicazione del rapporto dell'ONU "Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report" (2005). Inoltre recenti studi collocano il costo delle inefficienze energetiche, dell'uso delle risorse e delle esternalità ambientali, a seconda dei paesi tra il 10 e il 15 % del PIL, con continua tendenza all'aggravio.

Nei consumi particolarmente significativi nella determinazione degli impatti sono il settore alimentare, il settore delle costruzioni e anche il settore dei trasporti. Negli ultimi anni è andato sempre più affermandosi il ruolo dell'Life Cycle Assessment, come metodologia che permette di valutare i potenziali impatti dei prodotti, servizi e in generale di sistemi considerando tutte le fasi della loro vita, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento finale.

Attraverso la Valutazione del Ciclo di Vita, vengono individuati gli effetti ambientali potenziali del sistema oggetto dello studio; infatti l'analisi di LCA non svolge una determinazione puntuale delle emissioni inquinanti in un preciso istante temporale e in un preciso sito, inoltre esistono ancora incertezze nelle conoscenze scientifiche relative ai meccanismi causa-effetto dell'inquinamento globale.

Ciascun effetto ambientale è inoltre caratterizzato da una diversa e specifica sfera di influenza (globale, regionale o locale), come rappresentato in tabella. In particolare, esistono alcuni effetti, come l'eutrofizzazione, la tossicità ecologica e umana, ecc. che presentano una forte dipendenza dalle condizioni del corpo ricevente.

<b>SCALA</b>	<b>EFFETTO</b>
<b>Globale</b>	effetto serra impoverimento dell'ozono stratosferico diminuzione delle risorse non rinnovabili
<b>Regionale</b>	acidificazione del suolo eutrofizzazione formazione di smog fotochimico tossicità cronica (ambientale e umana)
<b>Locale</b>	tossicità acuta (ambientale e umana) degradazione dell'area disturbi di tipo fisico (traffico, rumori)

**Tabella 1: Principali effetti ambientali e scala d'influenza.**

In questo paragrafo sono descritti i principali problemi ambientali e le relative categorie d'impatto ambientale che sono maggiormente considerate negli studi LCA<sup>1</sup>:

- diminuzione delle risorse (abiotiche e biotiche);
- cambiamenti climatici in riferimento al riscaldamento globale
- impoverimento dell'ozono stratosferico<sup>2</sup>;
- acidificazione del suolo;
- formazione di smog fotochimico;
- arricchimento in nutrienti (eutrofizzazione);
- tossicità umana;
- eco-tossicità;
- uso del territorio.

<sup>1</sup> Categorie d'impatto proposte dalla SETAC-Europe: Second Working Group on LCIA (WIA-2) (International Journal of LCA 4 (3) 167-174 (1999)).

<sup>2</sup> La stratosfera è la regione atmosferica che va da 10 a 50 km di quota.

### **2.1.1 Diminuzione delle risorse**

Considerando la categoria "risorse" nella sua globalità, è necessario effettuare una distinzione netta: quella tra le risorse intrinsecamente rinnovabili, anche definite risorse flusso (acqua, aria, energia solare, energia eolica, risorse biotiche<sup>3</sup>) e le risorse non rinnovabili, denominate risorse stock (combustibili fossili e minerali, sabbia, ghiaia, risorse del territorio in generale).

Con il graduale aumento della conoscenza della loro disponibilità fisica, queste risorse diventano riserve note all'umanità e quindi sfruttate. Naturalmente è chiaro che il volume globale della riserva di una risorsa è limitato rispetto all'effettiva disponibilità fisica in tutta la litosfera. Nell'ottica di uno sviluppo sostenibile la diminuzione delle riserve, delle risorse flusso e delle risorse stock assume un'importanza primaria e dipende soprattutto dalla loro grandezza fisica e dal loro grado di impiego (nell'indice di questa categoria è ragionevole considerare risorse il cui esaurimento potrebbe accadere in un periodo di cento anni). La diminuzione delle risorse è calcolata come somma di valori dimensionali che fuoriescono dal seguente rapporto:

$$D = \text{materia prima utilizzata [kg]} / \text{produzione annuale materia [kg]}$$

Questo indicatore è stato però costruito senza tener presente la riserva della specifica materia prima, ignorando quindi il concetto della limitatezza della risorsa. Un approccio più rigoroso consiste nel confrontare il consumo di risorse con il rapporto riserve/produzione:

$$D = Ci / Ri / Pi$$

dove:

Ci rappresenta il consumo della risorsa considerata;

Ri rappresenta l'ammontare delle sue riserve;

Pi è la produzione annuale della risorsa.

In realtà D offre una stima della disponibilità delle riserve in maniera compatibile con i livelli attuali di consumo e produzione.

### **2.1.2 Riscaldamento globale**

Il meccanismo noto come "effetto serra" è causato dalla capacità di assorbimento della radiazione infrarossa riemessa dal suolo terrestre dei gas atmosferici (chiamati anche gas serra). Questo comportamento provoca il surriscaldamento di tutto il globo terrestre a causa dell'aumento di temperatura<sup>4</sup> che si verifica negli strati più bassi dell'atmosfera.

I gas serra più importanti sono l'anidride carbonica, il metano, l'ozono troposferico<sup>5</sup> e il vapore acqueo; tra questi è la CO<sub>2</sub> a destare le maggiori preoccupazioni poiché il suo continuo aumento di concentrazione deriva principalmente dalla combustione dei combustibili fossili e dalla distruzione della foresta pluviale dei tropici.

---

<sup>3</sup> Le risorse biotiche comprendono fauna, flora, animali in estinzione, ma in genere sono poco usate negli studi LCA.

<sup>4</sup> Gli scienziati della IPCC (*International Panel on Climate Change*) hanno stimato un aumento della temperatura media del Pianeta intorno a 0,4°C per decennio.

<sup>5</sup> La troposfera è la regione atmosferica compresa tra la superficie terrestre e circa 10km di quota.

Nell'ultimo secolo le attività antropiche industriali hanno fortemente disturbato il ciclo naturale della CO<sub>2</sub> in quanto l'enorme impiego di carbone e petrolio ha provocato l'immissione in atmosfera di tonnellate di CO<sub>2</sub>, facendone aumentare la concentrazione di oltre 1,25 ppm all'anno.

Oltre ai già citati gas, gas serra minori sono: il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O), i Cloro-Fluoro-Carburi (CFC) e i gas correlati (Idro-Cloro-Fluoro-Carburi, HCFCs).

Gli effetti principali del riscaldamento medio globale sono lo spostamento delle fasce climatiche con una velocità superiore alla capacità di adattamento della vegetazione e i conseguenti eventi meteorologici estremi quali alluvioni, tempeste e siccità che potrebbero portare ad un innalzamento del livello del mare, nei prossimi cento anni, di circa 70 centimetri. Le zone aride e i deserti rischiano di aumentare tanto che l'acqua potrebbe diventare un bene raro.

L'indicatore di questa categoria di impatto è espresso in kg di CO<sub>2</sub>-equivalenti, ed è determinato dal potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential - GWP). Questo potenziale determinato dalla IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) è stato calcolato considerando sia l'attitudine del gas serra ad assorbire radiazioni infrarosse, sia il tempo di permanenza del gas in atmosfera. Il GWP è quindi la misura, basata sulla concentrazione e sul periodo di esposizione, del potenziale contributo che una sostanza arreca all'effetto serra, rispetto a quello provocato dalla stessa quantità di anidride carbonica (Tabelle 2 e 3). Ad esempio, se si vuole standardizzare l'emissione di y kg di metano, basterà utilizzare il relativo GWP, che vale 62, ottenendo: y\*62 kg di CO<sub>2</sub>-equivalenti.

In genere il GWP è valutato per diversi periodi di esposizione, "tempi-orizzonte", normalmente pari a 20, 100, 200 anni.

Il Global Warming Potential complessivo sarà dato dalla seguente relazione:

$$GWP = \sum GWP_i * m_i$$

dove:

GWP<sub>i</sub> è il potenziale di riscaldamento globale della sostanza i-esima,

m<sub>i</sub> è la massa della stessa sostanza, espressa in kg.

<b>Categoria d'impatto</b>	<b>Sostanza</b>	<b>GWP a 20 anni [kgCO<sub>2</sub> equival.]</b>
Effetto serra	CO <sub>2</sub>	1
	NH <sub>3</sub>	< 1
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	20

**Tabella 2: Alcuni valori di GWP.**

<b>Categoria d'impatto</b>	<b>Sostanza</b>	<b>GWP a 20 anni [kg CO<sub>2</sub> equival.]</b>
Effetto serra	CFC R-11	4000
	CFC R-12	8100
	HCFC R-22	1500
	HFC R-134a	1300

**Tabella 3: Alcuni valori di GWP per i CFC, HCFC, HFC.**

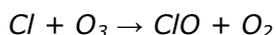
Come si nota dalla tabella 3 i Cloro-Fluoro-Carburi mostrano elevati indici di GWP dovuti essenzialmente alla loro elevata vita atmosferica, lunga anche centinaia di anni, come nel caso del CFC-115, pari a 1700 anni.

### **2.1.3 Impoverimento dell'ozono stratosferico**

L'ozono ( $O_3$ ) è presente in atmosfera con una concentrazione notevolmente variabile che va dai 50 ppb a suolo a circa 5 ppm in stratosfera. Nonostante la sua bassa concentrazione, l'ozono stratosferico è un costituente di fondamentale importanza per la vita sulla Terra. Infatti è in grado di assorbire efficacemente la radiazione solare ultravioletta con lunghezza d'onda compresa fra 0,2 e 0,3  $\mu m^6$ , letale per le forme di vita terrestri.

L'esposizione eccessiva dell'uomo alla radiazione ultravioletta aumenta il rischio di cancro alla pelle, di depressione del sistema immunitario, di danni alla vista e la frequenza di dolorosi casi di eritema negli individui di pelle bianca. Sugli ecosistemi l'assottigliamento della fascia di ozono minaccia l'equilibrio alimentare oceanico e marino, causa una riduzione dell'azoto atmosferico che influisce sui raccolti agricoli, aumenta la frequenza di piogge acide e smog ed arreca un rapido degrado a diversi materiali<sup>7</sup>.

I principali responsabili della rottura delle molecole di ozono, composti molto stabili che raggiungono inalterati la stratosfera, sono i clorofluorocarburi (CFC) e gli idroclorofluorocarburi (HFC); questi ultimi sono detti halons<sup>8</sup> e comunemente usati come sostanze antincendio. In particolare le molecole di  $CFCl_3$  e  $CF_2Cl_2$  raggiungono stabilmente la stratosfera dove, per azione della radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda pari a 0,23  $\mu m$ , si scindono e liberano atomi di cloro. L'atomo di cloro interagisce con l'ozono secondo la reazione:



Dando luogo a una specie instabile, che si chiama ipoclorito (ClO) e a ossigeno molecolare. La molecola di ipoclorito appena formata, reagendo con ossigeno atomico, si dissocia rapidamente perché molto instabile e libera nuovamente atomi di cloro, pronti a distruggere altre molecole di ozono e molecole di ossigeno molecolare. Un singolo atomo di cloro può arrivare a rompere fino a diecimila molecole di ozono prima di tornare sulla troposfera, sottoforma di acido.

L'indice costruito per questa categoria d'impatto è il potenziale di riduzione dell'ozono (Ozone Depletion Potential-ODP) da parte della World Meteorological Organization (WMO). Per gli ODP la sostanza di riferimento è il  $CFCl_3$ , anche conosciuto come CFC-11 (Tabella 4).

Come nel caso dei GWPs, anche qui il potenziale complessivo, espresso in kg di CFC-11 equivalenti, sarà dato dalla seguente relazione :

$$ODP = \sum ODP_i * m_i$$

dove:

$ODP_i$  è il potenziale di diminuzione dello strato di ozono del gas considerato,

$m_i$  è la massa del generico gas rilasciato, espressa in kg.

---

<sup>6</sup> L'intervallo spettrale che ha  $\lambda$ : 0,2 – 0,3  $\mu m$  è denominato banda di Hartley. In particolare l' $O_3$  stratosferico assorbe circa il 99% della radiazione solare con  $\lambda < 0,32 \mu m$ .

<sup>7</sup> Effetti elencati dalla United Nations Environment Program.

<sup>8</sup> La quarta Conferenza delle Parti del Protocollo di Montreal (Copenaghen, 1992) ha stabilito il divieto di produzione degli halons e dei CFC a partire dal 1/1/1994.

Esistono però ancora incertezze sul fenomeno dell'impoverimento dell'ozono stratosferico; infatti, pur essendo riconosciuto l'effetto dannoso dell'NO<sub>2</sub> e dell'N<sub>2</sub>O, non è mai stato possibile determinarne i relativi ODP, perché non sono ancora chiari alcuni meccanismi di causa-effetto.

<b>Categoria d'impatto</b>	<b>Sostanza</b>	<b>ODP a 20 anni [kg CFC-11 equival.]</b>
<b>Diminuzione strato di ozono</b>	<b>CFCI</b>	<b>1</b>
	<b>CFCICFCI<sub>2</sub></b>	<b>0,59</b>
	<b>CCl<sub>4</sub></b>	<b>1,23</b>

**Tabella 4: Alcuni valori di Ozone Depletion Potential.**

#### **2.1.4 Acidificazione del suolo**

L'acidificazione è quel fenomeno che si genera in seguito all'emissione nel suolo di particolari composti che hanno la capacità di rilasciare protoni; ne consegue l'abbassamento del pH di terreni agricoli, falde acquifere, laghi e foreste. Anche le costruzioni, i monumenti e i materiali in genere riportano danni rilevanti in seguito alle deposizioni acide. Vistosi effetti di acidificazione si sono registrati in Scandinavia e in alcune regioni europee centro-orientali. Essendo un impatto ambientale regionale, l'acidificazione dipende molto dalla natura degli ecosistemi riceventi, quindi risulta particolarmente complesso valutare tutti i meccanismi che la generano.

