



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in INGEGNERIA MECCANICA

**IMPLEMENTAZIONE DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA
NEGLI STRUMENTI DI LCA PER LA MODELLAZIONE DEL FINE
VITA DI PRODOTTI COMPLESSI**

**IMPLEMENTING THE CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA IN
LCA TOOLS FOR END-OF-LIFE MODELING OF COMPLEX
PRODUCTS**

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Michele Germani**

Correlatrice:

Ing. **Marta Rossi**

Tesi di Laurea di:

Silvia Bacchiocchi

A.A. 2023 / 2024

SOMMARIO

ABSTRACT.....	5
INTRODUZIONE AL LIFE CYCLE ASSESSMENT.....	6
1.1 LIFE CYCLE ASSESSMENT	6
1.2 FASI DELL' LCA.....	9
1.2.1 Definizione obiettivi e campo di applicazione.....	10
1.2.2 Analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI).....	13
1.2.3 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA).....	17
1.2.4 Interpretazione del ciclo di vita.....	18
1.3 METODI TRADIZIONALE UTILIZZATI PER LA MODELLAZIONE DEL FINE VITA.....	18
1.3.1 Approccio 100:0.....	20
1.3.2 Approccio 0:100.....	21
1.3.3 Approccio 50:50.....	22
1.3.4 Metodo ad anello chiuso.....	23
1.3.5 Metodo ad anello aperto.....	24
PRODUCT ENVIRONMENTAL FOOTPRINT.....	27
2.1 STRUTTURA E UTILIZZO DELLA PEF.....	27
2.1.1 Obiettivo e scopo.....	29
2.1.2 Life cycle inventory (LCI).....	30
2.1.3 LCIA.....	32
2.1.4 Interpretazione dei risultati.....	33
2.2 CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA	34
2.3 LIMITI E DIFFICOLTÀ NEL REPERIMENTO DI DATI.....	40
MODELLAZIONE EFFETTUATA TERMITE IL SOFTWARE SIMAPRO.....	42
3.1 DISTINTA BASE DEL PRODOTTO ATM SD400.....	42
3.2 MODELLAZIONE IN SIMAPRO.....	45
3.2.1 Obiettivo ed ambito	46
3.2.2 LCI.....	46
3.2.3 Valutazione dell'impatto	55
APPLICAZIONE DELLA CIRCULA FOOTPRINT FORMULA	61
4.1 MODELLAZIONE DEL FINE VITA DI UN PRODOTTO	61

4.2 RISPARMIO ENERGETICO NEI PROCESSI DI RICICLO DEI MATERIALI.....	63
4.3 LINEE GUIDA FORNITE DALLA PEF.....	66
4.4 MODELLAZIONE IN SIMAPRO DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA	67
LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT	75
5.1 ANALISI DEI DATI RICAVALI DALL'APPLICAZIONE DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA	75
5.2 ANALISI DEI DATI RICAVALI A SEGUITO DELLA MODIFICA DEI PARAMETRI DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA	79
5.2.1 Fattore di allocazione (A) nullo	79
5.2.2 Fattore di allocazione (A) unitario.....	82
5.2.3 Percentuale di materiale riciclato da un sistema precedente (R_1) nulla	85
5.2.4 Percentuale di materiale riciclato da un sistema precedente (R_1) unitaria	87
5.2.5 Percentuale di materiale riciclabile a fine vita (R_2) nulla	89
5.2.6 Percentuale di materiale riciclabile a fine vita (R_2) unitaria.....	91
DISCUSSIONE	94
6.1 METODO TRADIZIONALE DI MODELLAZIONE DELLO SMALTIMENTO PROPOSTO DA ECOINVENT	94
6.2 CONFRONTO DEI VALORI OTTENUTI IN RAPPORTO ALL'APPLICAZIONE DELLA CFF.....	98
CONCLUSIONI	102
BIBLIOGRAFIA	104

ABSTRACT

Lo scopo di tale studio è stato quello di analizzare le modalità di approccio al fine vita tramite l'applicazione della Circular Footprint Formula (CFF). Questa rappresenta un metodo innovativo che consente di valutare l'impatto ambientale del fine vita, considerando i potenziali benefici derivanti dal riciclo e dal riutilizzo dei materiali. Nello specifico si è studiato l'impatto ambientale della fase del fine vita di una macchina ATM (Automated Teller Machine), prodotta dall'azienda Sigma. L'analisi è stata condotta implementando nel software SimaPro la CFF partendo dal dataset standard di Ecoinvent. Per poterla implementare, sono stati individuati i parametri necessari in letteratura, all'interno dell'Allegato-C delle linee guida della PEF (Product Environmental Footprint). e i dati relativi al risparmio energetico derivante dall'utilizzo di materiali secondari rispetto a quelli vergini.

