

LINEE GUIDA ARCA

PER LA "LIFE CYCLE ASSESSMENT" (LCA)

Il presente documento è stato realizzato dal seguente gruppo di lavoro sotto il coordinamento tecnico-scientifico di **Antonio Frattari** – Università degli Studi di Trento e **Stefano Menapace** – ARCA Casa Legno S.r.l.

Autore:

Anna Peghini

Gruppo di revisione:

Maria Cristina Grillo – PhD Laboratorio di Progettazione Edilizia dell'Università degli Studi di Trento.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI TRENTO

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE | 4 |
| 1. SCOPO E CAMPO D'APPLICAZIONE | 6 |
| 2. RIFERIMENTI | 7 |
| 2.1 Riferimenti regolamentari e normativi | 7 |
| 2.2 Termini e definizioni | 8 |
| 2.3 Simboli..... | 11 |
| 3. POTENZIALITÀ E LIMITI DEL METODO LCA | 12 |
| 4. MODALITÀ DI CALCOLO | 15 |
| 4.1 Generalità..... | 15 |
| 4.2 Definizione di ambito e obiettivo (Goal and Scope Definition - ex ISO 14041) | 15 |
| 4.3 Analisi dell'inventario (LCI) (Life Cycle Inventory - ex ISO 14041) | 17 |
| 4.4 Stima dell'impatto ambientale (LCIA) (Life Cycle Impact Assessment - ex ISO 14042) | 20 |
| 4.5 Interpretazione e miglioramento dei risultati (Life Cycle Interpretation - ex ISO 14043) | 23 |
| 5. APPLICAZIONI LCA NEL SETTORE DELL'EDILIZIA | 25 |
| 5.1 Generalità..... | 25 |
| 5.2 Valutare la sostenibilità | 25 |
| 5.3 Life Cycle Design | 27 |
| 5.4 Fasi LCA per un edificio | 28 |
| BIBLIOGRAFIA | 31 |

LINEE GUIDA ARCA PER LA LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni è maturata l'attenzione nei confronti di problematiche di carattere ambientale, e in particolare è aumentato l'interesse nello sviluppo di metodi e tecniche che permettano di comprendere, valutare e conseguentemente ridurre i possibili impatti sia dei prodotti realizzati, sia di quelli che una volta utilizzati esauriscono la loro vita operativa e devono essere smaltiti.

Con l'aumento della "consapevolezza ambientale" della società, e quindi di una crescente domanda di prodotti ecocompatibili da parte dei consumatori, le industrie e le imprese stanno valutando sempre più come le loro attività influenzino l'ambiente, iniziando a interessarsi all'esaurimento delle risorse naturali e al degrado ambientale nel settore delle costruzioni. Le prestazioni ambientali e di costo sono due dei principali criteri di selezione, e insieme alle prestazioni sociali rappresentano i tre pilastri dello sviluppo sostenibile. Molte aziende vogliono andare oltre la conformità alle strategie di prevenzione dell'inquinamento e di sistemi di gestione ambientale in grado di migliorare le proprie prestazioni, adeguandosi all'obiettivo dell'eco-efficienza e della qualità totale. Il perseguimento di questi obiettivi comporterà un nuovo modo di procedere all'interno delle aziende: il progetto e la produzione di nuovi prodotti sarà accompagnato dalla valutazione del loro "ciclo di vita" o "Life Cycle Assessment".

La valutazione del ciclo di vita nacque negli anni '60 in ambito industriale, al fine di valutare l'impatto ambientale relativo alla produzione; ma cominciò solo negli anni '70 a essere utilizzata al di fuori del settore industriale. Alla fine degli anni Ottanta permaneva, tuttavia, una situazione d'enorme confusione: rapporti riguardanti LCA condotti sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti. Il motivo di ciò è da attribuire alla scarsa uniformazione delle valutazioni, per cui gli studi effettuati si basavano su dati, metodi e terminologie fra loro differenti. Divenne presto evidente la necessità di una metodologia univoca e standardizzata. Il dibattito scientifico fu portato avanti sotto il patrocinio della SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) di Vermont in Canada, e uno dei risultati più importanti fu la pubblicazione di un quadro di riferimento internazionalmente accettato.

"Una LCA è un procedimento oggettivo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente, e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"): dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e allo smaltimento finale."

SETAC, 1993

Dalla definizione appena fornita, si riesce a comprendere come il processo LCA si fondi su un unico principio: un prodotto va seguito e analizzato in ogni fase della sua vita, dalla culla alla tomba, da quando è prodotto a quando è smaltito, in quanto ogni azione associata ad una fase può avere riflessi su quelle precedenti o successive. Punto fondamentale della teoria è la definizione di "sistema industriale" (SI), che la norma ISO qualifica come "sistema di prodotti", con cui si intende un insieme di procedure la cui funzione principale è la produzione di beni utili. Il sistema industriale è separato dal sistema ambientale da confini fisici ben definiti ed è a esso collegato grazie allo scambio di input ed output.

In quest'ottica, l'ambiente non è quindi quello naturale definito dall'ecologia, ma è tutto ciò che sta all'esterno del sistema industriale considerato, e risulta chiaro come gli input del sistema sono parametri che intervengono nel dibattito sui problemi di risparmio delle risorse, mentre gli output riguardano i problemi di inquinamento. Ne consegue che più che descrivere il prodotto, un'LCA descrive il sistema che lo genera. Solo nel caso in cui il sistema industriale possieda un unico flusso interno di prodotto, lo studio del comportamento del sistema coincide con quello del prodotto. Un'LCA, quindi, è fondamentalmente una tecnica quantitativa che permette di determinare i fattori in ingresso (materie prime, uso di risorse, energia, acqua) e in uscita (consumi energetici, scarichi idrici, produzione di rifiuti, emissioni inquinanti) dal ciclo di vita di ciascun prodotto valutandone i conseguenti impatti ambientali.

L'LCA valuta i potenziali impatti ambientali di produzione/sistema/servizio relativi alla salute umana, alla qualità dell'ecosistema e all'impoverimento delle risorse, considerando inoltre gli impatti di carattere economico e sociale. L'obiettivo di un'analisi del ciclo di vita è dunque quello di definire un quadro completo delle interazioni di un prodotto o di un servizio con l'ambiente che lo circonda, al fine di comprendere le conseguenze ambientali causate direttamente o indirettamente e di fornire le informazioni necessarie a valutare i comportamenti e gli effetti ambientali di una attività e a identificare le opportunità di miglioramento e di gestione di prodotti e servizi, al fine di raggiungere le migliori soluzioni per intervenire sulle condizioni ambientali. Attraverso lo studio di un'LCA si finirà con l'individuare le fasi e i momenti in cui si concentrano maggiormente le criticità ambientali, i soggetti che dovranno farsene carico (produttore, utilizzatore) e le informazioni necessarie per realizzare gli interventi di miglioramento. Infine risulta evidente come l'LCA dovrebbe essere inteso correttamente come una comparazione il più possibile completa tra due o più prodotti, gruppi di prodotti, sistemi, metodi o approcci alternativi, diretta a rivelare i punti deboli, a migliorare le qualità ambientali, a promuovere prodotti e processi ecologici, a comparare approcci alternativi e dare fondamento alle azioni suggerite.

L'affermarsi dell'LCA è, quindi, in qualche modo, l'effetto simultaneo di tre eventi:

- della crescente consapevolezza che i problemi ambientali non possono più essere affrontati per singoli comparti (aria, acqua, suolo) ma richiedono una valutazione e intervento globale.
- della nuova attenzione alle politiche di prodotto come componente importante delle politiche ambientali.
- della presenza di un'opinione pubblica che richiede informazioni ambientali e di consumatori che scelgono le merci e i servizi che vengono loro offerti in base a criteri di qualità ambientale.

1. SCOPO E CAMPO D'APPLICAZIONE

L'intento delle presenti linee guida è quello di fornire informazioni sull'utilizzo della Life Cycle Assessment (LCA) come metodologia di calcolo e valutazione dell'impatto ambientale.

Al fine di fornire uno strumento pratico ARCA ha realizzato un apposito software di calcolo denominato "LCA-ARCA".

Si ricorda, infine, che ARCA considera, attraverso i propri Regolamenti Tecnici di certificazione, ulteriori requisiti di qualità e sostenibilità.

Ulteriori informazioni sulla certificazione ARCA e sul software "LCA-ARCA" sono disponibili sul sito **www.arcacert.com**.

2. RIFERIMENTI

2.1 Riferimenti regolamentari e normativi

I lavori di redazione delle norme delle serie ISO 14000, iniziati nel 1993, sono di competenza del Comitato Tecnico internazionale ISO/TC 207 (Technical Committee 207), con lo scopo di fornire una guida pratica per l'attuazione o il miglioramento di un sistema di gestione ambientale interno all'organizzazione e per fornire mezzi attendibili per comunicare informazioni sugli aspetti energetici ed ambientali dei processi produttivi. Le norme ISO 14000 si possono dividere in due categorie:

▪ Le norme di SISTEMA

Specificano i requisiti di un sistema di gestione ambientale che consente a un'organizzazione di formulare una politica ambientale e stabilire degli obiettivi, tenendo conto degli aspetti legislativi e delle informazioni riguardanti gli impatti ambientali significativi. Di seguito si presenta un elenco delle principali norme di sistema di riferimento.

- UNI EN ISO 14001:2004: *"Requisiti e guida per l'uso sui sistemi di gestione ambientale"*.
- UNI EN ISO 14004:2005: *"Linee guida generali su principi, sistemi e tecniche di supporto di sistemi di gestione ambientale"*.
- UNI EN ISO 19011:2003: *"Linee guida per gli audit dei sistemi di gestione per la qualità e/o di gestione ambientale"* (ha sostituito le precedenti UNI EN ISO 14010, 14011 e 14012).
- UNI EN ISO 14031:2000: *"Linee guida di Gestione ambientale - Valutazione della prestazione ambientale"*.

▪ Le norme di PRODOTTO

A livello internazionale, per valutare correttamente gli impatti ambientali del ciclo di vita dei prodotti sono disponibili, da circa 10 anni, le norme ISO (International Organization for Standardization) della serie 14040, recentemente aggiornate, recepite anche in Italia come norme UNI. Con il progetto ISO 14040 si intende, in particolare, porre ordine in tutte le procedure di analisi e controllo dei rendimenti ambientali dei sistemi produttivi e predisporre un unico riferimento normativo adottabile in tutti i paesi del mondo. Un'LCA dovrebbe, come requisito minimo, seguire tali norme per essere accettata in discussioni pubbliche e garantire la credibilità dello studio, in quanto esse rappresentano un riferimento riconosciuto in campo internazionale per la gestione ambientale (Environmental Management) e per i sistemi di gestione ambientale (Environmental Management System) dei sistemi produttivi. Gli standard ISO 14040 non prescrivono una metodologia, bensì forniscono informazioni sul modo in cui condurre, rivedere, presentare e utilizzare uno studio LCA. Essi riguardano la terminologia LCA, la qualità dei dati e il modo in cui garantirla, la presentazione dei risultati, le applicazioni del metodo LCA e i suoi limiti, prevedendo che la raccolta e l'analisi dei dati vengano condotte da soggetti terzi indipendenti e siano sottoposte a revisione critica condotta da esperti imparziali. Di seguito si riporta l'elenco dei principali riferimenti normativi.

- UNI EN ISO 14040:1998: La norma descrive il quadro di riferimento generale, i principi e i requisiti per la conduzione e comunicazione degli studi LCA. Essa copre numerosi aspetti della gestione ambientale d'impresa, incontrando le esigenze espresse dalle aziende, dai governi, dalle organizzazioni non governative (ONG) e dai consumatori stessi. Non descrive in dettaglio le tecniche di valutazione del ciclo di vita.
- UNI EN ISO 14044:2006: Introdotta nel più recente aggiornamento, tale norma va ad accorpate le ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043, snellendo la normativa. Tale norma specifica i requisiti e le procedure necessarie per compilare e preparare la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione di una valutazione del ciclo di vita (LCA), nonché per condurre, interpretare e riportare un'analisi d'inventario del ciclo di vita (LCI). Inoltre descrive la valutazione dell'impatto e l'interpretazione del ciclo di vita.
- UNI EN ISO 14020:2002: Stabilisce i principi guida per lo sviluppo e l'utilizzo di etichette e dichiarazioni ambientali, e non è destinata all'utilizzo come specifica a fini di certificazione e registrazione.

Lo studio LCA include inoltre la valutazione delle emissioni di CO₂ del ciclo di vita dei prodotti di legno, in conformità con gli standard relativi. A livello europeo l'importanza strategica dell'adozione della metodologia LCA è espressa chiaramente all'interno del Libro Verde COM 2001/68/CE e della COM 2003/302/CE sulla Politica Integrata dei Prodotti, ed è suggerita, almeno in maniera indiretta, anche all'interno dei Regolamenti Europei EMAS ed Ecolabel.

2.2 Termini e definizioni

L'analisi LCA è basata su indicatori sintetici (quantitativi), suddivisi in categorie di impatto ambientale, che valutano il consumo di risorse e le emissioni sulle matrici ambientali (acqua, suolo e aria). A seconda del metodo di calcolo adottato per eseguire la valutazione LCA, esistono diverse categorie di impatto, riguardanti la salute umana e ambientale.

