

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Tesi di laurea triennale

**Life Cycle Assessment: principi e applicazioni a componenti
strutturali.**

Relatore

Prof. Lucio Maragoni

Laureando

Andrea Zausa

Matricola 2010914

Anno Accademico 2023-2024

Sommario

Prefazione	3
1. Struttura di un LCA	4
1.1 Approccio Iterativo.....	4
2. Fasi di un LCA	6
2.1 Definizione degli obiettivi	6
2.2 Definizione dello scopo	8
2.2.1 Risultati attesi	9
2.2.2 Oggetto della valutazione.....	9
2.2.3 Quadro di modellazione del LCI e gestione dei processi multifunzionali	10
2.2.4 Confini del sistema e requisiti di completezza	12
2.2.5 Rappresentatività dei dati del LCA	13
2.2.6 Preparazione delle basi per la valutazione degli impatti	14
2.2.7 Requisiti speciali per la comparazione dei sistemi	14
2.2.8 Esigenze di una recensione critica.....	14
2.2.9 Pianificazione e rendiconto dei risultati	15
2.3 Life Cycle Inventory (LCI)	15
2.3.1 Identificazione dei processi per il modello LCI del product system considerato	15
2.3.2 Pianificazione e raccolta dati	16
2.3.3 Processi unitari di costruzione e controllo qualità.....	17
2.3.4 Costruzione del modello LCI e calcolo dei risultati	18
2.3.5 Gestione dell'incertezza e Analisi di sensitività	19
2.3.6 Reporting.....	20
2.4 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)	21
2.4.1 Selezione delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e della caratterizzazione dei modelli	22
2.4.2 Classificazione	23
2.4.3 Caratterizzazione.....	23
2.4.4 Normalizzazione	24
2.4.5 Ponderazione.....	26
2.4.6 Raggruppamento	26
2.5 Interpretazione dei risultati ottenuti.....	27
2.5.1 Identificazione di problematiche rilevanti	27
2.5.2 Valutazione	28
2.5.3 Controllo di completezza.....	28
2.5.4 Controllo di sensitività	29
2.5.5 Controllo di consistenza	30
2.5.6 Conclusioni, limitazioni e raccomandazioni.....	31
2.5.7 Interpretazioni per studi comparativi	31
3. Casi studio	33
3.1 LCA dei rivestimenti delle portiere automobilistiche	33
3.1.1 Fasi LCA della Definizione dello scopo e dell'obiettivo del caso studio	35
3.1.2 Fasi LCA di LCI e LCIA del caso studio	36
3.1.3 Fase LCA dei Risultati del caso studio	38
3.1.3.1 Risultati relativi al consumo di energia e materie prime.....	39
3.1.3.2 Risultati relativi alle emissioni d'aria e di acqua	40
3.1.3.3 Risultati relativi ai rifiuti solidi	44
3.1.4 Fase LCA delle conclusioni dello studio	45

3.2 LCA di una turbina eolica	47
3.2.2 Fasi LCA di LCI e LCIA del caso studio	49
3.2.3 Fase LCA dei Risultati del caso studio	54
3.2.3.1 Risultati relativi all'impatto ambientale	54
3.2.3.2 Risultati relativi alla domanda cumulata di energia (CED)	55
3.2.3.3 Risultati relativi al processo.....	56
3.2.3.4 Risultati relativi al tempo di recupero energetico	57
3.2.4 Fase LCA delle Conclusioni del caso studio	58
4. Conclusioni	59
Bibliografia.....	62

Prefazione

Il Life Cycle Assessment (LCA), è una tecnica standardizzata basata su un approccio iterativo, nata per comprendere l'impatto ambientale di prodotti e servizi durante tutte le fasi del loro ciclo di vita.

L'idea del LCA è stata concepita nel 1960 quando l'accesso limitato alle risorse e la degradazione dell'ambiente hanno cominciato a destare preoccupazione a livello globale.

Inizialmente gli studi erano principalmente fatti per le aziende, usando i risultati a scopo interno e resi in parte noti agli stakeholders, ma dal 1980 c'è stato un aumento dello sviluppo metodologico e della collaborazione internazionale, che ha coinvolto la comunità scientifica arrivando anche alle università (Figura 1).

Ad oggi, lo sviluppo è sempre continuo e crescente, e lo studio è diventato di interesse anche per i governi.

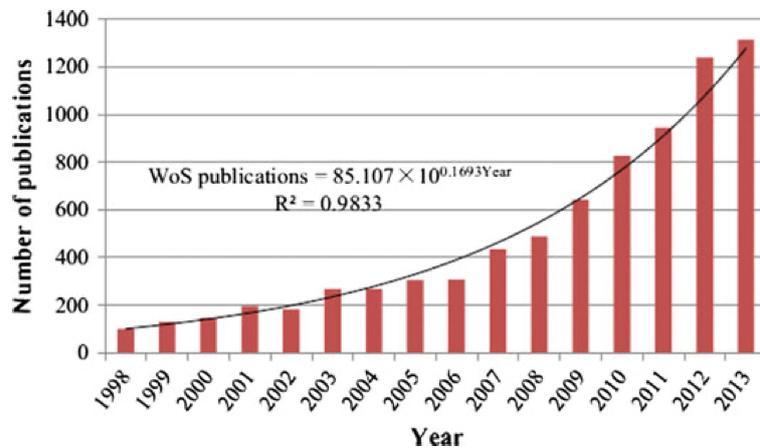


Figura 1 – Grafico sul numero di pubblicazioni annuali riguardo lo studio di un LCA dal 1998 al 2013. [4]

1. Struttura di un LCA

Per condurre uno studio di LCA, ci sono quattro fasi principali regolate dalle normative ISO 14040 e ISO 14044 (Figura 2):

- Definizione degli scopi e degli obiettivi;
- Life cycle inventory analysis (LCI);
- Life cycle impact assessment analysis (LCIA);
- Interpretazione dei risultati ottenuti.

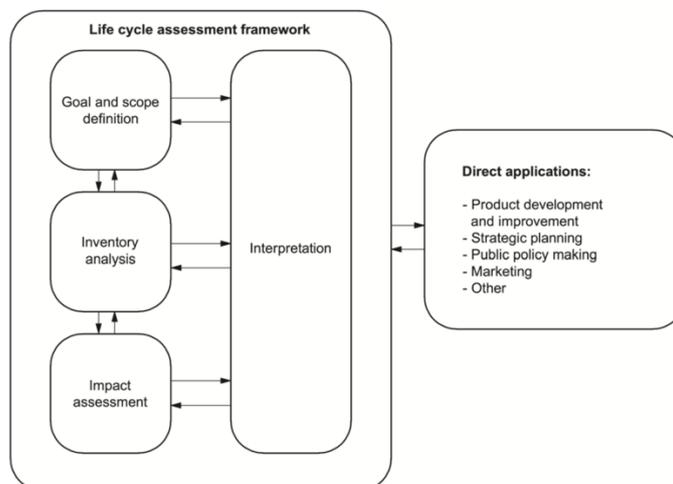


Figura 2 – Fasi per lo studio di un LCA. [1]

1.1 Approccio Iterativo

L'analisi del ciclo di vita è un approccio iterativo perché durante la seconda e terza fase, ossia nel reperimento dei dati (LCI) e nella valutazione dell'impatto (LCIA), diventano disponibili più informazioni, quindi tipicamente è necessario che lo scopo del LCA debba essere perfezionato o alcune volte anche rivisto (Figura 3).

Le iterazioni terminano quando i dati raccolti durante la fase del LCI sono completi e precisi, senza una ulteriore revisione degli scopi ed obiettivi dello studio.

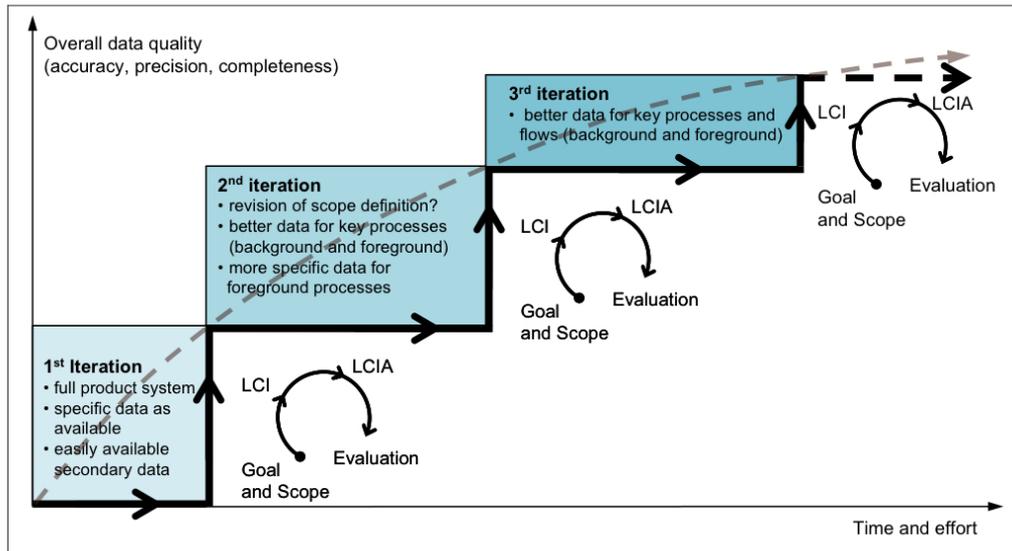


Figura 3 – Approccio iterativo per lo studio di LCA, basato sul tempo e sulla qualità dei dati.

[3]

2. Fasi di un LCA

Oggetto dell'analisi di un LCA è un *product system*, definito come l'insieme di *unit processes* con *flussi elementari* e *flussi di prodotto*, che svolgono una o più funzioni definite e che modella il ciclo di vita di un prodotto. Un *unit process* indica il più piccolo elemento considerato nella fase LCI (Life Cycle Inventory analysis) del LCA per il quale sono quantificati i dati di input e output. Un flusso elementare indica il materiale o l'energia che entra nel sistema oggetto di studio e che è stato prelevato dall'ambiente senza una precedente trasformazione umana, mentre un flusso di prodotto indica i prodotti in entrata o in uscita verso un altro *product system*. In accordo con le normative ISO 14040 e ISO 14044, in questa sezione sono riportate le fasi necessarie per condurre lo studio di un LCA.

2.1 Definizione degli obiettivi

Questa è la prima fase dello studio, e rappresenta le fondamenta di tutte le successive fasi in quanto ogni loro implementazione dovrà essere sempre in accordo con essa. Per definire un obiettivo ci sono sei aspetti fondamentali che devono essere sempre rispettati, e sono:

1. Applicazioni previste dei risultati;
2. Limitazioni causate dalle scelte metodologiche;
3. Ragioni per svolgere lo studio;
4. Target dello studio;
5. Studi comparativi da poter divulgare in pubblico;
6. Chi conduce lo studio e le figure coinvolte.

Tutti i LCA includono lo studio di uno o più *product systems* e questo può essere utilizzato in diverse applicazioni, ad esempio:

- Confrontando gli impatti ambientali di specifiche merci o servizi;
- Identificando le parti di un *product system* che contribuiscono di più al suo impatto ambientale;
- Valutare le potenzialità di miglioramento cambiando la progettazione del prodotto (con un'analisi e degli scenari 'what-if' in eco-design);

- Documentare la performance ambientale del prodotto;
- Sviluppando criteri per una eco-label;
- Sviluppando politiche che considerano l'aspetto ambientale.

Le applicazioni devono essere individuate in quanto esse influenzeranno tutte le fasi successive, come il disegno dei confini del sistema, l'approvvigionamento dei dati di inventario e l'interpretazione dei risultati.

Un altro aspetto importante nella definizione degli obiettivi consiste nel decidere il contesto e la ragione per il quale si svolge lo studio, perché esso influenza fortemente l'appropriata elaborazione del LCI.

Quindi, inizialmente deve essere compresa la ragione per la quale si conduce lo studio, e dovrebbe essere connessa alle intese applicazioni dei risultati.

Di seguito sono riportati tre diversi contesti decisionali in cui può essere inserito un LCA. Tale contesto risulta determinante per la definizione degli obiettivi del LCA stesso.

- **Situazione A (Supporto decisionale di micro-livello):** Il product system in studio è considerato di piccola scala, quindi nella fase delle decisioni non causa cambiamenti strutturali con i sistemi con cui esso interagisce. Un esempio è uno studio di progettazione ecocompatibile che modella un nuovo tipo di mouse del computer che confronta diverse tipologie di polimeri per il suo case.
- **Situazione B (Supporto decisionale di meso/macro-livello):** I risultati dello studio sono utilizzati come supporto alle decisioni, e la scala del product system è tale da causare il cambiamento strutturale di uno o più processi dei sistemi con cui esso interagisce. Un esempio è uno studio per supportare lo sviluppo di politiche riguardo la potenziale sostituzione a livello nazionale del diesel derivato dal petrolio con del biodiesel per le auto private.
- **Situazione C (Ragioneria):** Lo studio non è usato come supporto alle decisioni ed è puramente di natura descrittiva. Documenta cosa è già successo o cosa succederà a causa di una decisione che è già stata presa. Un esempio è uno studio che riguarda la passata performance di alcune tecnologie per il trattamento di rifiuti di involucri di plastica.

La definizione degli obiettivi deve inoltre specificare se lo studio di un LCA è di natura comparativa e se c'è l'intenzione di divulgarlo al pubblico. Se questo è il caso, le normative ISO 14040 e 14044 specificano un numero di requisiti nella condotta e nella documentazione dello studio e nel processo di revisione esterna a causa delle potenziali conseguenze che la comunicazione dei risultati potrebbero avere per aziende esterne, istituzioni, consumatori e altri stakeholders.

2.2 Definizione dello scopo

La definizione dello scopo determina quali product systems devono essere valutati e come questa valutazione deve avvenire. Assieme alla definizione degli obiettivi, questa fase serve come guida stabile per come le successive fasi devono essere condotte e come il LCA deve essere riportato.

La definizione degli scopi coinvolge la definizione dei seguenti punti:

1. Risultati attesi;
2. Oggetto della valutazione;
3. Quadro di modellazione del LCI e gestione dei processi multifunzionali;
4. Confini del sistema e requisiti di completezza;
5. Rappresentatività dei dati del LCI;
6. Preparazione delle basi per la valutazione degli impatti;
7. Requisiti speciali per la comparazione dei sistemi;
8. Esigenze di una recensione critica;
9. Pianificazione del rendiconto dei risultati.

Quando si conduce uno studio sul LCA è necessario tenere conto di ognuno dei punti sopra elencati.

I punti dal 2 al 6 sono quelli principali per condurre lo studio in quanto hanno influenza nelle decisioni delle fasi successive, invece gli aspetti 1, 7, 8 e 9 si riferiscono principalmente al riportare e comunicare lo studio LCA.

2.2.1 Risultati attesi

I tipi di risultati attesi dovrebbero riflettere direttamente l'applicazione dei risultati, come definito dalla definizione degli obiettivi. Per essere compatibile con la normativa ISO 14044 uno studio di LCA deve includere una valutazione degli impatti, e la maggior parte degli studi ha due risultati attesi, ossia quelli del LCI e del LCIA.

2.2.2 Oggetto della valutazione

Gli oggetti della valutazione si dividono in funzioni, unità funzionali e flussi di riferimento.

Le funzioni sono particolarmente importanti per capire quando comparare due o più product systems, in quanto una comparazione è corretta e significativa se i sistemi comparati forniscono la/e stessa/e funzione/i all'utente.

Un esempio è quando due diverse tecnologie energetiche possono essere confrontate sulla base della funzione che esse svolgono nel consentire la fornitura di elettricità alle famiglie, attraverso un sistema di distribuzione comune.

Un'unità funzionale definisce gli aspetti qualitativi e quantifica gli aspetti quantitativi delle funzioni, che generalmente includono le risposte alle domande "cosa?", "quanto?", "Per quanto tempo/Per quante volte?", "Dove?" e "Quanto bene?".