I composti responsabili dell'acidificazione sono quelli che, con l'intervento di catalizzatori (per esempio ossidi di ferro e umidità), riescono a generare ioni idrogeno (H<sup>+</sup>), come SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>x</sub>.

La sostanza di riferimento per la standardizzazione è l'anidride solforosa (SO<sub>2</sub>).

L'indice costruito è il Potenziale di Acidificazione (Acidification Potential - AP), espresso in kg di SO<sub>2</sub> equivalente (Tabella 5).

Il potenziale di acidificazione del sistema in esame è dato dalla seguente relazione, analoga a quella per il GWP e l'ODP:

$$AP = \sum AP_i * m_i$$

dove per un generico gas:

AP<sub>i</sub> è il potenziale di acidificazione della sostanza rilasciata,

m<sub>i</sub> è la massa della sostanza, espressa in kg.

<b>Categoria d'impatto</b>	<b>Sostanza</b>	<b>AP [kg SO<sub>2</sub> equival.]</b>
Acidificazione	SO <sub>2</sub>	1
	NO <sub>3</sub>	1,88
	NO <sub>x</sub>	0,7

**Tabella 5: Alcuni valori di AP.**

#### **2.1.5 Formazione di smog fotochimico**

Lo smog fotochimico (Photosmog) costituisce una manifestazione dell'inquinamento atmosferico in ambiente urbano e suburbano. Il termine si riferisce ad un miscuglio di inquinanti, fra i quali predominano gli ossidi di azoto, l'ozono, l'ossido di carbonio, aldeidi e

idrocarburi, che si forma nella bassa atmosfera per azione della luce solare sulle emissioni derivanti dalle attività umane.

L'espressione "smog fotochimico" è stata coniata per analogia con lo "smog" convenzionale; anche quest'ultimo interessa le aree urbane, ma è formato prevalentemente da anidride solforosa, composti parzialmente combustibili e particolato carbonioso, e si manifesta prevalentemente intorno all'alba nella stagione invernale.

Nello smog fotochimico la luce solare fornisce l'energia di attivazione per numerose reazioni chimiche, di conseguenza esso assume intensità massima nel periodo estivo e nelle ore intorno a mezzogiorno.

In sintesi il fenomeno si articola in quattro fasi:

1. reazione tra i composti organici volatili (COV) e i radicali idrossidi (OH) per formare radicali-perossidi organici;
2. reazione dei radicali perossidi (ad esempio  $\text{CH}_3\text{OO}$ ) con monossido di azoto (NO) per formare  $\text{NO}_2$ ;
3. reazione del biossido di azoto, in presenza di raggi solari ( $\lambda=0,43 \mu\text{m}$ ) per formare NO e atomi di ossigeno;
4. reazione degli atomi di ossigeno con le molecole di ossigeno ( $\text{O}_2$ ) per formare ozono.

Durante la seconda fase l' $\text{NO}_2$  può anche reagire con i radicali perossidi e portare alla formazione del perossiacetil-nitrato (PAN) e del perossibenzoil-nitrato (PBzN), molecole altamente irritanti.

I disturbi generati da questo smog, legati essenzialmente alla presenza di ozono, PAN e PBzN negli strati bassi dell'atmosfera, sono irritazione agli occhi, problemi occasionali o cronici all'apparato respiratorio e danni agli alberi e alle coltivazioni (rallentamento della crescita e morte delle piante).

Sebbene lo smog fotochimico sia stato studiato prevalentemente in ambiente urbano, di recente si sono riscontrati processi analoghi in vaste regioni tropicali e subtropicali, determinati dai gas emessi dai periodici incendi delle erbe della savana. In queste aree il fenomeno è favorito dalla radiazione solare che può portare, attraverso le complesse reazioni, ad un livello ozono cinque volte superiore al valore normale.

L'indicatore di conversione utilizzato è il potenziale di formazione di smog fotochimico (*Photochemical Ozone Creation Potentials - POCP*), espresso in kg di etilene ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) equivalente. Il sistema in esame avrà un potenziale di formazione di smog fotochimico derivante dalla seguente relazione:

$$POCP = \sum POCP_i * m_i$$

dove:

$POCP$  è il potenziale di formazione di ozono fotochimico relativo al gas rilasciato,  
 $m_i$  è la massa del gas rilasciato, espressa in kg.

Questo metodo prevede però fattori di equivalenza solo per i COV.

### **2.1.6 Eutrofizzazione**

L'eutrofizzazione, detta anche fertilizzazione, è un processo di arricchimento di sostanze nutritive di un ambiente acquatico, per mutazione naturale o favorito da scarichi urbani, agricoli e industriali, che spesso determina uno sviluppo anormale di alghe. Le sostanze di cui si

parla sono in particolare fosforo e azoto e sono dette "biostimolanti". Questo fenomeno si verifica soprattutto nei laghi e nei fiumi a corso molto lento, dove queste sostanze tendono progressivamente a concentrarsi. Il graduale accumulo, che si sviluppa in modo naturale (tutte le acque che giungono al corpo d'acqua contengono sostanze nutritive derivanti dal dilavamento del terreno, dalla presenza di organismi, ecc.), è stato esasperato dall'uomo con l'immissione, in modo massiccio e concentrato nel tempo, di grandi quantità di sostanze contenute nelle acque di rifiuto, oltre che nei fertilizzanti utilizzati in agricoltura.

Nel corpo d'acqua recettore si instaura allora una reazione a catena: le alte concentrazioni favoriscono la crescita, in particolare durante il periodo estivo, di grandi quantità di plancton, costituito specialmente da microalghe. Con le sfavorevoli condizioni climatiche del periodo invernale (scarsa luminosità, bassa temperatura), la flora acquatica formata in gran parte muore, precipita sul fondo del corso d'acqua e si decompone inducendo l'assorbimento di forti quantitativi di ossigeno.

Si instaura così un deficit di ossigeno, cioè si sviluppano condizioni anaerobiche che si estendono costantemente in tutta la massa liquida provocando gravi sconvolgimenti nell'equilibrio biologico dell'ecosistema. In particolare si liberano sostanze tossiche (come ammoniaca e idrogeno solforato) con conseguenti morie di pesci ed altri organismi che esigono un ambiente aerobico e si solubilizzano di nuovo le sostanze nutritive alla base del ciclo. Contemporaneamente l'acqua tende a intorbidirsi, limitando la trasmissione della luce in profondità e peggiorando ulteriormente la situazione. Alcuni effetti negativi dell'eutrofizzazione sono:

- aumento della biomassa di fitoplancton
- sviluppo di specie tossiche di fitoplancton
- aumento della quantità di alghe gelatinose (mucillagini)
- aumento delle piante acquatiche in prossimità dei litorali
- aumento della torbidità e del cattivo odore dell'acqua
- diminuzione della quantità di ossigeno disciolto nell'acqua
- diminuzione della diversità biotica
- scomparsa di alcune specie ittiche pregiate (ad esempio i salmonidi).

Per contrastare l'eutrofizzazione sono necessari interventi che riducano gli afflussi di nutrienti ai corpi idrici (riduzione dei fertilizzanti in agricoltura, depurazione degli scarichi civili ed industriali, trattamento delle acque di scolo delle colture tramite agenti sequestranti ed impianti di fitodepurazione). Si ritiene che il riscaldamento globale contribuirà a peggiorare il fenomeno dell'eutrofizzazione; il riscaldamento delle acque superficiali infatti fa diminuire la solubilità dei gas (e quindi anche dell'ossigeno).

L'entità del processo di eutrofizzazione dipende fortemente dalla qualità di partenza dell'acqua e dalla natura del corpo idrico; per questo motivo risulta molto complessa la risoluzione della componente spaziale nell'applicazione dell'indicatore specifico della categoria.

La standardizzazione di tale fenomeno si effettua utilizzando un indice che misura l'attitudine delle diverse sostanze emesse a favorire lo sviluppo di biomassa.

Con lo stesso approccio visto per le altre categorie, è stato costruito un potenziale di eutrofizzazione (*Nutrition Potential - NP*), espresso in kg di ione fosfato equivalente (Tabella 6).

Il sistema avrà un potenziale di eutrofizzazione globale dato dalla sommatoria dei diversi NP, come mostra la seguente relazione:

$$NP = \sum NP_i * m_i$$

dove:

$NP_i$  è il potenziale di eutrofizzazione della generica sostanza,

$m_i$  è la massa della rispettiva sostanza.

<b>Categoria d'impatto</b>	<b>Sostanza</b>	<b>NP [kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equival.]</b>
Eutrofizzazione	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1
	NOx	0,13
	NH <sub>4</sub>	0,33

**Tabella 6: Alcuni valori di NP.**

### **2.1.7 Tossicità umana**

Per tossicità umana si intende un fenomeno fortemente complesso riguardante l'esposizione dell'uomo a composti chimici e biologici nocivi per le cellule del suo corpo.

Ad esempio una sostanza altamente tossica per l'uomo è il monossido di carbonio (CO); se respirato anche in piccole quantità il CO si lega all'emoglobina formando un complesso detto carbossi-emoglobina. L'emoglobina, molecola complessa del sangue che ha il compito di trasportare l'ossigeno, si ritrova così a veicolare il CO in tutte le cellule del corpo umano. In un ambiente chiuso l'aumento repentino di CO (dovuto ad esempio ad una stufa che non funziona bene) ha effetti mortali.

Esistono poi sostanze tossiche che si accumulano lungo tutta la catena alimentare perché non sono né degradate né metabolizzate e giungono ad organismi di ordine superiore. E' il caso dei Poli-Cloro-Bifenili (PCB)<sup>9</sup> che possono arrivare all'uomo, ad esempio, dopo l'ingestione involontaria di pesce contaminato. I PCB si depositano nel tessuto adiposo e possono procurare dermatiti, danni al fegato e ai reni e, benché non sia stata accertata la loro cancerogenicità, vi è il sospetto che siano anche potenzialmente oncogeni.

Questa categoria di impatto è complessa e non esiste ancora una metodologia condivisa. In letteratura sono stati sviluppati diversi metodi che hanno preso in considerazione il tempo di permanenza degli inquinanti nell'ambiente, la loro tossicità rispetto al tempo di esposizione (basandosi su funzioni dose-effetto) e il loro effetto tossicologico. Il dibattito scientifico, sia in sede ISO che in sede SETAC, ha riguardato la possibilità di introdurre indicatori di categoria sulla salvaguardia nella catena cause-effetto, tra cui il numero di anni di vita persi, noto come YLL (*Years of Life Lost*), il numero di anni di vita con disabilità, noto come YLD (*Years Lived Disabled*) e il numero di anni di vita per rimediare alle inabilità, noto come DALY (*Years Disability Adjusted Life*).

<sup>9</sup> Fino al divieto di produzione i PCB sono stati utilizzati come liquido di isolamento e raffreddamento in trasformatori e condensatori, come additivo, lubrificante e plastificante in masse di sigillatura, lacche, materie plastiche e carta.

### **2.1.8 Eco-tossicità**

La eco-tossicità interessa gli ecosistemi, acquatici e terrestri, esposti a sostanze chimiche e biologiche nocive. Il destino di questi inquinanti nell'ambiente dipende da:

- bioaccumulazione,
- tassi di degradazione (anaerobica e aerobia, idrolitica e fotolitica),
- deposizione,
- evaporazione.

Generalmente l'ecotossicità è espressa come la percentuale di specie di piante che vivono in una certa area in condizioni ambientali mutate, ovvero in condizioni di stress dell'ecosistema.

### **2.1.9 Uso del territorio (Land use)**

Il degrado del territorio, nel quale sono inclusi anche disturbi di tipo fisico quali il traffico, il rumore e gli odori, rappresenta una categoria d'impatto piuttosto vasta per la quale sono ancora in atto elaborazioni di standardizzazione.

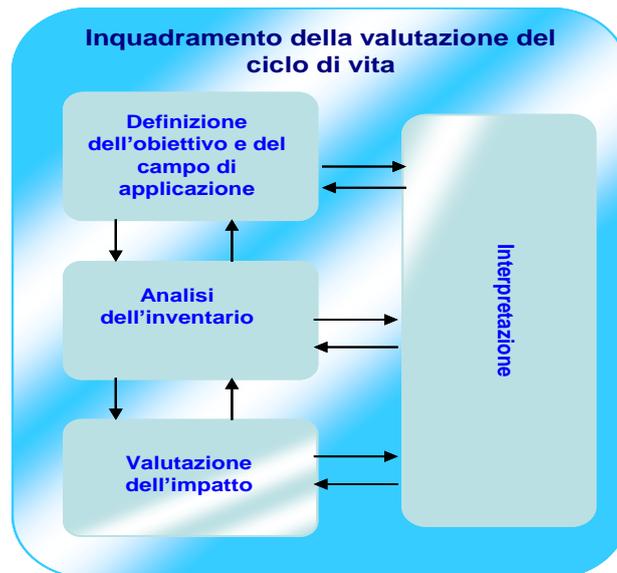
Gli effetti di un inopportuno uso del territorio consistono nel deterioramento del suolo (erosione, eventuali rischi di frane), nella lenta distruzione degli ecosistemi e nella perdita di qualità ambientale nel paesaggio.