Dopo aver implementato in SimaPro la CFF partendo dalla modifica del dataset di Ecoinvent, sono stati confrontati diversi scenari modificando i parametri richiesti dall'applicazione della CFF per valutare la sensibilità dei risultati alle diverse assunzioni. Infine, è stata modellata la fase del fine vita della macchina ATM ed analizzata, utilizzando il metodo tradizionale di gestione del fine vita proposto in SimaPro. Questo confronto ha permesso di valutare le differenze tra i risultati ottenuti con la CFF e quelli ottenuti con un metodo tradizionale, evidenziando i vantaggi e i limiti di entrambi gli approcci. L'utilizzo della CFF in questo studio ha permesso di ottenere una valutazione più completa e accurata dell'impatto ambientale del fine vita dell'ATM, considerando i potenziali benefici del riciclo e del riutilizzo dei materiali. Questo approccio innovativo può essere applicato ad altri prodotti e sistemi per promuovere la transizione verso un'economia circolare più sostenibile.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE AL LIFE CYCLE ASSESSMENT

1.1 LIFE CYCLE ASSESSMENT

Il Life Cycle Assessment (LCA), ovvero analisi del ciclo di vita, consiste in un metodo che valuta e quantifica in modo oggettivo i carichi energetici ed ambientali e gli impatti potenziali associati a un prodotto, processo o attività lungo l'intero ciclo di vita.

Il calcolo spazia dalle fasi di estrazione delle materie costituenti il prodotto, alla sua produzione, sua distribuzione, uso e sua dismissione finale, andando così a restituire i valori di impatto ambientali associati al ciclo stesso. Quindi, tramite tale metodo, è possibile andare a stimare l'impatto ambientale di un servizio, inteso anche prodotto o processo, contabilizzando l'impronta di tutto ciò che serve per l'erogazione del medesimo.

Al termine dell'analisi, l'impronta ambientale viene presentata in modo dettagliato, suddivisa in diverse categorie. Ognuna di queste categorie rappresenta un tipo specifico di impatto ambientale generato dal prodotto o dal servizio in esame.

Questo approccio consente di ottenere una comprensione più approfondita e completa degli effetti ambientali complessivi, identificando le aree che richiedono maggiore attenzione e miglioramento.

Alcuni esempi di categorie di impatto possono essere:

- Cambiamento climatico che quantifica le emissioni di gas serra, espresse in equivalente CO₂, associate al ciclo di vita del prodotto o servizio;
- Consumo di risorse idriche che valuta il consumo di acqua durante l'intero ciclo di vita, considerando l'estrazione, l'utilizzo e lo scarico;

- Tossicità per l'uomo e per l'ambiente con lo scopo di misurare il potenziale rilascio di sostanze tossiche nell'ambiente e il loro impatto sulla salute umana e sugli ecosistemi;
- Consumo di risorse per valutare l'utilizzo di risorse naturali non rinnovabili, come minerali e combustibili fossili, e rinnovabili durante il ciclo di vita;
- Degrado del territorio per valutare l'occupazione del suolo, a trasformazione di habitat naturali e altri impatti sul territorio causati dal ciclo di vita del prodotto o servizio.

Tali categorie di impatto ambientale sono in definitiva riconducibili a tre gruppi tematici: salute umana, danno all'ecosistema ed esaurimento delle risorse. La prima macrocategoria riguarda i danni ambientali che possono avere un impatto diretto sulla salute umana, attraverso l'esposizione a sostanze tossiche oppure l'inquinamento atmosferico. Invece, il danno ambientale può comportare danneggiamento degli ecosistemi, generando conseguentemente un effetto a catena sulla salute e sul benessere umano, dato l'aumento di epidemie provocate dalla perdita di biodiversità. Infine, l'esaurimento delle risorse comporta l'aumento del costo di vita e l'insicurezza alimentare, fattori che compromettono lo stile di vita dell'essere umano.

Un approccio per categorie di impatto consente di fornire una comprensione completa e dettagliata degli impatti ambientali, permette di valutare le aree di maggior impatto, facilitando la definizione di strategie mirate di miglioramento, semplifica la comunicazione dei risultati dell'analisi LCA a un pubblico non tecnico e consente di confrontare l'impatto ambientale di diverse opzioni o prodotti.

L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) rappresenta una metodologia rigorosa e consolidata a livello internazionale per valutare l'impatto ambientale di prodotti. Assumendo un ruolo di

primaria importanza, l'LCA si configura come la base tecnica per numerose azioni volte ad aumentare la sostenibilità in diversi ambiti.

Attraverso l'LCA, è possibile quantificare in maniera oggettiva e scientifica l'impatto ambientale associato a ciascun processo produttivo all'interno del sistema preso in esame. L'analisi consente di individuare i punti critici del ciclo di vita, ossia le fasi che generano la maggior parte degli impatti ambientali.

L'obiettivo finale dell'LCA è quello di supportare le aziende e gli enti nel processo di riduzione e compensazione degli impatti ambientali identificati. L'analisi fornisce le informazioni necessarie per ottimizzare i processi produttivi, sviluppare prodotti e servizi ecocompatibili, implementare strategie di ecodesign, selezionare materie prime e tecnologie sostenibili e comunicare la performance ambientale in modo trasparente

Il Life Cycle Assessment rappresenta uno degli strumenti fondamentali per l'attuazione di una politica ambientale integrata dei prodotti e quindi il principale strumento operativo del Life Cycle Thinking. Questo permette, tramite comparazione, di individuare i materiali a minore impronta ambientale. Si può, potenzialmente, sostituire dei materiali o materie prime a maggiore impronta con materiali a minore impronta con lo scopo di aumentare la compatibilità ambientale dei prodotti.

Tramite la tecnica LCA è possibile riuscire a valutare tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto “dalla culla alla tomba” come correlate e dipendenti.