Un esempio è il confronto tra due vernici (A e B) per esterni che può essere basato sull'unità funzionale: "Copertura completa di 1 m² di parete esterna primerizzata per 10 anni in Germania in un colore uniforme con un'opacità del 99,9%".

Una volta determinata l'unità funzionale, si possono determinare i flussi di riferimento.

Un flusso di riferimento è la quantità di prodotto che è necessaria per realizzare l'unità funzionale, considerando tutti i flussi di input e output del product system. Riprendendo l'esempio citato per l'unità funzionale, per la copertura di 1 m² di parete esterna, si possono utilizzare 0.67 L di vernice A la quale necessita di due applicazioni ogni 2.5 anni, oppure 0.15 L di vernice B la quale necessita di una sola applicazione ogni 5 anni.

2.2.3 Quadro di modellazione del LCI e gestione dei processi multifunzionali

Nella scelta dell'appropriato quadro di modellazione del LCI e gestione dei processi multifunzionali, le scelte devono essere prese in accordo a quanto stabilito nella fase della definizione dello scopo, in particolare il contesto decisionale individuato (A, B o C).

Nella pratica LCA vengono utilizzati due principi principali di modellazione dell'LCI: il modello attribuzionale e quello consequenziale, con il primo più ampiamente utilizzato per ragioni storiche e pratiche. Rappresentano le due situazioni fondamentalmente diverse di modellazione del sistema analizzato (ad esempio un prodotto):

- Il modello del ciclo di vita attribuzionale descrive la supply-chain specifica o media, effettiva o prevista, oltre alla catena del valore di utilizzo e di fine vita. Il sistema esistente o previsto è incorporato in una technosfera statica.
- Il modello del ciclo di vita consequenziale descrive la supply-chain generica come è teoricamente prevista in conseguenza della decisione analizzata. Il sistema interagisce con i mercati e vengono rappresentati quei cambiamenti che ci si aspetta che una domanda aggiuntiva per il sistema analizzato avrà in una technosfera dinamica che sta reagendo a questa domanda aggiuntiva.

Strettamente correlata alla scelta del quadro di modellazione LCI appropriato, è la scelta di come risolvere la multifunzionalità dei processi e dei prodotti (raggruppati sotto la voce comune “allocazione” nella norma ISO 14044:2006).

Un processo si dice multifunzionale se esso fornisce più di una funzione, ovvero se fornisce diversi beni e /o servizi (spesso denominati anche “co-prodotti”), come riportato in figura 4.

Un esempio è l'elettrolisi della soluzione cloruro di sodio, che fornisce la soluzione di idrossido di sodio, cloro gassoso e idrogeno gassoso.

Un altro esempio è il co-trattamento di diversi rifiuti in un inceneritore di rifiuti; in tal caso il processo fornisce diversi co-servizi di trattamento di rifiuti distinti.

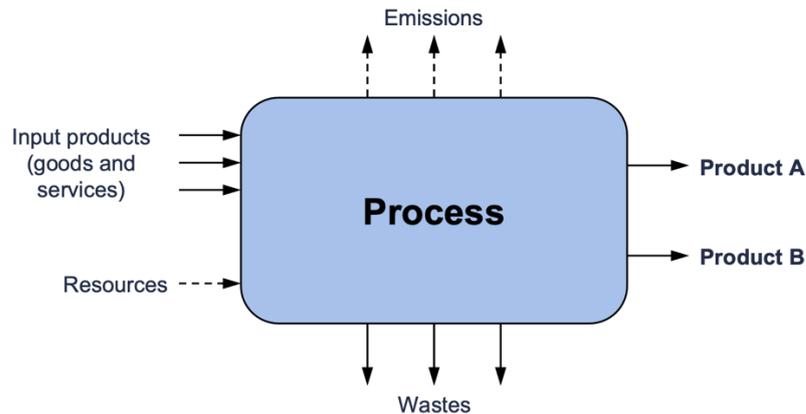


Figura 4 – *Processo multifunzionale con diversi prodotti di input e risorse consumate, e vari rifiuti ed emissioni generate oltre a fornire i due co-prodotti A e B.* [3]

In rari casi, un processo multifunzionale potrebbe avere più di un insieme di co-funzioni.

Un esempio è l'incenerimento di diversi rifiuti che danno come co-prodotti la produzione di elettricità e vapore. Se lo studio mira a calcolare un inventario per uno dei rifiuti, i servizi di trattamento dei diversi rifiuti sono le co-funzioni, se invece lo studio mira a calcolare l'inventario per l'elettricità o per il vapore, queste due sono le co-funzioni rilevanti.

Una variante dei processi multifunzionali è il prodotto multifunzionale (ad esempio un telefono cellulare), che è metodologicamente uguale, ma è modellato tipicamente in modo diverso nei set di dati LCI: mentre ciascuna co-funzione dei processi multifunzionali sopra menzionati ha un flusso di riferimento separato, in questo caso viene tipicamente utilizzato un solo flusso di riferimento. Ciò è giustificato non solo perché l'utente percepisce, ad esempio, il telefono cellulare in questione come un unico prodotto, ma anche quando viene ulteriormente gestito (ad esempio imballato, trasportato, utilizzato) e scartato come un unico articolo, cioè diverso dagli altri casi che hanno beni (o servizi) fisicamente distinti.

Per risolvere la multifunzionalità vengono utilizzati diversi approcci. La scelta dell'approccio più appropriato dipende, tra l'altro, dall'obiettivo dello studio, dai dati e dalle informazioni disponibili e dalle caratteristiche del processo o prodotto multifunzionale. Il modo più appropriato per risolvere questa multifunzionalità deve essere identificato già in questa fase del LCA (o almeno nella fase di inventario

quando si pianifica la raccolta dei dati), poiché influisce su quali dati di inventario e altre informazioni sono richiesti.

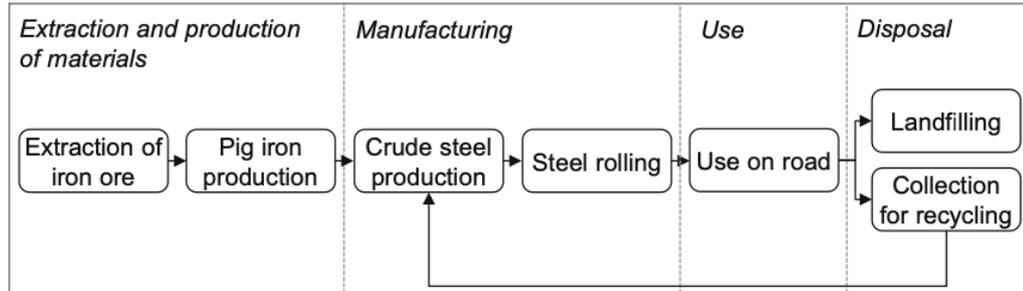


Figura 5 - Esempio di diagramma di confini del sistema per il ciclo di vita di un foglio d'acciaio utilizzato per prevenire incidenti durante i lavori stradali. Sono visualizzati solo i processi principali del suo ciclo di vita. [4]

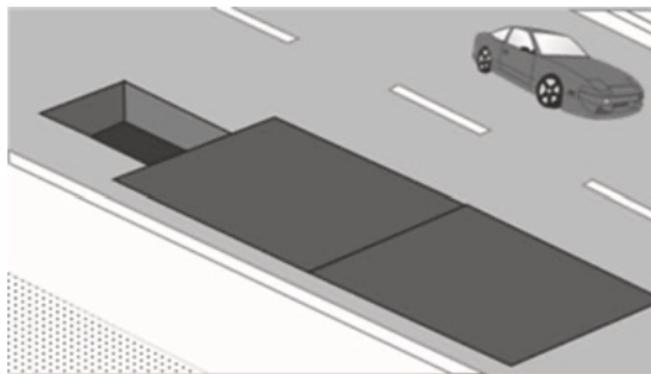


Figura 6 - Illustrazione del foglio d'acciaio menzionato in figura 5. [4]

2.2.4 Confini del sistema e requisiti di completezza

I confini del sistema delimitano i confini tra il product system studiato, l'economia circostante (Technosfera) e l'ambiente (Ecosfera). I requisiti di completezza sono un concetto collegato che può essere utilizzato per determinare quali processi dovrebbero essere inclusi all'interno dei confini del sistema per raggiungere il grado di completezza nella modellazione del product system che è necessaria ad essere in accordo con l'obiettivo dello studio di LCA. Un esempio è quanto riportato nelle figure 5 e 6.

2.2.5 Rappresentatività dei dati del LCA

La rappresentatività dei dati del LCI è lo scopo del LCA di riflettere la realtà fisica. Essa può essere compresa in tre dimensioni interconnesse: geografica, temporale e tecnologica.

La rappresentatività geografica è importante da considerare perché due processi che erogano lo stesso output, ma che avvengono in due località differenti possono essere un po' diversi in termini di flussi quali gli elementari, di energia, di materiali e di trattamento dei rifiuti.

Un esempio è quanto riportato in figura 7, dove si evidenziano le fonti di energia per la produzione di elettricità tra Svezia (a) e Danimarca (b). Nonostante la vicinanza geografica, la Svezia utilizza principalmente come fonti il nucleare e l'idroelettrica, mentre la Danimarca utilizza principalmente il carbone e l'eolico.

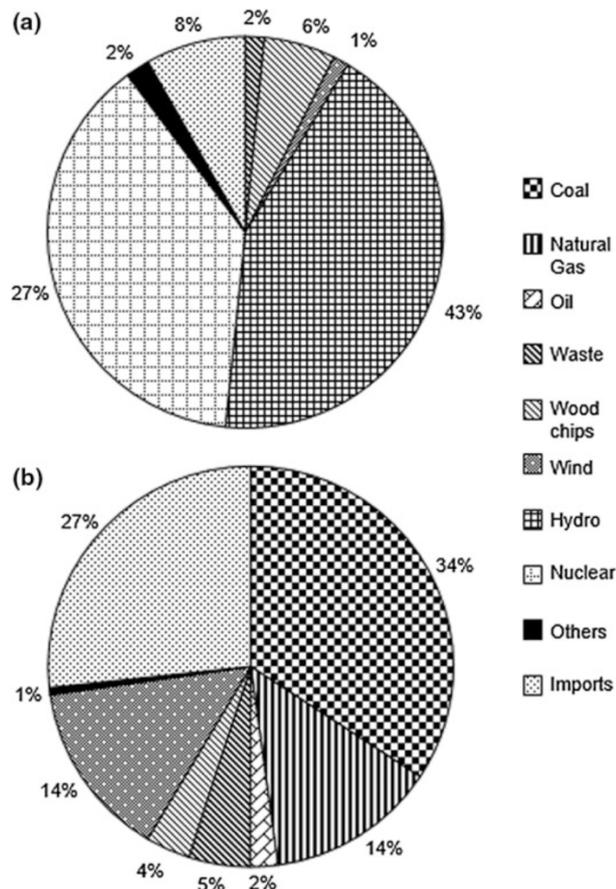


Figura 7 – Fonti di energia utilizzate in Svezia (a) e Danimarca (b) per la produzione di energia elettrica. [4]

La rappresentatività temporale è molto importante in quanto grazie allo sviluppo e all'innovazione tecnologica, due processi che erogano lo stesso output in momenti diversi verificano differenze nell'efficienza del sistema produttivo, input privi di significato e a volte anche sottoprodotti meno indesiderati per unità di output.

La rappresentatività tecnologica descrive che due output identici possono essere prodotti utilizzando due tecnologie differenti e di conseguenza con unità di processo e flussi relativi diversi.

Un esempio può essere la produzione dell'acciaio grezzo, che può avvenire utilizzando un forno elettrico ad arco (EAF) o un forno ad ossigeno basico (BOF), le quali sono due tecnologie molto diverse e che coinvolgono flussi diversi.

2.2.6 Preparazione delle basi per la valutazione degli impatti

La preparazione delle basi per la valutazione degli impatti aiuta a garantire che durante la fase del LCI vengano raccolti i dati correttamente.

2.2.7 Requisiti speciali per la comparazione dei sistemi

La normativa ISO 14044 ha posto dei requisiti speciali per la comparazione dei sistemi, per assicurare che i sistemi possano essere messi a confronto.

Quando uno studio comparativo intende giungere alla conclusione sulla superiorità o sull'equivalenza delle alternative confrontate in termini di performance ambientale, e di rendere queste conclusioni disponibili pubblicamente, la normativa lo identifica come un'“asserzione di studio comparativo destinato ad essere reso pubblico”.

Questi requisiti speciali riflettono la conseguenza che i risultati di uno studio comparativo di LCA possono essere utilizzati da aziende, istituzioni o stakeholders che non sono direttamente inclusi nello studio, allo scopo di prevenire l'abuso di queste informazioni nel mercato concorrenziale.

2.2.8 Esigenze di una recensione critica

La recensione critica è fatta da esperti che non sono coinvolti nello studio. Anche se non c'è un requisito formale di una recensione critica, è sempre utile per aumentare la qualità e la credibilità di uno studio.

2.2.9 Pianificazione e rendiconto dei risultati

Nell'oggetto di pianificazione del rendiconto dei risultati, è essenziale che il report sia chiaro e trasparente con una chiara indicazione di cosa è stato incluso nello studio e cosa non, e quali raccomandazioni e conclusioni sono supportate dai risultati.

2.3 Life Cycle Inventory (LCI)

Il LCI è la terza parte dello studio di un LCA, e spesso è quella più lunga.

La sua attività principale è la raccolta e la compilazione di dati sui flussi elementari da tutti i processi del product system in studio.

L'output è un inventario compilato dei flussi elementari che viene utilizzato per le seguenti fasi del LCA. Il LCI è composto da sei fasi principali:

1. Identificazione dei processi per il modello LCI del product system considerato;
2. Pianificazione e raccolta dei dati;
3. Processi unitari di costruzione e controllo qualità;
4. Costruzione del modello LCI e calcolo dei risultati;
5. Preparazione delle basi per la gestione dell'incertezza e dell'analisi di sensitività;
6. Reporting.

2.3.1 Identificazione dei processi per il modello LCI del product system considerato

Per tutte i contesti decisionali (punti A, B e C riportati nella sezione 2.1), l'approccio utilizzato per identificare i processi è quello di partire con un flusso di riferimento e costruire tutto il sistema in primo piano processo per processo, come riportato in figura 8.

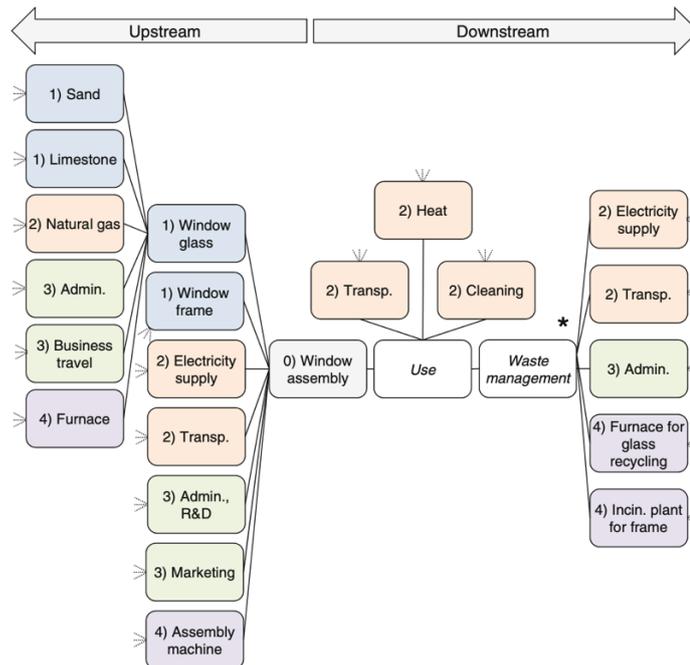


Figura 8 – Procedura per identificare i processi del sistema in primo piano, relativi ad uno studio sul ciclo di vita di una finestra. [4]

2.3.2 Pianificazione e raccolta dati

Secondo quanto definito nella fase di definizione dello scopo del LCA e i processi identificati dentro i confini del sistema, la raccolta dei dati per tali processi deve essere pianificata ed effettuata.