## **2.2 L'LCA secondo le norme ISO 14040**

La normativa di riferimento nel campo della valutazione LCA è la serie ISO (UNI EN) 14040 (2006) elaborata dal Comitato Tecnico ISO/TC 207 "Environmental management" SC 5 "Life cycle assessment" e in Italia pubblicate dall'UNI. Le norme hanno l'obiettivo di sistematizzare il processo di valutazione degli effetti che un prodotto può avere sull'ambiente nell'intero suo ciclo di vita. In particolare la serie ISO 14040 fornisce un quadro generale delle pratiche, delle applicazioni e delle limitazioni dell'LCA e descrive attraverso una procedura step-by-step i requisiti e le linee guida per la preparazione, la gestione e la revisione critica di un LCA.

La norma ISO 14040 standardizza la metodologia LCA suddividendola in quattro fasi principali:

1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema (Goal and scope definition).
2. Redazione e analisi dell'inventario (Inventory analysis) – compilazione di un inventario completo dei flussi in ingresso (materiali, energia, risorse naturali) e in uscita (emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti) che siano rilevanti per il sistema definito.
3. Valutazione degli impatti ambientali (Life cycle impact assessment) – valutazione dei potenziali impatti ambientali diretti e indiretti, associati a questi input e output e della loro significatività.
4. Interpretazione dei risultati e analisi di miglioramento (Interpretation and improvement analysis) – analisi dei risultati delle due fasi precedenti e definizione delle possibili linee di intervento.



**Figura 2: Schema sintetico della metodologia LCA (ISO 14040, 2006).**

### **2.2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio**

La prima fase di uno studio LCA consiste nella dichiarazione degli obiettivi e delle motivazioni dello studio e nella definizione dell'oggetto dell'analisi e dei confini del sistema.

L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità le motivazioni per le quali si realizza lo studio, quale sarà l'applicazione prevista per i suoi risultati ed il tipo di pubblico a cui è destinato. Nella definizione del campo di applicazione si deve descrivere il sistema oggetto dello studio ed elencare le categorie di dati da considerare in esso. Tale definizione deve essere fatta con cura per assicurare che l'ampiezza, la profondità e il dettaglio dello studio siano compatibili con l'obiettivo che ci si è prefissi di conseguire.

Essendo poi la LCA una tecnica iterativa, a volte può essere necessario modificare il campo di applicazione a seguito di informazioni supplementari raccolte nel corso del lavoro, allo scopo di soddisfare l'obiettivo originale dello studio.

E' evidente che questa prima fase delinea notevolmente le linee di svolgimento dell'analisi e può portare a significativi cambiamenti dei risultati.

Al fine di comprendere in che maniera nella metodologia LCA vengono scelti i confini del sistema, è utile riportare le definizioni di sistema di prodotto e unità di processo fornite dalla norma ISO 14040.

Per sistema di prodotto si intende un insieme di unità di processo interconnesse da flussi di prodotti intermedi che rappresentano una o più funzioni definite, in cui con il termine funzione si indica una caratteristica prestazionale del sistema. La descrizione di un sistema di prodotti comprende le unità di processo, i flussi elementari e i flussi di prodotti che oltrepassano i confini del sistema, nonché i flussi intermedi dentro il sistema.

Le unità di processo sopra citate sono la più piccola parte di un sistema di prodotto per la quale sono stati raccolti i dati nel corso della Valutazione del Ciclo di Vita. Sono collegate tra loro da flussi di prodotti intermedi (materiali di base, semilavorati) e/o rifiuti da trattare e sono collegate con altri sistemi di prodotti e con l'ambiente da flussi elementari in input (materie prime, energia) e in output (radiazioni, emissioni in aria, acqua, suolo).

La suddivisione di un sistema di prodotti in unità di processo rende più facile l'identificazione delle entità in ingresso e in uscita da esso. La sua descrizione comprenderà dunque quella delle

unità di processo, dei flussi elementari e dei flussi di prodotti che oltrepassano i confini del sistema nonché quella dei flussi intermedi interni al sistema stesso.

La descrizione iniziale delle unità di processo considerate è fondamentale per definire innanzitutto dove ha inizio ogni sistema di prodotti in termini di ricevimento di materie prime e prodotti intermedi, ma anche per la definizione della natura delle trasformazioni e delle operazioni che si svolgono al suo interno. Inoltre, poiché una unità di processo genera a sua volta altre entità in uscita come risultato delle sue attività, il suo confine sarà dunque determinato dal livello di dettaglio richiesto per soddisfare l'obiettivo dello studio.

Infine poiché il sistema considerato è un sistema fisico, ogni unità di processo deve soddisfare le leggi di conservazione di massa ed energia e perciò la validità della descrizione dell'unità di processo potrà essere controllata proprio attraverso un bilancio di massa ed energia.

Per una descrizione chiara di un sistema di prodotti può essere molto utile l'uso di un diagramma di flusso di processo, che permette di illustrare rapidamente quali sono le unità di processo considerate.

Gli studi di LCA devono essere condotti mediante lo sviluppo di modelli descrittivi degli elementi chiave di un sistema fisico. La scelta degli elementi del sistema fisico da introdurre nel modello dipenderà dalla definizione dell'obiettivo e dal campo di applicazione dello studio. Infatti non sarebbe pratico né utile studiare tutte le relazioni tra le unità di processo di un sistema di prodotti o quelle tra un sistema di prodotti e l'ambiente. Ovviamente è necessario specificare le ipotesi alla base delle semplificazioni introdotte e descrivere i modelli utilizzati nell'analisi.

Nella descrizione del campo di applicazione di una LCA si deve specificare con chiarezza quali sono le funzioni del sistema in analisi, ovvero le caratteristiche prestazionali del sistema di prodotti o dei sistemi nel caso di studi comparativi.

Allo scopo di quantificare le suddette funzioni si utilizza l'**unità funzionale**, definita dalla norma ISO 14040 come:

*"Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento in uno studio di Valutazione del Ciclo di Vita. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati della LCA, che risulta critica quando si valutano sistemi differenti perché ci si deve assicurare che il confronto venga fatto su base comune".*

In definitiva l'unità funzionale costituisce il riferimento a cui tutti i dati dello studio in ingresso e in uscita saranno rapportati, perciò essa deve essere chiaramente definita e misurabile.

Va sottolineato che i confronti tra sistemi devono essere effettuati sulla base della medesima funzione e quantificati attraverso la stessa unità funzionale.

I confini di un sistema di prodotto identificano le unità di processo da includere nel sistema in cui si costruisce il modello e devono essere scelti in maniera tale che tutti i flussi in ingresso e in uscita siano flussi elementari. La scelta dei confini, il livello di aggregazione dei dati e il modello scelto per il sistema del sistema devono essere coerenti con l'obiettivo dello studio.

Quando non c'è sufficiente tempo, dati o risorse per condurre uno studio completo, si può decidere di escludere delle unità di processo dalla composizione del modello. In questo caso qualunque decisione di eliminare fasi del ciclo di vita, processi o flussi in ingresso o in uscita deve essere chiaramente indicata e giustificata.

### **2.2.2 Analisi di inventario - LCI**

La redazione dell'inventario (Life Cycle Inventory – LCI) è il cuore di un'analisi LCA. In questa fase vengono riportati tutti i flussi di energia e di materia del sistema/prodotto in esame normalizzati all'unità funzionale. Questi flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e comprendono l'utilizzo di risorse e di energia e tutti i rilasci in aria, in acqua e nel suolo associati al sistema.

Nell'inventario devono essere inclusi i dati raccolti per ognuna delle unità di processo comprese nei confini del sistema. La qualità dei dati raccolti ed usati nella fase di inventario è propedeutica alla qualità finale dello studio LCA. La raccolta di informazioni deve rispondere a criteri di completezza, precisione, rappresentatività, coerenza e riproducibilità. Un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio di massa per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output. E' necessario descrivere dettagliatamente la qualità dei dati per poter successivamente operare confronti fra studi su sistemi analoghi. Tale descrizione deve definire alcuni parametri quali:

- Fattori relativi ad area geografica, tecnologia e periodo temporale di riferimento.
- Precisione, completezza e rappresentatività dei dati.
- Incertezza dell'informazione.

Durante la raccolta è opportuno usare un consistente numero di fonti come altri studi di LCA, banche dati internazionali o disponibili in software, dati provenienti dalla letteratura, proceedings di convegni e congressi, informazioni disponibili in internet e dati raccolti sul campo presso aziende e industrie.

I dati misurati direttamente dall'autore presso siti industriali sono definiti **dati primari** (primary data) mentre quelli ricavabili da letteratura e da banche dati sono **dati secondari** (secondary data) di cui è bene controllare la fonte, la data di pubblicazione. Nella fase di inventario si raccolgono i dati di processo anche per l'energia utilizzata nel sistema produttivo (energia elettrica, idrocarburi) e nel sistema di trasporto. Allo stato attuale, il problema della qualità dei dati rappresenta ancora il punto critico della metodologia del ciclo di vita, poiché esistono sia troppi dati di natura confidenziale, sia differenze consistenti se si paragonano banche dati su uguali processi produttivi. La situazione è delicata, poiché le realtà aziendali non sempre possiedono dati accurati dei propri processi e soprattutto i dati disponibili spesso non sono catalogati in maniera funzionale all'uso degli stessi in un'analisi del ciclo di vita.

Il procedimento per condurre un'analisi di LCA è iterativo, man mano che i dati vengono raccolti, i confini iniziali del sistema potrebbero essere revisionati in accordo con i criteri stabiliti nel campo di applicazione.

La definizione dei confini del sistema e l'assegnazione degli input e output ai vari sottosistemi del processo non è sempre semplice da operare. Per agevolare l'indagine LCA, è opportuno suddividere il processo in una serie di sotto-sistemi in cui vengano correttamente assegnati gli input e output, in modo che riflettano le relazioni fisiche insite tra i flussi e i differenti prodotti. Una volta individuati i flussi in ingresso ed in uscita dal sistema si passa all'aggregazione di questi, tenendo presente che le categorie di dati dovrebbero essere aggregate solo se si riferiscono a sostanze equivalenti e ad impatti ambientali simili.

Una analisi di inventario si basa essenzialmente sulla capacità di correlare delle unità di processo all'interno di un sistema con flussi elementari di materiali ed energia. Tuttavia in realtà sono davvero pochi i processi industriali che producono un solo flusso in uscita o che

sono fondati sulla linearità tra materie prime in ingresso e in uscita. Nella maggior parte dei casi, infatti, i processi industriali comportano più di un prodotto, senza contare che alcuni prodotti intermedi o di scarto possono essere riciclati e riutilizzati come se fossero materie prime. La conseguenza di tutto ciò è che i flussi di materiali ed energia, nonché i rilasci nell'ambiente ad essi associati, dovranno essere ripartiti nel sistema di prodotto considerato. Tale processo prende il nome di **allocazione** e dovrà essere documentato e giustificato per ognuna delle unità di processo considerate e dovrà essere condotto secondo procedure chiaramente definite.

Le procedure di allocazione, che dovrebbero approssimare meglio possibile le relazioni che sussistono tra i flussi in ingresso e in uscita, possono basarsi sulle proprietà fisiche (ad esempio in base al peso o al volume dei vari prodotti) oppure sul valore economico di ciascun prodotto. Se possibile il processo di allocazione dovrebbe essere sempre evitato, ad esempio mediante la divisione delle unità di processo da allocare in due sottoprocessi e collegando i dati in ingresso e in uscita relativi a tali sottoprocessi, oppure tramite l'espansione del sistema in modo che quest'ultimo includa funzioni aggiuntive relative ai coprodotti.

### **2.2.3 Valutazione degli impatti**

Lo scopo della terza fase è di valutare la portata degli impatti ambientali del sistema trasformando ogni flusso di sostanze della tabella di inventario in un contributo agli impatti stessi mediante gli indicatori di impatto. Questa valutazione parte dalla matrice di base dell'inventario, cioè il complesso bilancio materiale ed energetico in uscita dalla LCI, e permette di ottenere risultati di più immediata comprensione che serviranno per individuare le criticità ambientali e i conseguenti miglioramenti ambientali da apportare al sistema oggetto dello studio.

Il metodo alla base della valutazione degli impatti consiste nell'associare quantitativamente tutti i consumi delle risorse e i rilasci ambientali a determinate categorie d'impatto (eutrofizzazione delle acque, formazione di smog fotochimico, impoverimento dell'ozono stratosferico, ecc.) che saranno successivamente stimate assegnando loro un peso fino a giungere alla determinazione dell'indicatore ambientale finale, somma degli indicatori delle singole categorie d'impatto.

La valutazione degli impatti si articola in quattro momenti principali:

#### **1. Classificazione**

Durante la classificazione si identificano le categorie d'impatto attribuendo le emissioni inquinanti e i consumi di materie prime, energia ed acqua alle specifiche categorie da essi provocati.