La struttura dell'LCA è suddivisa in quattro fasi principali:

1. Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio: quali prodotti si studiano, l'unità funzionale, i confini di sistema, le assunzioni e i limiti, l'applicazione prevista e le motivazioni, a chi è indirizzato lo studio;

2. Analisi d'inventario (LCI): consiste nella raccolta di dati e nelle procedure di calcolo volte a quantificare i flussi in entrata e in uscita rilevanti di un sistema di prodotto, in accordo all'obiettivo e al campo di applicazione;
3. Valutazione degli impatti (LCIA): la valutazione dell'impatto del ciclo di vita ha lo scopo di valutare la portata dei potenziali impatti ambientali utilizzando i risultati dell'analisi di inventario del ciclo di vita;
4. Interpretazione: è un procedimento sistematico volto all'identificazione, qualifica, verifica e valutazione dei risultati delle fasi di inventario e di valutazione degli impatti, al fine di presentarli in forma tale da soddisfare i requisiti dell'applicazione descritti nell'obiettivo e nel campo di applicazione, nonché di trarre conclusioni e raccomandazioni.

Le norme volte a definire nello specifico l'LCA sono la UNI EN ISO 14040 e la 14044. La prima contiene al suo interno i principi ed il quadro di riferimento, mentre la seconda i requisiti e le linee guida.

1.2 FASI DELL'LCA

L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) offre un metodo efficace per rappresentare il ciclo di vita di un prodotto come un vero e proprio "sistema di prodotto". Questo sistema svolge una o più funzioni specifiche e viene scomposto in una serie di "processi unitari" interconnessi. Ogni processo unitario rappresenta un'attività o una fase specifica all'interno del ciclo di vita del prodotto. In questo contesto, un processo si riferisce a un insieme di azioni correlate o interconnesse che trasformano "elementi in ingresso" in "elementi in uscita". Il livello di dettaglio con cui vengono modellati i processi unitari dipende dagli obiettivi specifici dell'LCA. Infatti, uno studio più approfondito necessiterà di una suddivisione più dettagliata

dei processi. Invece, un'analisi preliminare può necessitare di un livello di dettaglio minore. La definizione del confine di un processo unitario è fondamentale per garantire la coerenza e l'accuratezza dell'LCA. Tale confine, deve essere chiaro e ben definito, considerando tutti gli ingressi, le uscite e gli impatti ambientali associati al processo. L'utilizzo di processi unitari nell'LCA presenta diversi vantaggi, tra cui la modularità, che permette di scomporre un sistema complesso in componenti più piccoli e gestibili; la riutilizzabilità, ovvero la possibilità di riutilizzare i processi unitari in diverse LCA facilitando la comparazione tra prodotti simili; la trasparenza, intesa come capacità di individuare aree di miglioramento [1].

1.2.1 Definizione obiettivi e campo di applicazione

Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

La prima fase di qualsiasi valutazione del ciclo di vita è rappresentata dalla definizione dell'obiettivo. Tale operazione è decisiva per le fasi seguenti dell'LCA. Ad esempio, il controllo qualità viene eseguito in considerazione dei requisiti derivati dell'obiettivo del prodotto. Diventa quindi fondamentale effettuare una valida definizione dell'obiettivo per poter correttamente interpretare i risultati.

L'obiettivo dell'LCA può indicare: l'applicazione prevista, la motivazione per cui viene effettuato lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato. Il campo di applicazione, invece, può contenere differenti aspetti quali le funzioni del prodotto, l'unità funzionale e il confine di sistema. Essendo l'LCA una tecnica iterativa, man mano che i dati e le informazioni vengono raccolte, i vari aspetti del campo di applicazione possono essere modificati così da soddisfare l'obiettivo primario dello studio.

Funzione, unità funzionale e flussi di riferimento

Un sistema può possedere un numero ampio di funzioni possibili e possono essere scelte sulla base dell'obiettivo e del campo di applicazione. Soprattutto quando l'obiettivo dello studio è meno specifico, i sistemi da analizzare e confrontare devono ancora essere identificati e specificati nel dettaglio.

La funzione e l'unità funzionale del sistema sono elementi centrali di un'analisi LCA. Senza di essi non sarebbe possibile effettuare un confronto significativo tra prodotti. La funzione LCA consente di specificare quantitativamente e qualitativamente l'oggetto analizzato. Questo viene fatto utilizzando l'unità funzionale che definisce le caratteristiche prestazionali del prodotto. Lo scopo primario dell'unità funzionale è quello di fornire un riferimento a cui legare gli elementi in ingresso e in uscita. Infatti, è proprio grazie alla sua definizione che è possibile effettuare confronti validi, poiché gli oggetti confrontati sono comparabili basandosi su standard tecnici di misurazione.

Il flusso di riferimento, infine, è il flusso a cui si riferiscono quantitativamente tutti gli altri flussi in ingresso e in uscita, ovvero tutti i flussi elementari, i flussi di prodotti e rifiuti non di riferimento. Il flusso di riferimento può essere espresso in relazione diretta all'unità funzionale oppure in un modo più orientato al prodotto. La scelta del tipo di flusso di riferimento dipende come prima cosa dal tipo di prodotto analizzato.