▪ Potenziale di Surriscaldamento Globale (GWP, Global Warming Potential)

Il meccanismo noto come "effetto serra" è causato dalla capacità di assorbimento della radiazione infrarossa riemessa dal suolo terrestre da parte dei gas atmosferici, chiamati anche gas serra. Questo comportamento provoca il surriscaldamento di tutto il globo terrestre a causa dell'aumento di temperatura che si verifica negli strati più bassi dell'atmosfera. I gas serra prodotti dalle attività antropiche possono provocare scompensi nel sistema naturale se le quantità emesse e la velocità con cui cresce la loro concentrazione superano determinati limiti. Il gas serra che desta maggiori preoccupazioni è l'anidride carbonica (CO₂), poiché il suo continuo aumento di concentrazione deriva principalmente dalla combustione dei combustibili fossili (emissione annua dell'ordine dei 10 miliardi di t di CO₂) e dalla distruzione della foresta pluviale dei tropici (pari a due terzi dell'Italia), con conseguente riduzione della capacità di assorbimento di CO₂ da parte della copertura vegetale del pianeta. Altri gas serra, con minor grado di assorbimento dei raggi infrarossi, sono il metano (CH₄), l'ozono troposferico, il vapore acqueo, il protossido di azoto (N₂O), i clorofluorocarburi (CFC), gli idrofluorocarburi (HFC) e i gas correlati (idroclorofluorocarburi, HCFC).

L'indicatore utilizzato è il potenziale di surriscaldamento globale GWP, 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 un indice, basato sulla concentrazione e sul periodo di esposizione, che esprime quanto un gas contribuisce all'effetto serra basandosi su una scala relativa che confronta la sostanza considerata con la quantità equivalente di CO₂, il cui valore convenzionale di GWP è per definizione pari a 1. I quantitativi di gas serra oggetto dell'analisi vengono normalmente espressi in kg di CO₂ equivalenti (kg CO₂eq), attraverso un'operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale. Ogni valore di GWP è calcolato per uno specifico intervallo di tempo indicato a pedice, normalmente pari a 20, 100, 200 o 500 anni per tener conto del fatto che le varie sostanze si decompongono e inattivano in periodi di tempo molto lunghi (più frequentemente si utilizza un arco temporale di 100 anni espresso come GWP₁₀₀). Il GWP complessivo sarà dato dalla seguente relazione:

$$GWP = \sum GWP_i * m_i$$

dove:

- GWP_i è il potenziale di riscaldamento globale della sostanza i-esima,
- m_i è la massa della stessa sostanza, espressa in kg.

| Gas serra | GWP ₁₀₀ |
|------------------|--------------------|
| CO ₂ | 1 |
| CH ₄ | 21 |
| N ₂ O | 310 |
| CF ₄ | 6500 |
| SF ₆ | 23900 |

▪ Potenziale di Acidificazione (AP, Acidification Potential)

La combustione del carbone, del petrolio e degli altri idrocarburi, oltre a produrre anidride carbonica, dà luogo anche alla produzione di altri agenti inquinanti, quali piombo, anidride solforosa e biossido di azoto. Tali residui, liberati nell'atmosfera, entrano in soluzione nel vapore acqueo delle nubi e, trasformandolo in gocce di acidi potenti come l'acido solforico e l'acido nitrico, ricadono a terra sotto forma di pioggia, neve e nebbia (fenomeno delle "piogge acide"). L'acidificazione è dunque quel fenomeno che si genera in seguito all'emissione nel suolo, attraverso precipitazioni atmosferiche, di particolari composti acidi derivanti dalla combustione di combustibili fossili (biossido di zolfo SO₂, ossido di azoto NO_x e NH₃), che hanno la capacità di rilasciare protoni. Ne consegue l'abbassamento del pH di terreni agricoli, falde acquifere, laghi e foreste, con pesanti e gravi conseguenze sugli organismi viventi. Anche le costruzioni, i monumenti e i materiali in genere riportano danni rilevanti in seguito alle deposizioni acide. 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.

L'indicatore AP misura la tendenza di un elemento a diventare acidificante, quindi misura la sua capacità di formare protoni, con l'intervento di catalizzatori come ossidi di ferro e umidità. La sostanza di riferimento per la standardizzazione è il biossido di zolfo (SO₂). L'AP è espresso in kg di SO₂ equivalente, o in termini di mole di H⁺ prodotte, e si ottiene dalla seguente relazione:

$$AP = \sum AP_i * m_i$$

dove per un generico gas:

- AP_i è il potenziale di acidificazione della sostanza rilasciata;
- m_i è la massa della sostanza, espressa in kg.

| Formula | Sostanza | AP |
|-----------------|----------------------|------|
| SO ₂ | Biossido di zolfo | 1,00 |
| NO | Monossido di azoto | 1,07 |
| NO ₂ | Biossido di azoto | 0,70 |
| NO _x | Ossidi di azoto | 0,70 |
| NH ₃ | Ammoniaca | 1,88 |
| HCl | Acido idrocloridrico | 0,88 |
| HF | Acido fluoridrico | 1,60 |

▪ Potenziale di Eutrofizzazione (EP, Eutrophication Potential)

L'eutrofizzazione, detta anche fertilizzazione, è un processo di arricchimento della concentrazione di sostanze nutritive (in particolare fosforo e azoto, dette anche sostanze "biostimolanti") in un ambiente acquatico, per mutazione naturale o favorito da scarichi urbani, agricoli e industriali, che spesso determina uno sviluppo abnorme di alghe e piante acquatiche, di fitoplancton, aumento della torbidità dell'acqua, accumulo di biomassa, diminuzione della quantità di ossigeno disciolto nell'acqua, morie di alcune specie bentoniche, ecc. 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), 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 si 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. Il potenziale di eutrofizzazione EP quantifica il contributo di una sostanza, contenente azoto o fosforo, a favorire la produzione di biomassa, ed è definito come quantità di nutrienti che supera la richiesta stessa delle biomasse. La sostanza di riferimento è il fosfato PO_4 , e il valore finale assunto da quest'indicatore è espresso in kg di PO_4 eq o in kg di O_2 eq. Il sistema avrà un potenziale di eutrofizzazione globale dato dalla sommatoria dei diversi EP, come mostra la seguente relazione:

$$EP = \sum EP_i * m_i$$

dove:

- EP_i è il potenziale di eutrofizzazione della generica sostanza,
- m_i è la massa della rispettiva sostanza.

▪ **Potenziale di Consumo dello strato di Ozono (ODP, Ozone Depletion Potential)**

L'ozono (O_3) è presente in atmosfera con una concentrazione notevolmente variabile che va dalle 50 parti per bilione a suolo a circa 5 parti per milione in stratosfera. Nonostante la sua bassa concentrazione, l'ozono stratosferico è un costituente di fondamentale importanza per la vita sulla Terra, in quanto è in grado di assorbire efficacemente la radiazione solare ultravioletta con lunghezza d'onda compresa fra 0,2 e 0,3 μm^6 , letale per le forme di vita terrestri. Contemporaneamente, è continuamente distrutto in seguito a diverse reazioni chimiche che lo riconvertono in ossigeno molecolare. Il potenziale di riduzione dell'ozono ODP è un indice che quantifica la capacità da parte di un fluido di distruggere lo strato di ozono presente in stratosfera, avente la prerogativa di bloccare la componente ultravioletta dei raggi solari UV. I principali responsabili della rottura delle molecole di ozono, e quindi della formazione del buco nel sottile strato protettivo, sono i clorofluorocarburi (CFC), i clorofluorometani (CFM), gli idroclorofluorocarburi (HFC) e gli HCFC prodotti dall'uomo. Questi composti sono molto stabili, tanto che possono raggiungere inalterati la stratosfera: qui le loro molecole vengono rotte dai raggi ultravioletti, liberando così il cloro che attacca immediatamente le molecole di ozono. Un singolo atomo di cloro può arrivare a rompere fino a diecimila molecole di ozono prima di tornare sulla troposfera sotto forma di acido. La sostanza usata come riferimento è il triclorofluorometano ($CFCl_3$), anche conosciuto come CFC-11. L'ODP misura, sulla base della reattività specifica e del tempo di residenza, il contributo di un'emissione gassosa in atmosfera all'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico sulla base dei singoli contributi calcolati relativamente al potenziale rilasciato dal gas R11 preso a riferimento e per il quale si assume il valore ODP pari a 1 (il peggiore). 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.

Esistono però ancora incertezze sul fenomeno dell'impoverimento dell'ozono stratosferico; infatti, pur essendo riconosciuto l'effetto dannoso dell' NO_2 e dell' N_2O , non è mai stato possibile determinarne i relativi ODP, perché non sono ancora chiari alcuni meccanismi di causa-effetto.

▪ **Potenziale di Ossidazione Fotochimica (POCP, Photochemical Ozone Creation Potential)**

Lo smog fotochimico costituisce una manifestazione dell'inquinamento atmosferico in ambiente urbano e suburbano. Il termine si riferisce ad un miscuglio di gas organici nocivi (fra i quali predominano ossidi di azoto, ozono, ossido di carbonio, aldeidi e idrocarburi), che si forma nella bassa atmosfera per azione della luce solare sulle emissioni derivanti dalle attività umane. La degradazione di tali composti organici volatili (Volatile Organic Compounds, VOC), in presenza di radiazione luminosa e di ossidi di azoto (NO_x) provenienti principalmente dal traffico urbano, è la causa della formazione di molecole di ozono (O_3) in troposfera, dove però costituisce un elemento di pericolo per la salute di piante e animali.

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 (con forte insolazione). In sintesi il fenomeno si articola in quattro fasi:

- reazione tra i composti organici volatili (VOC) e i radicali idrossidi (OH) per formare radicali-perossidi organici.
- reazione dei radicali perossidi (ad es: CH₃OO) con monossido di azoto (NO) per formare NO₂.
- reazione del biossido di azoto, in presenza di raggi solari, per formare NO e atomi di ossigeno.
- reazione degli atomi di ossigeno con le molecole di ossigeno (O₂) per formare ozono.

Durante la seconda fase, in presenza della radiazione solare, l'NO₂ può anche reagire con i radicali perossidi e portare alla formazione del perossiacetil-nitrato (PAN) e del perossibenzoil-nitrato (PBzN), molecole altamente irritanti e pericolose per la salute umana quando si trovano nell'atmosfera.

L'indicatore di conversione utilizzato è il potenziale di formazione di smog fotochimico POCP, che stima il potenziale di creazione di agenti foto-ossidanti di un'emissione gassosa in troposfera e comprende soprattutto i VOC (composti organici volatili). Il POCP è misurato sulla base dei singoli contributi relativi al potenziale della molecola di etilene (C₂H₄), posto uguale a 1, ed è espresso in kg di etilene (C₂H₄) equivalente. Il sistema in esame avrà un potenziale di formazione di smog fotochimico derivante dalla seguente relazione:

$$POCP = \sum POCP_i * m_i$$

dove:

- $POCP_i$ 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 fattori di equivalenza solo per i VOC.

▪ Energia Primaria (PEI, Primary Energy Index):

Il PEI misura la quantità di energia primaria non rinnovabile (PEInr) o rinnovabile (PEIr) impiegata nella catena di produzione del materiale riferita a una sua unità di massa. Anche se elencata tra gli indici di potenziale impatto ambientale, in realtà rappresenta una caratteristica intrinseca di ogni materiale. Le risorse energetiche non rinnovabili comprendono petrolio, gas metano, carbone e uranio. Le risorse energetiche rinnovabili sono legno, energia idrica, energia solare ed energia eolica.

Un primo approccio quantitativo alla valutazione del consumo di risorse, in particolare di quelle non rinnovabili, può essere quello di paragonare il consumo corrente su base annua con quello delle riserve totali accertate. Il consumo di energia primaria non rinnovabile viene calcolato in base al potere calorifico massimo di tutte le risorse energetiche non rinnovabili, mentre il consumo di energia primaria rinnovabile viene ricavato dalle risorse energetiche rinnovabili che sono state impiegate nella catena di realizzazione del prodotto. L'unità di misura è il MJ/Kg o il MJ/m³.

2.3 Simboli

Di seguito si riportano i principali simboli utilizzati nel presente documento con i loro significati e le unità di misura.

| Simbolo | Significato | Unità di misura |
|---------|--|--|
| GWP | Global Warming Potential | Kg CO ₂ /m ³ |
| AP | Acidification Potential | Kg SO ₂ /m ³ |
| EP | Eutrophication Potential | Kg PO ₄ /m ³ |
| ODP | Ozone Depletion Potential | Kg CFC ₁₁ /m ³ |
| POCP | Photochemical Ozone Creation Potential | Kg C ₂ H ₄ /m ³ |
| PEInr | Primary Energy Index (non-renewable) | MJ/m ³ |

3. POTENZIALITÀ E LIMITI DEL METODO LCA

Le potenzialità applicative dell'LCA per il raggiungimento di uno sviluppo economico sostenibile sono molteplici: dalla gestione della singola impresa a quella dei sistemi socioeconomici nazionali, con il coinvolgimento sia del piccolo imprenditore privato sia delle autorità di Governo. Si possono individuare due categorie di utilizzazione: quella degli interventi tipici del mondo produttivo e quella degli interventi di supporto alle decisioni della pubblica amministrazione.

I diversi scopi per i quali l'LCA può essere utilizzata, per quanto riguarda i produttori, si possono così elencare:

- paragonare materiali diversi per uno stesso uso.
- valutare gli effetti dell'utilizzo di risorse per prodotti particolari.
- comparare prodotti equivalenti nell'uso.
- comparare diverse soluzioni all'interno di un processo con lo scopo di individuare quelle che consentono di minimizzare gli impatti ambientali.
- identificare processi, componenti e sistemi che contribuiscono in misura maggiore all'impatto ambientale.
- fornire informazioni di base per l'esecuzione di audit ambientali.
- fornire indicazioni nell'ambito di strategie a lungo termine circa le tendenze relative alla progettazione di prodotti all'uso di materiali.
- aiutare il progettista nella scelta di materiali a basso impatto ambientale nella realizzazione di un determinato prodotto.
- valutare le contestazioni provenienti da altri prodotti.
- accrescere la competitività sul mercato.
- fornire informazioni ai consumatori circa le caratteristiche delle risorse impiegate per i propri prodotti o materiali.