#### **2. Caratterizzazione**

Nella fase di caratterizzazione si moltiplica la quantità di una certa sostanza (dato presente nella tabella d'inventario) per un indicatore della sua relativa attitudine o incidenza a provocare quella determinata categoria d'impatto. Generalmente questo indicatore riguarda una sostanza presa a riferimento, emblematica per quella categoria. Ad esempio, per l'effetto serra, la sostanza di riferimento è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), e si esprimono i contributi di tutti i gas serra in kg di CO<sub>2</sub> equivalente. Dire che il metano ha un potenziale effetto serra pari a 21 kg di CO<sub>2</sub> vuol dire che un kg di metano ha un'incidenza sull'effetto serra pari a 21 kg di CO<sub>2</sub>. L'impatto totale sull'effetto serra del prodotto analizzato sarà dato dalla somma di tutti i contributi dei gas serra espressi in

kg di CO<sub>2</sub> equivalenti. Grazie alla classificazione e alla caratterizzazione si riduce notevolmente il numero di voci dell'inventario giungendo ad un numero limitato (in genere si considerano da otto a dieci effetti ambientali) che rappresenta il "profilo ambientale" (o "eco-profilo") del sistema prodotto.

### **3. Normalizzazione**

Terminate le fasi di classificazione e caratterizzazione e ottenuto l'eco-profilo, si passa al terzo step: la normalizzazione. Le norme ISO la definiscono così: "*Calcolo dell'entità dei risultati di indicatore di categoria in rapporto all'informazione di riferimento.*" Infatti, una volta quantificati i differenti indicatori, risulta ancora complesso interpretare l'effettiva grandezza delle varie categorie d'impatto, essendo espresse in unità di misura diverse. Normalizzare vuol dire allora dividere la quantità calcolata di una categoria d'impatto per la quantità totale della stessa categoria che si verifica in uno specifico arco temporale e in una determinata zona. Si ottengono così degli indici sintetici, grazie ai quali si può effettivamente comprendere a quale categoria d'impatto il sistema contribuisce maggiormente. I risultati normalizzati mostrano i problemi ambientali generati dal ciclo di vita di un prodotto secondo il loro "ordine di grandezza". Solo con la normalizzazione si iniziano a capire le fasi ambientalmente critiche del sistema in esame o si possono iniziare ad operare confronti tra prodotti che hanno a monte tecnologie produttive differenti. La suddetta norma ISO definisce questa fase "opzionale" per le numerose incertezze legate all'individuazione della validità di un impatto circoscritto nel tempo e nello spazio; incertezze dovute essenzialmente alla carenza di dati statistici.

### **4. Ponderazione.**

La ponderazione o pesatura (*weighting across impact categories*) è definita dalle norme ISO nel seguente modo:

*"La ponderazione è il processo di conversione dei risultati di indicatore delle diverse categorie d'impatto mediante fattori numerici basate sulle scelte dei valori. Essa può comprendere l'aggregazione dei risultati di indicatore ponderati."*<sup>10</sup>

In questa fase si attribuisce un peso di importanza ai diversi effetti causati dal sistema, in modo che possano essere comparati tra loro per effettuare successivamente una ulteriore aggregazione dei dati.

Con la pesatura si determina alla fine un indice assoluto, il cosiddetto **eco-indicatore**, che esprime in modo complessivo le prestazioni ambientali del sistema. Questo indice sarà ottenuto dalla seguente relazione:

$$I = \sum w_i * E_i$$

dove:

$E_i$  è l'effetto normalizzato della generica categoria d'impatto,

$w_i$  è il peso attribuito alla rispettiva categoria d'impatto.

Per la ISO i primi due momenti, cioè la raccolta dei risultati di indicatore per le diverse categorie d'impatto, sono obbligatori, mentre la normalizzazione e la ponderazione rappresentano elementi facoltativi da essere utilizzati in funzione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio LCA.

---

<sup>10</sup> Dalla SETAC questa fase era stata denominata "valutazione" ed era definita come: "la fase in cui i contributi delle diverse categorie d'impatto sono pesate in modo che possano essere comparate tra di loro."

#### **2.2.4 Interpretazione dei risultati**

La parte conclusiva di uno studio LCA è l'interpretazione che ha lo scopo di riassumere e discutere i risultati dell'inventario e della valutazione d'impatto. Viene definita nel seguente modo: *"L'interpretazione del ciclo di vita è un procedimento sistematico volto alla identificazione, qualifica, verifica e valutazione delle informazioni contenute nei risultati del LCI e/o LCIA di un sistema di prodotto, nonché alla loro presentazione in forma tale da soddisfare i requisiti dell'applicazione descritti nell'obiettivo e nel campo di applicazione dello studio."*

Questa fase si prefigge di analizzare e riportare i risultati in modo trasparente, di giungere alle conclusioni e di spiegare le limitazioni del sistema/prodotto dello studio.

Questa fase comprende i tre stadi seguenti:

1. identificazione dei fattori ambientali significativi, sulla base dei risultati dell'inventario e della valutazione d'impatto, al fine di proporre eventuali opzioni di miglioramento,
2. valutazioni, cioè verifica della completezza di inputs e outputs, della sensibilità e della coerenza dei risultati,
3. conclusioni, raccomandazioni e redazione di un rapporto finale.

Infine la fase di miglioramento completa il ciclo di analisi e permette di indirizzare il sistema verso un reale obiettivo di eco-sostenibilità, nonché di eco-efficienza.

A livello organizzativo e progettuale, la valutazione del ciclo di vita è uno strumento utile di supporto alle decisioni, che permette di effettuare analisi comparative tra le varie alternative applicabili al sistema e di scegliere l'alternativa che massimizza l'efficienza energetico-ambientale totale. L'analisi LCA risulta quindi essere uno strumento efficace per promuovere l'eco-innovazione e la competitività in modo sostenibile. A livello europeo l'LCA rappresenta un elemento di qualificazione in tutti i campi ove è richiesta una valutazione della sostenibilità: è centrale nel Piano per la Produzione e il Consumo Sostenibile (COM 397, 2008), così come lo è nella Direttiva Ecodesign (EuP 2005/32/CE), in quella sui rifiuti (COM 666, 2005), nell'ETAP (Environmental Technologies Action Plan) (COM38 , 2004) e anche nel regolamento REACH (1907/2006). Già nel 2003, la Comunicazione sulla IPP (COM 302, 2003) riportava espressamente che "LCA attualmente fornisce il miglior framework per valutare i potenziali impatti ambientali dei prodotti". A livello nazionale nel 2006, su iniziativa dell'ENEA, si è costituita la "Rete Italiana LCA" ([www.reteitalianalca.it](http://www.reteitalianalca.it)), che ha come obiettivo principale quello di favorire la diffusione della metodologia LCA, attraverso lo scambio di informazioni e buone pratiche a livello nazionale. La Rete Italiana LCA è organizzata in Gruppi di Lavoro che operano su base volontaria per lo svolgimento di ricerche inerenti la metodologia LCA (Cappellaro et al, 2008). I Gruppi di Lavoro sono suddivisi in 9 diverse aree tematiche, tra cui alimentare ed agro-alimentare, energia e tecnologie sostenibili, prodotti e processi chimici, servizi turistici, edilizia, gestione e trattamento rifiuti, legno arredo, metodologico (Gruppo DIRE) e un gruppo specifico per il settore automotive-elettrico-elettronico. I Gruppi di Lavoro sono finalizzati a costituire un network di esperti di riferimento sul territorio nazionale per armonizzare le conoscenze nel campo dell'Analisi del Ciclo di Vita e identificare linee di ricerca future in particolare per ogni settore. Tra le attività dei Gruppi di Lavoro vi sono ricerche e analisi per individuare le modalità per una maggiore attendibilità degli studi di LCA nei settori analizzati.

### 2.3 L'ILCD Handbook e Data Network

Per superare il problema della buona riproducibilità e confrontabilità degli studi di LCA sono state recentemente sviluppate dal Joint Research Centre - JRC EC le linee guida internazionali per l'applicazione dell'LCA ("International reference Life Cycle data System - **ILCD Handbook**") e per la costituzione di una rete di banche dati accomunate da una comune nomenclatura, formato, sistema di garanzia della qualità, sistema di revisione e approccio metodologico (ILCD Data Network, che comprende la European Reference Life Cycle Data Base ELCD). Si tratta da un lato di una sorta di secondo livello di standardizzazione (ILCD Handbook), che fornisce regole metodologiche dettagliate per effettuare studi di LCA pienamente corrispondenti alle norme ISO. L'obiettivo è quello di aumentare considerevolmente la robustezza degli studi, la loro armonizzazione per favorire un ampio uso dell'LCA all'interno delle politiche ambientali europee. L'Handbook comprende una serie di rapporti che coprono gli aspetti più metodologici e di modellazione (JRC 2010a; JRC 2010b), di raccolta dati (JRC, 2010c) Impact assessment (JER, Impact Assessment (JRC, 2010d), ecc.

Dovendo coprire tutte le possibili situazioni in cui si effettua l'LCA, l'Handbook è ovviamente molto generale e con un numero rilevante di prescrizioni da seguire. Per semplificare notevolmente il lavoro degli analisti, attualmente sono in fase di realizzazione le prime guide settoriali. Esse, essendo specifiche di un determinato settore, o di categorie di prodotto, possono essere molto più precise nelle prescrizioni, semplificando quindi il lavoro degli analisti. Attualmente ENEA e partners stanno concludendo la definizione del primo esempio di tale documento, FC-HyGuide ([www.FC-Hyguide.eu/](http://www.FC-Hyguide.eu/)), una guida per l'esecuzione di studi di LCA su celle a combustibile e sistemi di produzione dell'idrogeno. La guida è correlata di strumenti pratici quali fogli di raccolta dati, modelli per la scrittura del rapporto, e per la documentazione dei dati raccolti, esempi di casi applicativi, materiale formativo, ecc.

Come anticipato, l'ILCD Handbook è costituito da una serie di documenti che comprendono una guida generale sull'LCA, la sintesi delle prescrizioni contenute nella guida, una guida specifica sull'analisi di inventario, i requisiti di qualificazione dei revisori degli studi e dei data sets di LCA, gli schemi per la revisione degli studi e dei data set di LCA, il quadro di riferimento per i requisiti da rispettare nei metodi di Impact Assessment, l'analisi di fondo dei sistemi di Impact Assessment. In fase di pubblicazione la lista dei metodi raccomandati di Impact Assessment. Inoltre, l'ILCD Data Network prescrive, oltre agli aspetti prettamente tecnici del formato di rappresentazione dei dati e la relativa nomenclatura da utilizzare, criteri di qualità molto stringenti.

Attualmente i bandi dei programmi di ricerca europei richiedono che ogni progetto di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie siano accompagnati da uno studio di LCA conformi con l'ILCD Handbook e la fornitura dei relativi dati in formato "ILCD compliant."

Un aspetto fondamentale nell'ILCD Handbook è la definizione del contesto decisionale in cui la specifica applicazione dello studio di LCA si inserisce. In particolare sono definiti tre situazioni (di cui una con due sotto casi), individuati con le lettere A, B e C

La situazione A è quella che si applica al maggior numero di studi di LCA e si riferisce ad studi che devono supportare decisioni a livello micro, ossia relativi a prodotti o processi. In queste situazioni le decisioni prese a valle dello studio di LCA hanno conseguenze strutturali limitate o assenti. Gli effetti sono troppo piccoli per superare la soglia che comporta conseguenze in grande scala su altri sistemi tecnologici. Un esempio può essere individuare gli aspetti ambientali più significativi di una specifica batteria per autotrazione.

La situazione B, a livello meso o macro, comporta il supporto a decisioni a livello strategico che possono avere conseguenze strutturali anche al di fuori del contesto decisionale, per esempio cambiando l'attuale capacità produttiva. Un esempio può essere valutare gli effetti ambientali dell'introduzione estesa dell'autotrazione elettrica.

La situazione C si riferisce a situazioni in cui si intende esclusivamente descrivere e documentare un sistema senza essere interessati alle possibili conseguenze su altre parti dell'economia.

Ciascuno delle sopra descritte situazioni decisionali comportano scelte differenti di modellazione, richiedendo ad esempio per la situazione B la scelta di utilizzare un approccio consequenziale anziché attributivo.

La modellazione attribuzionale, per quantificare l'inventario, descrive i potenziali impatti ambientali che possono essere attribuiti ad un sistema (ad esempio ad un prodotto), nel suo intero ciclo di vita. La modellazione attribuzionale utilizza dati storici, fattuali, misurabili di incertezza nota ed include tutti i processi che sono stati identificati per contribuire in modo significativo al sistema oggetto dello studio. Cioè il sistema è modellato come è, è stato o è previsto che sia. Ciò si applica anche agli altri sistemi di contorno, utilizzando dati specifici dagli effettivi fornitori o dati medi quando derivanti da un misto di produttori o tecnologie. (ad esempio si utilizza il dato medio della produzione dell'energia elettrica italiana, compreso l'import e l'export).

La modellazione consequenziale è finalizzata a identificare le conseguenze che una decisione presa sul sistema in oggetto comportano su altri processi e sistemi dell'economia. Si modella il sistema in oggetto intorno a queste conseguenze. In pratica il modello di ciclo di vita consequenziale non rappresenta la reale (o prevista) filiera produttiva ma un'ipotetica catena di fornitura come pronosticata attraverso meccanismi di mercato e potenzialmente comprendendo interazioni politiche e cambiamenti di comportamento dei consumatori. Un elemento chiave della modellazione consequenziale è l'individuazione dei processi marginali, cioè quelli che sono affetti dalla decisione oggetto dell'analisi. Per valutare le conseguenze di mercato si utilizzano modelli di equilibrio generale o parziale. Centrale è perciò una comprensione dei mercati e come cambiamenti diretti ed indiretti causano cambiamenti nella domanda ed offerta di altri beni e servizi. Ad esempio l'introduzione di un'auto elettrica comporta una riduzione di domanda di combustibili fossili ed un incremento di domanda di energia elettrica.