Per poter definire l'unità funzionale come prima cosa è fondamentale identificare e quantificare le proprietà rilevanti e le prestazioni tecnico-funzionali del sistema. Per quantificare correttamente l'unità funzionale di molti prodotti, è importante considerare due aspetti chiave dell'entità della funzione fornita:

- Durata di utilizzo nel tempo ovvero la durata prevista del prodotto durante il quale svolge la sua funzione;

- Quantità della funzione effettiva fornita che si riferisce alla quantità o all'intensità della funzione effettivamente fornita dal prodotto.

Per quantificare correttamente l'unità funzionale, è necessario considerare entrambi questi aspetti e combinarli in un'unica unità di misura. Questo può essere fatto in diversi modi, a seconda del prodotto specifico in questione.

La definizione qualitativa delle funzioni del sistema rappresenta una descrizione dettagliata del modo in cui le funzioni vengono erogate e di altre caratteristiche del prodotto che non possono essere facilmente quantificate. Questa analisi qualitativa approfondisce le peculiarità del sistema, andando oltre la semplice descrizione numerica delle sue capacità. Si concentra su aspetti intangibili che influenzano l'esperienza dell'utente e il valore complessivo del prodotto. La definizione qualitativa di una funzione consente di comprendere maggiormente il prodotto distinguendolo dalla concorrenza. Inoltre, Orienta il processo di progettazione e sviluppo, assicurando che il prodotto soddisfi le esigenze qualitative degli utenti.

Confine di sistema

Il confine di sistema nell'LCA (Life Cycle Assessment) rappresenta la definizione precisa dei limiti entro cui si effettua l'analisi dell'impatto ambientale di un prodotto, servizio o sistema. Stabilire correttamente il confine di sistema è fondamentale per ottenere una valutazione accurata e completa dell'impatto ambientale, in quanto permette di identificare e includere tutti i processi e le attività che contribuiscono significativamente all'impatto ambientale del prodotto in esame. Un confine di sistema ben definito garantisce che tutti i componenti e i processi significativi siano inclusi nell'analisi, evitando di sottostimare l'impatto ambientale. Inoltre, contribuisce all'accuratezza dei risultati dell'LCA, fornendo una rappresentazione veritiera dell'impatto ambientale del prodotto, servizio o sistema

assicurandosi che le analisi siano condotte su basi comparabili e facilmente comprensibili dai lettori.

1.2.2 Analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI)

Inizialmente è necessario definire quali siano i principi di modellazione dell'inventario del ciclo di vita e gli approcci metodologici da applicare nella modellazione del sistema. Questa decisione deve essere presa in conformità con l'obiettivo dello studio e dipende dal contesto decisionale dello studio stesso e da una serie di altri fattori quali riproducibilità, robustezza, fattibilità pratica. Pertanto, la scelta della struttura e degli approcci di modellazione dell'LCI non è indipendente, ma deve essere valutata individualmente per ciascuno studio in base al suo obiettivo. Tale fase comprende la raccolta dei dati in ingresso e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare gli elementi in ingresso e in uscita pertinenti di un sistema di prodotto.

È un processo di tipo iterativo e, per tale motivazione, i dati vengono continuamente aggiornati al fine di ottenere la qualità di risultati desiderata. Inoltre, il quantitativo di dati che viene elaborato in questa fase comporta un ingente dispendio di risorse.

Nell'ambito dell'LCA, due metodologie principali per la modellazione dell'inventario sono ampiamente utilizzate: il modello attribuzionale e il modello consequenziale. Sebbene il modello attribuzionale sia storicamente più diffuso per motivi pratici, entrambi offrono approcci distinti all'analisi del sistema in esame:

- Il modello del ciclo di vita attribuzionale descrive la catena di fornitura specifica o media, effettiva o prevista, oltre alla catena del valore di utilizzo e di fine vita. Distribuisce gli impatti ambientali ai prodotti in base a regole di allocazione predefinite, indipendentemente dalle decisioni future. Consente di offrire una visione

completa degli impatti associati al sistema analizzando dati facilmente reperibili. Di contro, però, è un modello che non considera i potenziali cambiamenti nel sistema dovuti a modifiche della domanda.

- Il modello consequenziale modella la catena di approvvigionamento generica, come teoricamente si evolverebbe in risposta alla decisione specifica oggetto di analisi. Questo è possibile attribuendo gli impatti ambientali in base ai cambiamenti incrementali nel sistema dovuti alla domanda addizionale del prodotto analizzato. A differenza del metodo precedente, quello consequenziale, essendo più complesso e richiedendo dati specifici, fornisce una valutazione più realistica degli impatti, considerando le potenziali modifiche del sistema. Per tale motivo, è considerato un valido modello di valutazione di scenari alternativi.

La scelta tra il modello attribuzionale e quello consequenziale dipende dagli obiettivi specifici dell'LCA e dalle informazioni disponibili. La comprensione delle loro differenze e dei loro punti di forza permette di scegliere l'approccio più adatto per ottenere informazioni accurate e utili per il processo decisionale.