Per ciò che concerne le istituzioni, l'LCA è impiegata per:

- aiutare la valutazione e la differenziazione fra prodotti nell'ambito della concessione di etichette (Ecolabel).
- fornire informazioni al consumatore circa le caratteristiche delle risorse impiegate nella fabbricazione di prodotti o materiali.
- raccogliere informazioni ambientali.
- identificare carenze nella conoscenza di alcuni prodotti e priorità nella ricerca.
- fornire le informazioni necessarie per stabilire degli standard per le informazioni da associare ai prodotti (ad esempio definire il contenuto di materiale riciclato).
- fornire le informazioni necessarie per l'emanazione di norme che limitino l'uso di prodotti o materiali;
- aiutare nello sviluppo di politiche a lungo termine circa l'utilizzo di materiali, conservazione di risorse, riduzione di impatti e rischi connessi con l'uso di materiali e processi produttivi lungo il ciclo di vita di un prodotto.
- valutare contestazioni provenienti dai produttori.
- valutare gli effetti sulle risorse connessi con la riduzione del consumo delle fonti.
- valutare l'utilizzo di tecniche alternative per il trattamento dei rifiuti.

L'LCA non è quindi solo un mezzo per la salvaguardia dell'ambiente; esso può infatti diventare un importante strumento per il rafforzamento delle dinamiche competitive e di riduzione e controllo dei costi. L'LCA non deve però essere considerato un metodo in grado di fornire risultati completi e pienamente esaustivi, poiché fa uso di valutazioni di carattere soggettivo, soprattutto laddove si ha mancanza di informazioni più rigorose. Lo scopo, i confini e il livello di dettaglio di un'LCA dipendono dall'oggetto dello studio e dall'uso che se ne vuole fare. Sebbene la profondità e l'ampiezza dell'indagine possano variare molto a seconda dei casi, lo schema a cui si fa riferimento rimane sempre lo stesso.

In generale, le informazioni ottenute attraverso uno studio di LCA dovrebbero essere usate come parte di un processo decisionale molto più completo e utilizzate per comprendere gli scambi globali o generali. È

possibile confrontare i risultati di differenti studi di LCA, solamente se le assunzioni e il contesto di ciascuno studio sono i medesimi. Per ragioni di trasparenza queste assunzioni dovrebbero essere così esplicitamente dichiarate.

Ciascuna delle molteplici applicazioni dell'LCA può comportare un approccio diverso al problema ed una diversa esecuzione dell'LCA stessa. Differenti sono i modi di procedere a seconda che al centro della valutazione ci sia o l'analisi o la comparazione di tecnologie, di pianificazioni aziendali o di strategie da parte delle istituzioni. Sostanzialmente si possono individuare tre differenti modi di condurre un'LCA in funzione dello scopo e del livello di approfondimento:

- LCA – qualitativa: è il primo e più semplice livello di LCA, usato per effettuare valutazioni basate su un inventario limitato e di tipo qualitativo. Questo approccio non è adatto per LCA realizzate al fine di compiere operazioni di marketing o pubblicazioni, ma ha il vantaggio di essere uno strumento efficace per orientare chi deve prendere decisioni verso prodotti aventi il vantaggio competitivo di essere a “ridotto impatto ambientale”.
- LCA – dettagliata: è l'approccio più specialistico e scientifico, affrontabile in modo corretto solo da esperti del settore e con forte collaborazione da parte di tutti gli autori coinvolti. Ha il vantaggio di fornire dati molto affidabili ma comporta un grosso dispendio di tempo e di forze, richiedendo la raccolta di dati completa in loco e dai fornitori e le risorse umane correlate.
- LCA – semplificata: lo scopo di questo approccio è lo stesso di un'LCA dettagliata, ma in questo caso vengono praticate semplificazioni volte a ridurre sensibilmente il tempo e i costi necessari a compiere lo studio. Si può usare solo per specifiche categorie di prodotti, dato che vengono usati dati generici, sia di carattere quantitativo che qualitativo. Tale approccio è valido, purché la semplificazione non comprometta l'affidabilità del risultato completo, quindi bisogna garantire una modellazione del ciclo di vita valida in base alla definizioni di scopi e obiettivi. Questo tipo di LCA è sicuramente il più diffuso poiché può essere utilizzato per la maggior parte degli scopi.

Vantaggi

Comprendere l'LCA di un prodotto/servizio aiuta a evitare che i miglioramenti in una parte del ciclo di vita (ad esempio la produzione) portino a conseguenze più elevate in altre parti dello stesso ciclo di vita (per esempio l'uso del prodotto), e viceversa. Allo stesso tempo, un'LCA aiuta a identificare ed evitare lo spostamento degli oneri tra impatti differenti (cambiamenti climatici, acidificazione, smog estivo, consumo delle risorse naturali, ecc). L'LCA può aiutare nel processo decisionale, identificando il trasferimento degli impatti ambientali da un mezzo a un altro (ad esempio, eliminando le emissioni nell'aria, creando un reflui effluenti invece) e/o da una fase del ciclo di vita ad un altro (ad esempio da un uso e riuso del prodotto per la fase di acquisizione delle materie prime). Se non sono state eseguite LCA, il trasferimento può non essere riconosciuto e adeguatamente incluso nell'analisi, perché è fuori dell'ambito tipico dei processi di selezione del prodotto.

Inoltre l'LCA permette ai decisori di studiare un intero sistema di prodotto. Ad esempio, quando si confrontano due prodotti alternativi, può sembrare che l'opzione 1 sia migliore per l'ambiente perché genera meno rifiuti solidi dell'opzione 2; tuttavia, uno studio di LCA potrebbe mostrare che la prima opzione crea in realtà impatti ambientali più grandi dalla culla alla tomba, misurati in tutte e tre le matrici ambientali (aria, acqua, terra), mentre l'opzione 2, che produce i rifiuti solidi, può produrre danni ambientali dalla culla alla tomba di minor impatto per le sue emissioni chimiche basse.

Limitazioni

Nonostante le numerose applicazioni e la capacità nell'identificazione di impatto ambientale in riferimento al processo produttivo di un bene un servizio o un prodotto, la metodologia LCA presenta dei limiti che riguardano soprattutto la raccolta e la disponibilità di dati completi e precisi, la complessità dello studio e le considerevoli risorse richieste in termini di costo e tempo. Si incontrano difficoltà soprattutto quando si analizzano prodotti nuovi, poiché i dati necessari devono essere necessariamente ipotizzati, ma la maggior parte di questi ostacoli può essere superata ad esempio effettuando ipotesi coerenti ed utilizzando dati provenienti da database ritenuti affidabili.

Importante in uno studio di LCA è la natura delle scelte e delle assunzioni (es. stabilire i confini di un sistema o scegliere le categorie di impatto) che nella maggior parte dei casi può essere soggettiva. I modelli utilizzati per l'analisi d'inventario o per la valutazione degli impatti non sono adatti a qualunque applicazione e non sono in grado di descrivere in modo completo qualsiasi impatto ambientale. La disponibilità e qualità dei dati possono limitare l'affidabilità dei risultati pertanto sussiste la necessità di lavorare con un set di dati consistenti e documentato. L'LCA è inoltre maggiormente applicabile ad indicatori d'impatto su scala globale (ad esempio, cambiamenti climatici) e meno agli impatti locali come lo smog, dove i fattori temporali e spaziali delle emissioni hanno più rilevanza. Da questo punto di vista, la procedura di LCA (site-independent), si contrappone a quella di VIA (Valutazione Impatto Ambientale, site-specific), avente un approccio espressamente locale. Differentemente da altre procedure di valutazione, l'LCA non comprende gli impatti economici e sociali di un sistema di prodotti. Questi, ad esempio, sono oggetto di studio delle valutazioni d'impatto ambientale. Esistono alcune difficoltà nell'applicazione, ossia:

- allocazione complessa: risulta complesso allocare a ogni singolo prodotto gli impatti ambientali del sistema di produzione, a meno che il sistema stesso non sia facilmente scomponibile in modo da rispettare le unità di prodotto. Con uno studio orientato ai processi l'allocazione non è più necessaria.
- dispersione geografica: durante tutto il ciclo di vita, il prodotto è causa di impatti ambientali in diverse regioni geografiche (si pensi per esempio all'estrazione di materiale in una regione, alla produzione in un'altra, alla distribuzione che ha impatto lungo tutto il tragitto che separa il magazzino dall'utilizzatore del prodotto stesso, ecc.). Questi impatti "distribuiti" sono difficilmente valutabili a causa della disomogeneità che le diverse operazioni possono avere nelle diverse regioni. Studiando il sistema produttivo invece, questi problemi non dovrebbero esserci perché l'impatto ambientale è localizzato in una sola regione.
- LCA oltre l'ambiente: studiando i sistemi produttivi, si possono più facilmente considerare nell'analisi fattori economici (mettendoli in relazione con le normali attività gestionali dell'impresa) e sociali (che sono direttamente connessi con le varie fasi del ciclo di vita del sistema produttivo).

Inoltre l'LCA non determinerà quale prodotto o processo è il più conveniente o funziona meglio. L'informazione sviluppata in uno studio LCA dovrebbe quindi essere una componente per una valutazione più completa con costi e prestazioni sulla gestione del ciclo di vita. Focalizzare l'attenzione sui processi e non sui prodotti può essere una cosa positiva; quello che non si può fare è applicare una metodologia LCA ai processi e questo principalmente per tre motivi:

- in un'LCA di prodotto, per rendere omogeneo il confronto tra le diverse alternative, si individua un'unità funzionale per ogni categoria di prodotto. Non è invece semplice individuare un criterio di confronto tra i cicli di vita di sistemi diversi, perché non sempre appare chiaro quando un confronto di questo tipo è utile.
- in un'LCA di prodotto non si presentano grandi difficoltà se si vuole effettuare un'analisi di confronto fra eventuali alternative. Nel caso in cui si vogliono invece valutare i cicli di vita di sistemi di produzione diversi, non si possono considerare quelle soluzioni che mettono in discussione la necessità di realizzare uno o più prodotti specifici. Questo perché il sistema di produzione è progettato una volta definita la pianificazione di prodotto.
- l'LCA è facilmente applicabile a un prodotto, perché questo è scomponibile, senza grossi problemi, nelle sue diverse componenti, che possono essere così seguite fin dalla produzione primaria. La fase inventariale in un'LCA di processo non sarebbe altrettanto semplice a causa delle difficoltà che si avrebbero nell'individuare degli elementi di base da seguire in maniera approfondita.

4. MODALITÀ DI CALCOLO

4.1 Generalità

Un'LCA descrive e analizza, in modo quantitativo, tutti gli importanti aspetti ambientali di un sistema di prodotto o di una tecnologia. La portata dello studio è il risultato di una procedura di raccolta dei dati e definizione dell'ambito, seguita da analisi e interpretazione iterativo. In conformità con lo standard ISO 14040 e con la procedura indicata da SETAC, integrando alcune parti con uno studio svolto da AMBIENTE ITALIA e con quello elaborato dalla CML, la Valutazione del Ciclo di Vita si articola secondo quattro fasi principali.

4.2 Definizione di ambito e obiettivo (Goal and Scope Definition - ex ISO 14041)

La fase preliminare di definizione dell'obiettivo rappresenta uno stadio rilevante nello sviluppo di uno studio perché, in accordo con le intenzioni e gli interessi specifici, chiarisce la ragione principale per la quale si esegue l'LCA e descrive il contesto dell'indagine, fissando le richieste per le fasi successive. Questo aspetto potrebbe riguardare il livello di approfondimento dello studio, la qualità dei dati richiesta, la selezione dei parametri per la realizzazione della stima dell'impatto ambientale e le possibili interpretazioni all'interno del contesto della valutazione. Tra le altre cose, bisogna decidere se (ed eventualmente come) una commissione di esperti debba stendere un resoconto esterno (un'indagine critica), come richiesto dalla normativa ISO 14040, utile per la realizzazione di studi comparativi aperti al pubblico.

▪ Obiettivo

Un'LCA deve essere necessariamente preceduta da un'esplicita dichiarazione degli obiettivi e delle finalità dello studio, dichiarazione particolarmente importante poiché consente di definire i confini della ricerca e quindi quelli del sistema oggetto dello studio, nonché per esprimere i risultati in maniera opportuna e i destinatari a cui è indirizzata l'indagine (utilizzatori interni od esterni). Se necessario, bisognerebbe rilevare quale sia il ruolo di LCA all'atto di prendere una decisione e, eventualmente, se questa indagine sia collegata o meno ad altre (ad esempio: di taglio economico, tecnologico o sociale). All'atto di rendere noti i risultati, inoltre, è molto importante sottolineare quali siano le domande per le quali LCA è adatto e quali non lo siano. Seguendo i requisiti stabiliti nella norma ISO 14040, gli obiettivi potrebbero essere:

- analisi del punto debole nella produzione o ottimizzazione dei processi.
- accompagnamento nella valutazione dello sviluppo di nuovi materiali.
- ottimizzazione dei materiali analizzando le prestazioni del sistema di un'applicazione.
- assistenza decisionale nel marketing.
- ottimizzazione della produzione di un componente o dei componenti del confronto.
- ottimizzazione di un componente di prodotto in vista del prodotto e il suo ciclo di vita.
- ottimizzazione di un prodotto nel suo ciclo di vita.

Ulteriori obiettivi di uno studio LCA potrebbero essere l'assistenza nelle decisioni strategiche e il riconoscimento delle possibili influenze del contesto sociale e politico e l'individuazione delle conseguenze derivanti da misure politiche (ad esempio nella politica energetica).