Il rispetto delle norme dell'ILCD Handbook riguarda specificamente 5 aspetti:

- Qualità dei dati: Questo aspetto si riferisce alla completezza; rappresentatività tecnologica, geografica e temporale; la completezza; la precisione/incertezza; l'appropriatezza e consistenza metodologica.
- Il metodo: si riferisce all'appropriatezza della modellazione, al rispetto delle prescrizioni metodologiche e alla consistenza nel loro uso.
- La nomenclatura: correttezza e consistenza della nomenclatura utilizzata nel nominare i flussi i processi, l'uso delle unità di misura e della terminologia tecnica.
- La revisione: appropriatezza e correttezza del tipo, metodo e documentazione della revisione. Comprende la verifica che i metodi utilizzati nel eseguire l'LCA sono consistenti con l'Handbook e sono tecnicamente e scientificamente validi. I dati utilizzati devono essere appropriati e ragionevoli in relazione agli obiettivi dello studio, e

l'interpretazione riflette le limitazioni identificate e l'obiettivo dello studio. Il rapporto dello studio deve inoltre essere trasparente e consistente.

Solo rispettando l'insieme di questi cinque punti uno studio di LCA può essere considerato pienamente rispondente ai requisiti dell'ILCD.

In particolare ogni data set, per essere conforme per l'ILCD Data network, deve essere correlato da una quantificazione di un indice di qualità calcolato secondo la seguente formula:

$$DQR = \frac{TeR + GR + TiR + C + P + M + X_w * 4}{i + 4}$$

Dove:

DQR = Data Quality rating, indice di qualità

TeR = indice di rappresentatività tecnologica, grado con cui il data set riflette la vera popolazione di interesse riguardante la tecnologia.

GR = indice di rappresentatività geografica, grado con cui il data set riflette la vera collocazione geografica del processo

TiR = indice di rappresentatività temporale, grado con cui il data set riflette l'età dei dati richiesta per lo studio.

C = indice di completezza, percentuale dei flussi elementari compresi quantitativamente nell'inventario. Cut-off utilizzato.

P = indice di precisione/incertezza, misura della variabilità dei valori per ciascun dato espresso

M = indice di appropriatezza e consistenza metodologica, applicazione corretta e consistente del quadro di modellazione raccomandato e dei metodi specificati.

Ciascuno dei suddetti indici può assumere un valore 0 (non applicabile) e da 1 (molto bene) a 5 (molto scarso o non valutato)

$X_w$  = il peggior (più alto) punteggio ottenuto negli indici precedenti

i = numero di indici applicabili.

Attualmente l'ILCD Data Network consente anche un livello di ingresso (Entry level) in cui i requisiti di qualità e di documentazione sono meno restrittivi.

### 3. Applicazioni dell'LCA nel settore automotive

Recentemente la Rete Italiana LCA ha pubblicato la Mappatura 2011 (Cappellaro & Scalbi, 2011) indagine sullo stato dell'arte dell'LCA in Italia. Tra i lavori pubblicati è stato presentato lo stato dell'arte delle metodologie ed applicazioni per il settore automotive (Delogu et al. 2011), dove in particolare vengono descritte le principali problematiche di impatto ambientale che interessano il prodotto auto nelle sue varie fasi del ciclo di vita e una panoramica sullo stato dell'arte relativo allo sviluppo ed applicazione di metodologie, basate principalmente sull'LCA, per valutare l'impatto ambientale del prodotto stesso. Il presente paragrafo riporta un estratto di tale lavoro svolto da Delogu M. (2011) del Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali dell'Università degli Studi di Firenze e coordinatore del Gruppo di Lavoro Automotive della Rete Italiana LCA.

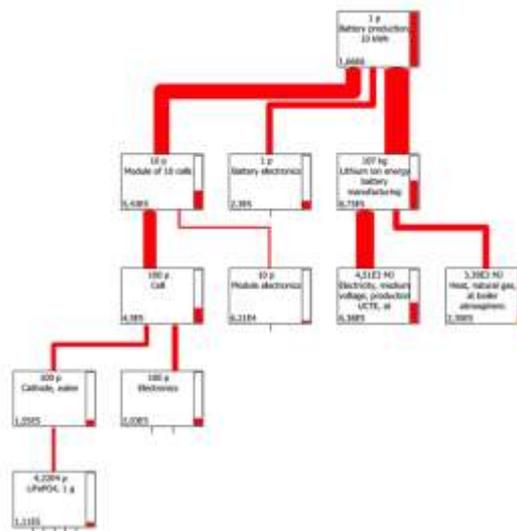
### 3.1 Le fasi dell'analisi LCA

L'effettuazione dell'LCA di un autoveicolo, secondo un approccio dalla "dalla culla alla tomba", richiede un elevato numero di informazioni a causa della complessità del prodotto e delle differenti problematiche che vanno ad interessare le varie fasi del ciclo di vita.

In tal senso, la valutazione dell'impatto per la *fase di produzione* comprende l'analisi di numerose componenti diverse tra loro per materiale e per processo produttivo (es. batteria in Figura 3); l'evoluzione del settore richiede la ricerca di dati aggiornati rispetto alle tecnologie in uso o alle potenziali innovazioni attese nel settore.

La fase di *uso* di un veicolo comporta, invece, un impatto generalmente predominante rispetto alle altre fasi; esso è conseguente al consumo di energia (in forma di combustibili o di energia elettrica) e di tutti i prodotti necessari al funzionamento (fluidi, componenti soggetti a sostituzione periodica).

L'impatto deve essere calcolato in funzione della vita prevista (espressa con unità di misura coerenti rispetto all'utilizzo tipico del prodotto, ad esempio in km per veicoli da autotrazione, in ore di funzionamento o cicli totali per veicoli agricoli ed industriali) ed in funzione delle modalità con cui la missione viene svolta, secondo cicli d'uso provenienti da normative caratteristiche del settore o da valutazioni dirette. È, pertanto, necessaria la disponibilità di numerosi dati e la formulazione di ipotesi talvolta non generali.



**Figura 3: Produzione di una batteria per autotrazione da 10 kW – contributi dei componenti all'impatto al riscaldamento globale (Zackrisson, 2010)**

Il consumo di energia primaria connesso all'uso del carburante può essere calcolato in modo diverso in base alle condizioni al contorno del calcolo stesso. Si può distinguere, pertanto, l'impatto in:

- *Well To Tank* (WTT – "dal pozzo al serbatoio"), dovuto alla fornitura al veicolo dell'energia primaria (es. estrazione del combustibile fossile, produzione di biocombustibili, produzione di energia elettrica, distribuzione), prima che questa venga utilizzata dal veicolo stesso;
- *Tank To Wheels* (TTW – "dal serbatoio alle ruote"), calcolato in funzione della prestazione del veicolo dopo che questo è stato rifornito.

L'insieme delle suddette informazioni costituisce l'impatto *Well To Wheels* (WTW – "dal pozzo alle ruote"). Tale analisi può essere condotta indipendentemente dalle altre e costituire l'unico

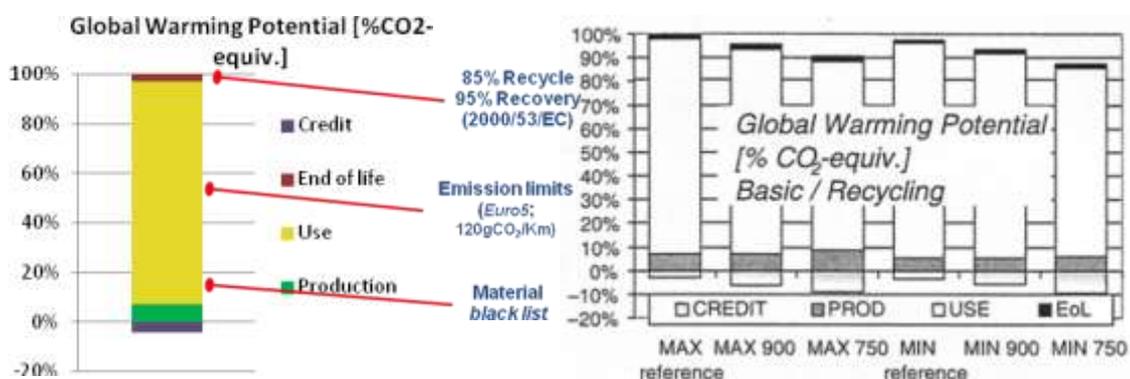
prodotto dell'analisi LCA. La semplificazione risulta coerente in determinati contesti, quale ad esempio il confronto tra combustibili diversi: in tal caso infatti l'impatto si differenzia essenzialmente a livello di produzione ed uso del combustibile, mentre è possibile assumere sostanziale analogia tra le tecnologie dei veicoli in uso (e quindi tra le fasi di produzione e gestione del fine-vita del veicolo).

La gestione del *fine-vita*, comprendente sia la "messa in sicurezza" delle sostanze inquinanti sia il riuso, il riciclo, il recupero (3R) ed infine lo smaltimento dei materiali residui, è strettamente regolamentata a livello comunitario. La Comunità Europea, attraverso l'emanazione della direttiva 2000/53/CE, coinvolge tutti gli operatori economici, ed in particolare i costruttori automobilistici, nel corretto trattamento e gestione del ciclo di vita del prodotto auto, imponendo loro di garantire che, entro il 2015, solo il 5% in massa del veicolo finisca in discarica; il restante 95% dovrà essere sottoposto ad adeguati trattamenti di riciclaggio-reimpiego (85%) e recupero energetico (10%).

Attualmente sono riciclate le parti metalliche che rappresentano circa il 75% della massa dell'auto, mentre il restante 25% (il cosiddetto *fluff* o residuo di frantumazione), costituito essenzialmente da plastiche, vetro e gomme, è destinato alla discarica.

A fronte di quanto sopra, risulta, quindi, evidente che l'analisi LCA "dalla culla alla tomba" di un autoveicolo richiede competenze multidisciplinari (su tecnologia dei materiali, dinamica del veicolo ecc.) che devono operare sinergicamente sin dalla fase di progettazione (alla quale, come noto, è imputabile oltre l'80% dell'impatto).

Una determinata soluzione in sede progettuale può, infatti, avere ricadute importanti su diverse fasi del ciclo di vita. Alcuni esempi: la scelta di un materiale o di un processo produttivo ha conseguenze sia sul consumo di energia durante l'utilizzo, sia sulla riciclabilità effettiva al termine della vita (cfr. Figura 4). L'analisi LCA per processi di stampaggio innovativi (Volkswagen, 2009) mostra che, grazie alla riduzione di massa del componente, è possibile un sostanziale risparmio di combustibile durante l'uso del veicolo, tale da compensare il maggior impiego di energia in fase produttiva. L'obbligo di raggiungimento di una quota predefinita di riciclabilità può imporre la necessità di rinunciare a scelte costruttive (es. abbinamento di materiali diversi) per le quali non esistono processi di trattamento consolidati, limitando quindi le soluzioni a disposizione del progettista.



**Figura 4: A sinistra: impatto (emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente) e vincoli legislativi associati alle varie fasi di vita di un autoveicolo. A destra: sensibilità del GWP in funzione della massa del veicolo per scenari diversi tra loro (Schmidt, 2004)**

L'utilità di un'analisi LCA strutturata è, inoltre, particolarmente evidente nel momento in cui le normative impongono al costruttore il rispetto di più vincoli (cfr. Figura 4). Questi, infatti, condizionano sia l'ambito produttivo (es. rinuncia ai materiali presenti nella "black list" interna alla Direttiva 2000/53/CE), sia l'uso del veicolo (la norma 443/2009 prospetta un limite di emissione di CO<sub>2</sub> – direttamente legata all'efficienza del veicolo – pari a 120g/km<sup>11</sup>), sia il suo smaltimento (la Direttiva 2000/53/CE impone il raggiungimento di una quota di Riciclabilità di almeno l'85%).

### 3.2 Esempi di metodologie di valutazione dell'impatto ambientale: criteri

Numerose sono le metodologie e gli strumenti presenti in letteratura per la valutazione di impatto ambientale degli autoveicoli. Come riassunto nella **Tabella 7** e nella **Tabella 8** (provenienti dal report di Boureima et al, 2007), alcuni approcci non permettono di valutare la totalità dell'interazione tra il veicolo e l'ambiente, ma limitano il campo di indagine ad alcune fasi della vita del veicolo e/o del combustibile.

La metodologia **Ecoscore** valuta l'impatto ambientale di veicoli a diversa alimentazione (combustibili e *drive-train*) sulla base di analisi WTW. La metodologia non considera gli impatti legati alla produzione, la manutenzione e la gestione del fine-vita essenzialmente a causa della scarsità di dati coerenti tra loro. L'approccio proposto dal **Green Book ACEEE** (American Council for an Energy-Efficient Economy) permette, invece, di stimare l'impatto legato al ciclo di vita in modo più esteso rispetto al precedente.

L'impatto dovuto alla produzione del veicolo è stimato sulla base della massa totale, effettuando quindi un'approssimazione dovuta alla genericità dei dati di produzione e lavorazione dei diversi materiali (il coefficiente utilizzato è pari a circa 0,035 gCO<sub>2</sub>-eq/km per kg del veicolo). La stima, quindi, non può considerare piccole differenze sui processi produttivi. La modellazione della fase d'uso è invece dettagliata e considera più tipologie di emissione diretta (allo scarico) ed indiretta (ciclo del combustibile), includendo anche categorie di emissione non coperte delle normative. La fase di fine-vita non è considerata.