In un processo multifunzionale, dove un singolo processo assolve a più funzioni, l'analisi LCA tradizionale si concentra tipicamente su una singola co-funzione specifica. Questo implica l'isolamento dell'LCI per la funzione di interesse, considerando solo gli input e gli output ad essa strettamente correlati. L'isolamento dell'inventario in un processo multifunzionale può presentare delle sfide, in particolare quando le funzioni sono interconnesse o quando la quantificazione dei loro contributi risulta complessa. La scelta del metodo di allocazione è fondamentale e può influenzare significativamente i risultati dell'LCA. È importante, quindi, documentare chiaramente le ipotesi e i metodi utilizzati per allocare gli input e gli output, assicurando la trasparenza e la robustezza dell'analisi. Inoltre,

è importante sottolineare che l'isolamento di una singola funzione all'interno di un processo multifunzionale fornisce solo una visione parziale dell'impatto ambientale complessivo del sistema. Per una valutazione più completa, è opportuno considerare l'intero ciclo di vita del processo, includendo tutte le sue co-funzioni e le loro interazioni.

La norma ISO 14044:2006, dedicata all'LCA, stabilisce una gerarchia di metodi per affrontare il problema dell'allocazione negli inventari LCI quando si ha a che fare con processi multifunzionali. Tale gerarchia rappresenta una linea guida per la scelta dell'approccio più appropriato in base alle specifiche circostanze dell'analisi.

Come primo passo nella gerarchia di allocazione, la suddivisione dei processi multifunzionali rappresenta una strategia ideale per affrontare la multifunzionalità e ottenere inventari LCI univoci. In questo approccio, l'obiettivo è quello di trasformare un processo multifunzionale in due o più sottoprocessi separati, ognuno con flussi di input e output distinti e univoci per ogni funzione. In questo modo, si elimina la necessità di allocare gli input e gli output tra le diverse funzioni, semplificando notevolmente l'analisi e migliorando la qualità dei dati. Rappresenta un approccio preferenziale per l'analisi LCA, quando fattibile, in quanto elimina la necessità di allocazione e migliora la qualità dei dati e la trasparenza dell'analisi. Tuttavia, la fattibilità di questa strategia dipende dalle specifiche caratteristiche del processo in esame e dalle risorse disponibili.

Il secondo approccio nella gerarchia di allocazione consiste nell'espansione del sistema. Questo metodo mira ad ampliare i confini del sistema LCA per includere sistemi alternativi che potrebbero svolgere la stessa funzione del processo multifunzionale in esame. L'obiettivo principale di questo approccio è quello di evitare l'allocazione eliminando la multifunzionalità all'interno del sistema LCA ampliato. In pratica, si ipotizza l'esistenza di un sistema alternativo in grado di svolgere la funzione analizzata separatamente. Gli input e

gli output del processo multifunzionale vengono poi allocati in base al confronto con questo sistema ipotetico. Tuttavia, la fattibilità di questa strategia dipende dalla disponibilità di dati, dalla complessità del sistema e dai limiti del sistema LCA.

Quando la suddivisione dei processi multifunzionali o l'espansione del sistema non sono praticabili, la norma ISO 14044:2006 per l'LCA prevede l'utilizzo di metodi di allocazione per affrontare la multifunzionalità e allocare gli input e gli output tra le diverse funzioni di un processo. L'allocazione rappresenta una strategia per distribuire gli impatti ambientali di un processo multifunzionale alle sue diverse funzioni. Esistono diversi metodi di allocazione:

- Allocazione basata su relazioni causali: Questo metodo attribuisce gli input e gli output a ciascuna funzione in base al loro contributo causale al loro utilizzo. Richiede un'ottima comprensione delle relazioni di causa ed effetto tra le funzioni e i flussi di materiali ed energia;
- Allocazione basata su criteri quantitativi: Questo metodo utilizza criteri quantitativi misurabili, come il valore economico, la massa, il volume o l'energia, per allocare gli input e gli output alle diverse funzioni;
- Allocazione basata su giudizi di esperti: Quando non è possibile utilizzare altri metodi, si può impiegare il giudizio di esperti per allocare gli input e gli output alle diverse funzioni. Questa opzione dovrebbe essere utilizzata solo come ultima risorsa e richiede una documentazione dettagliata delle ipotesi e delle decisioni prese.

L'allocazione rappresenta un metodo utile per affrontare la multifunzionalità nell'analisi LCA quando altre strategie non sono applicabili. La scelta del metodo di allocazione appropriato dovrebbe essere basata su una valutazione attenta delle caratteristiche del processo, degli obiettivi dell'analisi e delle risorse disponibili.

Successivamente alla raccolta dei dati, avviene la fase di calcolo. Nello specifico, il calcolo dei flussi di energia dovrebbe tenere conto dei diversi combustibili e delle sorgenti di elettricità utilizzate, dell'efficienza di conversione e di distribuzione dei flussi d'energia.

1.2.3 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA)

La terza fase consiste nella valutazione dell'impatto dell'LCA, con lo scopo di valutare la portata degli impatti ambientali utilizzando quanto emerso dall'LCI. Infatti, questo processo comporta l'associare i dati d'inventario a specifiche categorie di impatti ambientali e indicatori di categoria e l'approfondire la comprensione di tali impatti. Le categorie di impatto ambientale da includere nella valutazione dell'impatto del ciclo di vita, nonché i metodi LCIA da applicare e gli insiemi di normalizzazione e ponderazione devono essere determinati prima dell'analisi dell'inventario iniziale.