La pianificazione ha lo scopo di bilanciare lo sforzo della raccolta dei dati in base alla rilevanza del rispettivo dato e informazione.

Questo è essenziale per eliminare la perdita di tempo nella collezione di dati di alta qualità che hanno una bassa rilevanza per i risultati del LCA e/o spendere troppo poco tempo nella collezione di dati di alta qualità altamente rilevanti per i risultati. La pianificazione e la raccolta dei dati sono processi iterativi, in quanto dipendono anche dai risultati della successiva LCIA.

La pianificazione iniziale dovrebbe essere basata sui requisiti della rappresentatività dei dati dalla definizione dello scopo.

La qualità dei dati è legata alla loro specificità, che viene categorizzata in livelli da molto bassa a molto alta come riportato in Tabella 1.

Data specificity	Explanation
Very high	Measured directly at specific process site or scaled from measurement
High	Derived from measurements at specific process site via modelling
Medium	LCI database process or data from literature specific to actual process, e.g. according to best available technology standard or country average. Specificity may be improved by modifying a process with site-specific data
Low	Generic LCI database process or data from literature, e.g. covering a mix of technologies in a country or region
Very low	Judgement by expert or LCA practitioner

Tabella 1 – *Classificazione della specificità dei dati.* [4]

2.3.3 Processi unitari di costruzione e controllo qualità

I dati raccolti dovrebbero rappresentare il pieno ciclo di operazione del processo, includendo attività di preparazione come il riscaldamento, la calibrazione (con potenziali perdite di materiali e prodotti come scarti), operazione, pulizia e manutenzione.

La raccolta dei dati dovrebbe inoltre prendere in considerazione tassi di scarto tipici durante le operazioni.

Questo significa che la raccolta dei dati dovrebbe basarsi su un'operazione di lungo periodo, probabilmente di un anno di produzione. A volte anche gli impatti della produzione e lo stadio di end-of-life degli strumenti di produzione sono importanti e dovrebbero essere inclusi nella raccolta dati.

Quando i dati sono raccolti, si costruisce un unit process.

Come menzionato nel paragrafo 2.3.2, la qualità dei dati può variare, ed è importante assicurarsi che tutti i dati abbiano lo stesso formato per un unit process.

Quando si costruiscono gli unit processes c'è il rischio che siano incomplete e che ci siano errori nei flussi quantitativi. La non completezza potrebbe essere causata dal fatto che alcuni flussi non siano monitorati e riportati. Errori nei flussi quantitativi potrebbero essere causati da errori nelle misure riportate o da errori nel calcolo di flussi e conversioni di unità.

Per evitare ciò, gli unit processes costruite dovrebbero essere controllate prima di essere usate in un modello di LCI.

2.3.4 Costruzione del modello LCI e calcolo dei risultati

Quando tutti gli unit processes sono stati costruiti o raccolti dal database LCI, gli esperti LCA possono costruire il modello LCI. Ogni unit process può essere visto come un “blocco da costruzione” nel modello LCI, la cui ‘taglia’ è decisa dal flusso di riferimento dell’unità funzionale, questo perché tale flusso decide la quantità richiesta di ogni unit process. Un esempio è riportato in figura 9, dove viene riportato un sistema formato da tre unit processes, ognuno avente 4 flussi.

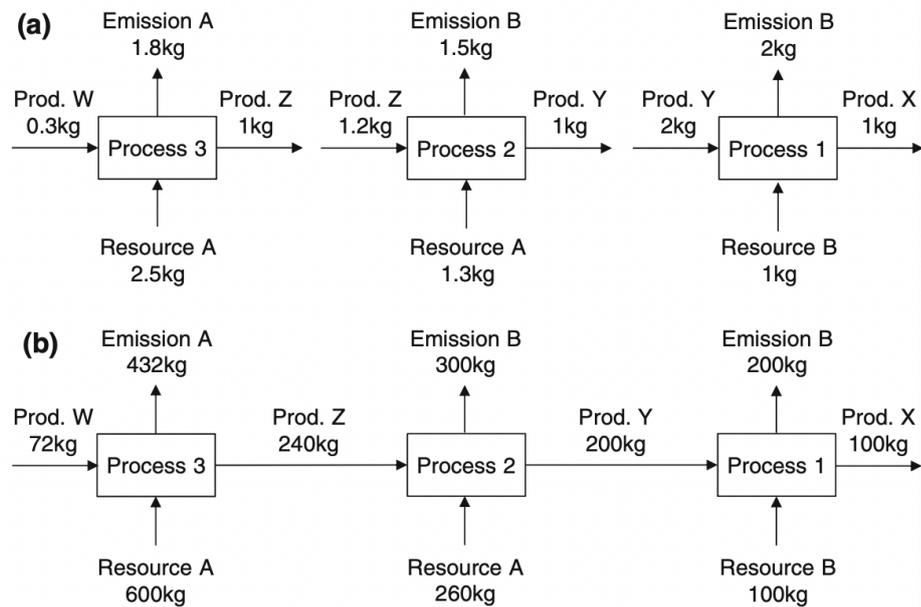


Figura 9 - Tre semplici unit processes non connessi (a) e connessi (b), basati sullo studio di un flusso di riferimento di 100 kg di prodotto X. [4]

Nella pratica, la modellazione dell’inventario è normalmente effettuata utilizzando un software dedicato che supporta la costruzione del modello di product system, collegando gli unit processes rilevanti.

I risultati del LCI sono la compilazione di flussi elementari su tutti i processi che sono parte del modello LCI (scalato al flusso di riferimento dell’unità funzionale). Normalmente il numero di flussi e di processi è enorme, ma non è richiesto calcolo manuale dai praticanti LCA in quanto si utilizzano i software LCA come ad esempio:

- SimaPro;
- GaBi;
- OpenLCA;

- Umberto.

I risultati del LCI sono le basi per le successive fasi dello studio LCA (a meno che lo scopo dello studio non fosse semplicemente calcolare questi risultati).

Un esempio di calcolo dei risultati di un LCI è riportato in figura 10, dove viene semplificato il product system riportato nella figura 9.

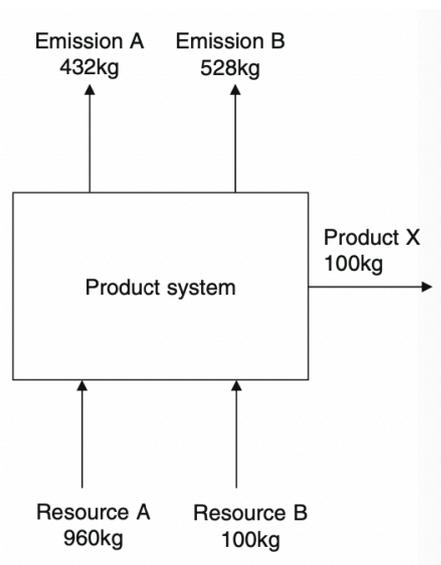


Figura 10 - *Product system semplificato*. In questo caso, i risultati sarebbero semplicemente la somma di ogni risorsa ed emissione per tutti i processi. Nello schema precedente non sono mostrati i flussi elementari di prodotto *W*, che corrispondono a 100 kg di risorsa A e 28 kg di emissioni B. [4]

2.3.5 Gestione dell'incertezza e Analisi di sensitività

L'incertezza e l'analisi di sensitività sono importanti per l'interpretazione dei risultati del LCIA perché possono informare i praticanti su quanto robuste sono le conclusioni dello studio e dove futuri studi dovrebbero concentrarsi per avere risultati ancora più forti.

L'analisi dell'incertezza permette la quantificazione di incertezze sul risultato finale, come conseguenza di certi parametri di incertezza del modello LCI. Per permettere questa analisi, il praticante deve raccogliere informazioni sulla distribuzione statistica (normale, log-normale o uniforme) dei parametri quantitativi del sistema in

primo piano, e i corrispondenti parametri statistici (media e deviazione standard per parametri distribuiti normalmente).

L'analisi di sensitività permette una sistematica identificazione dei parametri che hanno la più grande influenza sui risultati LCIA. L'influenza dei parametri sui risultati è calcolata cambiandoli uno ad uno e osservando i cambiamenti nei risultati. Questi cambiamenti nei parametri dovrebbero riflettere le incertezze riguardo l'attuale product system modellato. Per parametri quantitativi nel sistema in primo piano, il praticante dovrebbe mirare al raccoglimento di valori minimi e massimi, o di un basso e di un alto percentile quando la distribuzione statistica di un parametro è conosciuta, in aggiunta al valore di default nel modello LCI.

Ad esempio, uno specifico agricoltore potrebbe utilizzare in media 2 kg di uno specifico pesticida per produrre 1 tonnellata di patate, ma questo numero potrebbe variare da 0.5 kg a 3 kg in base alle condizioni meteo.

Per parametri discreti o assunzioni nel sistema in primo piano, il praticante dovrebbe sviluppare un numero di scenari di sensitività.

2.3.6 Reporting

Il reporting dell'analisi di inventario dovrebbe contenere i seguenti sei elementi:

1. Documentazione del modello LCI a livello sistema;
2. Documentazione di ogni unit process;
3. Documentazione di metadata (i metadata descrivono le caratteristiche e le condizioni dei processi per valutare quanto sono rappresentativi i dati rispetto ai dati effettivamente necessari);
4. Documentazione dei risultati LCI;
5. Assunzioni per ogni stadio del ciclo di vita;
6. Documentazione del raccoglimento dei dati per l'analisi di incertezza e di sensitività.

Gli elementi 1, 2 e 3 dovrebbero permettere al lettore di ricreare i risultati LCI, i quali sono documentati nell'elemento 4. L'elemento 5 dovrebbe permettere al lettore di giudicare la ragionabilità di tutte le assunzioni performate, e l'elemento 6 dovrebbe permettere al lettore di ricreazione l'analisi di incertezza e di sensitività.

2.4 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Questa fase mira a valutare l'entità del contributo di ciascun flusso elementare (ad esempio, le emissioni della risorsa utilizzata di un product system) all'impatto ambientale.

Il suo obiettivo è quello di esaminare il product system da una prospettiva ambientale utilizzando delle categorie di impatti e degli indicatori di categoria insieme ai risultati dell'analisi dell'inventario. Questo fornirà informazioni utili per la fase di interpretazione.

Questa fase è necessaria perché dal momento in cui i flussi elementari sono solamente quantità emesse o utilizzate, non sono direttamente comparabili tra loro in termini di importanza del loro impatto.

I metodi di caratterizzazione del LCIA modellano essenzialmente il meccanismo ambientale che è alla base di ciascuna delle categorie di impatto come una catena causa-effetto che parte dall'inventario ambientale (emissione o interazione fisica) fino al suo impatto.

Tuttavia, i risultati del LCIA non dovrebbero essere interpretati né come effetti ambientali previsti, né come superamento previsto delle soglie o margini di sicurezza, né come rischi per l'ambiente o la salute umana, ma sono invece punteggi che rappresentano i potenziali impatti.

Gli standard ISO 14040/14044 (ISO 2006a, b) distinguono passaggi obbligatori e facoltativi per la fase LCIA.

Passaggi obbligatori:

- Selezione delle categorie di impatti, degli indicatori di categoria e della caratterizzazione dei modelli;
- Classificazione, assegnando i risultati del LCI alle categorie di impatto in base ai loro effetti potenziali noti;
- Caratterizzazione, calcolando i risultati degli indicatori di categoria quantificando i contributi dei flussi elementari e di prodotto alle diverse categorie di impatto.

Passaggi opzionali:

- Normalizzazione, esprimendo i risultati del LCIA rispetto a quelli di un sistema di riferimento;

- Ponderazione, dando priorità o assegnando pesi ad ogni categoria di impatto;
- Raggruppamento, aggregando diversi risultati di indicatori di impatto in un gruppo.

2.4.1 Selezione delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e della caratterizzazione dei modelli

L'obiettivo di questo step è quello di trovare le categorie, gli indicatori e la caratterizzazione più utili e necessari per un dato obiettivo. Per aiutare a guidare la raccolta di informazioni sui flussi elementari rilevanti nell'analisi di inventario, la selezione delle categorie di impatto deve essere conforme all'obiettivo dello studio e viene effettuata nella fase di definizione dell'ambito prima della raccolta dei dati dell'inventario, per garantire che quest'ultimo è mirato a ciò che alla fine verrà valutato.

La difficoltà è quella di determinare i criteri che definiscono cosa è utile e necessario nel contesto in studio. Alcuni criteri sono forniti dalla ISO 14044 (2006b), sia come requisiti che come raccomandazioni. I requisiti sono obbligatori per la conformità allo standard ISO e saranno quindi tra i punti focali della fase di revisione critica. Esempi di categorie di impatto sono: Cambiamento climatico, Riduzione dell'ozono (stratosferico), Tossicità umana, Sostanze inorganiche respiratorie, Radiazioni ionizzanti, Formazione di ozono fotochimico (a livello del suolo), Acidificazione (della terra e dell'acqua), Ecotossicità, Utilizzo del suolo, Scarsità delle risorse (minerali, risorse energetiche fossili e rinnovabili, acqua).

Gli indicatori di categoria devono includere quelli rilevanti per lo specifico studio LCA effettuato, per quanto possibile. Eventuali lacune dovranno essere documentate e discusse esplicitamente nell'interpretazione dei risultati.

Il modello di caratterizzazione per ciascun indicatore di categoria deve essere scientificamente e tecnicamente valido e basato su un meccanismo ambientale distinto identificabile o su un'osservazione empirica riproducibile.

2.4.2 Classificazione

In questo step, i flussi elementari del LCI sono assegnati alle categorie di impatto nelle quali essi contribuiscono.

La difficoltà sta nel fatto che alcune sostanze emesse possono avere multipli impatti in due modi differenti:

- In parallelo: una sostanza ha più impatti simultanei, ad esempio SO₂ che causa acidificazione ed è tossico per l'umano quando inalato;
- In serie: una sostanza ha un effetto negativo che a sua volta diventa la causa di qualcos'altro, ad esempio SO₂ provoca l'acidificazione che può mobilitare metalli pesanti nel suolo che sono tossici per l'uomo e gli ecosistemi.

Questo step richiede una notevole comprensione e una conoscenza approfondita degli impatti ambientali e pertanto viene generalmente gestita automaticamente dal software LCA che utilizza tabelle di classificazione pre-programmate da esperti.

2.4.3 Caratterizzazione

In questo step tutti i flussi elementari del LCI sono valutati in base al grado con cui contribuiscono all'impatto ambientale.

A tal fine, tutti i flussi elementari (E), classificati all'interno di una specifica categoria di impatto (c), vengono moltiplicati per il rispettivo fattore di caratterizzazione (CF) e sommati su tutti gli interventi rilevanti (emissioni o estrazioni di risorse) che danno come risultato un punteggio di impatto (IS) per la categoria di impatto ambientale.

$$IS = \sum_i (CF_i \cdot E_i) \quad (1)$$

IS è espresso in un'unità specifica uguale per tutti i flussi elementari all'interno della stessa categoria di impatto.

Per ogni categoria di impatto, i risultati dell'indicatore sono sommati per determinare il risultato totale della categoria.

Il fattore di caratterizzazione (CF) rappresenta il contributo per quantità di flusso elementare ad uno specifico impatto ambientale (categoria). Viene calcolato utilizzando dei modelli (scientificamente validi e quantitativi) del meccanismo ambientale che rappresentano nel modo più realistico possibile la catena di eventi causa-effetto che portano ad impatti sull'ambiente per tutti i flussi elementari che concorrono a tale impatto.

Il CF può esprimere l'impatto direttamente (ad esempio, il numero di casi di malattia/unità di emissione tossica), o indirettamente collegandolo all'impatto di un flusso elementare di riferimento (ad esempio, gli equivalenti di CO₂/emissione unitaria di gas a effetto serra).

2.4.4 Normalizzazione

La normalizzazione è utile per:

- Fornire un'idea delle dimensioni relative dei potenziali impatti ambientali;
- Presentare i risultati in una forma idonea ad una successiva ponderazione;
- Controllare la coerenza e l'affidabilità;
- Comunicare i risultati.