L'approccio proposto da EPA (Environmental Protection Agency) nella *Green Vehicle Guide* è incentrato sulla fase d'uso; la valutazione finale offre un punteggio basato su due categorie di impatto: l'inquinamento dell'aria e l'emissione di gas serra.

La metodologia *Cleaner Drive* proposta dal Consorzio coordinato dall'Energy Saving Trust considera principalmente le emissioni allo scarico e quelle legate al combustibile, fornendo un risultato combinato espresso in forma numerica (scala da 1 a 100).

La guida per l'acquirente *ETA* (Environmental Transport Association), è basata su informazioni fornite dai costruttori automobilistici e, pertanto, è applicabile alle automobili di nuova produzione. In questo caso, sono considerati anche gli impatti legati alla produzione (es. uso di sostanze pericolose) ed al fine-vita (impatto stimato sulla base della riciclabilità).

Analoghe stime, basate sui dati offerti da costruttori e dagli importatori, sono offerte dall'associazione tedesca *VCD* (Verkehrsclub Deutschland).

---

<sup>11</sup> Non oltre 130 g/km di emissione diretta, 10 g/km di riduzione ulteriore mediante scelte sulla filiera dei carburanti.

Metodologia	Ciclo vita del combustibile		Ciclo vita del veicolo		
	Produzione	Uso	Produzione	Uso	Fine-Vita
Eco-score	X	X			
ACEEE	X	X	X	X	
EPA		X		X	
Cleaner Drive	X	X		X	
ETA		X	X	X	X
VCD		X	X	X	X

**Tabella 7: Fasi del ciclo di vita disponibili per l'analisi secondo alcune metodologie di calcolo**

Metodologia	Emissioni regolamentate	Emissioni non regolamentate	Consumo di combustibile	Impatto acustico
Eco-score	X	X	X	X
ACEEE	X	X	X	
EPA	X	solo CO <sub>2</sub> *	X	
Cleaner Drive	X	X	X	
ETA	X	X	X	X
VCD	X	X	X	X

\* non regolamentata all'epoca dell'introduzione della metodologia

**Tabella 8: Emissioni in fase di uso del veicolo per le quali è disponibile l'analisi nelle diverse metodologie.**

La possibilità di stimare impatti diversi da quelli soggetti a normativa offre un quadro di valutazione più esteso rispetto a quanto indicato dalla sola caratteristica di omologazione.

### 3.3 Casi studio: metodi, scopi, finalità

Come già accennato, l'effettuazione di analisi LCA complete necessita della disponibilità di numerosi dati in input e la conoscenza delle relazioni intercorrenti tra una fase e l'altra. È pertanto frequente la limitazione del campo di studio in funzione dell'informazione primaria richiesta.

Secondo Boureima et al, 2007, a seguito dell'analisi di numerosi casi studio in letteratura (progetto CLEVER) si può riconoscere almeno quattro diverse categorie di LCA, indicative delle principali tipologie di analisi, ognuna delle quali comporta la scelta di differenti ipotesi:

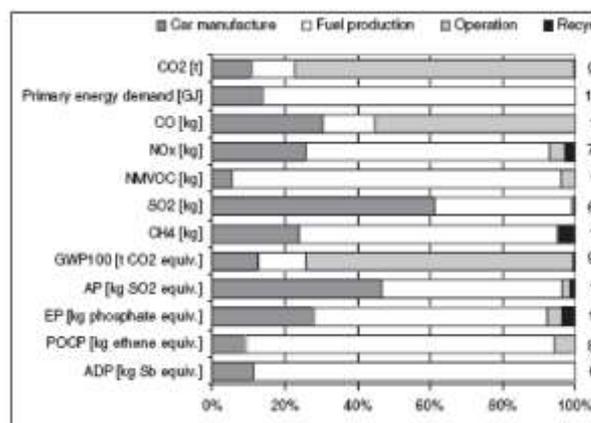
- LCA di uno specifico veicolo;
- LCA di una tipologia di veicolo;
- LCA comparativa di veicoli diversi per alimentazione e/o per tecnologia;
- LCA relative all'implementazione di scenari futuri.

L'LCA nel settore *automotive* solitamente interessa differenti livelli di dettaglio; in tal senso, il campo di applicazione dello studio può essere ristretto al singolo componente del veicolo (telaio, interni ecc.) ed alle tecnologie produttive ad esso associate. In questo caso l'analisi è mirata all'individuazione di alternative progettuali e tecnologiche che, pur soddisfacendo in maniera equivalente una determinata specifica di progetto, presentano un differente profilo ambientale.

### 3.3.1 LCA di uno specifico veicolo

Gli studi LCA aventi come oggetto uno specifico veicolo richiedono dati dettagliati, solitamente confidenziali, e per tale motivo sono spesso effettuati dai produttori stessi. Analisi di questo tipo, con elevato livello di specificità e di dettaglio, possono essere motivate da necessità diverse, quali ad esempio l'ottenimento di una certificazione ambientale, la stima degli impatti in termini assoluti ed in termini comparativi, la necessità di elementi di marketing.

Parametro	S 350 nuova generazione	S 350 modello preesistente	Unità
<b>Potenza</b>	200	180	kW
<b>Consumo di combustibile (ciclo NEDC)</b>	10,1	11,1	l/100 km
<b>CO<sub>2</sub></b>	242	266	g/km
<b>CO</b>	0,21	0,185	g/km
<b>HC</b>	0,026	0,05	g/km
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,011	0,045	g/km



**Figura 5 – A destra: principali emissioni dei due veicoli sottoposti a confronto. A sinistra: ripartizione dell’impatto secondo la fase del ciclo di vita (Mercedes modello S)**

Il lavoro di Finkbeiner et al. (2006) offre una comparazione tra veicoli omologhi, appartenenti a due generazioni diverse. Le informazioni relative alla produzione del veicolo ed al suo smaltimento provengono in parte da database commerciali, in parte da informazioni proprie del Costruttore; la fase d’uso prevede la percorrenza di 300.000 km. L’analisi offre il risultato in termini di ripartizione dell’impatto tra le varie fasi (cfr. Figura 5), soffermandosi sia sulle emissioni in aria sia su indicatori aggregati quali il potenziale di riscaldamento, di acidificazione, di eutrofizzazione, di creazione di ozono.

### 3.3.2 LCA di una tipologia di veicolo

L’effettuazione dell’LCA incentrata su una tipologia di veicolo è spesso supporto alla fase di deliberazione di scelte operate da soggetti pubblici o privati (autorità pubbliche, responsabili di flotte). L’LCA di un veicolo “tipico”, dalle caratteristiche “medie” rispetto all’insieme di veicoli considerati è tesa a quantificare l’impatto atteso su media o grande scala (regionale, nazionale, comunitaria); i risultati offrono la possibilità di individuare i fattori maggiormente critici per l’impatto globale.

Le stime sono pertanto riferite ad un modello di veicolo ipotizzato a livello teorico, sfruttando database esistenti o sviluppati appositamente per lo scopo; essi provengono, a seconda dei casi, da associazioni, autorità (governi, Commissione Europea), enti di ricerca. L’analisi sviluppata dalla Delft University of Technology (Castro, 2003) rientra nell’ambito di questo tipo di indagine. Oggetto della LCA è un veicolo da trasporto passeggeri; i dati in

ingresso indicano quindi valori generali quali la massa del veicolo, la vita prevista, il consumo medio di combustibile (benzina senza piombo). I risultati ottenuti identificano i principali fattori di impatto, tra cui:

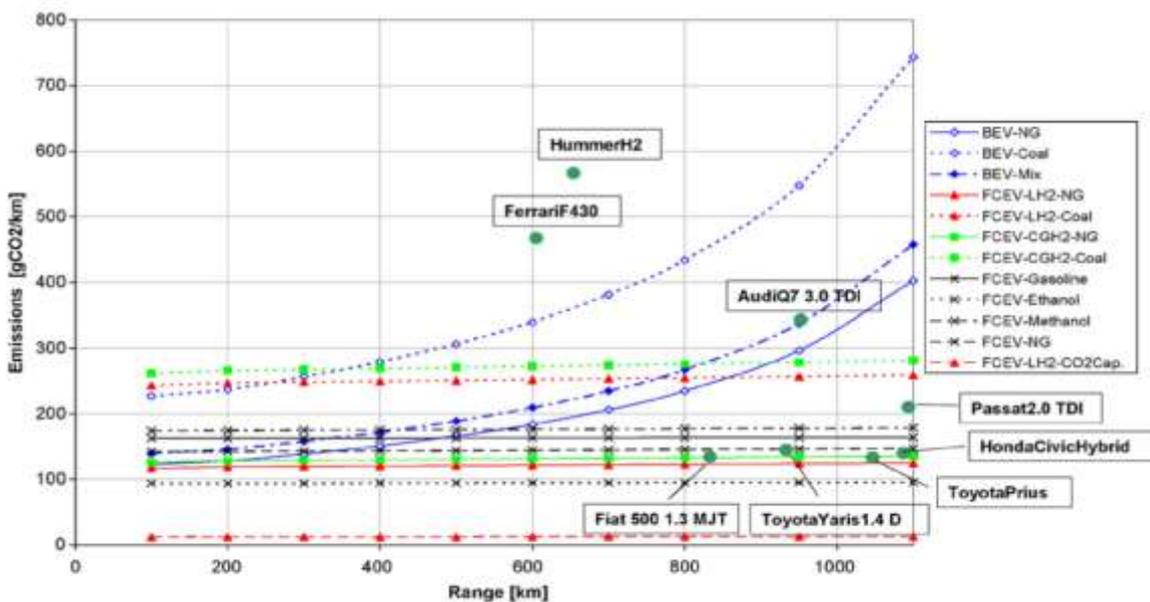
- il maggiore impatto è legato alla fase di uso, ed è pari al 90% del totale;
- l'emissione di  $\text{NO}_x$  è limitata in quantità rispetto alle altre emissioni ma è responsabile del 36% dell'impatto complessivo;
- l'emissione di  $\text{CO}_2$ , pur essendo la più elevata, è responsabile del 6% dell'impatto.

### 3.3.3 LCA comparativa di veicoli diversi per alimentazione e/o per tecnologia

In presenza di analisi comparative di veicoli diversi per alimentazione, il risultato della LCA permette di selezionare le scelte più promettenti a livello di riduzione dell'impatto, confrontando gli archetipi di soluzioni differenti a livello di tecnologia e di combustibili impiegati. È quindi evidente che tale analisi comparativa è un efficace supporto ai processi decisionali, potendo stimare l'impatto conseguente all'introduzione di misure normative, incentivi e sviluppi di prodotto.

Il risultato è generalmente presentato attraverso un indicatore omogeneo per le diverse soluzioni o in forma di variazione percentuale dei parametri rispetto al caso assunto come riferimento.

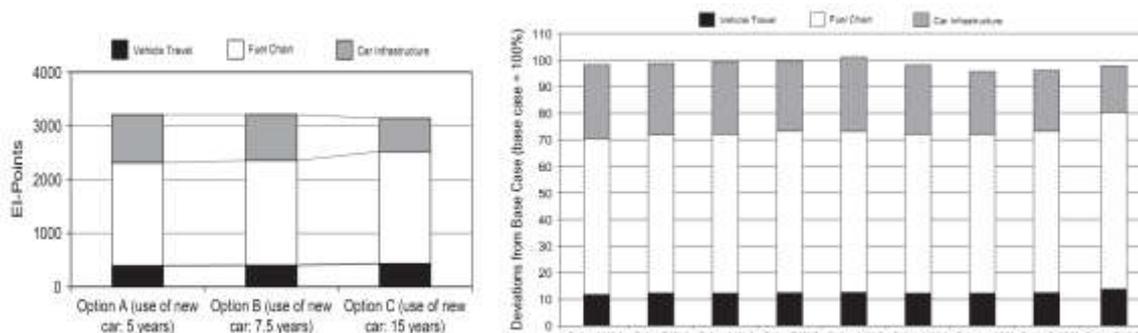
Un'analisi comparativa WTW è mostrata in Figura 6 (da Campanari et al, 2010). Lo studio prevede sia il calcolo dell'impatto legato alla fornitura dei diversi combustibili sia la simulazione di prestazioni (consumo) di diversi modelli di veicolo (è ipotizzato un uso descritto dai cicli di omologazione europei). Sono quindi confrontati: modelli tradizionali di diverse categorie; veicoli a batteria (BEV), veicoli a *fuel cell* (FCEV), a loro volta comprendenti più casi a seconda della fonte di energia primaria (gas naturale, carbone, benzine, biocarburanti, energie elettrica da mix attuale, fonti fossili con cattura della  $\text{CO}_2$ ).