La scelta delle categorie di impatto, dei set di normalizzazione e dei fattori di ponderazione rappresenta un aspetto cruciale nell'LCA e deve essere condotta in maniera coerente con gli obiettivi specifici dello studio. Le categorie di impatto selezionate dovrebbero riflettere i potenziali impatti ambientali più significativi del sistema o prodotto in esame, in linea con le preoccupazioni e gli interessi. Inoltre, i set di normalizzazione e i fattori di ponderazione scelti dovrebbero essere pertinenti alla scala geografica, al contesto temporale e alle caratteristiche del sistema oggetto di studio. Allo stesso tempo, la valutazione dell'impatto è necessaria anche per applicare le regole di esclusione per valutare la completezza dei dati, vale a dire per tutti gli studi LCA. L'esclusione iniziale degli impatti rilevanti deve essere chiaramente documentata e considerata nell'interpretazione dei risultati, limitando potenzialmente le conclusioni e le raccomandazioni dello studio.

Parlando di valutazione di impatto, si può includere un procedimento iterativo di revisione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio, così da determinare quando essi siano stati conseguiti oppure, eventualmente, modificarli.

1.2.4 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione rappresenta la fase finale dell'analisi del ciclo di vita, dove i risultati ottenuti nell'inventario e nella valutazione dell'impatto vengono riuniti e interpretati alla luce degli obiettivi dello studio. In questa fase cruciale, si estraggono conclusioni significative e si comunicano i risultati in modo chiaro e comprensibile. L'interpretazione deve essere condotta in modo coerente con l'obiettivo definito all'inizio dello studio LCA. I risultati dell'interpretazione dovrebbero fornire risposte chiare e complete alle domande formulate in fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. Inoltre, non si limita a presentare semplicemente i dati grezzi ottenuti dall'LCI e dall'LCIA. Richiede un'attenta combinazione e analisi di questi dati, considerando le relazioni tra le diverse categorie di impatto, l'incertezza dei risultati e la sensibilità dei dati alle ipotesi e alle scelte fatte durante l'analisi. I risultati dell'interpretazione del ciclo di vita devono essere comunicati in modo chiaro, conciso e comprensibile a un pubblico di destinatari diversi. L'utilizzo di grafici, tabelle e altri strumenti di comunicazione visiva può facilitare la comprensione dei risultati complessi

.

1.3 METODI TRADIZIONALMENTE UTILIZZATI PER LA MODELLAZIONE DEL FINE VITA

Le industrie attuali affrontano diverse pressioni ambientali da normative, accessibilità alle risorse, responsabilità etica e richieste dei consumatori per prodotti ambientalmente

sostenibili. Le decisioni, intraprese nella selezione dei materiali, giocano un ruolo cruciale al fine di migliorare le prestazioni ambientali aziendali, influenzando l'intero ciclo di vita dei prodotti. La valutazione del ciclo di vita con metodologia LCA è uno strumento ampiamente utilizzato per informare sulle implicazioni ambientali delle scelte dei progettuali.

Un aspetto particolarmente interessante e ancora non completamente esplorato ed applicato è relativo alla modellazione del fine vita dei prodotti nelle analisi di impatti ambientali.

La modellazione del fine vita richiede un processo di allocazione quando sono previsti processi come il riciclo. In tal caso, infatti, gli output derivanti dal riciclo di materiali generano carichi ambientali e benefici che possono essere associati al ciclo di vita iniziale o al successivo. Ciò richiede l'applicazione di una metodologia di allocazione.

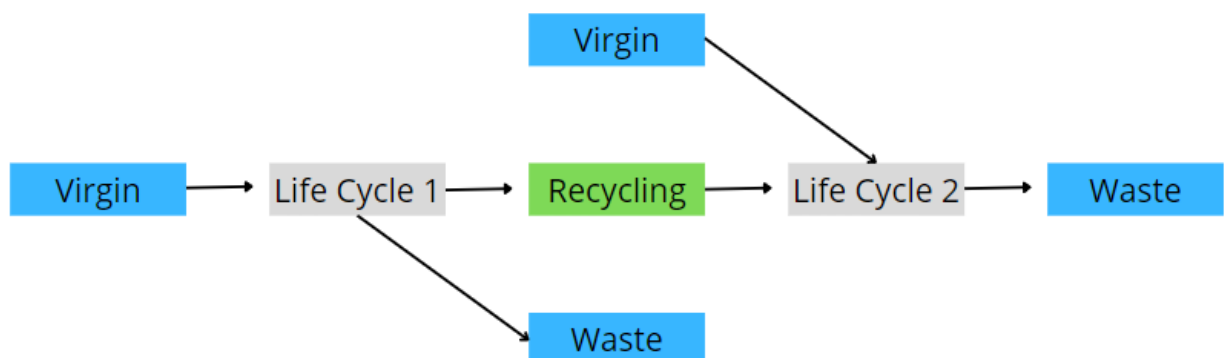


Figura 1: Schema dell'EoL

In particolare, l'allocazione degli oneri e benefici ambientali, nella gestione End-of-life (EoL), è una sfida nella metodologia LCA. Gli standard attuali non affrontano esplicitamente la questione e, per tale motivo, la scelta del metodo di gestione del fine vita può influenzare le decisioni sulla scelta dei materiali.

L'obiettivo è comprendere come la variazione dei risultati possa influenzare le decisioni pratiche nella selezione dei materiali, fornendo informazioni preziose per promuovere l'economia circolare e l'impresa sostenibile.