I sistemi di riferimento tipici sono:

- Zona geografica, che può essere globale, continentale, nazionale, regionale o locale;
- Abitante di una zona geografica (ad esempio, esprimendo lo "spazio ambientale" occupato per persona media);
- Settore industriale di una zona geografica (ad esempio, esprimendo lo "spazio ambientale" occupato da questo product system rispetto ad attività industriali simili);
- Scenario di riferimento base, come un altro product system (ad esempio, esprimendo lo "spazio ambientale" occupato da questo product system ad un sistema di riferimento simile utilizzando le migliori tecnologie disponibili).

L'utilizzo di uno dei primi tre sistemi di riferimento sopra elencati viene definito normalizzazione esterna, mentre l'utilizzo dell'ultimo viene chiamato normalizzazione interna.

I punteggi di impatto normalizzati, quando si utilizza una normalizzazione interna, sono spesso comunicati come percentuali rispetto al sistema di riferimento.

In pratica, un metodo LCIA generalmente fornisce dei fattori di normalizzazione da utilizzare con i suoi fattori di caratterizzazione.

I fattori di normalizzazione da diversi metodi LCIA non possono essere combinati con i fattori di caratterizzazione di un altro metodo LCIA. Questo significa che un praticante LCA è limitato al sistema di riferimento scelto dal metodo LCIA sviluppato.

La normalizzazione viene applicata utilizzando i fattori di normalizzazione (NF). Essi vengono calcolati per categoria di impatto (c) conducendo un LCI e un LCIA sul sistema di riferimento, ovvero quantificando tutti gli interventi ambientali (E) per tutti i flussi elementari i per il sistema di riferimento e applicando i fattori di caratterizzazione (CF) per flusso elementare i , rispettivamente, per ciascuna categoria di impatto (c).

Anche se non obbligatorio, il riferimento alla normalizzazione è tipicamente diviso per popolazione (P) della regione di riferimento r , in modo da esprimere il (NF) per abitante medio della regione di riferimento.

In questo modo viene calcolato un impatto totale del sistema di riferimento per categoria di impatto:

$$NF_c = \left(\frac{\sum_i (CF_i \cdot E_i)}{P_r} \right)^{-1} \quad (2)$$

Per garantire coerenza, i dati LCI utilizzati per calcolare un (NF) devono rappresentare un anno di riferimento comune per tutte le categorie di impatto. Ciò fa sì che il NF abbia un'unità che esprime un impatto per persona ad anno, denominato anche persona equivalente.

Un punteggio di impatto normalizzato (NS) per un product system viene calcolato moltiplicando il punteggio di impatto (IS) per il product system per il (NF) pertinente per la categoria di impatto (c):

$$NS_c = IS_c \cdot NF_c \quad (3)$$

2.4.5 Ponderazione

La ponderazione può essere utilizzata per determinare quali impatti sono più importanti e come lo sono. Questo step può essere applicato solo dopo la normalizzazione e permette di dare priorità alle categorie di impatto applicando pesi diversi o uguali per ogni indicatore di categoria.

È importante evidenziare che non c'è alcuna base scientifica o oggettiva per questo step, quindi non importa il metodo di ponderazione scelto o lo schema applicato perché sarà sempre basato sulle scelte soggettive di una persona o di un gruppo di individui.

La ponderazione è utile per:

- Aggregare dei punteggi di impatto in uno o più indicatori;
- Confrontare tra le categorie di impatto;
- Comunicare i risultati applicando una priorità di base dei valori etici.

Secondo la norma ISO 14044, la ponderazione non è consentita in un'affermazione comparativa resa pubblica, e i risultati ponderati dovrebbero sempre essere riportati insieme a quelli non ponderati per mantenere la trasparenza.

2.4.6 Raggruppamento

Questa fase consiste nel collocare le categorie di impatto in uno o più gruppi, e può comportare l'ordinamento o la classificazione applicando uno dei due possibili metodi:

1. Ordinamento e raggruppamento delle categorie di impatto su base nominale (ad esempio impatti correlati alle emissioni o al consumo di risorse, o impatti correlati a livello geografico – locale, regionale...);

2. Classificazione delle categorie di impatto in base a una gerarchia prestabilita (soggettiva, basata su scelte di valore etico).

2.5 Interpretazione dei risultati ottenuti

L'interpretazione è la fase del LCA in cui i risultati delle altre fasi vengono considerati assieme e analizzati alla luce delle incertezze dei dati applicati e delle ipotesi che sono state fatte e documentate nel corso dello studio.

Il risultato di questa fase dovrebbe essere una conclusione o delle raccomandazioni che:

- Rispettino le intenzioni della definizione dell'obiettivo e le restrizioni che questa impone allo studio attraverso la definizione dello scopo;
- Tengano conto dell'adeguatezza dell'unità funzionale e dei confini del sistema.

L'interpretazione dovrebbe presentare le conclusioni del LCA in modo comprensibile e aiutare gli utenti dello studio a valutarne la robustezza e i potenziali punti deboli alla luce di eventuali limitazioni identificate dello studio.

Gli elementi caratteristici di questa fase sono:

- Identificazione di problematiche rilevanti;
- Valutazione;
- Controllo di completezza, di sensitività e di consistenza;
- Conclusioni, limitazioni e raccomandazioni;
- Interpretazione per studi comparativi.

2.5.1 Identificazione di problematiche rilevanti

Lo scopo di questo primo elemento è quello di analizzare i risultati di ogni fase precedente per determinare i problemi più rilevanti dal punto di vista ambientale.

I problemi significativi possono riguardare scelte metodologiche e assunzioni, inventario errato di dati per importanti processi del ciclo di vita e/o fattori di caratterizzazione, normalizzazione o ponderazione utilizzati nella valutazione degli impatti.

Il professionista è incoraggiato a preparare un elenco di tali scelte durante l'esecuzione pratica del LCA, la definizione dello scopo e dell'obiettivo, la

modellazione del product system e la valutazione degli impatti per facilitare la loro identificazione.

2.5.2 Valutazione

La valutazione stabilisce le basi per le conclusioni e le raccomandazioni che possono essere formulate nell'interpretazione. Viene eseguita in un'interazione iterativa con l'identificazione dei problemi chiave per determinare l'affidabilità e la stabilità dei risultati dall'elemento di identificazione.

Come l'elemento precedente, la valutazione copre i risultati delle fasi precedenti del LCA, l'analisi dell'inventario e la valutazione degli impatti secondo lo scopo e l'obiettivo dello studio, con molta attenzione ai problemi significativi identificati nei dati e nelle scelte metodologiche.

Il risultato di questo elemento è cruciale per determinare la forza delle conclusioni e raccomandazioni dello studio, e perciò deve essere presentato in modo da dare all'utente dello studio una chiara comprensione di ciò che è stato ottenuto.

La valutazione comprende:

- Il controllo di completezza;
- L'analisi di sensitività in combinazione con l'analisi di incertezza;
- Il controllo di consistenza.

2.5.3 Controllo di completezza

Questo controllo viene effettuato per l'inventario e la valutazione dell'impatto per determinare il grado con il quale il dato disponibile è completo per i processi e gli impatti che sono stati identificati come problemi significativi.

Se si trova che informazioni rilevanti mancano o sono incomplete per alcuni processi chiave o per i flussi elementari più importanti o per le categorie di impatto, bisogna investigare in modo da soddisfare la definizione dello scopo e dell'obiettivo del LCA.

Se non è possibile porre rimedio ad un'importante carenza di dati, questo dovrebbe essere considerato quando si formulano le limitazioni nelle conclusioni dello studio.

Se l'informazione mancante è stata trovata ma è di bassa importanza, questo dovrebbe essere riportato nel documento di reporting del controllo di completezza.

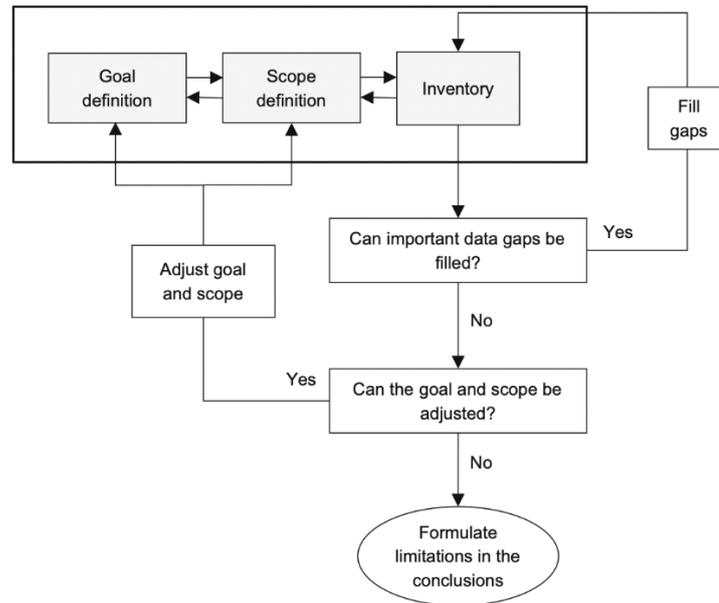


Figura 11 – Interazioni iterative tra il controllo di completezza e le fasi 2.1, 2.2 e 2.3 del LCA. [4]

2.5.4 Controllo di sensitività

Il controllo di sensitività ha l'obiettivo di identificare i processi chiave e i flussi elementare più importanti come quegli elementi che maggiormente contribuiscono agli impatti complessivi del product system. L'analisi di sensitività può essere effettuata e presentata come un'analisi contributiva o un'analisi dominante, ma è anche utilizzata in combinazione con l'analisi di incertezza come attività di guida nei cicli di iterazione che vengono eseguiti durante il LCA, a supporto della definizione dei confini per il product system, della raccolta dati di inventario e della valutazione dell'impatto.

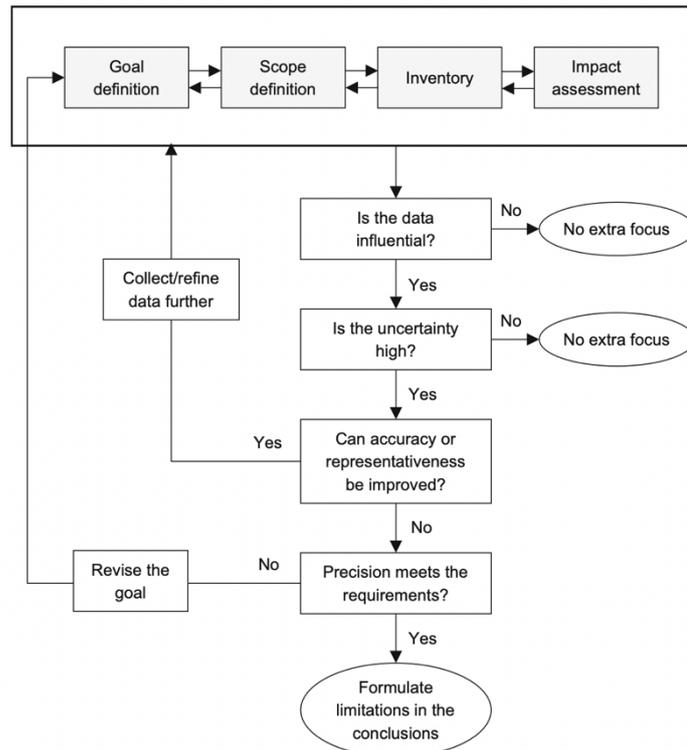


Figura 12 – *Combinazione dell'analisi di sensitività e di incertezza per migliorare i dati del LCA.* [4]

2.5.5 Controllo di consistenza

Il controllo di consistenza è utilizzato per verificare se le ipotesi, i metodi applicati nello studio sono coerenti con l'obiettivo e lo scopo.

La qualità dei dati di inventario riguarda sia la rappresentatività temporale che quella geografica e tecnologica dei dati, l'adeguatezza dell'unit process scelto per rappresentare il processo del product system, e l'incertezza dei dati. In caso di comparazione tra diversi product systems, il controllo di consistenza esamina anche se le regole di assegnazione e la definizione dei confini del sistema, nonché la valutazione dell'impatto, sono state applicate in modo coerente a tutti i sistemi di prodotto confrontati. Quando vengono identificate incoerenze, la loro influenza sui risultati dello studio viene valutata e considerata per trarre conclusioni dai risultati.

2.5.6 Conclusioni, limitazioni e raccomandazioni

Basandosi sugli elementi precedenti e attingendo ai principali risultati delle fasi precedenti del LCA, l'elemento finale dell'interpretazione deve trarre conclusioni, identificare i limiti dello studio e sviluppare raccomandazioni per il pubblico previsto in conformità con la definizione dell'obiettivo e le applicazioni previste dei risultati.

Le conclusioni dovrebbero essere tratte in modo iterativo: sulla base dell'identificazione dei problemi significativi, della valutazione di questi per completezza, sensibilità e consistenza, si possono trarre conclusioni preliminari.

Si verifica quindi se quest'ultime sono conformi ai requisiti della definizione dello scopo dello studio (in particolare requisiti di qualità dei dati, ipotesi e valori predefiniti e limitazioni della metodologia e nello studio). Se le conclusioni sono allineate con i requisiti, possono essere riportate come conclusioni finali, altrimenti devono essere riformulate e controllate nuovamente.

Le raccomandazioni dovrebbero essere conseguenze logiche e ragionevoli basate sulle conclusioni finali dello studio. Dovrebbero basarsi solo su risultati significativi e riguardare l'applicazione prevista dello studio come definito nella definizione dell'obiettivo.

2.5.7 Interpretazioni per studi comparativi

Negli studi che includono la comparazione tra product systems, l'interpretazione deve considerare un numero addizionale di punti per assicurare conclusioni giuste e pertinenti allo studio.

- Problemi significativi devono essere determinati per ogni sistema, e bisognerebbe prestare particolare attenzione ai problemi che differiscono tra i sistemi e quanto influenzano l'equilibrio della comparazione.
- Il controllo di completezza deve avere come specifico obiettivo le differenze nella completezza nel trattamento di alcuni problemi significativi tra product systems. Se ci fossero differenze che potrebbero influenzare i risultati della comparazione, esse dovrebbero essere eliminate se possibile, altrimenti devono essere tenute presenti nella formulazione delle conclusioni.
- Se un'analisi di incertezza è effettuata per verificare se la differenza tra due sistemi è statisticamente significativa, dovrebbe essere controllata per una

differenza statisticamente significativa diversa da zero, tenendo in considerazione della potenziale covariazione tra i processi dei due sistemi.

- Quando un LCA è utilizzato in asserzioni comparative destinate ad essere divulgate al pubblico, lo standard ISO 14044 richiede che l'elemento di valutazione includa dichiarazioni interpretative basate su analisi di sensibilità dettagliate. Si sottolinea nella norma che l'incapacità di un'analisi statistica di trovare differenze significative tra le diverse alternative studiate non porta automaticamente alla conclusione che tali differenze non esistono, piuttosto che lo studio non è in grado di mostrarle in modo significativo.
- Un controllo di consistenza è necessario sul trattamento delle ipotesi chiave e delle scelte metodologiche nei diversi sistemi per evitare errori e garantire un confronto equo.

L'influenza di eventuali incongruenze identificate sull'esito del confronto dovrebbe essere valutata e presa in considerazione quando si traggono conclusioni dai risultati.

3. Casi studio

Di seguito nelle sezioni 3.1 e 3.2 sono riportati due casi studio LCA riguardanti, rispettivamente, sui rivestimenti delle portiere automobilistiche su una turbina eolica di 2 MW di potenza nominale.

3.1 LCA dei rivestimenti delle portiere automobilistiche

Secondo un documento informativo di Environment Australia 2002 (Impatto ambientale dei veicoli a fine vita) [6], ogni anno in Australia venivano immessi nel flusso dei rifiuti più di 500.000 veicoli.

Ci si aspettava che questo quantitativo di veicoli potesse oltrepassare i 750.000 veicoli entro il 2010 a causa della crescita del tasso di proprietà dei veicoli, della diminuzione dell'età media dei veicoli e della diminuzione dell'efficacia in termini di costi di possedere veicoli più vecchi.