**Figura 6: Emissione di  $\text{CO}_2$  - WTW - di veicoli a diversa alimentazione in funzione dell'autonomia prevista (nel caso dei veicoli a batteria, essa influenza significativamente la massa e quindi il consumo di energia del veicolo)**

### 3.3.4 LCA relative all'implementazione di scenari futuri

L'analisi LCA è anche un valido strumento di predizione nel valutare scenari di impatto potenziale legato agli sviluppi attesi in un certo settore: dall'implementazione di normative allo sviluppo di prodotto, dall'introduzione di nuove tecnologie alla realizzazione di processi di riciclaggio. Un esempio di tale tipo di analisi è riscontrabile nel lavoro di Spielmann e Althaus, 2007. Lo scopo dello studio è di valutare l'efficacia del rinnovo del parco auto per motivi ambientali. L'unità funzionale considerata è il servizio di trasporto di un automobilista per un periodo di tempo pari a 15 anni, all'interno del contesto svizzero. Gli scenari comparativi prevedono l'assunzione di un valore medio della durata di possesso del veicolo, la sua diminuzione, il suo aumento (rispettivamente 12 anni contro 5 anni, 7,5 anni, 15 anni), e si differenziano essenzialmente per le caratteristiche del veicolo. I dati necessari in ingresso comprendono, tra gli altri, la stima delle caratteristiche dei veicoli di futura produzione: il consumo di combustibile è estrapolato dal trend storico, al pari della massa, legata all'impatto in produzione e fine-vita del veicolo. Le emissioni sono stimate ipotizzando il rispetto delle norme di omologazione future, già parzialmente note al momento dell'analisi. Il risultato finale è fornito in forma di un unico indicatore (Eco-Indicator 99, Figura 7). È inoltre valutato il rapporto causa-effetto tra dati in ingresso ed in uscita: per tutti gli scenari, quindi, sono formulate ulteriori ipotesi di variazione dei principali parametri assunti per l'analisi (Tabella 9).



**Figura 7: Risultati della LCA per le tre soluzioni poste a confronto (a destra) ed analisi di sensibilità rispetto alle ipotesi di scenario (a sinistra, cfr. Tab. 3)**

Variabile	Variazioni "What - If"			
	WI 1	WI 2	WI 3	WI 4
	Consumo di carburante	Veicolo	Consumo di carburante ed emissioni	Tipologia di veicolo
Assunzione	Veicoli a benzina: -3% annuo Veicoli Diesel: -2.7% annuo	Ipotesi di inversione del trend di crescita; massa dei veicoli nel periodo 2005-2010 analoga al dato del 2000	Mancata introduzione del livello Euro5 e consumo di carburante stabile a partire dal 2008	Introduzione di veicoli di nuova generazione (materiali innovativi, riduzione della massa) a partire dall'anno 2007

**Tabella 9: Ipotesi di variazione dei diversi scenari ai fini dell'analisi di sensibilità mostrata in Figura 7:7**

### 3.4 LCA come supporto all'ecoprogettazione

In letteratura, l'LCA è soprattutto indicata come strumento di supporto all'Ecodesign. Sono infatti richieste in fase di progettazione informazioni di anteprema rispetto all'impatto atteso per il componente, quando questo non è ancora definito in tutti i suoi dettagli. Approcci strutturati prevedono la formulazione di più alternative (diverse per processo produttivo, materiale, design previsto) e la valutazione di queste sulla base di più criteri (funzionalità, consumo di risorse, riciclabilità ecc.); il know-how caratteristico consiste nella disponibilità di matrici che formalizzino la relazione di causa-effetto. Rientrano in quest'ambito le metodologie proposte da Schiavone et al., 2008, e da Grujicic et al., 2009.

La maggior parte dei produttori automobilistici dichiara nei propri report ambientali l'utilizzo abituale dell'LCA, con finalità, che in numerosi casi, afferiscono all'ambito del "decision making". Alcuni esempi, non esaustivi, di tale utilizzo:

- Fiat<sup>12</sup> segnala l'utilizzo di LCA comparative per la selezione di fluidi refrigeranti di nuova generazione; il cambiamento è indispensabile e non opzionale a seguito di restrizioni normative per l'uso di fluidi già impiegati (r134a) a partire dall'anno 2011. L'analisi di impatto è inoltre parte integrante degli studi attualmente in corso per lo sviluppo di processi di fosfatazione a basso impatto.
- L'analisi di Finkbeiner, 2006, è basata in gran parte su dati e strumenti proposti dal costruttore stesso (Mercedes).
- Per Volkswagen, l'LCA è uno strumento integrato nelle fasi di progetto teso al miglioramento della compatibilità ambientale del veicolo, includendo l'analisi di soluzioni produttive innovative e lo studio di specifici metodi di riciclaggio (Krinke et al, 2005).
- Per Toyota<sup>13</sup>, l'LCA è utile sia per studi comparativi in ambiti ristretti (es. sostituzione di plastiche da fonte fossile con altre da fonte biologia), sia per la quantificazione completa degli impatti derivanti da tecnologie radicalmente diverse da altre consolidate (es. analisi del veicolo Prius).

### 3.5 Mobilità elettrica

Sulla mobilità elettrica, a livello internazionale, il dibattito scientifico è intenso e numerose sono le attività di ricerca in corso. Sono molteplici le potenziali aree di miglioramento delle prestazioni energetico-ambientali della mobilità elettrica, alcune delle quali di seguito elencate:

- peso del veicolo;
- produzione della batteria;
- mix energetico di generazione dell'energia elettrica impiegata per alimentare l'autotrazione;
- l'efficienza energetico-ambientale del sistema;
- i diversi stili di vita e di mobilità.

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 cicli di vita appaiono

---

<sup>12</sup> <http://www.fiatspa.com/it->

IT/sustainability/enviromental\_responsibility/mobilita\_ecologica/recuperare\_riciclare\_riutilizzare/Pages/life\_cycle\_assessment.aspx

<sup>13</sup> [http://www.toyota.co.jp/en/environmental\\_rep/03/kaihatu07.html](http://www.toyota.co.jp/en/environmental_rep/03/kaihatu07.html)

importanti, anche per evitare di spostare gli impatti ambientali da una fase all'altra del ciclo vitale della tecnologia indagata.

#### **4. Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche**

Nell'ambito dell'obiettivo D del Progetto 3.5 "Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto", l'ENEA e il Dipartimento dell'Energia (ex Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali - DREAM) dell'Università degli Studi di Palermo hanno sviluppato uno studio LCA per valutare gli impatti energetico-ambientali connessi alla produzione (escluso l'assemblaggio) di celle basate sulla tecnologia ferro-fosforo da impiegare nelle batterie di avviamento di auto elettriche. L'attività è stata sviluppata attraverso tre fasi consecutive, che sono descritte nei seguenti paragrafi.

##### **4.1 Stato dell'arte internazionale sulla LCA applicata alle batterie**

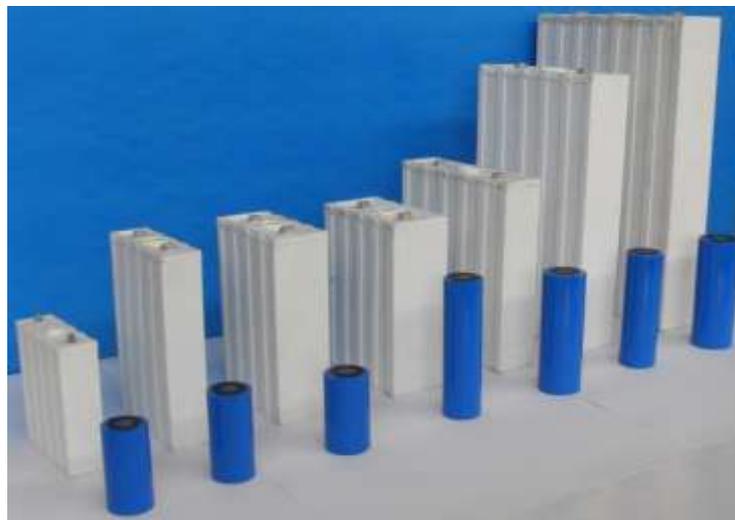
La prima fase di svolgimento dell'attività è consistita nell'analisi dettagliata dello stato dell'arte internazionale sulla LCA applicata alle batterie, condotta prendendo in esame i più recenti studi di letteratura inerenti a questi sistemi. Dall'analisi degli studi rilevati in letteratura, la cui sintesi è riportata nel Rapporto di dettaglio "Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche", sono emerse delle considerazioni sia di carattere metodologico che applicativo, che sono state utili per la definizione delle scelte metodologiche intraprese nello studio di LCA delle batterie per autotrazione.

Relativamente al numero di pubblicazioni sulla fase di uso e il ciclo di vita dei combustibili di veicoli elettrici, pochi studi si focalizzano sulla produzione delle batterie (Hawkins et al. 2011). Si prevede che in futuro la maggior parte dei veicoli ibridi e elettrici puri monteranno batterie a Li-ione. Su queste batterie sono disponibili alcuni studi, ma i risultati sono presentati in forma altamente aggregata e senza riportarne gli inventari e ciò ne limita fortemente l'usabilità e la significatività fisica. In alcuni casi gli stessi autori indicano come incompleti gli inventari utilizzati, per cui i risultati ottenuti possono essere solo indicativi per una stima minima degli impatti. Dagli studi, in particolare i più recenti, risulta che la fase d'uso è la maggior responsabile della quota degli impatti ambientali di una batteria. In particolare, sebbene il 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 Li 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 Li non è particolarmente energivoro, è piccolo 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 processi di realizzazione danno un contributo significativo. Un aspetto da approfondire è inoltre il potenziale di risparmio di risorse derivanti dal riciclaggio delle batterie.

##### **4.2 LCA delle batterie per autotrazione.**

La seconda fase ha riguardato lo studio di LCA di dettaglio. A seguito di diversi incontri tenutisi tra i tecnici e i ricercatori dell'Università di Palermo, del Laboratorio ENEA UTVLAMB-LCA di Bologna, dell'Università di Pisa e del Laboratorio ENEA UTTEI-VEBIM di Casaccia (RM) si è

deciso che l'oggetto dell'analisi del ciclo di vita fossero le batterie di avviamento di taglie di 30, 60, 100Ah, con tensione nominale di 14 V, basate su tecnologia ferro-fosforo ( $\text{LiFePO}_4$ ). Le batterie di avviamento oggetto dello studio sono batterie al prodotte dalla ditta Hipower, riportate nella Figura 8.



**Figura 8: Batterie prodotte da Hipower**

Lo studio di LCA è stato condotto in conformità alle norme della serie ISO 14040 (2006). In particolare considerato che la metodologia LCA è stata applicata a differenti tipologie di batterie di avviamento, sono state selezionate le seguenti Unità Funzionali:

- UF<sub>1</sub>: N.1 batteria con celle al  $\text{LiFePO}_4$  del tipo HP-PW-30AH;
- UF<sub>2</sub>: N.1 batteria con celle al  $\text{LiFePO}_4$  del tipo HP-PW-60AH;
- UF<sub>3</sub>: N.1 batteria con celle al  $\text{LiFePO}_4$  del tipo HP-PW-100AH.

Nel rapporto tecnico "Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche" (Cellura et al. 2011) è descritto nel dettaglio lo studio di LCA che ha previsto la definizione del campo di applicazione e le principali ipotesi ed assunzioni necessarie per eseguire l'analisi, oltre che la scelta degli indicatori energetico-ambientali da calcolare per la sintesi dei risultati. Lo studio è stato sottoposto a revisione da parte di ENEA e le principali considerazioni sono descritte di seguito. La fase più impegnativa dello studio di LCA è stata l'analisi d'inventario, che ha previsto la realizzazione di un questionario di raccolta dati redatto in duplice lingua, italiana e inglese. Il questionario è stato inviato alla ditta produttrice Hipower, presso cui sono state acquistate le batterie oggetto dello studio. La ditta ha però fornito solo la scheda tecnica della batteria da cui si sono potuti determinare solo alcuni dati parziali sulla batteria, quali il peso dei componenti. Gli altri dati sono stati ricavati da database ambientali disponibili nel software per LCA SimaPro 7. In dettaglio, laddove possibile, è stato fatto riferimento al database Ecoinvent. Il processo di determinazione delle prestazioni energetico - ambientali delle batterie è stato realizzato tramite il supporto del software specializzato per LCA SimaPro 7.

I risultati ottenuti hanno consentito di stimare le prestazioni energetico - ambientali dei prodotti in esame e di individuare le fasi del ciclo di vita caratterizzate dai maggiori impatti. 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 (circa il 67-77%) durante l'intero ciclo di vita. Al momento 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%.

Occorre evidenziare che lo studio andrebbe ulteriormente implementato ricorrendo a dati primari sul ciclo di vita della batteria (in particolare dati relativi ai processi produttivi). Si rileva comunque che i dati relativi ai materiali e ai componenti delle celle, che rappresentano l'elemento fondamentale della batteria, sono stati forniti direttamente dall'azienda produttrice.

#### **4.3 Organizzazione dei dati primari in formato ILCD-compliant**

La terza e ultima fase dell'attività inerente l'obiettivo D ha riguardato l'organizzazione dei data sets primari ottenuti nella fase di inventario (LCI). Come descritto al paragrafo 2.4 i data sets primari possono costituire un'importante base per la realizzazione di una banca dati di LCA specifica di settore valida in ambito nazionale, conforme alla banca dati dell'European Platform on Life Cycle Assessment. Per questo motivo i data sets sono stati realizzati in accordo con le linee guida internazionali per l'applicazione dell'LCA (JRC, 2010c) in formato ILCD-compliant. In particolare data sets primari ottenuti nella fase di Life Cycle Inventory, sono stati presentati secondo le seguenti categorie di impatto:

- consumo materie prime (compartimento prima);
- emissioni in aria (compartimento aria);
- emissioni in acqua (compartimento acqua);
- emissioni al suolo (compartimento terreno).

Per ciascun input o output, sono stati specificati:

- nome della sostanza;
- compartimento;
- sottocompartimento;
- unità di misura;
- valore.

Tali data sets sono stati riprodotti attraverso dei fogli Excel dove sono riportati i dati di inventario relativi alle tre unità funzionali esaminate. I data sets includono i dati di inventario di ciascuna tipologia di celle al Li-Ione e in accordo all'ILCD Handbook, tali dati sono stati corredati da metadati atti a garantire la trasparenza dello studio. Una descrizione dettagliata dei data sets è contenuta nel rapporto tecnico "Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche" (Cellura et al. 2011).