L'allocazione dovrebbe essere, in primo luogo, evitata suddividendo il processo produttivo in sub-processi, oppure tramite l'espansione del problema. Qualora questo non fosse possibile, si dovrebbe impostare una procedura di allocazione basata su relazioni fisiche, come per esempio massa ed energia, oppure su altre relazioni, ad esempio di tipo economico. Occorre fornire una miglior panoramica di quelli che sono i principali approcci a cui possono essere ricondotti i metodi usati nell'esecuzione dell'LCA per garantire un miglior gestione del riuso, riciclo e recupero energetico dei materiali.

1.3.1 Approccio 100:0

L'approccio 100:0 è un metodo che esclude completamente gli impatti associati alla fase di produzione della materia prima vergine da cui deriva il materiale riciclato. Tale metodo incentiva l'utilizzo di un prodotto di riciclo poiché esso permette di fornire un'alternativa allo smaltimento in discarica del materiale o negli impianti di incenerimento. Lo scopo di tale approccio è quello di promuovere un mercato per il materiale da riciclo che, altrimenti, verrebbe trattato come un rifiuto. Al prodotto viene assegnato un credito calcolato considerando gli impatti medi associati alla produzione della materia prima vergine che è stata sostituita dal materiale riciclato. Infatti, presuppone che se il prodotto non esistesse, nessuna materia prima vergine sarebbe associata alla sua creazione. Infine, assegna gli oneri del riciclaggio al prodotto successivo.

Si consideri, ad esempio, un prodotto realizzato con plastica riciclata. L'approccio 100:0 considererebbe solo gli impatti associati alla raccolta, al riciclaggio e alla produzione del prodotto in plastica riciclata. Verrebbero invece esclusi gli impatti relativi all'estrazione e alla lavorazione del petrolio per la produzione della plastica vergine. Al prodotto verrebbe

inoltre assegnato un credito per gli impatti evitati grazie al mancato utilizzo di plastica vergine.

L'approccio 100:0 offre un metodo semplice e intuitivo per valutare i benefici ambientali del riciclo nell'LCA. Tuttavia, è importante sottolineare che questo metodo presenta alcune limitazioni. Ad esempio, non considera la potenziale variabilità nella qualità e nelle caratteristiche dei materiali riciclati, che può influenzare gli impatti ambientali. Inoltre, non tiene conto degli aspetti sociali ed economici legati al riciclo. Nonostante queste limitazioni, l'approccio 100:0 rimane un metodo valido per incoraggiare l'utilizzo di materiali riciclati e promuovere l'economia circolare. Per ottenere una valutazione più completa e accurata dell'impatto ambientale di prodotti riciclati, è consigliabile utilizzare metodi LCA più complessi che considerino anche altri fattori.

1.3.2 Approccio 0:100

L'approccio 0:100 rappresenta un metodo alternativo nell'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) per la valutazione degli impatti ambientali associati all'utilizzo di materiale riciclato. A differenza dell'approccio 100:0, questo metodo si concentra sul potenziale beneficio derivante dal recupero e dal riciclo del materiale a fine vita, evitando la necessità di estrarre e processare nuove materie prime vergini. Il presupposto fondamentale dell'approccio 0:100 è che ogni unità di materiale riciclato impiegata nella produzione sostituisce una pari quantità di materiale vergine che altrimenti sarebbe necessario estrarre e processare. In base a questo principio, gli impatti ambientali evitati grazie al riciclo vengono attribuiti al sistema che ha generato il materiale secondario, piuttosto che al sistema che lo utilizza nel proprio processo produttivo. Il vantaggio principale, dato dall'utilizzo di tale approccio, è quello di incentivare il recupero e il riciclo dei materiali, valorizzando il loro contributo nel ridurre la domanda di

materie prime vergini e i relativi impatti ambientali. Inoltre, può evidenziare un beneficio ambientale maggiore rispetto all'approccio 100:0, in quanto considera l'impatto evitato nell'intero ciclo di vita, dalla produzione della materia prima vergine allo smaltimento. Un credito di riciclo viene assegnato interamente al sistema che genera il materiale secondario. Questo credito rappresenta il risparmio di impatti ambientali ottenuto evitando l'estrazione e la lavorazione di materia prima vergine. Il prodotto finale che contiene materiale riciclato non ottiene alcun credito di riciclo. Questo riflette il fatto che il beneficio ambientale del riciclo è già stato attribuito al sistema che ha generato il materiale secondario. L'approccio 0:100 offre una prospettiva differente rispetto all'approccio 100:0, sottolineando il ruolo del riciclo nella riduzione della domanda di materie prime vergini e dei relativi impatti ambientali.

1.3.3 Approccio 50:50

Un ulteriore approccio è quello 50:50 in cui gli impatti e i benefici del riciclo dei materiali vengono equamente ripartiti tra il sistema produttivo che genera il materiale secondario e quello che lo utilizza. Tale metodo riconosce che sia l'offerta di materiale riciclato da parte di un sistema, sia la domanda da parte di un altro, sono elementi essenziali per il funzionamento del mercato del riciclo. Inoltre, enfatizza il riciclo come un processo che richiede sforzi e investimenti da parte di entrambi i protagonisti della filiera, ovvero i produttori di materiale secondario e gli utilizzatori.