▪ Sistema

Nell'ottica LCA viene definito il "sistema" come un insieme di dispositivi che realizzano uno o più precise operazioni industriali aventi una determinata funzione; esso è delimitato da appropriati confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input ed output. Considerando il caso più generale possibile di un sistema industriale di tipo globale, i cui input consistono tutti in materie e energia primarie, e gli output in reflui che ritornano al sistema ambiente. Questo viene trattato come il "vero sistema di ciclo di vita" poiché fra i suoi output non esistono prodotti utili ma solamente sostanze reflue (estendendo così il concetto "dalla culla alla tomba" a quello "dalla culla alla culla"). Tali sistemi contengono un gran numero di operazioni collegate fra loro, anche in modo molto complesso, dai flussi di materiali, di energia e di prodotti

finali. Per effettuare un inventario di ciclo di vita è pertanto necessario definire in primo luogo le singole operazioni componenti (operazioni unitarie): ognuna di queste operazioni riceve i propri input dalle operazioni unitarie a monte, mentre i suoi output serviranno ad alimentare quelle seguenti. In condizioni stazionarie, il comportamento di un'operazione unitaria è indipendente sia dalle operazioni che a monte la precedono e le forniscono gli input, sia da quelle a valle che ne ricevono gli output. Di conseguenza, tale comportamento può essere analizzato senza riferimento alle altre operazioni unitarie contenute nel sistema complessivo. Infatti non sempre si analizzano sistemi globali, ma spesso è opportuno limitare l'analisi a sottosistemi produttivi. L'analisi del singolo sottosistema viene definita come "eco-bilancio". L'eco-bilancio quindi si differenzia dall'LCA essenzialmente per i confini del sistema indagato. In altre parole si può intendere l'LCA come un insieme di eco-bilanci collegati opportunamente fra loro.

▪ **Confini del sistema**

I confini del sistema determinano le unità di processo che devono essere incluse nell'LCA, e devono essere definiti in accordo agli obiettivi. Innanzitutto, è necessario vagliare attentamente i mezzi utilizzabili, il contesto temporale e la disponibilità (o meno) di tutti i dati necessari; entrando più nel dettaglio, bisogna determinare tutti gli aspetti temporali, spaziali, pratici e tecnici (cioè la scala del bilancio) relativi allo studio. I confini del sistema costituiscono l'interfaccia con l'ambiente e con gli altri sistemi di prodotti; essi definiscono anche quali procedure vadano incluse e quali escluse dall'indagine. Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, è necessario determinarne la scala, il tipo (specifico, medio) e la qualità. E' utile rappresentare attraverso un diagramma del flusso le unità di processo e le loro interrelazioni.

Emergono due problemi quando si stabilisce l'estensione del bilancio. Per prima cosa, è necessario definire i criteri limite e le procedure di allocazione dei prodotti accoppiati (cioè coinvolti in più fasi dell'analisi) per ciascuno dei singoli processi considerati nel bilancio. Bisogna, inoltre, determinare le funzioni dei sistemi esaminati, nonché le loro unità funzionali: in relazione a questi aspetti, sono state documentate differenze e possibili restrizioni nel caso della comparazione di alcuni sistemi.

- **Criteri limite:** Allo scopo di ridurre l'estensione e la complessità dell'indagine entro limiti ragionevoli, la portata del bilancio deve essere discussa e fissata sulla base di dati aderenti al problema. Con l'aiuto delle analisi di sensibilità e dei criteri di prestazione, inoltre, è possibile determinare se un flusso di materiale possa (o meno) essere limitato. Tra gli altri, possono essere considerati i seguenti criteri limite:
 - *Criterio di massa:* Solo nel caso in cui il bilancio di massa del flusso di un materiale cada al di sotto di una certa soglia minima (stabilita a priori) sia in entrata, che in uscita rispetto al sistema, allora è possibile trascurare gli aspetti relativi alla produzione di tale materiale.
 - *Criterio energetico:* In maniera analoga, gli aspetti relativi ad un certo materiale possono essere trascurati solo qualora il suo contributo all'energia totale (ottenuta sommando le quote di tutti i materiali) cada al di sotto di una certa soglia (stabilita a priori).
- **Procedura di allocazione:** Definire e documentare le procedure fondamentali è importante per lo svolgimento di uno studio di LCA che include regole di base, nonché questioni specifiche. Se si dovessero presentare produzioni accoppiate nel sistema esaminato, sarebbe necessario applicare una ripartizione; le produzioni accoppiate sono processi che, insieme al prodotto desiderato, generano anche sostanze secondarie che possono essere impiegate in altre procedure. Gli effetti ambientali causati da procedimenti di questo genere devono essere ripartiti (in maniera proporzionale) a tutti i prodotti accoppiati presenti nel sistema in esame, secondo regole ben precise. Se possibile, sarebbe meglio evitare le ripartizioni. Nel caso fosse impossibile evitare le ripartizioni, i flussi in entrata e in uscita rispetto al sistema dovrebbero essere assegnati ai diversi prodotti accoppiati secondo una ripartizione che rifletta le relazioni fisiche di base. La ripartizione non deve essere necessariamente basata sul criterio di massa. Se le relazioni fisiche non fossero applicabili, oppure insufficienti, la ripartizione potrebbe essere applicata sulla base di altre relazioni, ad esempio di natura economica. Nel caso in cui fossero possibili diverse tipologie di

ripartizioni, sarebbe opportuno condurre un'analisi di sensibilità.

- **Benefici e unità funzionali**

I benefici (o le funzioni) dei sistemi di prodotti analizzati devono essere determinati chiaramente (es. attraverso diagrammi di flusso). Per quantificare un certo beneficio, è necessario definire un'unità funzionale (ad esempio: una tonnellata di prodotto), cioè il prodotto, il servizio o la funzione su cui impostare l'analisi e il confronto con le possibili alternative (kg di prodotto, t di rifiuto trattato, Kwh di energia fornita). L'unità funzionale è definita dalla SETAC come "la misura della prestazione svolta da un sistema", e serve da riferimento rispetto al quale tutti i dati che compongono il bilancio ambientale del sistema in esame saranno normalizzati. La scelta deve essere fatta intendendo per unità funzionale la prestazione quantificabile e oggettivamente riscontrabile di un prodotto, per consentire la comparabilità dei risultati dell'LCA, e dipende essenzialmente dallo scopo per cui i sottosistemi e il sistema globale sono stati progettati. Essa può essere intesa come un indice delle prestazioni svolte dal sistema, ovvero del servizio reso all'utilizzatore. L'unità di misura deve essere coerente con la funzione centrale che viene analizzata, oltre ad essere chiara e quantificabile. L'unità funzionale dovrebbe corrispondere dunque ad un servizio offerto piuttosto che ad un tipo di prodotto. Ad esempio, se la funzione di un processo è la produzione di un imballaggio, l'unità di misura a cui riferire le sue prestazioni sarà la quantità di imballaggio necessaria per contenere un certo volume di prodotto, e non il kg di vetro o di cartone o di altro materiale. E se la funzione di un'operazione è la verniciatura di una parete, l'unità funzionale sarà il mq di superficie coperta dalla pittura per un dato periodo di tempo, e non il kg di vernice.

4.3 Analisi dell'inventario (LCI) (Life Cycle Inventory - ex ISO 14041)

L'analisi dell'inventario è la componente base di un'LCA, la fase più delicata e dispendiosa in termini di tempo, il vero e proprio ecobilancio. A seconda dell'obiettivo, i requisiti devono essere formulati sulla qualità dei dati (ad esempio sulla sua precisione, completezza e rappresentatività). L'LCI consiste nella raccolta dei dati (identificazione e quantificazione dei relativi flussi di ingresso e di uscita rilevanti di un sistema di prodotto per l'intero ciclo di vita di un prodotto, in accordo all'obiettivo e al campo di applicazione) e di calcolo dei dati.

In questa fase vengono annotati, secondo regole ben precise, i flussi di materiale ed energia dei diversi passaggi del procedimento in esame, in relazione all'unità di beneficio. In un primo momento, vengono modellate le strutture del processo complessivo, così da avere un supporto per assemblare tutti i dati. I flussi di materiale (materie prime e prodotti riciclati, acqua), energia (termica e elettrica) e le emissioni in aria, acqua e suolo vengono quindi determinate sulla base delle entrate e delle uscite di ciascun processo parziale, in relazione ai confini del sistema. Successivamente, connettendo tra loro i vari passaggi analizzati, si riesce a simulare la rete di connessioni che intercorrono tra i moduli e l'ambiente: in questo modo si possono tracciare i bilanci di massa e di energia, che diventano l'inventario vero e proprio del sistema complessivo. Il procedimento per condurre l'analisi d'inventario è iterativo. Man mano che i dati raccolti diventano più approfonditi e il sistema è meglio conosciuto, possono essere identificati nuovi requisiti o limitazioni, che potranno anche comportare cambiamenti nelle procedure di raccolta dei dati, affinché siano ancora soddisfatti gli obiettivi dello studio. Il risultato dell'inventario è la stesura di una tabella d'inventario che mostra tutti gli usi delle risorse, le emissioni associate all'unità funzionale, comprese, ad esempio, tutte le sostanze e i composti chimici utilizzati. L'inventario è costituito da 5 parti:

- **Confini Del Sistema (system boundaries)**

È in questa fase che si definiscono più nel dettaglio le condizioni al contorno:

- descrizione qualitativa e quantitativa delle unità di processo.
- categorie di dati ad esse associate.
- ipotesi e assunzioni (trascurare alcuni ingressi e uscite).

Inizialmente vengono stabiliti i punti di confine tra il sistema studiato e l'ambiente: ci si concentra sul processo di manifattura, cercando di individuare i passi rilevanti e i flussi di materiali ed energia,

nonché le emissioni nell'ambiente; successivamente si estende l'analisi a monte ed a valle del processo manifatturiero, considerando l'estrazione della materia prima, i trasporti prima e dopo il ciclo produttivo, l'uso dei prodotti, il riciclaggio e lo smaltimento. Poi il confine fra i processi ritenuti rilevanti e quelli irrilevanti: prima di costruire nel dettaglio il diagramma di flusso e di procedere con la raccolta dati, è bene decidere l'estensione dello studio, stabilendo ciò che deve essere incluso e ciò che deve essere trascurato, e specificare alcune informazioni riguardanti le unità di misura utilizzate, la loro definizione e i procedimenti per la raccolta dei dati. Al fine di assistere il personale addetto a questa fase, occorre descrivere le tecniche di raccolta dati, che possono variare a seconda delle unità di processo e a seconda della composizione e qualificazione di coloro che partecipano allo studio.

▪ **Diagramma di Flusso (process flow-chart)**

Il diagramma di flusso del processo consiste in una rappresentazione grafica e qualitativa di tutte le fasi rilevanti e di tutti i processi coinvolti nel ciclo di vita del sistema analizzato. Trattandosi di un modello del processo reale, il diagramma sarà necessariamente una sua rappresentazione approssimata, ancorché corretta ed efficace. Il diagramma definitivo potrà essere utilizzato come base di questionari che saranno successivamente inviati agli operatori dell'impianto per la raccolta sistematica delle informazioni. Il diagramma è composto da sequenze di processi (boxes), collegati da flussi di materiali (freccie). La sua caratteristica fondamentale è quella di dividere un sistema in vari sottosistemi, esplicitare azioni d'interconnessione (le uscite di un sottosistema a monte sono le entrate di un sottosistema a valle) ed individuare le parti del processo che hanno una maggiore rilevanza, soprattutto in termini ambientali, per evitare così di dover porre lo stesso grado d'attenzione indiscriminatamente su tutte le fasi.

Lo schema più rappresentativo, valido per la maggior parte dei sistemi industriali, ha come scopo l'individuazione dei maggiori processi e interventi ambientali e può essere diviso in 7 sequenze:

- produzione principale: evidenzia il processo di produzione prioritario del prodotto. In questa fase sono evidenziati i principali passi di processo e i maggiori flussi di materiali.
- produzione secondaria o co-prodotto: riguarda il processo di fabbricazione del prodotto che è realizzato durante la produzione del prodotto principale.
- produzione dei materiali ausiliari: ha lo scopo di estendere il process flowchart coi processi che appaiono prima, durante e dopo la fabbricazione del prodotto. Ciò consentirà di analizzare l'estrazione, la produzione e i componenti delle materie prime, dall'altro mostrerà l'uso del prodotto, i consumi, il riciclaggio o riuso e i processi della gestione dei rifiuti.
- produzione d'energia: riguarda la possibilità di recuperare energia sotto forma di calore o elettricità.
- consumo d'energia: prende in considerazione i consumi d'energia dovuti ai vari processi
- trasporti: riguarda i mezzi di trasporto usati per il trasporto del prodotto o coprodotto, ma soprattutto interessa la quantità di prodotto trasportato per chilometro.
- trattamento rifiuti: considera i trattamenti che sono applicati agli scarti di lavorazione e ai materiali ausiliari.

▪ **Raccolta Dei Dati (collection of data)**

Una volta che si è schematizzato il processo si passa alla fase di raccolta dei dati, che richiede un impegno molto elevato, in termini di tempo e di risorse, a causa delle mole delle informazioni necessarie, che comprendono tutte le fasi del processo produttivo (spesso anche di difficile reperibilità). I dati raccolti saranno di due tipi: quelli relativi ai flussi d'ingresso (input) e quelli corrispondenti alle uscite (output). I primi si riferiscono a materiali, trasporti ed energia, gli altri ai prodotti e ai gas rilasciati in aria, acqua e suolo. Lo scopo sarà quello di strutturare un vero e proprio bilancio ambientale per la redazione del quale dovrà essere controllata la qualità dei dati. Questa deve essere valutata sulla base dei seguenti parametri: età dei dati, tecnologia di riferimento, processo al quale è riferito il dato, metodi di calcolo impiegati per ottenere valori medi, varianza e irregolarità riscontrate nella misurazione. Potrebbe allora essere costruita una sorta di matrice per definire e valutare con un discreto grado d'approssimazione il livello qualitativo dei dati impiegati per avviare un'LCA.