Inoltre, un momento di crisi energetica in tutto il mondo e l'elevato prezzo del petrolio avevano esercitato un'enorme pressione sulla produzione di automobili leggere con un maggiore risparmio di carburante ed un minore impatto ambientale, come basse emissioni di gas serra ed un minore consumo energetico.

La lotta tra maggiore riciclabilità e maggiore risparmio di carburante, il rispetto dell'ambiente o della sostenibilità delle automobili è una delle principali forze trainanti di questo studio che mira a valutare le diverse alternative di materiali per i rivestimenti delle portiere dei veicoli fuori uso e i trattamenti di fine vita, così da poter determinare il materiale e la tecnologia di riciclaggio più sostenibili.

Questo studio mira inoltre a valutare criticamente la metodologia di smaltimento e tenta di suggerire delle alternative.

I rivestimenti delle portiere sono una delle parti principali dell'acciaio che fino al 2009 erano continuamente realizzati in acciaio.

Secondo le forze trainanti sopra citate, i rivestimenti delle portiere realizzati in diversi materiali possono essere di grande interesse per essere i soggetti di uno studio LCA, al fine di ottenere un chiaro quadro ambientale sulle prestazioni dei diversi materiali.

I rivestimenti, inoltre, possono essere agevolmente smontati, quindi i dati per lo sviluppo del LCA possono essere facilmente calcolati.

A causa della complessità del ciclo di vita dei rivestimenti delle porte, vengono posti i confini del sistema come mostrato in figura 13 per rivestimenti delle porte in acciaio, alluminio e composito insieme alle rispettive tecnologie di riciclaggio.

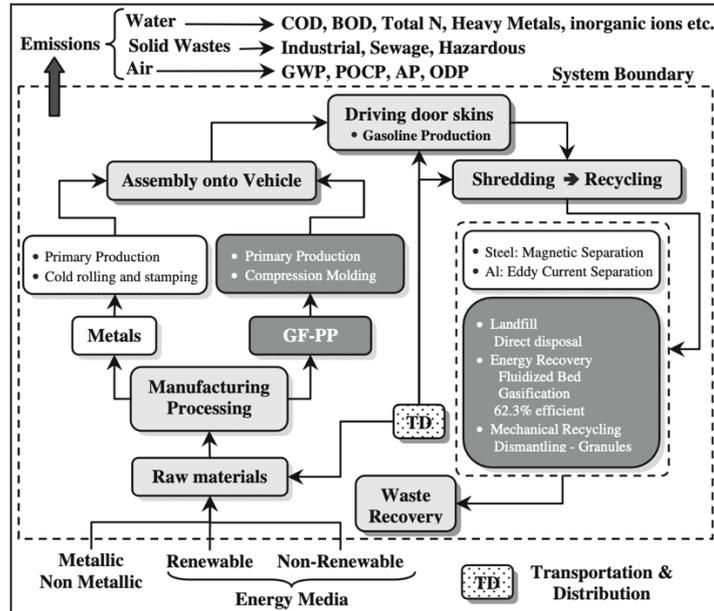


Figura 13 - Confini del sistema e tecnologie di riciclaggio per un LCA di un set di rivestimenti di porte. [5]

I dati di inventario sono costituiti dal consumo di risorse di materie prime e di energia di origine fossile e non fossile che costituiscono ogni fase del ciclo di vita, le emissioni risultate nell'aria, nell'acqua e nei rifiuti solidi generati.

Sulla base della norma ISO 14040, esistono 3 principali categorie di impatto:

1. Consumo energetico totale, espresso in MJ di energia;
2. Consumo totale di materie prime o risorse, misurato ridimensionando la quantità di materia prima utilizzata nel ciclo di vita del rivestimento della porta in base al fattore di caratterizzazione delle materie prime;
3. Emissioni: aria, acqua e rifiuti solidi.

3.1.1 Fasi LCA della Definizione dello scopo e dell'obiettivo del caso studio

L'obiettivo di questo caso studio è quello di determinare l'alternativa materiale più accettabile dal punto di vista ambientale, insieme alla tecnologia di riciclaggio per i rivestimenti delle portiere delle automobili.

In questo studio vengono prese in considerazione tre alternative di materiali: alluminio, acciaio e composito di propilene e fibra di vetro (GFPP).

Il composito di propilene contiene il 60% di vetro in peso.

Le caratteristiche dei rivestimenti delle porte su questi materiali sono riassunte nella tabella 2:

Characteristic of Door Skin Set	Steel	Al.	GFPP
Material Substitution Factor	1	0.55	0.69
Mass of door sets (4 door skins) (kg)	17.0	9.35	11.7
Total mass of the car (kg)	1381	1374	1376
Fuel Efficiency (km/l)	11.31	11.67	11.56
Lifetime fuel consumed by car (l)	13264	12853	12976
Lifetime fuel consumed by skin set (l)	163	87	111

Tabella 2 – Caratteristiche del set di rivestimenti delle porte. [5]

L'unità funzionale dello studio è un set di rivestimenti delle porte (4 rivestimenti esterni) con volume e dimensioni fissi, in acciaio e con massa 17 kg.

Con riferimento alla tabella 2, il fattore di sostituzione regola quindi la massa di ciascun set di rivestimenti in base alle differenze tra densità del materiale e proprietà meccaniche, mantenendo il volume fisso. Esso rappresenta quindi la quantità minima di materiale B necessaria per sostituire il materiale A affinché la funzionalità del componente venga mantenuta dopo la sostituzione.

L'efficienza del carburante per ciascun rivestimento della porta è stato determinato utilizzando l'efficienza del carburante del rivestimento in acciaio (11,31 km/l) come caso base.

Si può notare che la differenza nell'efficienza del carburante tra le alternative dei materiali è minima, mentre è significativa nel consumo di carburante per ciascun tipo di rivestimento durante l'intera vita dell'auto.

Lo studio ha presupposto 150.000 km di vita dell'auto per i dati sul consumo di carburante nel ciclo di vita presenti in tabella 2.

Gli utenti delle informazioni fornite da questo studio sono i produttori automobilistici australiani, principalmente GM Holden Australia, Melbourne.

I risultati di questo studio sono ulteriormente utili per stabilire le migliori pratiche di sostenibilità ambientale per i fornitori automobilistici australiani locali, i riciclatori automobilistici, le assicurazioni automobilistiche e le agenzie governative australiane.

3.1.2 Fasi LCA di LCI e LCIA del caso studio

Alcuni dati per la fase LCI del LCA sono stato raccolti dai programmi software SimaPro e Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS), come mostrato in tabella 3. Altri dati, invece, sono stati derivati da riviste pubblicate.

Nei casi in cui i dati relativi al riciclaggio nell'industria automobilistica australiana non erano disponibili, così come i dati relativi ai metodi di recupero energetico, è stato utilizzato un dataset generico basato sulle società di riciclaggio europee (Fussler 1999).

È stato scelto un dataset generico di origine europea perché si intendeva leggere le variazioni nel trasporto e nella distribuzione nel caso in cui tali tecnologie di riciclaggio europee venissero avviate in Australia.

Per quanto riguarda la fase LCIA del LCA, come già preannunciato nella sezione 3.1, le categorie di impatto sono: il consumo totale di energia, il consumo totale di materie prime e le emissioni.

Queste categorie sono state selezionate all'inventario ISO, in conformità alla norma ISO 14040 (2006).

Le emissioni atmosferiche sono ulteriormente suddivise in 4 sottocategorie che includono:

1. Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) misurato in kg di CO₂;
2. Il potenziale di Acidificazione (AP) misurato in kg di SO₂;
3. Il potenziale di Creazione di Foto Ossidanti (POCP) misurato in kg di gas equivalenti all'etilene;

4. Il potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) misurato in kg di idrocarburi alogenati.

La normalizzazione dei dati è stata effettuata utilizzando i fattori di caratterizzazione presi da Saling et al. (2002), Rhyd e Sun (2005), Hendrix et al. (1996). Tali fattori spiegano la quantità di riserve e il tasso di esaurimento delle risorse, che è significativo per i combustibili fossili, infatti si dimostra il grande vantaggio energetico nel riciclo meccanico del GFPP, rispetto alla fase di produzione, dopo il ciclo di vita di 150.000 km.

L'energia consumata è dominata dal petrolio, che ha fattori di caratterizzazione più elevati a causa delle riserve relativamente basse e dell'elevato tasso di esaurimento. Nel riciclaggio convenzionale dei compositi rinforzati con fibre, si dice che il composito sia stato riciclato quando le fibre lunghe recuperate durante il riciclaggio meccanico vengono riutilizzate per riciclare lo stesso prodotto. Questo approccio limita il tasso di riciclaggio.

In questo caso studio, tuttavia, è stato ipotizzato che tutte le fibre precipitate vengano riutilizzate nella realizzazione dei rivestimenti delle porte o nella realizzazione di altri prodotti come i tappetini a filo tagliato, dove i requisiti di resistenza delle fibre sono meno rigorosi.

La matrice viene riconvertita in pellet e riutilizzata per realizzare i rivestimenti delle porte.

Questo nuovo approccio dovrebbe tradursi in tassi di riciclo/riutilizzo della plastica molto più realistici e raggiungibili e quindi in maggiori benefici energetici derivanti dal ciclo.

Cat.	Sub-Cat.	Steel			Aluminum			GFPP				
		Prod.	Use	Rec.	Prod.	Use	Rec.	Prod.	Use	L	ER	MR
Energy (MJ)	Coal	359	46	-273	1183	25	-255	22	32	0	-13	51
	Petroleum	75	6119	-39	140	3279	-489	160	4146	1	-7	-220
	Natural Gas	43	91	7	351	49	-489	32	61	0	-4	-83
	Renewables	98	35	5	90	19	0	18	24	0	0	22
	Total	575	6291	-301	1777	3376	-1233	232	4263	1	-24	-230
Material (kg)	Water	3663	299	-30	542	160	-71	182	203	0	0	-15
	Coal	17	0	-15	0.690	0	-14	4	0	1E-03	-0.712	1.947
	Crude oil	4.1E-05	0.011	-0.926	9.78E-06	6E-03	-11	12	0.007	0.050	-0.174	-5.068
	Natural gas	7.E-03	0.001	0.153	0.020	0.00055	-11	7	0.00069	0	-0.121	-2.249
	Metallic Ores	29	2.210	-18.235	45	1.184	-25	0.054	1.497	0	4.959E-07	0.00
	Non-metallic	3.E-04	1.242	-0.477	4.157	0.666	0	0.424	0.842	0	-0.007	0.022
	Salts	0	0	0	0	0	-0.511	0.446	0	0	0.001	-0.024
	Ceramics	8	0	-4.339	4.419	0	-0.00017	2.432	0	0	0.028	0.00
	CO ₂	41	467	-25	162	250	-68	42	317	1	11	-36
	SO _x	0.067	0.314	-0.046	1.063	0.168	-0.496	0.349	0.213	0.000419	-0.013	-7.E-03
Emissions Air / (kg)	NO _x	0.085	0.389	-0.024	0.467	0.212	-0.141	0.298	0.267	2.E-03	-2.E-03	-0.027
	HC _s	0.192	0.222	-0.131	0.103	0.119	4.E-03	0.144	0.150	0.143	-6.E-03	4.E-03
	C1. HC.	3E-03	0.00	1E-03	8E-03	9.1E-05	-5.E-03	4E-03	2.E-03	7.15E-07	-0.000495	1.E-03
	Particulates	0.037	0.024	-2E-03	0.292	0.013	-0.197	0.120	0.016	0.00016	-3.E-03	7.E-04
	Heavy Metals	0.0001	0.00029	0.000315	1.15E-06	0.00016	-2.E-03	0.00017	0.0002	2.74E-06	-0.00013	4.E-04
	Others	0.532	2.847	-0.213	1.561	1.561	-0.679	0.035	1.959	2.E-03	-0.00031	-0.045
	COD	2.E+00	36.3741	0.738	185.695	19.464	-0.76355	3.453	24.648	0.00723	-0.0097	-1.871
	BOD	2.E-01	1.195	0.289	7.334	0.64024	-0.03073	0.564	0.80949	0.000221	-0.000531	-0.285
	N-tot	5.E-03	1.044	-0.048	0.000	0.55939	-0.56932	0.165	0.70726	0.005283	-0.007753	-0.012
	NH4	6.E-02	0	-0.046	0.000	0	-0.6967	0.082049	0	0.172	-0.014	0.027
Water (0.001 kg)	PO4	4E-02	0.018	-1.411	3.8E-06	0.00953	-1.32488	0.172951	0.01206	9.44E-05	-0.065	0.215
	AO _x	2.E-04	0.001	-0.008	2.42E-06	0.0007	-0.00198	1.2E-06	0.00089	9.65E-06	-2.98E-05	-0.00024
	Heavy Metals	4.E+00	4.2E-10	-37.288	5.06E-11	2.3E-10	-40.099	4.759	2.9E-10	0.303	-2.881	-21.626
	HC	0.E+00	0	-0.031	0	0	-0.50367	2.567	0	3.630	-0.007688	-1.24701
	SO42-	7.E+00	0	-84.705	0	0	-10.212	1.251	0	0.511	-12.382	-40.2609
	Cl-	7.E+00	0	-132.517	0	0	-50.675	7.674	0	1.325	-11.622	1.167
	Inorg Salts	1.E-03	23.7964	-73.779	43.431	12.753	11.3509	0.0098	16.125	0	-8.113	33.95908
	Municipal	9.E-04	0.09	0	3.E-03	0.047	-0.010	8.12E-09	0.06	1.567	-0.389	-0.076
	Construction	85	14	0	254	7.269	0	1.741	9.190	0	-6.678	0
	Industrial	8.3	1.1	-0.77	18	0.596	-9.063	0.366	0.754	0	0	-6.E-03
Solid Wastes (kg)	Hazardous	1E-05	9.7E-06	1.2	5.77E-06	5.2E-06	-1.560	0.000246	6.6E-06	0	0	-0.067

Tabella 3 – Dati del LCA relativi alle 3 opzioni di materiali per i rivestimenti delle portiere automobilistiche australiane. [5]

3.1.3 Fase LCA dei Risultati del caso studio

I dati di inventario vengono riepilogati attraverso l'uso di fattori di caratterizzazione e combinando i dati dell'inventario rispetto a ciascuna delle categorie di impatto, citate precedentemente nella sezione 3.1.

I risultati per il composito GFPP sono forniti per gli scenari di fine vita: discarica (L), recupero energetico (ER) e riciclaggio meccanico (MR).

3.1.3.1 Risultati relativi al consumo di energia e materie prime

L'acciaio ha registrato il più alto consumo netto di energia e materie prime come mostrato nelle figure 14 e 15, rispettivamente.

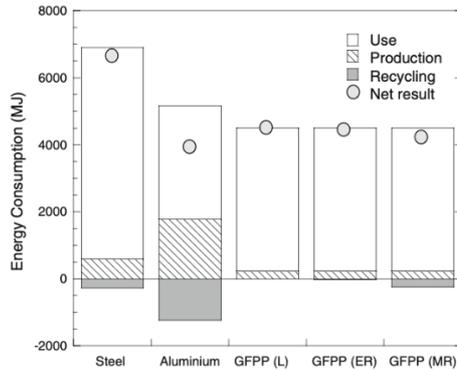


Figura 14 – Consumo di energia. [5]

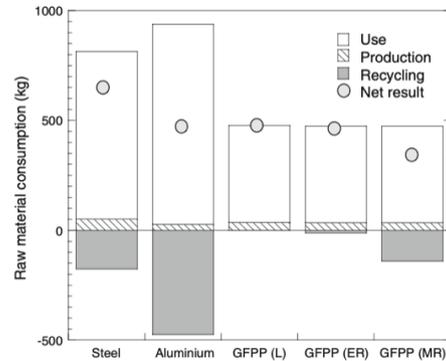


Figura 15 – Consumo di materie prime. [5]

Il consumo di energia per l'acciaio è dominato dalla fase di utilizzo, a causa dell'elevata massa dei rivestimenti delle porte, e con uno scarso recupero di energia. L'alluminio ha un consumo energetico maggiore durante le fasi di produzione e di utilizzo rispetto al GFPP, ma ha un recupero di energia più elevato.