## **5. Divulgazione dei risultati delle attività**

In merito all'attività dell'obiettivo D, è stata presentata una relazione scientifica per la Call for Paper del Convegno Scientifico della Rete Italiana LCA che si terrà il 9 novembre ad Ecomondo 2011, 15° fiera internazionale del recupero di materia ed energia e dello sviluppo sostenibile. La relazione scientifica dal titolo "Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche" descrive i principali aspetti metodologici e i risultati emersi dall'attività svolta in collaborazione tra ENEA e Università di Palermo.

Inoltre è stata predisposto un articolo, sempre inerente l'attività dell'obiettivo D, di prossima pubblicazione sulla Newsletter LCA, trimestrale a cura della Rete Italiana LCA, che conta oltre 400 iscritti.

In Allegato al presente documento sono riportati gli articoli sottomessi.

## **6. Conclusioni e sviluppi successivi**

Le attività inerenti l'obiettivo D del Progetto 3.5 hanno previsto la valutazione delle prestazioni energetico - ambientali di batterie Li-Ione adatte all'alimentazione della propulsione elettrica pura, comprensive del sistema BMS (Battery Management System). Come descritto in questo rapporto tecnico la metodologia scelta per realizzare tale valutazione è l'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment - LCA), in linea anche con i più recenti bandi dei programmi di ricerca europei che richiedono che ogni progetto di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie sia accompagnato da uno studio di LCA. Come dimostrano anche le politiche europee su ambiente, energia, risorse e rifiuti, a cui si sono affiancate anche numerose iniziative private, l'LCA e l'approccio di ciclo di vita sono diventati sempre più strumenti necessari per valutare i potenziali impatti di prodotti industriali, già in fase di concezione e 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 problemi ambientali da uno stadio all'altro del ciclo di vita e da un impatto all'altro, ottenendo una valutazione complessiva delle prestazioni energetico-ambientali di processi, prodotti, sistemi e tecnologie.

Lo studio di Life Cycle Assessment delle batterie per autotrazione è stato realizzato in collaborazione con il Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo e in accordo alle norme della serie ISO 14040 (2006) ed all'International Reference Life Cycle Data System ILCD Handbook, linee guida internazionali per condurre uno studio di LCA. In conformità con lo standard internazionale ISO 14040 la realizzazione dello studio di LCA delle batterie per autotrazione di ultima generazione ha comportato la raccolta dati relativi a tutte le fasi del ciclo di vita, la valutazione degli impatti e l'interpretazione dei risultati. Il ciclo di vita di una batteria inizia con l'estrazione delle materie prime e termina con lo smaltimento dei suoi componenti che non possono essere ulteriormente utilizzati. La produzione dei materiali principali ed ausiliari, la fabbricazione, l'uso e il riciclaggio della batteria sono gli stadi intermedi della vita della batteria. Ciascuno di questi stadi implica un certo impatto ambientale, che dipende da diversi parametri. Attraverso la metodologia LCA è stato possibile la determinazione degli impatti rispetto a diverse categorie di impatto, quali consumo di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile, effetto serra potenziale (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).

Le fasi più rilevanti della valutazione LCA sono state la fase d'uso delle batterie, rispetto alla quale i risultati ottenuti hanno evidenziato che il consumo di energia primaria è responsabile dei maggiori impatti energetico - ambientali, circa il 67-77% dell'intero ciclo di vita.

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 al peso dei componenti della batteria. In carenza di dati primari inerenti le

fasi dei processi produttivi, la fase d'uso e il fine vita sono stati utilizzati dati di letteratura (dati secondari), ricavati anche dall'analisi dello stato dell'arte internazionale degli studi di LCA sulle batterie. In futuro sarebbe importante soprattutto per la fase di uso, responsabile della maggior parte degli impatti nel ciclo di vita della batteria, poter utilizzare (appena fossero disponibili) i dati primari derivanti dalle prove sperimentali di carico/scarico effettuate sulle batterie di avviamento.

Ulteriori sviluppi potrebbero inoltre consistere nell'effettuazione di un'ulteriore valutazione di LCA dei componenti (moduli integrati completi di BMS, sistemi di ricarica rapida) e dei materiali innovativi (quali schiume metalliche ad Aluminum Foam Sandwich AFS, materiali metallici cellulari, materiali cellulari ibridi polimero metallo, materiali compositi a base di fibre naturali) sviluppati nell'ambito del Progetto 3.5. L'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, identificando opportuni scenari di impiego.

## **7. Bibliografia**

Bureima, FS, Sergeant, N, Wynen, V., Van Mierlo, J., CLEVER – Clean Vehicle Research: LCA and Policy Measures, Report Task 1.2 – overview of environmental vehicle assessment, 2007.

Campanari, S.; Manzolini, G. & de la Iglesia, F. G. (2009), Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations, *Journal of Power Sources* 186(2), 464 - 477.

Cappellaro F., Scalbi S., Masoni P: "The Italian Network on LCA" *Int J Life Cycle Assess* 13 (7) 523-526. 2008.

Cappellaro F. & Scalbi S. (a cura di) "La Rete Italiana LCA: prospettive e sviluppi del Life Cycle Assessment in Italia". Dossier ENEA. ISBN:978-88-8286-240-4. (2011) <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/edizioni-enea/La%20rete%20italiana%20LCA>

Castro, M., Remmerswaal J., Reuter, M., Life cycle impact assessment of the average passenger vehicle in the Netherlands, *Int J LCA* **8** (2003) (5), pp. 297–304.

Cellura M., Longo S., Orioli A. Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche. Report Ricerca di Sistema Elettrico Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Settembre 2011.

COM (2005) 666, 2005, "Portare avanti l'utilizzo sostenibile delle risorse - Una strategia tematica sulla prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti"

COM(2003) 302, 2003, "Politica integrata dei prodotti - sviluppare il concetto di ciclo di vita dei prodotti. Comunicazione sulla IPP"

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)

COM(2008) 397, 2008, "Piano di azione per la produzione e il consumo sostenibile e Politica industriale sostenibile"

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

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.

European Commission, JRC-IES: 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>

European Commission, JRC-IES: 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>

European Commission, JRC-IES: 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>

European Commission, JRC-IES: 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>

Finkbeiner, M., Hoffmann, R., Ruhland, K., Liebhart, D., Stark, B., Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes Benz S-Class, International Journal of LCA, 2006.

Grujicic, M., Sellappan, V., He, T., Seyr, N., Obieglo, A., Erdmann, M., Holzleitner, J., Total life cycle-based materials selection for polymer metal hybrid body-in-white automotive components. J. Mater. Engng Performance 18 (2) (2009): 111-128.

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.

ISO (UNI EN) 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, ISO 14040:2006(E), International Organization for Standardization, 2006, Geneva, Switzerland.

ISO (UNI EN) 14044, Environmental Management - Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, ISO 14040:2006(E), International Organization for Standardization, 2006, Geneva, Switzerland.

Krinke, S., Boßdor-Zimmer, B., Goldmann, D., 2005, Volkswagen AG - Life Cycle Assessment of End-of-Life Vehicle Treatment.

Lane, B., Life Cycle Assessment of different vehicle fuels and technologies, London Borough of Camden, March 2006.

McDonough W. & Braungart M. (2002), Cradle to cradle: remaking the way we make things, North Point Press, 2002.

Millennium Ecosystem Assessment, (2005) . Synthesis Reports. <http://www.millenniumassessment.org>

REACH Reg (2006) Regolamento (CE) n. 1907/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 18 dicembre 2006, concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche.

Rete Italiana LCA" [www.reteitalianalca.it](http://www.reteitalianalca.it)

Schiavone, F.; Pierini, M. & Eckert, V. (2008), Strategy-based approach to eco-design: application to an automotive component, Int. J. Vehicle Design 46(2), 156-171.

Schmidt WP, et. al (2004), Life Cycle Assessment of Lightweight and End- of- Life Scenarios for Generic Compact Class Passenger Vehicles LIRECAR; Int J LCA 9 (6) 405- 416.

Spielmann, M. & Althaus, H.-J. (2007), Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? Life Cycle analysis of Swiss passenger cars, *Journal of Cleaner Production* 15(11-12), 1122 - 1134.

UNDP-United Nations Development Programme, 2007, Rapporto sullo sviluppo umano 2007-2008 Cap 2 - Crisi climatiche: rischio e vulnerabilità in un mondo disuguale.

Volkswagen A.G., The Passat Environmental Commendation – Detailed Version, 2009.

Zackrisson, M.; Avellán, L. & Orlenius, J. (2010), Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues, *Journal of Cleaner Production* 18(15), 1519 - 1529.

**Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche**

Francesca Cappellaro [francesca.cappellaro@enea.it](mailto:francesca.cappellaro@enea.it), Paolo Masoni - ENEA  
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. 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 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.

### *2.2. 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)

ALLEGATO  
ARTICOLO SOTTOMESSO AL CONVEGNO DI ECOMONDO 2011

sia presenta 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.

### **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.

#### *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 ( $\text{LiFePO}_4$ ) del tipo HP-PW prodotte da un'azienda leader a livello mondiale. In particolare sono state selezionate le seguenti Unità Funzionali:

- UF<sub>1</sub>: N.1 batteria con celle al  $\text{LiFePO}_4$  del tipo HP-PW-30AH;
- UF<sub>2</sub>: N.1 batteria con celle al  $\text{LiFePO}_4$  del tipo HP-PW-60AH;
- UF<sub>3</sub>: N.1 batteria con celle al  $\text{LiFePO}_4$  del tipo HP-PW-100AH.

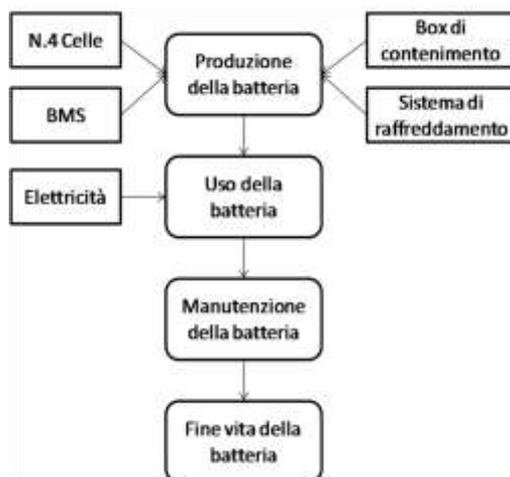
Ogni unità funzionale è costituita dai seguenti componenti principali:

- 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.

ALLEGATO  
ARTICOLO SOTTOMESSO AL CONVEGNO DI ECOMONDO 2011



**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.

### 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  $\text{LiFePO}_4$  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.

ALLEGATO  
ARTICOLO SOTTOMESSO AL CONVEGNO DI ECOMONDO 2011

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

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

	UF <sub>1</sub>	UF <sub>2</sub>	UF <sub>3</sub>
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)

#### 4. 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.

## 5. 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/es103607c , 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>

ALLEGATO  
ARTICOLO SOTTOMESSO AL CONVEGNO DI ECOMONDO 2011

- [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>

## LCA per la Ricerca di Sistema Elettrico



A cura di F. Cappellaro, M. Cellura e S. Longo

La Ricerca di Sistema Elettrico ha come obiettivo l'innovazione del sistema elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile. Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico, il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE. Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale. Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate.

Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, in particolare del Progetto 3.5 "Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto", l'ENEA e il Dipartimento dell'Energia dell'Università degli Studi di Palermo hanno sviluppato uno studio LCA per valutare gli impatti energetico-ambientali connessi alla produzione (escluso l'assemblaggio) di celle basate sulla tecnologia ferro-fosforo da impiegare nelle batterie di avviamento di auto elettriche.

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 cicli di vita appaiono importanti, anche per evitare di spostare gli impatti ambientali da una fase all'altra del ciclo vitale della tecnologia indagata. Dallo studio è emerso che 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.

I risultati di questo studio sono stati presentati lo scorso 19 settembre a Roma, dove presso la Sede Legale dell'ENEA si è tenuto il Convegno "L'ENEA e la Ricerca di Sistema Elettrico: i sistemi di accumulo" organizzato nell'ambito dell'Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico.

Nel corso del workshop sono state descritte le principali attività che presentano significative potenzialità di applicazione e ampie prospettive di mercato, evidenziate anche da una crescente richiesta, e precisamente:

- i sistemi stazionari applicabili alle reti elettriche per svolgere funzioni di regolazione e miglioramento dell'efficienza energetica, soprattutto in abbinamento con le fonti rinnovabili
- i sistemi di accumulo elettrico per la trazione elettrica stradale, in particolare per le auto elettriche e per i veicoli ibridi ormai prodotti dalle principali industrie automobilistiche.

Oltre al Life Cycle Assessment (LCA) delle batterie Li-Ione, sono stati illustrati gli studi sulla gestione e controllo verso la rete dei sistemi di accumulo, la ricerca di base sulle celle al litio da laboratorio, la sperimentazione di batterie, supercondensatori e sistemi di accumulo completi.

Per quanto riguarda l'LCA ulteriori sviluppi della ricerca potrebbero consistere nell'utilizzare l'analisi di ciclo di vita 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 (Battery Management System), 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. L'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.

**"... il ruolo della batteria elettrica è uno dei parametri significativi nel miglioramento dell'eco-profilo della "mobilità elettrica"..."**