I dati raccolti da utilizzare nella fase di inventario possono essere distinti in tre categorie:

- *Dati primari* (primary data), provenienti da rilevamenti diretti sul campo.
- *Dati secondari* (secondary data), ricavati dalla letteratura, come data base di software specifici (BUWAL, CETIOM, CBS, IVAM) e manuali tecnici, sia da altri studi e da calcoli ingegneristici.
- *Dati terziari*, provenienti da stime e da operazioni analoghe, da dati relativi a test realizzati in laboratorio, da statistiche ambientali e da valori medi.

Il metodo seguito per la raccolta dei dati prevede l'allestimento di un questionario o di un data sheet che permette di collocare tutte le informazioni ordinatamente, così da poter risalire facilmente all'origine di ciascuna. Quando si raccoglie il set di dati, è necessario controllare che questi siano concreti e coerenti. Un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output.

Oltre agli impatti relativi al processo, devono essere definiti anche i dati riguardanti:

- impatti e consumi riguardanti l'energia elettrica importata nel sistema. È necessario chiarire quale sia il contesto di riferimento (Regionale, Nazionale, Comunitario) per procedere alla valutazione del mixing di combustibili che concorrono alla produzione del kW elettrico sfruttato, l'efficienza globale del sistema ed i relativi impatti sull'ambiente. In Italia il rendimento medio di produzione di energia elettrica da fonti fossili è di circa il 40%, valore che si deduce dalla quantità di energia contenuta nei combustibili impiegati per produrre 1 kWh di energia elettrica. Questo rendimento si riduce al 36% al consumo, a causa delle perdite per i servizi ausiliari nei trasformatori e nella distribuzione (ENEA, 1988; ENEA, 1991). Nel 1994 la produzione interna di energia elettrica per l'80% è derivata da centrali termoelettriche e per il 20% da fonti geotermica, idroelettrica, eolica e solare. Le importazioni provengono da Austria (6%), Francia (40%), Svizzera (50%) ed Ex-Yugoslavia (4%). Ai fini di una corretta applicazione di LCA è indispensabile utilizzare uno strumento informatico sia per adattare continuamente le analisi a mix energetici diversi e alle evoluzioni della tecnologia usata per la produzione, sia per poter considerare dinamicamente gli scambi di energia elettrica attraverso le interconnessioni predisposte a tale scopo.
- impatti e consumi concernenti il sistema di trasporti. Costituiscono un elemento vitale per la maggior parte dei processi produttivi industriali e spesso la quantità di energia ad essi legata rappresenta una parte significativa dell'energia complessiva spesa nel processo in esame. Nel caso dei trasporti, è possibile suddividere l'apporto di diversi contributi:
 - contenuto energetico dei combustibili consumati direttamente dal veicolo considerato più la quota di energia indiretta necessaria a produrre il combustibile.
 - energia necessaria alla costruzione e alla manutenzione del veicolo.
 - energia necessaria a realizzare le infrastrutture per permettere il viaggio del veicolo stesso, dalla costruzione di strade e ferrovie al loro mantenimento.

Per quanto riguarda le unità di misura da impiegare per esprimere i quantitativi di energia legati ai trasporti, tenendo conto della capacità di carico dei mezzi impiegati, è possibile adottare l'unità di energia (J) per tonnellata per km. Si pone particolare attenzione ai sistemi di trasporto su strada, i più diffusi al mondo per il trasporto di cose e di persone. Considerando il solo trasporto merci e i tre componenti energetici prima elencati, è possibile stimare che il 60% circa dell'energia associato a questo tipo di trasporto è da attribuire al consumo di combustibile, il 30% circa alla costruzione e alla manutenzione del veicolo e approssimativamente il 10% alla realizzazione delle infrastrutture [Boustead e Hancock, 1979]. I prodotti, infatti, possono essere trasportati con numerosi mezzi, ciascuno con un impatto differente per unità di prodotto trasportato.

▪ **Problemi di allocazione degli impatti (allocation procedures)**

Si tratta di individuare a quali prodotti attribuire gli impatti sia in termini di input che di output, in quanto la maggior parte dei processi industriali ha più di un prodotto e ricicla i prodotti intermedi o di scarto come fossero materie prime. I flussi di materia ed energia devono essere allocati ai differenti prodotti secondo procedure chiaramente definite.

L'allocazione è la ripartizione nel sistema di prodotto allo studio dei flussi in entrata e in uscita di

unità di processo. I problemi connessi con l'allocazione degli impatti coinvolgono l'analisi dei processi di trattamento dei rifiuti e l'analisi dei sistemi di riciclo. Ogni opzione di riciclo è semplicemente un altro sottosistema all'interno del sistema principale: il riciclo a ciclo chiuso reinserisce il materiale al processo originale, mentre il riciclo a circuito aperto lo invia ad un altro processo dove esso viene usato come materia prima. Il metodo appropriato per allocare gli impatti dipende dall'obiettivo dello studio, ma è comunque importante che sia logico e reso esplicito nello studio. Lo studio di LCA deve identificare processi condivisi e trattarli con procedure specifiche. La somma dei flussi allocati in ingresso e in uscita da un'unità di processo deve essere uguale ai flussi in ingresso e in uscita non allocati dell'unità di processo. È importante cercare di conoscere nel dettaglio il processo produttivo, così da poter attribuire ad ogni prodotto ottenuto la quota spettante di materia prima, energia consumata e quindi anche i rispettivi impatti in aria, acqua e rifiuti solidi. Quando ciò non risulti possibile, perché, ad esempio, in uno stesso processo sono lavorate più categorie di prodotti, si procede ad una ripartizione dei consumi e dei relativi impatti attraverso una suddivisione che può tenere conto dei seguenti criteri:

- ove possibile si dovrebbe evitare l'allocazione mediante:
 - divisione unità di processo da allocare in due o più sottoprocessi.
 - espansione del sistema di prodotti per includere funzioni aggiuntive relative ai co-prodotti.
 - dove l'allocazione non è evitabile, si devono impiegare relazioni fisiche chiare in funzione dell'importanza dei vari prodotti (in base alla massa, al volume, ...);
 - se le relazioni fisiche non sono chiare usare altre relazioni, per esempio il valore economico di ciascun prodotto.
- **Elaborazione dei dati (processing data)**
- In questa parte dell'inventario, i dati raccolti relativi al ciclo produttivo sono trasformati in una tabella d'impatti ambientali causati dall'unità funzionale in studio, la tabella dell'inventario. Per far ciò si deve disporre di due tipi di dati:
- dati relativi ad ogni processo necessario alla produzione del prodotto (esempio: quantità d'energia elettrica utilizzata nella produzione, quantità di materie prime necessaria...), disponibili presso l'azienda.
 - dati riguardanti l'impatto ambientale del prodotto ottenuto con il processo considerato.

Questi dati devono successivamente essere riferiti all'unità funzionale scelta. In questa fase si fa spesso uso di software dedicati che mettono a disposizione una serie di processi già implementati e permettono anche di inserirne di nuovi, con la presenza di database relativi a varie categorie: materiali, combustibili e sistemi di trasporti, a cui si aggiungono anche i sistemi di smaltimento dei rifiuti. I risultati sono presentati con tabelle di inventario in cui sono raccolti tutti i dati relativi ai flussi di input e di output.

4.4 Stima dell'impatto ambientale (LCIA) (Life Cycle Impact Assessment - ex ISO 14042)

L'obiettivo è la valutazione, secondo precisi parametri ambientali, dei flussi di materiale e di energia calcolati durante l'analisi dell'inventario. I flussi di magazzino sono classificati in base al loro potenziale impatto sull'ambiente, la salute umana, le risorse o nelle cosiddette categorie di impatto. Queste categorie forniscono indicatori di potenziali impatti ambientali e non necessariamente contributi per gli effetti reali. Gli effetti reali possono dipendere, ad esempio, dalle concentrazioni di agenti contaminanti per l'ambiente e il superamento di soglie a causa di molteplici fonti in tempi e luoghi specifici. Tale stima, quindi, serve per riconoscere, riassumere e quantificare i possibili effetti ambientali dei sistemi esaminati, nonché per fornire informazioni essenziali intese alla loro valutazione. L'analisi degli impatti ha per obiettivo la correlazione dei consumi e delle emissioni, ottenuti nella fase dell'inventario, a specifiche categorie di impatto riferibili ad effetti ambientali conosciuti, tentando di quantificare, con opportuni metodi di caratterizzazione, l'entità del contributo complessivo che il processo o il prodotto arrecano agli effetti considerati. In questo modo l'impatto risulta rappresentato da valori numerici ottenuti elaborando i risultati dell'LCI con operazioni di

raggruppamento e classificazione: il suo collegamento con l'effetto consiste nel fatto che esso ne è una causa potenziale. L'approccio dell'analisi degli impatti in proposito è stato fin dall'inizio, e in diversi casi lo è tuttora, quello del "meno è meglio" (less is better). Si tratta quindi di una valutazione che può anche apparire grossolana. In effetti, questo procedimento di aggregazione dei risultati dell'inventario in categorie d'impatto è solo il primo passo della fase di valutazione, che non ha l'obiettivo di dare dei giudizi di valore assoluto sugli effetti ambientali degli impatti, ma consente giudizi relativi, come può essere quello di determinare quale, fra due o più processi produttivi portati ad un minor dispendio di risorse e a un minor impatto conseguente ai rilasci nell'ambiente.

Uno dei punti deboli di questa metodologia è di non considerare variabili fondamentali per una valutazione oggettiva e complessiva dell'interazione fra il sistema analizzato e il sistema sociale, economico e ambientale. Queste variabili interdisciplinari possono solo nascere da una attenta e difficile ricerca fatta nel campo delle Scienze Ambientali, scienza di recente istituzione in ambito accademico.

Le fasi principali di questo modulo sono:

▪ **Aree di protezione**

Il primo passo nell'ambito di un'analisi di impatto è la selezione delle categorie di impatto in relazione al campo di applicazione e definizione obiettivo. Le categorie di valutazione di impatto dovrebbero collegare i potenziali impatti e gli effetti su quello che viene definito come "aree di protezione" dell'LCA, cioè i soggetti che vogliamo proteggere eseguendo e utilizzando l'LCA. Oggi, vi è l'accettazione che le zone di protezione della valutazione del ciclo di vita sono: risorse naturali, ambiente naturale, salute umana e spesso anche antropizzata.

▪ **Classificazione**

In questa fase i flussi di materiale ed energia, esaminati nell'analisi dell'inventario, vengono suddivisi in temi e assegnati a una o più categorie di impatto ambientale (assimilabili a veri e propri effetti ambientali notoriamente provocati dalla produzione) che sono state fissate in precedenza. In generale le categorie di impatto vengono definite non solo a seconda dei potenziali effetti e danni delle emissioni alla salute dell'uomo e all'ambiente, ma anche in base al raggio di influenza dell'effetto stesso: a questo proposito si parlerà di "scala dell'effetto". In generale in LCA vengono normalmente impiegate le seguenti categorie di impatto:

- riscaldamento globale – effetto serra (GWP), che comporta un aumento della temperatura nella bassa atmosfera come conseguenza della presenza di alcuni gas, quali la CO₂, il metano, il biossido di azoto, che intrappolano le radiazioni infrarosse.
- riduzione dell'ozono presente nella stratosfera (ODP), che ha come conseguenza l'incremento dell'incidenza dei raggi ultravioletti, dannosi per l'uomo e, in generale, per tutti gli ecosistemi.
- formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera (POCP), che considera tutti gli impatti derivanti dalla formazione di ozono troposferico, causata dalle reazioni di componenti organici (VOC) in presenza di luce e di ossidi di azoto (NO_x).
- eutrofizzazione (EP), causato da un eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili, e di tutti quegli elementi nutrienti che portano ad un incremento nella produzione di plancton, alghe e piante acquatiche in genere. L'eccesso della presenza di queste forme di vita causa un deterioramento della qualità delle acque e una riduzione della loro possibilità d'utilizzazione.
- acidificazione (AP), causata dal rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, principalmente attraverso la pioggia. I suoi effetti sono evidenti nelle foreste di legno dolce (ad esempio le foreste d'abete rosso) dove si manifestano in termini di crescita insufficiente: fenomeno particolarmente presente nella penisola scandinava e nelle regioni dell'Europa centro orientale. Negli ecosistemi acquatici si ha un abbassamento del pH delle acque, situazione deleteria per lo sviluppo della vita. Le conseguenze dell'acidificazione si rendono evidenti, inoltre, negli edifici, nelle opere d'arte e in tutte le costruzioni in genere attraverso l'erosione delle pietre calcaree.
- tossicità per l'uomo (HTP), imputabile alla presenza di sostanze chimiche e biologiche, dipendente dal tipo di esposizione e dalla modalità con la quale avvengono le emissioni

delle diverse sostanze nell'ambiente.

- eco-tossicità delle acque e del suolo (ETP), relativa agli impatti sulle specie e sugli ecosistemi, provocata da emissioni dirette di sostanze tossiche, come metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi e sostanze liberate nel corso della degradazione dei prodotti.
- utilizzo del territorio, che riduce il numero di specie animali e vegetali presenti rispetto alle condizioni naturali.

Dal punto di vista operativo, la classificazione consiste nell'organizzare i dati dell'inventario, cioè i valori di tutte le emissioni, gassose, liquide e solide, provocate direttamente e indirettamente dalle operazioni considerate, distribuendoli nelle varie categorie di impatto. Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto ambientale, saranno contenuti tutti gli input ed output del ciclo di vita che contribuiscono allo sviluppo dei diversi problemi ambientali (la stessa sostanza o materiale potrà quindi essere contenuta all'interno di più categorie di impatto). Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente; tra le altre cose, esse differiscono in relazione alla loro collocazione spaziale (effetti globali, regionali e locali).