Il materiale composito, d'altro canto, ha un consumo energetico minimo nella fase di produzione, molto probabilmente a causa del basso fabbisogno energetico durante la produzione del E-glass (fibre di vetro borosilicato-calce-allumina) e della sua impregnazione con il polipropilene per formare compositi per stampaggio di fogli. Tuttavia, i rivestimenti compositi hanno un consumo energetico relativamente elevato nella fase di utilizzo rispetto all'alluminio, dovuto alla massa leggermente più elevata dei rivestimenti che garantiscono un minor risparmio di carburante. Il risultato finale è che l'alluminio e i compositi hanno un consumo energetico netto inferiore del 35÷45% rispetto all'acciaio.

Il consumo di materie prime è dominato dalla fase di produzione ed è massimo per i metalli. L'alluminio è quello che consuma più materie prime a causa dell'elevato consumo di elettricità nell'elettrolisi dell'allumina e durante lo stampaggio e la tranciatura per la produzione dei rivestimenti delle porte. Per l'acciaio e il GFPP gli andamenti sono simili a quelli riscontrati nel consumo energetico.

La fase di riciclaggio mostra che il recupero di materia prima ed energia nei metalli è maggiore di quello dei compositi come risultato di processi di riciclaggio efficienti

oltre il 99%. Lo smaltimento in discarica comporta una perdita di materiale ed energia, rappresentando quindi una strategia di riciclaggio insostenibile.

3.1.3.2 Risultati relativi alle emissioni d'aria e di acqua

Per quanto concerne le emissioni d'aria, I risultati per il potenziale di riscaldamento globale (GPW) in figura 16 mostrano un andamento simile ai risultati del consumo energetico, rappresentati in figura 14.

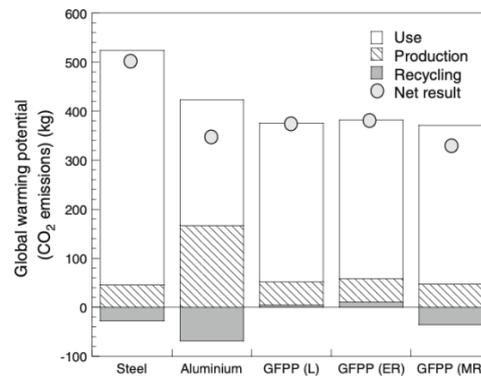


Figura 16 – Potenziale di riscaldamento globale. [5]

La motivazione di tale andamento risiede nella forte correlazione tra GWP e massa del rivestimento della porta, e quindi al consumo di carburante. Sebbene l'alluminio abbia un potenziale di riscaldamento globale netto inferiore rispetto all'acciaio, esso produce il GWP massimo nella fase di produzione a causa dell'elevato consumo di elettricità necessario per l'elettrolisi dell'allumina. Secondo il documento informativo di *Environment Australia 2002* riguardante l'impatto ambientale dei veicoli a fine vita, la percentuale di produzione di elettricità del carbone in Australia è superiore rispetto ad altre forme.

Questo spiega le elevate emissioni di gas serra.

Tuttavia, il GWP nella fase di utilizzo è più basso per l'alluminio poiché il materiale è più leggero per il rivestimento della portiera.

Per il GFPP, lo scenario della discarica dà un valore positivo che rappresenta un aumento delle emissioni derivanti dal deterioramento del materiale. E' inoltre da notare che il beneficio derivante dal metodo di recupero energetico non rappresenta più un valore negativo sul grafico della figura 16.

Lo scenario composito con discarica ha il potenziale di creazione di fotoossidanti (POCP) e il potenziale di acidificazione (AP) più elevati come mostrato nelle figure 17 e 18, rispettivamente, a causa del degrado del materiale in discarica.

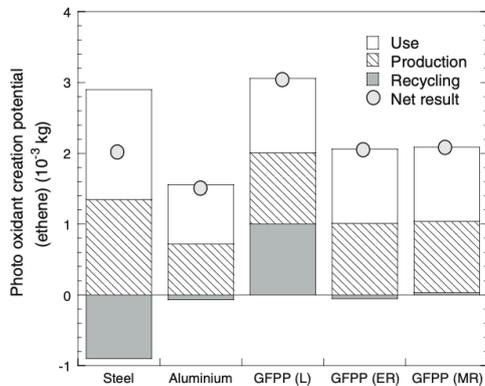


Figura 17 – Potenziale di creazione di fotoossidanti. [5]

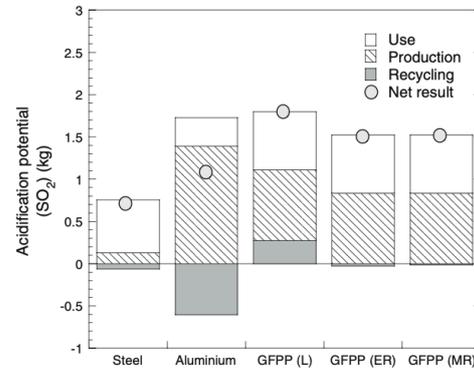


Figura 18 – Potenziale di acidificazione. [5]

Il POCP nella produzione è più alto per l'acciaio a causa della grande quantità di ossidi di azoto prodotti dall'ossidazione del coke e dalla combustione dell'olio combustibile negli altoforni. Il POCP è massimo anche in fase di utilizzo a causa della massa elevata. Tuttavia, il beneficio della riduzione del potenziale di creazione di fotoossidanti è massimo per l'acciaio grazie all'efficienza quasi del 99% della tecnica di separazione magnetica supportata da Hendrix et al. 1996. L'utilizzo di acciaio riciclato catturato da questo efficiente metodo di recupero per i nuovi rivestimenti delle porte riduce la quantità di energia necessaria per produrre nuovi rivestimenti delle porte da materiale vergine.

Il vantaggio del POCP per i rivestimenti in alluminio è inferiore rispetto a quello dei rivestimenti in acciaio, ma è bilanciato dal POCP inferiore dei rivestimenti in alluminio nella fase di produzione e utilizzo del set di rivestimenti della porta.

Per i compositi, il beneficio ottenuto attraverso il metodo di recupero energetico supera il beneficio ottenuto dal riciclo meccanico. Il recupero energetico diminuisce il POCP (come si vede dal valore negativo in figura 17), a differenza del riciclaggio meccanico che lo aumenta (come si vede dal valore positivo in figura 17). Il funzionamento dei riciclatori meccanici comporta l'utilizzo di energia elettrica ad una velocità superiore a quella impiegata nella tecnologia di recupero energetico. La

generazione di elettricità nel contesto australiano viene effettuata utilizzando la combustione termica di olio combustibile e carbone che sono entrambe le principali fonti di fotoossidanti nell'atmosfera.

I risultati per il potenziale di acidificazione (AP), mostrati in figura 18, evidenziano una tendenza simile ai risultati del POCP per ragioni analoghe. L'AP per la produzione di alluminio è elevato a causa del consumo di elettricità nell'elettrolisi dell'allumina, che produce gas acidi come anidride solforosa, ossidi di azoto e ammoniacca. L'opzione di riciclaggio meccanico offre un vantaggio maggiore rispetto allo scenario di recupero energetico. Quest'ultimo ha un'efficienza solo del 62,33% e converte quindi una parte del materiale in inquinanti acidi. I benefici ottenuti dal riciclaggio meccanico del GFPP si riducono a causa di alcuni sprechi che si verificano nella precipitazione delle fibre dalla matrice di polipropilene.

Il potenziale di riduzione dell'ozono (ODP), in figura 19, mostra risultati molto diversi rispetto alle altre categorie di emissioni atmosferiche.

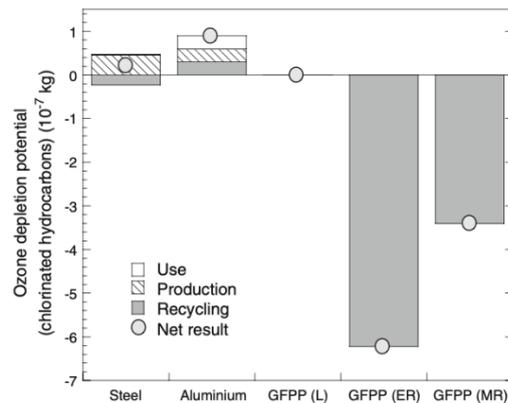


Figura 19 – Potenziale di riduzione dell'ozono. [5]

L'ODP netto è il più alto per i rivestimenti in alluminio e acciaio. I rivestimenti in composito hanno un potenziale di riduzione di ossidazione minimo nella fase di produzione e presentano un vantaggio netto negli scenari di fine vita del recupero energetico e del riciclo meccanico. L'ODP più elevato per i carburi metalli è dovuto alla produzione di maggiori quantità di idrocarburi clorurati in fase di produzione. La fase di utilizzo delle auto non contribuisce più al potenziale di riduzione dell'ozono grazie alla riduzione degli idrocarburi ramificati e clorurati nella benzina utilizzata.

Di conseguenza, lievi tracce di idrocarburi clorurati rilasciati dalla combustione della benzina sono insignificanti ai fini dei calcoli.

Per quanto concerne le emissioni d'acqua, i risultati presentati in termini di inquinamento sono mostrati in figura 20.

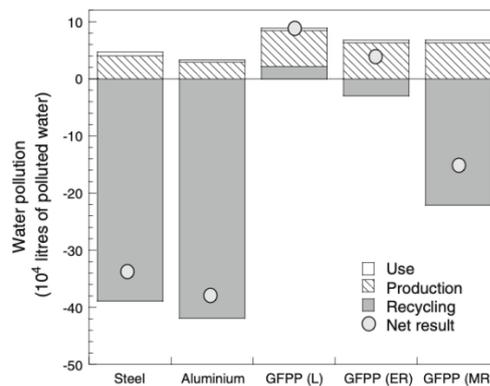


Figura 20 – *Inquinamento dell'acqua.* [5]

L'emissione netta di acqua è la più alta per l'opzione di discarica per i rivestimenti compositi.

I rivestimenti di alluminio e acciaio danno il massimo beneficio, seguiti dallo scenario di riciclaggio meccanico del composito.

Nel caso del rivestimento composito si verificano le massime emissioni di acqua nella fase di produzione a causa della produzione di fibra di E-glass. Questo processo richiede grandi quantità di metalli pesanti, ammoniaca e ioni di solfato che sono le principali ragioni dell'inquinamento delle risorse idriche.

Il beneficio in termini di riduzione dell'inquinamento idrico è maggiore nel caso dei metalli, e questo risulta da un'efficienza di quasi il 99% sia della tecnica di separazione magnetica nel caso dell'acciaio, sia della tecnica di separazione dalle correnti parassite nel caso dell'alluminio.

Il recupero di materiale in questi metalli riduce la quantità di acqua necessaria per produrre un nuovo set di rivestimento della portiera (l'acqua viene utilizzata principalmente nella fase di colata dei lingotti).

Inoltre, l'utilizzo di metalli pesanti, sali inorganici e altri prodotti chimici è ridotto al minimo grazie ad un efficiente recupero dei materiali.

Il beneficio in termini di riduzione delle emissioni (misurato dall'entità del valore negativo nella fase di riciclaggio) è inferiore per il composito, con un minimo per l'opzione di discarica. Gli scenari di discarica danno un valore positivo che rappresenta un aumento delle emissioni derivanti dal deterioramento del materiale lasciato nelle discariche a cielo aperto.

3.1.3.3 Risultati relativi ai rifiuti solidi

I risultati relativi al quantitativo di rifiuti solidi prodotti sono rappresentati in figura 21.

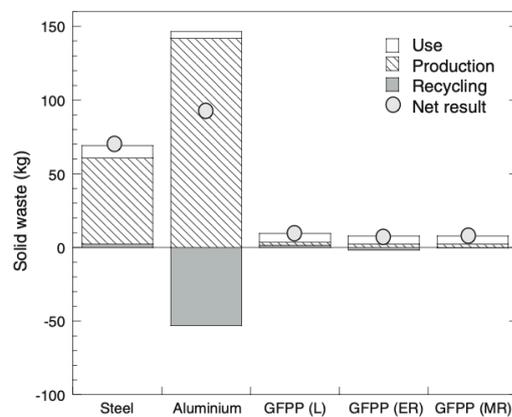


Figura 21 – *Quantitativo di rifiuti solidi prodotto.* [5]

I rifiuti solidi netti sono più elevati per l'alluminio e l'acciaio a causa degli scarti prodotti durante i processi di stampaggio e tranciatura.

Per i compositi, invece, l'utilizzo di processi di stampaggio a compressione e di materiali iniziali per compositi per stampaggio di lastre riduce al minimo gli sprechi. Nella fase di utilizzo delle automobili, le coperture d'acciaio producono la massima quantità di rifiuti solidi, principalmente a causa del maggior consumo di carburante. Anche i rivestimenti compositi presentano tassi di emissioni simili nella fase di utilizzo rispetto all'alluminio.

Ancora una volta, questo deriva da una massa leggermente superiore di rivestimenti in fibra di vetro che garantisce un consumo di carburante più elevato e una maggior quantità di produzione di rifiuti solidi.

3.1.4 Fase LCA delle conclusioni dello studio

La fase di produzione dei rivestimenti delle portiere è quella che comporta un consumo massimo di materia prima in tutte le alternative di materiali, ed è maggiore per i metalli rispetto al composito in fibra di vetro. Il recupero del materiale attraverso il riciclo è più elevato nei metalli, mentre il riciclo meccanico è il più efficiente per il composito.

Il consumo energetico è massimo nella fase di utilizzo del rivestimento della portiera, con il massimo per l'acciaio seguito dal composito e quindi dall'alluminio. La fase di produzione in alluminio consuma la massima energia.

Anche il potenziale di riscaldamento globale (GWP) segue un andamento simile a quello del consumo energetico.

Il potenziale di creazione di fotoossidanti (POCP) è il più alto per lo scenario di discarica del GFPP, seguito da acciaio e alluminio.

Il potenziale di riduzione di acidificazione (AP) è il più alto per tutti gli scenari di riciclaggio del composito, ovvero discarica, recupero energetico e riciclaggio meccanico.

Il potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) è simile per tutti i materiali.

Anche le emissioni nette di acqua sono più elevate per i compositi rispetto ai metalli, nonostante l'elevato inquinamento nelle fasi di produzione dei rivestimenti metallici delle porte.

I rifiuti solidi si formano in grandi quantità dai rivestimenti metallici delle portiere, e l'opzione di discarica per il composito produce il massimo dei rifiuti durante il ciclo di vita del rivestimento della porta.

Dallo sviluppo del LCA si evince che l'acciaio convenzionale, al tempo utilizzato nella maggior parte delle auto per i pannelli delle portiere, rappresenta una scarsa opzione ambientale in ogni categoria di impatto. L'alluminio e i materiali compositi dovrebbero essere presi in considerazione per sviluppare un'automobile più sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico. Il limite all'efficienza del riciclaggio è il principale ostacolo all'aumento della sostenibilità delle pelli composite. L'opzione della discarica per i rivestimenti delle portiere è un'opzione sfavorevole a causa del suo impatto negativo sul recupero del materiale. Il recupero energetico sembra inefficiente rispetto all'opzione di riciclaggio meccanico della

plastica. Tuttavia, questo studio LCA mostra che i rivestimenti compositi in fibra di vetro con metodo di riciclaggio meccanico o recupero energetico potrebbero essere desiderabili dal punto di vista ambientale, rispetto ai rivestimenti in alluminio e acciaio.