In linea di principio, ciascun effetto ambientale potrebbe essere incluso all'interno di un'indagine, a patto che i dati necessari all'analisi e un modello adatto per la descrizione e parametrizzazione dell'effetto stesso siano disponibili. Per esempio, le emissioni di anidride carbonica contribuiscono all'effetto serra e vengono quindi assegnate alla categoria di impatto dei cambiamenti climatici (ex "riscaldamento globale"). Tutte le emissioni che producono un potenziale contributo all'effetto serra sono assegnate a questa categoria. Al tempo stesso, se una sostanza contribuisce a diverse categorie di impatto, deve essere preso in considerazione in tutte queste categorie. Un caso del genere è, per esempio, l'ossido di azoto, che provoca sia l'eutrofizzazione e l'acidificazione. Il numero dei dati è quindi notevolmente ridotto e posso interpretare i risultati facendo riferimento direttamente agli impatti ambientali.

▪ **Caratterizzazione**

La classificazione è seguita da vicino dalla caratterizzazione, in cui vengono quantificate le porzioni precedentemente assegnate: con l'aiuto dei fattori di equivalenza i differenti contributi dei materiali vengono aggregati in un determinato effetto ambientale e rapportati ad una sostanza (presa come riferimento). I flussi registrati nell'analisi dell'inventario vengono moltiplicati per i rispettivi fattori di equivalenza, propri di ogni categoria di impatto, e sommati tra loro: il potenziale d'impatto così determinato rappresenta l'intensità di un possibile danno ambientale (NB: i valori dei differenti potenziali d'impatto non sono direttamente confrontabili tra loro), sulla base di considerazioni di carattere puramente scientifico. Il potenziale impatto di una sostanza è dato per un fattore dominante nella categoria, ad esempio per il potenziale di cambiamento climatico si tratta in genere di 1 kg di emissioni di anidride carbonica. Il risultato della fase di caratterizzazione è il profilo ambientale, costituito da una serie di punteggi d'impatto ambientale relativi a ciascuna categoria, ottenuti sommando tra loro tutti i contributi ottenuti. Solitamente viene rappresentato graficamente attraverso una serie di istogrammi.

▪ **Normalizzazione**

In questa fase, i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono normalizzati, divisi, cioè, per un "valore di riferimento" o "effetto normale" rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, regionale o europea, riferiti ad un determinato intervallo di tempo. Con la standardizzazione ottengo quindi degli indici sintetici con cui valutare complessivamente il sistema in esame. Attraverso la normalizzazione si può stabilire quindi la magnitudo, l'entità dell'impatto ambientale del sistema studiato rispetto a quello prodotto nell'area geografica prescelta come riferimento. Nella tabella che segue sono riportati i valori attuali relativi ad un anno di produzione industriale mondiale.

L'operazione di normalizzazione dell'LCA è ancora in fase di sperimentazione; si può infatti intuire che esistono molte difficoltà operative nel sintetizzare il profilo ambientale di un sistema in un unico parametro di riferimento. Non viene condotta alcuna aggregazione delle categorie d'impatto in uno (o più) indici riassuntivi; la valutazione dei singoli criteri può quindi essere condotta esclusivamente sulla base di parametri individuali, che spesso non possono essere tradotti in un linguaggio

scientifico. Secondo le norme ISO questa fase non è obbligatoria per un'LCA completo.

▪ **Valutazione**

L'obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un indice ambientale finale, l'impatto ambientale associato al prodotto nell'arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono perciò moltiplicati per "fattori peso" della valutazione, relativi alle varie categorie di danno e spesso riportati in guide tecniche, che esprimono l'importanza intesa come criticità, attribuita a ciascun problema ambientale. Esistono diversi modelli di valutazione, essi possono essere suddivisi in:

- modelli di tipo comprensivo: includono un elevato numero di parametri differenti, rinunciando spesso ad una elevata precisione e alla quantificazione degli effetti.
- modelli di tipo quantitativo: trattano i dati di impatto con grande precisione, limitandosi ad un numero circoscritto di parametri.
- modelli di tipo pragmatico: si pongono come intermedi tra gli altri due, definendo con una certa precisione i parametri che consentono una corretta valutazione del prodotto, tenendo comunque conto dei relativi costi e tempi di esecuzione.

Alla base del calcolo di tali fattori, quale che sia il modello seguito, vi è il principio della "distanza dallo scopo": essa afferma che quanto più è grande il divario tra lo stato attuale e quello ideale cui si tende, tanto risulta maggiore la gravità di un effetto. È evidente quanto sia soggettivo tale giudizio, che può variare per aree geografiche, sensibilità e scuole di pensiero differenti.

In alcuni casi si utilizzano fattori di peso uguali tra loro: se la generazione di un prodotto, ad esempio, influisce su sei temi ambientali, per ognuno di essi si potrà assumere che il fattore di peso sia pari ad 1/6; in alternativa si assumono come fattori peso quelli forniti da alcune banche dati, come la Uniliver. Sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore adimensionale, l'ecoindicatore, indice ambientale finale, che quantifica l'impatto ambientale associato al prodotto.

La fase di valutazione d'impatto, a differenza della fase di Inventario che ha raggiunto un buon grado di standardizzazione, è ancora caratterizzata da aspetti controversi che necessitano di ulteriori approfondimenti scientifici. Inoltre la soggettività legata alla scelta dei metodi di Valutazione d'Impatto difficilmente consentirà di raggiungere un consenso internazionale.

4.5 Interpretazione e miglioramento dei risultati (Life Cycle Interpretation - ex ISO 14043)

Questa fase spetta allo specialista, che ha il compito di analizzare i risultati ottenuti (risultati dei bilanci di massa ed energia e la valutazione del rischio, nonché la spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che pongono) per retroagire sull'impostazione dello studio e definire delle possibili linee di intervento, proponendo i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività. I fatti essenziali, basati sui risultati dell'analisi dell'inventario e sulla stima dell'impatto ambientale, devono essere determinati e verificati in merito alla loro completezza, sensibilità e consistenza, al fine di presentarli in forma tale da soddisfare i requisiti dell'applicazione descritti nell'obiettivo e nel campo di applicazione, in modo da avere una percezione dello studio facilmente fruibile e comprensibile. Le norme ISO comprendono tre elementi di interpretazione:

- traduzione e identificazione degli aspetti significativi.
- valutazione che considera la completezza, la sensibilità, e controlli di coerenza.
- conclusioni, raccomandazioni, e la relazione sui problemi significativi.

Alla fase di interpretazione è accompagnata quasi sempre la valutazione dei miglioramenti, la fase dell'LCA nella quale, dopo aver individuato gli ambiti più critici, vengono valutate e selezionate le opzioni e i miglioramenti per ridurre gli impatti e i carichi ambientali dell'unità funzionale in studio. Si possono, in questa sezione, rappresentare anche scenari diversi da quello considerato e confrontare i risultati ottenuti con altri relativi ad una situazione migliore. Sulla base di questi presupposti, sarà quindi possibile trarre delle conclusioni e fornire delle raccomandazioni, per informare poi applicazioni successive, come il disegno di prodotti ecocompatibili o la messa a punto di politiche di indirizzo. Tale fase non ha ancora raggiunto il livello

metodologico di quelle precedenti, ma rimane tuttavia un momento importante poiché consente, ove possibile, un miglioramento dell'impatto ambientale in termini di diminuzione della richiesta d'energia, delle emissioni, dell'uso di risorse, ecc. È importante rilevare che l'LCA, come tutte le metodologie basate sul confronto, non propone una soluzione assoluta, ma identifica un insieme di alternative tra le quali poi, il decisore, sceglierà a suo giudizio la migliore.

- **Temi rilevanti**

Al fine di determinare i problemi importanti, devono essere identificati i principali contributi di ogni categoria di impatto (le emissioni e/o processi che sono dominanti all'interno di ciascuna categoria). A seguito della definizione dell'ambito, i contributi principali possono essere raggruppati in base alla singola fase del processo, le fasi di vita dei singoli e l'intero ciclo di vita. Insieme a questi risultati, i problemi importanti possono ora essere stabiliti, dal momento che è ormai chiaro anche quali processi o fasi della vita sono dominanti.

- **Valutazione dei risultati**

Per valutare i risultati secondo la norma ISO, deve essere effettuato un controllo di completezza, un controllo della sensibilità, e un controllo di coerenza dei processi identificati o fasi della vita. L'analisi di sensibilità dovrà verificare l'accuratezza dei dati e la loro influenza sul risultato finale, mentre un parere da persone esperte è consigliabile per evitare conclusioni poco attendibili. Per rappresentare la variabilità dei dati, si può inizialmente pensare di fare un confronto tra i risultati ottenuti e quelli relativi alla situazione migliore ed a quella peggiore; un'analisi più complessa richiederebbe lo studio dell'intervallo di variabilità dei dati in ingresso. Si deve garantire che tutte le informazioni e dati rilevanti per l'interpretazione necessari siano disponibili e completi, e rappresentati in modo da avere una percezione dei risultati che sia facilmente fruibile, cercando anche di rappresentare scenari diversi da quello considerato. È anche importante verificare in che misura le incertezze, per esempio attraverso la stima di dati a causa di carenze di dati, possano influenzare il risultato. Bisognerebbe inoltre garantire che la procedura sia coerente con la definizione obiettivo e campo di applicazione e che la metodologia e le altre regole siano state accuratamente e coerentemente applicate per l'intero sistema di prodotto.

- **Conclusioni e raccomandazioni**

La terza fase contiene le conclusioni, le raccomandazioni e la presentazione dei risultati. Il metodo dell'LCA risulta tanto più attendibile quanto più è ricca la banca dati delle sostanze rilasciate nell'ambiente dai vari processi industriali necessari per l'ottenimento del prodotto in esame.

Inoltre, poiché la valutazione dei risultati dell'LCA dipende sia dalla scelta dei metodi utilizzati per collegare le sostanze emesse nell'ambiente alle categorie d'impatto ambientale, sia dalla scelta attuata per ridurre l'attuale livello di sostanze inquinanti in un tempo determinato, si comprende come queste due scelte siano molto delicate e complesse; esse coinvolgono infatti molteplici aspetti tecnici, sociali ed economici, quali il rispetto dell'ambiente, il rapporto tra costi e benefici che riguardano non solo le aziende e ma anche tutta la società civile.

5. APPLICAZIONI LCA NEL SETTORE DELL'EDILIZIA

5.1 Generalità

In una prospettiva di sostenibilità ambientale è importante ponderare l'incidenza dei vari settori produttivi nell'ambito della produzione di impatti ambientali. Da anni i bilanci ecologici consentono sia di considerare il ciclo di vita di un prodotto che di osservare diversi settori problematici dell'ambiente per impedire uno spostamento di danni ecologici. I metodi e gli strumenti di oggi permettono una panoramica completa del complesso sistema dell'opera ed aprono al progettista nuove vie e soluzioni in una delle questioni centrali dell'edilizia sostenibile. In futuro per gli operatori nel campo edile ci saranno a disposizione strumenti sempre più adeguati, pratici ed utili. La questione della considerazione del ciclo di vita ecologico nella progettazione di un'opera, con il requisito di realizzare costruzioni sostenibili, acquisterà sempre più importanza per gli investitori e i progettisti.

5.2 Valutare la sostenibilità

L'edilizia è attualmente un settore molto coinvolto nelle tematiche ambientali. L'ASSA (Associazione per la Salvaguardia della Salute e dell'Ambiente) ha pubblicato dati interessanti a livello globale: l'edilizia consuma attualmente circa il 50% delle risorse materiali a livello Europeo, e incide per un terzo circa sul consumo totale di energia nel mondo. Di questo 50%, il 36% è imputabile al fabbisogno energetico in fase d'uso degli edifici, mentre circa il 14% è causato dal settore delle industrie legato all'edilizia. Oltre a ciò va considerato che gli edifici comportano notevoli consumi di materiali ed energia sia in fase costruttiva che durante il loro uso e la loro dismissione: il settore edilizio consuma circa il 40% dei materiali utilizzati ogni anno dall'economia mondiale. La maggior parte di questa energia deriva da fonti non rinnovabili, come la combustione di combustibili fossili, da cui scaturiscono molteplici effetti collegati all'inquinamento atmosferico, come l'effetto serra, l'assottigliamento dello strato di ozono, malattie correlabili, ecc. Il settore edilizio produce circa il 34,5% delle emissioni complessive di gas serra, senza contare i consumi di acqua e di territorio, nonché la produzione di scarti e rifiuti dovuti alla sua demolizione. La climatizzazione degli edifici in Italia si colloca al secondo posto per entità delle emissioni, mentre il primo posto spetta al traffico motorizzato. Inoltre si stima che i rifiuti provenienti dalla costruzione e demolizione di edifici rappresentino circa il 25% in peso di tutti i rifiuti prodotti in Europa. Ancora più rilevante è osservare come in Italia riusciamo a riciclare solamente il 10% circa di questo tipo di rifiuti, mentre il resto viene smaltito in discarica; al contrario di paesi come Olanda, Belgio e Danimarca, che si distinguono per aver introdotto politiche indirizzate al riciclo e al riuso particolarmente avanzate, arrivando a percentuali di riutilizzo che superano l'80%. Da questo scenario si può vedere come l'applicazione a scala più vasta di strumenti di gestione ambientale, come può essere l'LCA, potrebbe contribuire in modo decisivo a mitigare molti dei problemi che gravano in modo pesante sull'ambiente. Il nostro obiettivo è quindi quello di costruire edifici sostenibili secondo tre approcci:

- high technology: edifici come macchine.
- low technology: edifici il più semplice possibili.
- light technology: edifici il più leggero possibili, riducendone il peso ambientale.

Per valutare la sostenibilità è dunque necessario comprendere l'effettivo risultato ambientale conseguito dalle scelte progettuali, verificandolo alle diverse scale di progetto. Valutare la sostenibilità significa quantificare gli effettivi vantaggi per l'ambiente, attraverso l'applicazione di diversi strumenti e il controllo di diversi aspetti.

- **Progettare ecocompatibile**

Un edificio è sostenibile quando è in grado di instaurare un rapporto equilibrato con l'ambiente. Ci vuole una corretta coniugazione degli aspetti inerenti: la qualità dell'abitare, il consumo di materiali e risorse, il consumo energetico, l'inquinamento delle matrici ambientali. Il termine Ingegneria Ecocompatibile indica l'applicazione della tecnologia ai problemi e alle tematiche dell'ecologia, della

difesa dalle fonti di inquinamento, del risparmio energetico, del contenimento dell'impatto ambientale anche nella scelta dei materiali, del benessere nell'abitare e del rapporto tra uomo ed ambiente. Discipline collegate all'Ingegneria Ecocompatibile sono la bioarchitettura, la bioedilizia la progettazione biocompatibile. Si riscontrano alcune esperienze in applicazione dei principi di Ingegneria Ecocompatibile anche al fine di verificare sperimentalmente quanto è possibile risparmiare con metodi costruttivi innovativi e con l'ausilio di materiali con migliori performance energetiche. Tra le principali esperienze si segnala: Thermo-vital-energie, Minergie, NEH, Passivhaus, R-2000, Zed Factory, Plast Bau, 3LH, e, in Italia, il Regolamento Edilizio di Carugate e il Regolamento CasaClima della Provincia Autonoma di Bolzano. I criteri per la valutazione della qualità energetico-ambientale degli edifici sono classificabili in due tipologie:

- Green building rating system (approccio con scala di valori): metodi a punteggio basati sull'attribuzione di un punteggio relativo alla performance dell'edificio rispetto a una serie di riferimenti di valutazione di impatto ambientale: il punteggio permette di classificare la costruzione rispetto ad una scala di qualità. I rating system in edilizia valutano, misurano oggettivamente e comunicano il livello di qualità ambientale raggiunto da un edificio attraverso liste di controllo; assegnano all'edificio un punteggio che corrisponde ad un livello di qualità, comunicato attraverso un'etichetta/marchio o targa; premiano, in misura diversa, la qualità del progetto, la gestione del cantiere, la gestione dell'edificio. Nel mondo sono BREEAM, HQE, DGNB, BDM, Minergie Eco, protocolli LEED, protocolli CASBEE, Green Star; in Italia il protocollo ITACA, LEED e GBC Home, CASACLIMA e ARCA.
 - Life Cycle Assessment LCA (approccio con modificazioni matrici ambientali): metodi basati su procedure di valutazione di impatto ambientale, derivanti direttamente dall'analisi del ciclo di vita dell'edificio. L'approccio metodologico alla progettazione ecocompatibile può prevedere l'utilizzazione di tre nuovi strumenti di valutazione degli impatti e delle performance ambientali: LCA (Life Cycle Assessment) e EPD (Environmental Product Declarations).
- **Dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD)**

L'LCA rappresenta un supporto fondamentale allo sviluppo di schemi di Etichettatura Ambientale nella definizione dei criteri ambientali di riferimento per un dato gruppo di prodotti (etichette ecologiche di tipo I: Ecolabel in primis), o come principale strumento atto ad ottenere una Dichiarazione Ambientale di Prodotto: DAP (in lingua italiana) – EPD (in lingua originale inglese), ossia un'etichetta ecologica di tipo III. L'EPD (Environmental Product Declaration) rappresenta quindi uno degli schemi più attivi a livello internazionale per la certificazione e registrazione delle dichiarazioni ambientali di prodotto. Tale dichiarazione è una certificazione volontaria, con carattere esclusivamente informativo, che può essere richiesta sia per un prodotto che per un servizio, e che permette di comunicare informazioni oggettive, confrontabili e credibili relative alla prestazione ambientale di prodotti, quindi non prevede livelli minimi che la prestazione ambientale del prodotto o servizio in esame debba rispettare. L'EPD deve essere sviluppata utilizzando la valutazione del ciclo di vita (LCA) come metodologia per l'identificazione e la quantificazione degli impatti ambientali. Una volta eseguito un'LCA, viene redatta un'EPD contenente le informazioni e le prestazioni ambientali legate al prodotto. La EPD è applicabile a tutti i prodotti, classificati in gruppi ben definiti, e serve sia al produttore che al progettista. Le etichette ambientali di prodotto si configurano dunque come un eccellente strumento di comunicazione delle prestazioni ambientali di un prodotto/servizio, in grado di fornire informazioni oggettive e confrontabili, utilizzabili dall'azienda per valorizzare le proprie strategie di comunicazione e marketing. La classificazione in gruppi permette quindi di effettuare confronti tra prodotti funzionalmente equivalenti. A tali gruppi fanno riferimento le PCR (Product Category Rules), che rappresentano la "carta d'identità" dello specifico gruppo di prodotti, con tutti i parametri utili a rendere confrontabili le EPD. È possibile infine effettuare una convalida del proprio studio LCA, svolgendo una cosiddetta Critical Review, prevista dalle norme ISO e particolarmente indicata per conferire robustezza ed affidabilità al proprio studio, specialmente nei casi in cui esso venga reso disponibile al pubblico o ancor di più quando si effettuano analisi ambientali comparative di prodotti diversi.

5.3 Life Cycle Design

Nonostante sia un settore in cui il metodo LCA trova ancora grande difficoltà nell'affermarsi, quello delle costruzioni rimane tra i campi di applicazione più interessanti. Il Life Cycle Design (LCD), conosciuto anche come Ecodesign o Design for Environment (DFE), consiste nell'impiego dell'LCA come strumento per garantire una migliore ecoefficienza produttiva, ed è costituito da un insieme di discipline che analizzano variabili tecniche, economiche ed i parametri che provengono da preventive analisi di ciclo di vita, mirando a garantire prodotti e servizi di qualità, vincolati da parametri riguardanti il risparmio energetico, la minimizzazione dell'impatto ambientale di tutta la vita utile dei materiali impiegati, le modalità di gestione del fine vita, la protezione della salute dei lavoratori e dell'ambiente. L'obiettivo prioritario di tale metodo è quello di fornire informazioni ambientali di supporto alle scelte di progetto mediante una valutazione integrale delle prestazioni dei materiali e dei componenti edilizi, dei consumi e delle emissioni inquinanti derivanti, delle tecniche costruttive e delle tipologie degli impianti di servizio che, a livello generale e non di singolo componente, consentono i più bassi consumi possibili di risorse e la minore generazione di emissioni e rifiuti. Come prima cosa bisogna quantificare i flussi. Gli obiettivi da porsi sono: ridurre il consumo di risorse ed energia; ridurre la produzione di inquinanti; garantire le medesime prestazioni di comfort e salubrità. Nessun materiale può essere inserito nella filiera costruttiva di un edificio senza subire processi di lavorazione, trasformazione, trasporto, ecc. che comportano consumi energetici e di risorse che potrebbero renderne l'utilizzo estremamente svantaggioso in termini ambientali. Non esistono prodotti generici come laterizio pieno o forato, ma gli impatti dipendono dal contesto di produzione (mix energetico). Conoscere l'impatto ambientale del ciclo di vita dei materiali è quindi fondamentale per scegliere in modo corretto.

Inoltre in fase di scelta progettuale dei materiali e componenti vanno evidenziate le interrelazioni del componente rispetto al sistema edificio e va valutato non solo il profilo ambientale del singolo componente, ma anche il comportamento ambientale del sistema edificio, prima di poter esprimere un giudizio sulla eco-compatibilità di un prodotto o di una soluzione tecnica. Ne deriva che non esistono materiali, componenti, tecniche costruttive eco-compatibili in senso assoluto, ma l'eco-compatibilità dipende dalla specifica applicazione e dalle modalità d'uso. L'edificio ha una serie di materiali e una serie di prodotti: alcuni materiali arrivano in cantiere non trattati, altri sono prodotti già lavorati. Se un prodotto arriva in cantiere, conosco già la maggior parte dei dati direttamente dal produttore.

L'LCA è uno strumento oggettivo e scientifico che permette al progettista di scegliere, durante la fase di progettazione (sia che si tratti di nuova costruzione che di ristrutturazione), la soluzione meno impattante a livello ambientale per ogni elemento tecnico e sub-sistema tecnologico, tra quelli esaminati. Se l'LCA è regolata dalla famiglia delle norme ISO 14040, quindi la procedura della fase di inventario è omogenea e standardizzata in tutto il mondo, esistono metodi di calcolo (OI3 index, Eco-Indicator 99, EPS 2000, EPD, EDIP, IMPACT 2002+) e database di materiali (IBO Catalogue, ICE Bath University, Ecoinvent, ETH, Bumel 250, Industry data, IDEMAT 2001, LCA food DK, Franklin USA 98, USA input output, US Life Cycle Inventory), costruiti su dati medi nazionali e continentali. Nello specifico, i metodi di valutazione della compatibilità ambientale degli edifici sviluppati con approccio LCA consistono nell'aggregare i risultati di analisi LCA sviluppate su materiali e componenti edilizi includendo anche la valutazione delle energie necessarie al funzionamento degli edifici stessi. Tra i metodi di calcolo a livello internazionale applicabili al settore edilizio ci sono:

- il metodo olandese *Eco-indicator 99*: le categorie di impatto confluiscono in tre categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem quality, Resources.
- il metodo svedese *EPS 2000* (Environmental Priority Strategies in product development): le categorie di impatto confluiscono in quattro categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem Production Capacity, Abiotic Stock Resources, Biodiversity.
- il metodo svizzero *IMPACT 2002+*: le categorie di impatto confluiscono in tre categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem quality, Climate Change, Resources.

- il metodo danese *EDIP* (Environmental Design of Industrial Products), in cui si considerano le sole categorie di impatto.

Uno degli aspetti più importanti del metodo LCA negli edifici è quindi quello di considerare il consumo energetico, non solo nella fase di gestione dell'edificio (es. riscaldamento), ma anche il consumo durante la costruzione. Gli impatti ambientali della produzione di un blocco di laterizio in Spagna, Germania, Francia cambiano notevolmente, non soltanto per il tipo di processo produttivo o per l'efficienza dei macchinari utilizzati, ma soprattutto per il tipo di vettore energetico utilizzato in questi processi e da questi macchinari. Si considerano 2 "tipi" energetici: l'energia diretta (consumata nel processo) e l'energia indiretta (estrazione, produzione e trasporto dell'energia sino alla sede in cui viene utilizzata per il processo considerato). In questo contesto si spiega anche la sempre maggiore diffusione del sistema delle dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) all'interno del settore dei prodotti da costruzione. E' a partire da tali presupposti che durante la conferenza organizzata nel 2001 dal CE-PMC, la Federazione europea dei produttori di materiali da costruzione, è emersa la necessità di definire regole armonizzate europee per le EPD in tale settore: si decise allora di costituire un Comitato tecnico europeo, il CEN/TC 350, che avesse funzione di introdurre e successivamente garantire l'applicazione di strumenti e metodi per la sostenibilità di opere costruite nuove o esistenti. A livello internazionale, la dichiarazione ambientale di prodotto per il settore delle costruzioni è disciplinata dalla norma ISO 21930:2007 "Sustainability in Building Construction – Environmental Declaration of Building Products" elaborata dal sottocomitato TC 59/SC 17 "Sustainability in Building Construction" della commissione tecnica ISO TC 59 "Building in Construction". Il ruolo dell'analisi del ciclo di vita nel quadro più generale della valutazione di sostenibilità dell'intervento edilizio è in corso di definizione nell'ambito del gruppo di lavoro CEN/TC350 "Sustainability of Construction Works", ma già emerge molto chiaramente, dal momento che essa è il metodo fondamentale per:

- sviluppare le "Dichiarazioni ambientali del prodotto", una sorta di "scheda degli impatti" analoga alla "scheda di sicurezza" che progressivamente dovrà accompagnare ogni prodotto da costruzione marcato CE.
- valutare progetti ed interventi realizzati, sia in ambito di nuova edificazione che di recupero.

5.4 Fasi LCA per un edificio

Oltre che sui materiali, è possibile svolgere un'analisi LCA sull'intero edificio. L'LCA di un edificio è definita come "from cradle to grave" perché tiene conto della vita dei materiali dalla loro produzione fino al loro smaltimento. Il metodo LCA applicato a un sistema industriale indirizza lo studio di efficienza del sistema in oggetto verso la salvaguardia della salute dell'ambiente e dell'uomo e verso il risparmio delle risorse. Intesa come tecnica di management energetico-ambientale, il metodo LCA si propone come nuovo supporto per le tecniche ormai consolidate, quali la valutazione di impatto ambientale e l'analisi di rischio. Per fare tale valutazione LCA occorre anzitutto definire la durata della vita utile dell'edificio stesso, in relazione alla funzione a cui è destinato, e del sistema impiantistico da cui dipendono infatti i cicli manutentivi e la quantità di energia complessiva derivante dall'uso dell'edificio. Successivamente si definiscono i flussi ambientali in entrata e in uscita delle seguenti fasi di vita dell'edificio:

▪ Fase di pre-produzione e produzione dell'edificio

Questa fase racchiude le quantità di materiali e componenti edili impiegati, definite sulla base del computo metrico estimativo. Questo passaggio rappresenta la fase di inventario da cui partire per effettuare l'analisi degli impatti ambientali della fase di costruzione dell'edificio. Durante la fase di pre-produzione vengono considerate le attività di estrazione e coltivazione delle risorse primarie di derivazione fossile, l'acquisizione delle risorse di origine naturale e delle risorse secondarie direttamente derivate dai combustibili primari. Inoltre viene considerato il trasporto di tali risorse dal luogo di estrazione al sito di produzione e la trasformazione delle risorse di origine primaria in energia e in materie prime pronte per essere immesse nel processo produttivo. Durante la fase di produzione sono considerate invece le attività di trasformazione delle risorse primarie e secondarie in materie di prima lavorazione; la trasformazione delle materie di prima lavorazione in prodotti finiti, attraverso operazioni

successive di finitura; il montaggio delle componenti costituite da diversi prodotti finiti in un prodotto assemblato o composito e in ultimo l'imballaggio del prodotto finito per garantirne l'arrivo in cantiere in condizioni di perfetta conservazione. A questi vanno sommati i flussi relativi ai processi di produzione dei macchinari da cantiere (scavatori, montacarichi, gru) e le durate di utilizzo stabilite dal crono programma.