3.2 LCA di una turbina eolica

Una delle fonti di energie rinnovabili in grande crescita è l'energia eolica, con l'introduzione di nuovi parchi eolici in tutto il mondo e nuovi progressi nella tecnologia. L'energia eolica produce energia elettrica dall'energia cinetica del vento, senza produrre alcun inquinamento o emissioni durante il processo di conversione. Nonostante ciò, è da considerare che esiste un impatto ambientale dovuto al processo di fabbricazione e al processo di smaltimento al termine del ciclo di vita della turbina eolica, e tale impatto deve essere quantificato per confrontare gli effetti di produzione di energia e analizzare le possibilità di miglioramento del processo da questo punto di vista. Pertanto, lo scopo di questo caso studio è quello di analizzare l'impatto della tecnologia eolica, considerando l'intero ciclo di vita del sistema eolico, attraverso l'applicazione dello standard ISO 14040 che consente di quantificare l'impatto complessivo di tale turbina eolica e di ciascuna delle sue parti utilizzando uno studio LCA.

Nei confini del sistema in studio rientrano la costruzione dei principali componenti della turbina, il trasporto della turbina al parco eolico, l'assemblaggio, l'installazione e l'avviamento, nonché il processo di smantellamento della turbina eolica e il successivo trattamento dei rifiuti prodotti

Il soggetto dello studio LCA è una turbina eolica Gamesa, modello G8X, con generatore a induttore a doppia alimentazione, potenza nominale di 2 MW e con le seguenti dimensioni generali: pala del rotore da 80 m, area di spazzamento da 5.072 m^2 e un'altezza di 70 m. La turbina eolica è installata nel parco eolico Munilla, nel nord della Spagna, dove è stata analizzata durante le sue diverse fasi del suo ciclo di vita prendendo in considerazione la produzione di ciascuna delle sue componenti, il trasporto fino al parco eolico, l'installazione, l'avviamento, la manutenzione e lo smantellamento finale con relativo smaltimento dei rifiuti residui, come mostrato in figura 22. Le fasi appena elencate per l'analisi del ciclo di vita della turbina sono comprese all'interno dei confini del sistema.

Fuori dai limiti del sistema rientrano il sistema di distribuzione dell'energia elettrica generata dall'impianto eolico, ovvero i cavi di media tensione, la cabina di trasformazione e la rete elettrica nazionale.

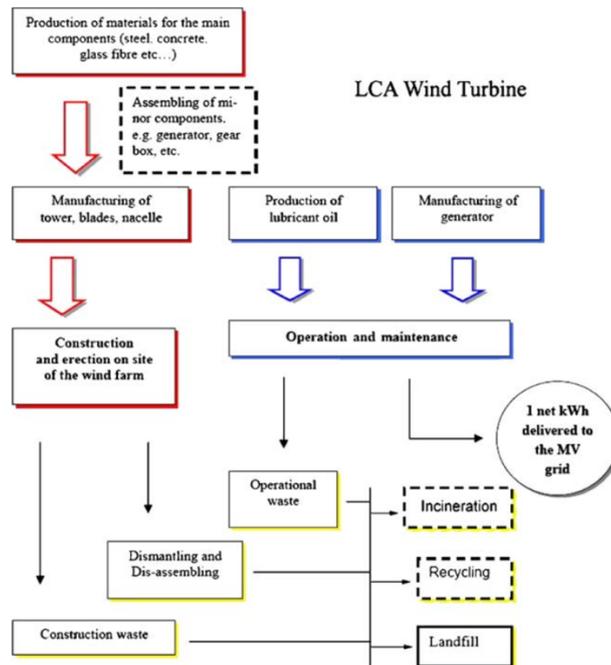


Figura 22 – Modello LCA della turbina eolica considerata nel caso studio. [7]

3.2.1 Fasi LCA della Definizione dello scopo e dell'obiettivo del caso studio

Lo scopo di questo caso studio era quello di analizzare l'impatto ambientale della tecnologia eolica, considerando l'intero ciclo di vita dei sistemi eolici.

L'applicazione della norma ISO 14040, oltre a consentire di quantificare l'impatto complessivo di una turbina eolica e dei suoi componenti, permette di analizzare le problematiche che producono un maggiore impatto e gli aspetti che potrebbero essere migliorati al fine di ridurre l'impatto effettivo.

Il modello LCA, inoltre, permette di definire il tempo di ritorno energetico.

Questo studio LCA è basato sul metodo CML (Centrum voor Milieukunde Leiden), ossia un metodo condotto presso il centro per gli studi ambientali di Leida, Paesi Bassi. Per gli studi LCA al di fuori del Nord America, la metodologia CML costituisce l'insieme di indicatori ambientali maggiormente utilizzato per la valutazione del ciclo di vita.

L'unità funzionale di questo studio LCA è stata definita come la produzione di 1 kWh di potenza elettrica.

3.2.2 Fasi LCA di LCI e LCIA del caso studio

Una turbina eolica è composta da molti componenti, i quali comprendono anche molti sottocomponenti, di diversa natura ed eventualmente con parti meccaniche, elettriche ed elettroniche. A causa della numerosità e della natura di questi componenti, è difficile reperire informazioni dai fornitori su tutte le parti che compongono la turbina.

Questo caso studio si è concentrato sulla compilazione dei dati di inventario (LCI) sui componenti più importanti, quali le fondamenta, la torre di sostegno, la gondola e il rotore. In pochi casi, vista la difficile reperibilità e affidabilità di alcuni dati, sono state utilizzate informazioni dal database Ecoinvent del software SimaPro.

I materiali e l'energia utilizzati nei diversi componenti sono stati forniti da Gamesa, le distanze dei trasporti sono state calcolate da apposite mappe fino alla reale collocazione del parco eolico Munilla.

I principali materiali che costituiscono i componenti della turbina e il database di riferimento Ecoinvent sono visualizzati nelle tabelle 4 e 5, rispettivamente.

Component	Subcomponent	Weight	Materials	Energy	Component	Subcomponent	Weight	Materials	Energy
Rotor	3 blades	19.5 T	11.7 T resin 7.8 T fibre glass	20.15 MWh	Nacelle	Bed Frame	10.5 T	10.5 T iron	9 MWh
	Blade Hub	13 T	14 T cast iron	12 MWh		Main shaft	6.1 T	6.1 T steel	5.3 MWh
	Nose-cone	310 kg	0.12 T fibre glass 0.19 T resin	0.95 MWh		Transformer	5 T	0.15 T silica 1.5 T copper 3.3 T steel	200,000 MJ
	Foundation	Footing	725 T	700 T concrete 25 T iron		0.4 MWh	Generator	6.5 T	0.20 T silica 2 T copper 4.29 T steel
	Ferrule	15 T	15 T steel	17,000 MJ					
Tower	3 sections	143 T	143 T steel	170,000 MJ		Gearbox	16 T	8 T iron 8 T steel	495,000 MJ
						Nacelle Cover	2 T	0.8 T fibre glass 1.2 T resin	6.2 MWh

Tabella 4 – *Inventario per componente della turbina eolica in oggetto di studio.* [7]

Material	Ecoinvent process selected
Fibreglass/resin	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection molding, at plant/RER U
Iron	Cast iron, at plant/RER U
Steel	Reinforcing steel, at plant/RER U
Concrete	Concrete, exacting, at plant/CH U
Silica	MG-silicon, at plant/NO U
Copper	Copper, at regional storage/RER U

Tabella 5 – *Materiali ricavati dal database Ecoinvent.* [7]

Dati specifici sul consumo energetico dei processi produttivi dei vari componenti sono stati ottenuti dai dati di consumo elettrico annuale di diversi impianti di produzione di tali componenti.

L'azienda proprietaria del parco eolico esegue gli interventi di manutenzione e le informazioni sugli stessi vengono registrate nel proprio sistema di gestione ambientale secondo la norma ISO 14001. Sulla base di queste informazioni, durante la fase operativa sono state prese in considerazione tutte le operazioni di manutenzione, come la quantità di olio e grasso utilizzati o la sostituzione dei filtri e il trasporto, tra gli altri. I processi di trasporto includono l'impatto delle emissioni causate dall'estrazione, la produzione di carburante e dalle generazioni di energia da tale carburante durante il trasporto.

Nel caso delle fondamenta, non sono state considerate le possibili emissioni nell'ambiente durante il ciclo di vita della turbina eolica, ma è stato ipotizzato un riciclaggio delle fondamenta al 100% per il cemento e al 90% per l'acciaio e il ferro al fine della vita della turbina.

Nel caso della torre di sostegno, nello studio sono stati considerati solo i processi di sagomatura e di saldatura dell'acciaio. Il trattamento superficiale sulla torre è stato considerato ai fini del risultato finale dell'analisi. Si suppone che durante il funzionamento della turbina eolica non sia necessaria alcuna manutenzione nella torre e, nel suo processo di smantellamento, il materiale subisca un processo di riciclaggio in cui è stato ipotizzato un tasso medio di perdita del materiale del 10%. La gondola è costituita da un telaio e da una copertura in un materiale composito denominato prepreg. All'interno della gondola si trovano i principali componenti della turbina responsabili della conversione dell'energia meccanica di rotazione in energia elettrica, ovvero l'albero, il gearbox, il generatore e il trasformatore. La fase di utilizzo e manutenzione prevede il cambio completo dell'olio del cambio e del sistema di raffreddamento e la lubrificazione degli ingranaggi e delle altre parti meccaniche del sistema. Nella fase di smantellamento si considera che nessun componente debba essere riutilizzato e che subisca un processo di riciclo, con una perdita di materiale del 10%.

Infine, nel caso del rotore, anche l'ogiva è in materiale prepreg, mentre il mozzo pala è in ghisa. Nel processo di smantellamento, tutto il prepreg dell'ogiva e delle pale del rotore verrà inviato in discarica, mentre il mozzo della pala verrà riciclato.

Di seguito vengono riportati come caso esemplificativo i dati LCI del rotore, riportati nelle tabelle 6, 7, 8.

Subassembly phase product materials	Rotor cone processes	Amount	Unit	Information reference
Fiberglass/resin	General	0.31	T	Data obtained from Gamesa. Technical Instruction: Characteristics and overall functioning of the G80-2.0 MW wind turbine
Electrical energy	Manufacture	0.10, Total: 3.1	kWh/kgkWh	The data used were collected from the energy consumption summary table of natural resource extraction and the production of materials of the study, developed by the Polytechnic University of Catalonia, named "estimate of energy consumption and CO ₂ emissions associated with the production, use and final disposal of sheeting PVC-P, EPDM and bituminous materials"
	Transport	48,360	kgKm	The transport of the iron of the cone has been considered. The origin of the cone is Pamplona, at 156 km from Munilla. The weight of each unit component considered is 1 kg Table 5 shows the consumption due to transportation. Distances from different origins to Munilla have been calculated from: www.viamichelin.es
Phase product materials Cast iron	Hub processes General	Amount 12,890	Unit T	Information references Data obtained from Gamesa. Technical Instruction: Characteristics and overall functioning of the G80-2.0 MW wind turbine (page 26) It has been calculated as the difference between the total weight of the rotor minus the weight of the blades (19.5 T=6.5×3) and the cone (0.31 T) Table 5 shows a breakdown of the consumption due to transportation
Natural gas	Foundry	13,890, Total: 179,042	Kwh/T Kwh	Data processing of the company Precicast Bilbao, in the Basque Country (Spain), dedicated to the production of special super alloys through the process of accuracy casting by lost wax techniques It is equipped with technology for casting processes of air and vacuum as well as other similar industrial processes with the aim of producing precision castings Environmental declaration Precicast 2005 (Oct 2006) validated by Bureau Veritas according to Regulation (CE 761/2001)
Electrical energy	Foundry	14,356, total: 185,049	Kwh/T Kwh	Environmental declaration Precicast 2005 (Oct 2006) validated by Bureau Veritas according to Regulation (CE 761/2001)
Electrical energy	Mechanization			Rejected
	Transport	2,010,840	kgKm	The transport of the cast iron of the hub has been considered. The origin of the hub is Pamplona, at 156 km from Munilla. The weight of each unit component considered is 1 kg Table 5 shows the consumption due to transportation. Distances from different origins to Munilla have been calculated from: www.viamichelin.es

Tabella 6 – LCI dettagliato del rotore. [7]

Material	TN	Units	Weight
Blades	6.50	3	19.50
Hub+bearings	12.89	1	12.89
Cone	0.31	1	0.31
Total rotor			32.70

Tabella 7 – *Massa dei componenti del rotore.* [7]

Material	Weight (kg)	Origin	Distance (km)	T/km (kg/km)
Blades	19,500	Pamplona	156	3,042,000
Hub+bearings	12,890	Pamplona	156	2,010,840
Cone	310	Pamplona	156	48,360
Total rotor				5,101,200

Tabella 8 – *Trasporto del rotore.* [7]

Le categorie di impatto considerate in questo caso studio per la fase LCIA del LCA sono:

- **Depurazione abiotico:** questa categoria di impatto riguarda la protezione del benessere umano, della salute umana e dell'ecosistema, ed è correlata all'estrazione di minerali e combustibili fossili dovuti agli input nel sistema. Il fattore di esaurimento abiotico è determinato per ciascuna estrazione di minerali e combustibili fossili (kg equivalenti di antimonio / kg di estrazione) in base alla concentrazione delle riserve e al tasso di deaccumulo;
- **Cambiamento climatico:** il fattore di cambiamento climatico è espresso come potenziale di riscaldamento globale (GWP) per un orizzonte temporale di 100 anni in kg di anidride carbonica / kg di emissioni;
- **Riduzione dell'ozono stratosferico:** questa categoria è correlata alla frazione di radiazione UV-B che raggiunge la superficie terrestre. Il modello di caratterizzazione è quello sviluppato dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale e definisce il potenziale di riduzione dello strato di ozono di diversi gas (kg CFC-11 equivalente / kg di emissione);
- **Tossicità umana:** questa categoria di impatto è correlata all'esposizione e agli effetti di sostanze tossiche per un orizzonte temporale infinito. Per ciascuna sostanza tossica, il potenziale di tossicità per l'uomo è espresso come 1,4-diclorobenzene equivalenti / kg di emissione;

- Ecotossicità acquatica dell'acqua dolce: questa categoria è correlata all'impatto sugli ecosistemi di acqua dolce a seguito delle emissioni di sostanze tossiche nell'aria, nell'acqua e nel suolo, per un orizzonte temporale infinito. Per ciascuna sostanza tossica, il potenziale di ecotossicità è espresso come 1,4-diclorobenzene equivalenti / kg di emissione;
- Ecotossicità marina: questa categoria di impatto è correlata all'impatto sugli ecosistemi marini. Come nella categoria della tossicità umana, il potenziale di ecotossicità è espresso come 1,4-diclorobenzene equivalenti / kg di emissione;
- Ecotossicità terrestre: questa categoria di impatto è correlata all'impatto sugli ecosistemi terrestri. Come nella categoria della tossicità umana, il potenziale di ecotossicità è espresso come 1,4-diclorobenzene equivalenti / kg di emissione;
- Ossidazione fotochimica: questa categoria è legata alla formazione di sostanze reattive (principalmente ozono) dannose per la salute umana, per gli ecosistemi e che possono anche danneggiare le colture. I potenziali di impatto sono espressi come emissione equivalente della sostanza di riferimento etilene, C₂H₄;
- Acidificazione: questa categoria è correlata alle sostanze acidificanti che provocano un'ampia gamma di impatti sul suolo, sulle acque sotterranee, sulle acque superficiali, sugli organismi, sugli ecosistemi e sui materiali. Le principali sostanze acidificanti sono SO₂, NOX, HCl e NH₃. Per le emissioni nell'atmosfera, il potenziale di acidificazione (AP) è definito come il numero di ioni H⁺ prodotti per kg di sostanza rispetto a SO₂.
- Eutrofizzazione: questa categoria di impatto è correlata a tutti gli impatti dovuti a livelli eccessivi di macronutrienti nell'ambiente causati dalle emissioni di nutrienti nell'aria, nell'acqua e nel suolo. Azoto (N) e fosforo (P) sono i due nutrienti maggiormente implicati nell'eutrofizzazione. I potenziali di eutrofizzazione sono espressi come equivalenti di PO₄.

Inoltre, è stata effettuata una valutazione dell'input energetico utilizzando la domanda cumulativa di energia (CED) per calcolare la quantità totale diretta e indiretta di energia consumata durante l'intero ciclo di vita.

3.2.3 Fase LCA dei Risultati del caso studio

3.2.3.1 Risultati relativi all'impatto ambientale

I risultati ottenuti per categoria di impatto sono mostrati nella tabella 9.

Impact category	Unit	Total	Maintenance	Tower	Foundation	Rotor	Nacelle
Abiotic depletion	kg Sb eq	3.75E-05	2.78E-06	7.28E-06	4.39E-06	1.88E-05	4.33E-06
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	6.58E-03	3.51E-04	1.35E-03	1.56E-03	2.61E-03	6.96E-04
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	5.21E-10	4.98E-11	1.41E-10	8.69E-11	1.83E-10	6.11E-11
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1.55E-02	6.48E-03	1.40E-03	3.63E-04	4.36E-04	6.84E-03
Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2.81E-03	8.19E-05	1.65E-03	4.00E-04	2.43E-04	4.43E-04
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4.41E+00	3.25E-01	1.69E+00	4.48E-01	1.04E+00	9.26E-01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1.56E-04	2.78E-05	4.89E-05	1.48E-05	1.55E-05	4.99E-05
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	2.13E-06	5.10E-07	1.84E-07	1.06E-07	6.75E-07	6.51E-07
Acidification	kg SO ₂ eq	5.43E-05	7.64E-06	5.34E-06	3.53E-06	1.94E-05	1.84E-05
Eutrophication	kg PO ₄ - eq	5.68E-06	3.24E-07	1.71E-06	8.25E-07	1.91E-06	8.98E-07

Tabella 9 – Risultati ottenuti per categoria d'impatto. [7]

Se si confrontano tali risultati con l'impatto ambientale generato producendo lo stesso livello di potenza nel sistema elettrico spagnolo, ovvero utilizzando il mix elettrico in Spagna dal database Ecoinvent, si può notare un minore impatto associato all'energia eolica di turbina per ogni categoria. La riduzione percentuale degli impatti ambientali della produzione di elettricità da turbine eoliche rispetto allo studio del mix spagnolo può essere vista nella tabella 10.

Impact category	% reduction of environmental impact
Abiotic depletion	98.99
Global warming (GWP100)	98.76
Ozone layer depletion (ODP)	96.73
Human toxicity	89.26
Freshwater aquatic eco-toxicity	94.06
Marine aquatic eco-toxicity	99.34
Terrestrial eco-toxicity	92.68
Photochemical oxidation	99.24
Acidification	99.28
Eutrophication	97.78

Tabella 10 – Percentuale di riduzione dell'impatto ambientale delle turbine eoliche rispetto al mix di elettricità spagnolo. [7]

Un altro risultato da valutare dal punto di vista ambientale é l'effetto dello smantellamento e del successivo trattamento dei rifiuti al termine della vita della

turbina. Il risultato ottenuto riciclando ciascuno dei principali componenti della turbina eolica è visibile nella tabella 11.

Impact category	Unit	Tower recycling	Foundation recycling	Rotor recycling	Nacelle recycling	Total recycling
Abiotic depletion	kg Sb eq	2.28E-05	6.26E-06	2.14E-06	6.58E-06	3.78E-05
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	1.65E-03	4.53E-04	1.53E-04	4.96E-04	2.75E-03
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2.59E-11	6.39E-12	1.13E-12	1.08E-11	4.41E-11
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	7.30E-04	2.01E-04	6.88E-05	8.41E-04	1.84E-03
Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	3.90E-04	1.08E-04	3.76E-05	2.16E-04	7.53E-04
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9.86E-01	2.74E-01	9.49E-02	3.94E-01	1.75E+00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6.10E-06	1.69E-06	5.80E-07	4.34E-06	1.28E-05
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	1.61E-06	4.49E-07	1.55E-07	5.06E-07	2.73E-06
Acidification	kg SO ₂ eq	8.28E-06	2.26E-06	7.59E-07	4.18E-06	1.55E-05
Eutrophication	kg PO ₄ ⁻ eq	1.20E-06	3.26E-07	1.08E-07	4.43E-07	2.08E-06

Tabella 11 – Risultati ottenuti dal riciclo dei componenti della turbina eolica. [7]

In generale si può osservare un maggiore beneficio ambientale dovuto al riciclo dell'acciaio che compone la torre di sostegno, ma nel caso opposto, il riciclo del rotore è localizzato poiché le pale, che sono uno dei suoi componenti principali, non vengono riciclate ma direttamente inviate in discarica.

3.2.3.2 Risultati relativi alla domanda cumulata di energia (CED)

La CED è calcolata per cinque classi di vettori energetici primari: fossile, nucleare, idroelettrico, biomasse e altri (eolico, solare e geotermico). Le differenze tra i diversi tipi di domanda energetica cumulativa sono dovute principalmente alla considerazione dei mix elettrici specifici del luogo. La preponderanza delle energie non rinnovabili in Spagna, in particolare dell'energia da combustibili fossili, è dimostrata nella tabella 12.

Impact category	Unit	Total	Maintenance	Tower	Foundation	Rotor	Nacelle
Non-renewable, fossil	MJ-Eq	7.63E-02	6.03E-03	1.62E-02	9.30E-03	3.60E-02	8.81E-03
Non-renewable, nuclear	MJ-Eq	2.22E-02	7.22E-04	6.51E-03	2.67E-03	9.15E-03	3.18E-03
Renewable, biomass	MJ-Eq	1.14E-03	1.12E-04	2.80E-04	1.38E-04	3.24E-04	2.88E-04
Renewable, wind, solar, geoth	MJ-Eq	7.13E-04	1.49E-05	1.61E-04	4.74E-05	3.60E-04	1.30E-04
Renewable, water	MJ-Eq	4.39E-03	3.77E-04	1.13E-03	7.04E-04	1.15E-03	1.03E-03

Tabella 12 – Risultati della CED. [7]

D'altra parte, esaminando i componenti principali, l'impatto maggiore si può osservare nel rotore, principalmente a causa della fabbricazione delle pale della turbina.

3.2.3.3 Risultati relativi al processo

Tre componenti principali contribuiscono all'effetto ambientale: il rotore, la torre di sostegno e la gondola. L'impatto maggiore o minore di ciascuna di queste componenti varia a seconda della categoria di impatto che è stata valutata, ma in generale si evidenziano alcune tendenze:

- Nel caso del rotore, il maggiore impatto ambientale è determinato dalla quantità di fibra di vetro utilizzata nella fabbricazione delle pale e del cono. Questo impatto viene accentuato mandando il materiale a riciclare al termine della vita della turbina;
- Nel caso della torre di sostegno, l'elemento chiave è l'acciaio utilizzato nella sua fabbricazione. Tuttavia, nonostante la notevole quantità di materiale utilizzato, il suo impatto finale è ridotto perché il 90% del materiale viene riciclato nella fase di smantellamento e smaltimento della turbina, ma l'invio in discarica del 10% dell'acciaio residuo rappresenta un significativo impatto in categorie quali l'ecotossicità d'acqua dolce e l'ecotossicità acquatica marina, dovuto principalmente all'infinito orizzonte temporale per la valutazione di queste categorie di impatto;
- Nel caso della gondola, in essa presenta un'incidenza particolare il rame utilizzato nei vari elementi che la costituiscono, così come la fibra di vetro utilizzata nella fabbricazione dell'involucro.

La percentuale di impatto ambientale associata a ciascuna categoria di componenti può essere vista in figura 23.

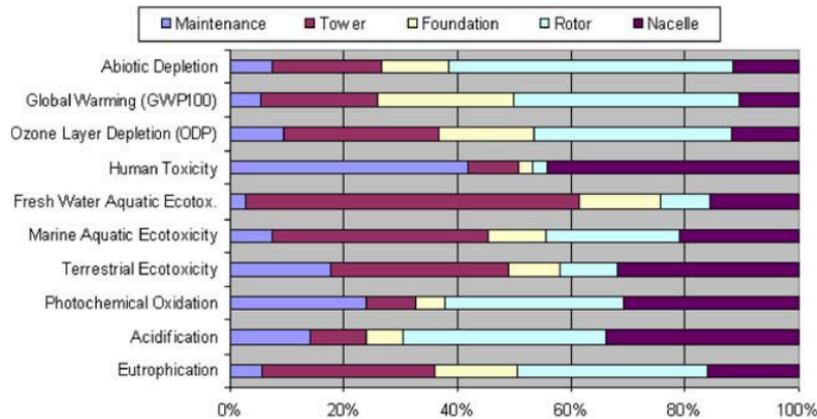


Figura 23 – Contributo di processo per categoria di impatto. [7]

3.2.3.4 Risultati relativi al tempo di recupero energetico

Un altro aspetto importante è valutare il ritorno energetico e il rapporto di resa energetica.

Il ritorno energetico è il numero di anni che l'impianto oggetto di studio deve essere in funzione per restituire la quantità di energia necessaria per la sua fabbricazione, messa in funzione e funzionamento durante tutta la sua vita.

Il rapporto di resa energetica indica la relazione tra l'energia generata dal sistema durante la sua vita e l'energia consumata dal sistema (CED).

Con riferimento alla tabella 12, con una produzione media annua di turbine eoliche fino a 4.000 MWh, si ottiene un tempo di recupero energetico di 0,58 anni e un rapporto di rendimento energetico di 34,36. Inoltre, è stato calcolato il tempo necessario per compensare l'impatto ambientale generato dalla produzione, al lancio e dall'esercizio delle turbine eoliche, riducendo il fabbisogno per la generazione di energia elettrica convenzionale. Il mix elettrico considerato è quello spagnolo dal database Ecoinvent, e il risultato ottenuto varia da 53 a 784 giorni a seconda delle categorie.

3.2.4 Fase LCA delle Conclusioni del caso studio

In questo caso studio è stato analizzato l'impatto ambientale generato da una turbina eolica. Dai risultati ottenuti, una conclusione importante è il significativo impatto generato dalle pale delle turbine e, soprattutto, il loro stadio di non riciclaggio.

Un altro elemento che presenta un impatto significativo all'interno dello studio è il rame presente nella gondola della turbina anche se, in questo caso studio, ha il vantaggio di essere un materiale riciclabile.

In ogni caso, nonostante all'interno della turbina siano presenti componenti con un impatto ambientale significativo, è stato anche verificato che tali impatti sono molto minori rispetto a quelli generati dalle centrali convenzionali in esercizio, con riduzioni dell'impatto che vanno dal 89% al 99% a seconda della categoria di impatto.

Inoltre, il tempo di ritorno energetico è inferiore ad 1 anno, molto inferiore rispetto alla vita utile del sistema che è almeno di 20 anni.

4. Conclusioni

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia standardizzata basata su un approccio iterativo, regolata dalle normative ISO 14040 e ISO 14044, utilizzata per analizzare le fasi del ciclo di vita di prodotti e servizi dal punto di vista dell'impatto ambientale.

Il LCA può essere suddiviso in quattro fasi principali: Definizione degli scopi e degli obiettivi, Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Impact Assessment (LCIA) e Interpretazione dei risultati ottenuti.

Questa metodologia è basata su un approccio iterativo in quanto nella raccolta dei dati nella fase LCI e nella valutazione dell'impatto nella fase LCIA, si elaborano informazioni tali da rendere necessaria una revisione o perfezionamento dello scopo definito nella fase della definizione degli scopi e degli obiettivi. Le iterazioni terminano quando i dati raccolti nella fase LCI sono completi e precisi, senza dover ricorrere ad un'ulteriore revisione dello scopo dello studio.

Nella fase della definizione degli scopi e degli obiettivi, si inizia sempre definendo gli obiettivi dello studio LCA in quanto tutte le fasi LCA successive dovranno essere in accordo con essi.

Nella definizione di un obiettivo ci sono aspetti fondamentali che devono sempre essere rispettati, come le ragioni per lo svolgimento dello studio LCA, il target dello studio e le figure coinvolte in tale studio. È importante inoltre indicare se lo studio LCA è di natura comparativa e se c'è l'intenzione di divulgazione al pubblico, e in tal caso le normative ISO 14040 e ISO 14044 specificano un numero di requisiti nella condotta e documentazione dello studio e nel processo di revisione esterna a causa delle potenziali conseguenze che la comunicazione dei risultati potrebbe avere per aziende esterne, istituzioni e stakeholders.

Successivamente si definisce lo scopo, quindi si determina quali product systems devono essere valutati e in che modo, definendo anche i confini del sistema, la preparazione delle basi per la valutazione degli impatti, i requisiti speciali per la comparazione dei sistemi e i risultati attesi dallo studio LCA.

Nella fase LCI, spesso la fase più lunga, avviene la raccolta e la compilazione dei dati sui flussi elementari da tutti i processi del product system in studio. L'output di

questa fase è un inventario compilato dei flussi elementari che viene utilizzato per le fasi LCIA e Interpretazione dei risultati ottenuti.

Questa fase inizia con l'identificazione dei processi del product system, partendo da un flusso, che viene detto flusso di riferimento, e identificando tutti i processi considerando, di volta in volta, l'input e l'output di ciascun processo.

Terminata l'identificazione dei processi, si procede alla pianificazione e raccolta dei dati, classificandoli in base alla loro qualità, la quale è legata alla specificità dei dati stessi.

Una volta raccolti i dati, si costruiscono tutti gli unit processes, successivamente si crea il modello LCI e avviene il calcolo dei risultati.

Nella fase LCIA si valuta il contributo all'impatto ambientale di ciascun flusso elementare. Il product system viene quindi esaminato utilizzando delle categorie di impatto e degli indicatori di categoria in quanto i flussi elementari, essendo solamente quantità emesse o utilizzate, non sono direttamente comparabili tra loro in termini di importanza di impatto.

L'utilizzo delle categorie di impatto e degli indicatori di categoria, assieme ai risultati calcolati al termine della fase LCI, permettono di interpretare i risultati ottenuti, passando quindi all'ultima fase dello studio LCA.

La fase di Interpretazione dei risultati vuole sviluppare raccomandazioni per il pubblico previsto in conformità all'obiettivo dello studio LCA e alle applicazioni previste dei suoi risultati.

I casi studio riportati nelle sezioni 3.1 e 3.2 mostrano, rispettivamente, l'efficacia di uno studio LCA per quanto riguarda la comparazione tra diversi materiali per il rivestimento delle portiere automobilistiche australiane e l'impatto dei materiali da costruzione di una turbina eolica.

Successivamente alla raccolta dati nella fase LCI, alla considerazione di numerose categorie di impatto e alla valutazione dell'impatto ambientali dei product systems rispettivi del caso studio, è emerso che in entrambi gli studi i materiali compositi evidenziano un'efficacia nella fase di utilizzo a livello energetico più elevata rispetto ai materiali metallici, a discapito di un impatto ambientale maggiormente negativo nella fase di riciclaggio.

Come dimostrato nei casi studio presi in esame, la metodologia LCA è molto importante da considerare nell'ambito della scelta dei materiali per la realizzazione di componenti meccanici e strutturali, ed è compito di chi effettua lo studio di prendere le scelte e le decisioni più adeguate considerando il trade-off tra prestazioni meccaniche del componente e impatto ambientale del suo intero ciclo di vita.

Bibliografia

- [1] BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, 2020, *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, BSI.
- [2] BS EN ISO 14044:2006+A2:2020, 2020, *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, BSI.
- [3] ILCD Handbook, 2010, *General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*, European Commission.
- [4] Michael Z. Hauschild, Ralph K. Rosenbaum, Stig Irving Olse, 2018, *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*, Springer.
- [5] Prateek Puri, Paul Compston, Victor Pantano, 2009, *Life cycle assessment of Australian automotive door skins*, Springer-Verlag.
- [6] Department of Environment and Heritage, 2002, *Environmental Impact of End-of-Life Vehicles: An Information Paper*, Commonwealth Department of Environment and Heritage.
- [7] Eduardo Martínez, Félix Sanz, Stefano Pellegrini, Emilio Jiménez, Julio Blanco, 2009, *Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method*, Springer-Verlag.