▪ **Esecuzione in cantiere**

In questa fase si considerano le attività di movimentazione della terra attraverso operazioni di scavo, spostamento e rimozione della terra, utili alla preparazione del piano di fondazione e la costruzione delle opere edilizie e posa degli impianti attraverso opere di fondazione, di elevazione, copertura, murature esterne e partizioni interne, etc..

▪ **Uso e manutenzione**

Si considerano in questa fase le attività di utilizzo degli impianti e delle tecnologie presenti nell'edificio e lavori di manutenzione ordinaria, come operazioni di pulitura e riparazione, o manutenzione straordinaria, come operazioni di sostituzione delle componenti usurate. Durante la fase d'uso occorre quantificare i fabbisogni annuali richiesti in termini di consumi idrici; consumi elettrici per illuminazione; energia primaria per la climatizzazione invernale; energia primaria per la climatizzazione estiva; energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria ACS. I dati di consumo sono forniti dalla certificazione energetica. Durante la fase di gestione, invece, l'analisi LCA riguarda gli impatti relativi alle opere di manutenzione: i cicli manutentivi di materiali e componenti dell'edificio e del sistema impiantistico, necessari per il perdurare nel tempo delle prestazioni loro richieste in fase progettuale, sono definiti in relazione alla durata di vita utile ipotizzata dell'edificio. Si definiscono i materiali e componenti da sostituire perché obsoleti o usurati e i relativi flussi ambientali per nuova produzione; trasporto al sito; messa in opera. I dati riguardanti la fase di manutenzione sono forniti dal libretto d'uso e manutenzione dell'edificio realizzato dal progettista.

▪ **Fine vita**

Questa fase considera sia la fine vita dei materiali edili che dell'impianto. Per ogni tipo di materiale e componente impiegati, in relazione a come questi sono stati messi in opera e connessi con gli altri materiali, si deve definire lo scenario di fine vita a minor impatto ambientale. Durante questa fase vengono considerate le attività di rimozione e trasporto dei materiali provenienti dalle operazioni di demolizione selettiva e disassemblaggio non distruttivo. In modo particolare si può anche distinguere in funzione delle potenzialità di recupero di materiali e componenti in riuso di materiali destinati a ricoprire la medesima funzione per cui sono stati prodotti o recupero di componenti, porzioni che possono essere riutilizzate per ottenere un prodotto uguale o paragonabile a quello di partenza. Negli altri casi si parla invece di valorizzazione del contenuto energetico o sotto forma di materia prima secondaria in riciclaggio dei materiali o incenerimento. Dove non è possibile procedere a un'operazione di recupero o riciclaggio, l'unica alternativa è la discarica autorizzata.

Il passo conclusivo di tale procedura è la somma delle fasi di valutazione sopra enunciate. Questi momenti di analisi sono il punto di riferimento per gli interventi su un processo di produzione esistente o per il progetto di un nuovo prodotto. L'approccio metodologico è per sua natura di tipo dinamico e iterativo e la parte fondamentale è quella della disponibilità dei dati e delle informazioni necessarie allo sviluppo di calcoli. Le banche dati presenti oggi sul mercato costituiscono difatti parte integrante della strumentazione necessaria per affrontare una valutazione LCA.

In un'ottica di sostenibilità, parallelamente all'LCA va redatta un LCC dove si computano i costi, tenendo presente anche i costi indiretti sull'ambiente.

Per quanto riguarda la normativa, per l'applicazione al settore edilizio, e nello specifico alla scala di edificio, si fa riferimento alle norme ISO: ISO/CD 21930. In tale norma, possiamo quindi trovare lo schema dell'articolazione in moduli e blocchi di informazione ambientale sul prodotto, sulle soluzioni tecniche, sull'uso e sull'esercizio di un edificio.

- **Considerazioni**

I limiti di questa tecnica di valutazione, che possono mettere in dubbio la scientificità del risultato, stanno nella disponibilità e accessibilità dei dati iniziali. Nel contesto italiano, dove non esiste una banca dati ufficiale, diventa necessario far riferimento a banche dati straniere con inevitabili approssimazioni dovute alla verifica di trasferibilità dei dati nel nostro contesto. Ciò, unitamente alla spesso scarsa disponibilità delle aziende a diffondere dati diretti su consumo e produzione di rifiuti, può rendere molto faticosa la fase di Life Cycle Inventory. Ad oggi la scarsità dei dati e la possibile disomogeneità delle valutazioni alla base dell'LCA rende difficili le comparazioni. Ciò non toglie che, almeno per i prodotti che hanno reso nota la loro analisi del ciclo di vita, siano possibili alcune riflessioni indicative.

BIBLIOGRAFIA

- Baldo Gianluca, in collaborazione con Badino Vanni, *LCA life cycle assessment: uno strumento di analisi energetica e ambientale*, Milano, Ipaservizi, 2000
- Baldo Gianluca, in collaborazione con Marino Massimo e Rossi Stefano, *Analisi del ciclo di vita LCA: gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi*, Milano, Edizioni Ambiente, 2008
- Borlenghi Riccardo, *Guida alle norme ISO 14000: i sistemi di gestione ambientale, l'audit ambientale, il labelling, la valutazione del ciclo di vita (LCA), la valutazione delle prestazioni ambientali (EPE), i sistemi integrati di gestione*, Milano, Hoepli, 2008
- Facoltà di Ingegneria Firenze, CNR Ivalsa, *Linee guida per l'edilizia in legno in Toscana*, Edizione Regione Toscana, 2009
- Kuittinen Matti, Ludvig Alice, Weiss Gerhard, *Wood in carbon efficient construction – Tools, methods and applications*, €CO2 European research project
- Lanza Alessandro, *Lo sviluppo sostenibile*, Bologna, Il Mulino, 2006
- Lavagna Monica, con Paleari Michele e Mondini Davide, *Murature ad alte prestazioni: valutazioni termiche, acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio*, Sarcangelo di Romagna (RN), Maggioli, 2011
- Lavagna Monica, con Bonanomi Marcella e De Flumeri Claudia, *Edificia a consumo energetico zero: orientamenti normativi, criteri progettuali ed esempi di zero energy e zero emissioni buildings*, Sarcangelo di Romagna (RN), Maggioli, 2012
- Lavagna Monica, con Borlenghi Riccardo, *Life cycle assessment in edilizia: progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Milano, Hoepli, 2008
- Wenzel Henrik, Hauschild Michael Z., Alting L., *Environmental Assessment of Products*, Chapman & Hall, 1997

Tesi consultate

- Antoniazzi Silvia, *Analisi comparativa dell'impatto ambientale di alcune tipologie di edifici in legno*, Corso di Laurea Specialistica in Tecnologie e industrie del legno, Relatore Antonel Mirto, A.A. 2009/2010
- Bramati Francesca e Mazzoleni Sara Lisa, *LCA di un edificio residenziale: valutazione ambientale del ciclo di vita di un edificio in legno a confronto con altre due tecnologie costruttive*, Conlegno-Consortio Servizi Legno Sughero, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile-Architettura, Relatore De Angelis Enrico, A.A. 2009/2010
- Buscema Salvatore, *LCA comparativa di differenti processi di sintesi del biodiesel*, Corso di Laurea Specialistica in Scienze per l'ambiente, Relatore Righi Serena, A.A. 2008/2009
- Callegari Giacomo, *Le performances energetiche ed ambientali dei materiali da costruzione per l'edilizia in ambito rurale*, Corso di Laurea Specialistica in Scienze per l'ambiente, Relatore Guercini Stefano, A.A. 2007/2008

- Colombo Cristian, Ruggieri Ottavio, *Edilizia a basso impatto ambientale: analisi del ciclo di vita di materiali naturali a base di calce-canapulo*, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'ambiente e il territorio, Relatore Dotelli Giovanni, A.A. 2011/2012
- Ferrari Elena, *Valutazione ambientale di un edificio residenziale: applicazione del Protocollo Itaca e del metodo LCA per il confronto tra soluzioni tecniche in calcestruzzo e legno*, Politecnico di Milano, Corso di Laurea Specialistica in Progettazione dell'Architettura Sostenibile, Relatore Lavagna Monica, A.A. 2009/2010
- Ferrioli Fabia, *L'analisi del ciclo di vita dei rifiuti e il sistema integrato di gestione*, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'ambiente e il territorio, Relatore Cirelli Andrea, A.A. 2005/2006
- Oliviero Luigi, *Life Cycle Assessment comparativo tra il processo di co-digestione della frazione organica dei rifiuti solidi urbani e dei fanghi di depurazione disidratati e il sistema di gestione attuale. Il caso di Bagnacavallo (RA)*, Corso di Laurea Specialistica in Scienze per l'ambiente, Relatore Righi Serena, A.A. 2009/2010
- Peroni Davide, *Analisi LCA delle case di paglia di Pescomaggiore (AQ)*, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'ambiente e il territorio, Relatore Bonoli Alessandra, A.A. 2010/2011
- Rallo Carla, *Applicazione della metodologia Life Cycle Assessment al Passito di Pantelleria*, Corso di Laurea Specialistica in Scienze per l'ambiente, Relatore Righi Serena, A.A. 2010/2011
- Rollo Mario, *Strumenti di supporto per il management dell'ecoinnovazione*, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Gestionale, Relatore Bonoli Alessandra, A.A. 2010/2011
- Treville Aldo, *Limiti del modello di sviluppo occidentale e proposta di un modello alternativo ecosostenibile con il metodo LCA. Applicazione per un "paese povero"*, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile Architettura, Relatori Barbaro Salvatore, Costantino Domenico, A.A. 2004/2005
- Villa Alfredo, Zelante Laura, *La carta di identità ambientale come strumento di qualificazione: il caso dei pavimenti in PVC*, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura, Relatore Piardi Silvia, A.A. 1995/1996
- Zucal Matteo, *Metodologia LCA (Life Cycle Assessment) e sue applicazioni in edilizia*, Trento, Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile, Relatore Dalprà Michela, A.A. 2005/2006

Report e Seminari

- Astuto Paola, *LCA-Analisi del Ciclo di Vita: un approccio metodologico alla progettazione ecocompatibile per l'efficienza energetica*, Napoli, Seminario "La progettazione ecocompatibile per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti", 2008
- Baldinelli Giorgio, *Il contributo dell'analisi del ciclo di vita (LCA) alla progettazione di edifici sostenibili*, Perugia, 2009
- Federazione Anie, aderente a Confindustria, *Guida all'Analisi del Ciclo di Vita*, Milano
- Frattari Antonio, *ARCA, l'edilizia in legno di qualità*, Trento, Seminario "La sostenibilità degli edifici in legno", 2012

- IFEU-Institut Heidelberg e Syneco, *Recupero dei materiali di demolizione di CaseClima*, su incarico della Provincia Autonoma di Bolzano, 2012
- Lavisci Paolo, *Progettare e realizzare strutture in legno: vantaggi e opportunità*, Avezzano, Seminario “Il legno strutturale in edilizia”, 2006
- Meri Adolf, *Life Cycle Assessment of Wooden Products in context of EPD and Building Certification*, Probos, Wagening, 2012
- Paleari Michele, *Caratteristiche dei materiali viste sotto la lente dell’LCA*, Rovereto, Seminario “Dall’idea architettonica all’ecocompatibilità e sostenibilità delle scelte relative ai materiali”, 2013
- Palumbo Elisabetta, Gargari Caterina, *Progettare la durabilità: confronto tra soluzioni in laterizio e in legno*
- Politecnico di Torino, in collaborazione con Studio Roatta Architetti Associati-Mondovì, *Valutazione della sostenibilità ambientale di una casa a basso consumo energetico con metodologia LCA*, Torino, 2007
- Rossetti Massimo, *Certificazioni ambientali di prodotto, materiali riciclati per l’edilizia, sistemi di valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici*, Università IUAV di Venezia
- Studio Botta (Pantanetti Alessandro, Papili Luca), *Costruire sostenibile: il ciclo di vita degli edifici con le nuove tecnologie SAAD*, Treviso, Seminario “Edifici sostenibili ad energia quasi zero”, 2011

Siti internet consultati

- http://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?SW=19
- <http://bau-umwelt.de/hp4084/Solid-wood.htm>
- <http://www.casaspa.it>
- <http://construction-environment.com>
- <http://www.csqa.it/Sostenibilita/Overview/LCA-labelling-EPD>
- <http://www.dataholz.com/it>
- <http://www.eco2wood.com>
- <http://www.ecosmes.net>
- <http://www.edilportale.com>
- <http://www.enea.it>
- <http://www.energielab.it>
- <http://www.federlegnoarredo.it>
- http://feel-good.ca/library/publications-building/61-1501_mod2_LCA_IT_web.pdf
- <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/index.vm>

- <http://www.nrel.gov/lci>
- <http://www.uni.com>