Valutando, ad esempio, l'impatto ambientale di un imballaggio in plastica vergine rispetto a uno realizzato in plastica riciclata con l'approccio 50:50, si evidenzia il vantaggio del riciclo in termini di risparmio di risorse e riduzione di emissioni, considerando gli impatti evitati sia nella produzione della plastica vergine che nel processo di riciclo.

I metodi relativi alle perdite di qualità basano i propri risultati sulla prospettiva che la produzione di materiale vergine e il trattamento finale dei rifiuti siano passaggi fondamentali per la fornitura. Infatti, quando un materiale viene riciclato, quello di partenza subisce una perdita di qualità che obbliga il produttore a considerare un certo livello di miglioramento per riuscire ad ottenere le stesse prestazioni dal materiale.

1.3.4 Metodo ad anello chiuso

Il metodo LCA ad anello chiuso rappresenta un approccio alternativo nell'analisi LCA per attribuire gli impatti ambientali associati a un sistema produttivo. A differenza di altri metodi LCA, questo metodo non si concentra sui singoli prodotti o componenti, ma considera il sistema produttivo nel suo complesso, assumendo che ogni prodotto contribuisca equamente agli impatti ambientali generati durante l'intero ciclo di vita, dalla produzione al riciclaggio o allo smaltimento finale. Infatti, tutti i prodotti all'interno del sistema sono considerati ugualmente responsabili degli impatti ambientali complessivi. Il sistema viene analizzato come un ciclo continuo, in cui i materiali vengono riciclati e riutilizzati all'interno dello stesso sistema. Il metodo ad anello chiuso è utile in situazioni in cui la maggior parte dei materiali prodotti viene riciclata e riutilizzata nello stesso sistema, quando risulta difficile attribuire gli impatti ambientali a singoli prodotti a causa della complessità del sistema, ma soprattutto quando occorre valutare la sostenibilità complessiva del sistema produttivo piuttosto che di singoli prodotti. I limiti che tale metodo presenta sono dati dall'assenza di un'attribuzione specifica a singoli prodotti o componenti; non risulta essere adatto a sistemi con bassi tassi di riciclo. Inoltre, le inefficienze possono essere celate all'interno del sistema in quanto l'impatto ambientale viene equamente distribuito tra tutti i prodotti.

1.3.5 Metodo ad anello aperto

Il riciclaggio ad anello aperto si verifica quando il materiale generato all'interno di un sistema produttivo viene riciclato e utilizzato in un sistema produttivo esterno. In questo scenario, il materiale riciclato può subire una modifica delle sue proprietà intrinseche, come la composizione chimica, la struttura o la presenza di impurità. La normativa ISO 14041 considera il riciclaggio ad anello aperto come un processo condiviso tra più sistemi, richiedendo un metodo di allocazione per attribuire gli impatti ambientali in modo equo. I criteri di allocazione comunemente utilizzati dipendono dalla massa, dal valore economico e benefici ambientali. Il primo assegna gli impatti ambientali in base alla quantità di materiale riciclato, il secondo assegna gli impatti ambientali in base al valore economico del materiale riciclato utilizzato dal sistema ed infine l'ultimo criterio assegna gli impatti in base ai benefici ambientali ottenuti da ciascun sistema di riciclaggio. Un esempio di applicazione può essere il caso in cui un'azienda produce imballaggi in plastica e ricicla internamente una parte degli scarti di produzione. La restante parte degli scarti viene venduta a un'altra azienda che li ricicla e li utilizza per produrre nuovi prodotti. In questo caso, è necessario utilizzare un metodo di allocazione per attribuire gli impatti ambientali associati alla produzione degli imballaggi in plastica tra le due aziende. Tale metodo presenta, però, delle limitazioni dovute all'incertezza dei dati raccolti per supportare il processo di allocazione che, se inappropriata, può distorcere i risultati dell'LCA e portare conclusioni errate.

Questi metodi offrono prospettive diverse sull'allocazione degli oneri EoL, influenzando le decisioni sulla selezione dei materiali. La scelta del metodo può essere cruciale per comprendere l'impatto ambientale cumulativo e guidare verso scelte più sostenibili nella

gestione dei materiali. È importante considerare come i risultati dell'impatto ambientale differiscano a seconda del metodo di allocazione dell'EoL utilizzato [2].

Esistono diversi strumenti che consentono la modellazione del fine vita di un prodotto. Questi strumenti possono essere utilizzati per valutare l'impatto ambientale di diverse opzioni di fine vita, come il riciclaggio, il compostaggio e l'incenerimento. I tradizionali software LCA, ad esempio, possono essere utilizzati per modellare l'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento. La scelta del corretto strumento per la modellazione del fine vita dipenderà da una serie di fattori quali la complessità del prodotto, i dati a disposizione ed il budget. Altre considerazioni che devono essere eseguite nella scelta possono riguardare la facilità di utilizzo del software e le funzionalità necessarie per modellare le opzioni di fine vita.

SimaPro è un software di valutazione del ciclo di vita sviluppato da Pré Sustainability che consente agli utenti di valutare l'impatto ambientale di prodotti, processi e sistemi. È uno strumento completo che supporta tutte le fasi della metodologia LCA, dalla raccolta dei dati e l'analisi dell'inventario alla valutazione e interpretazione dell'impatto.

Il software SimaPro consente di effettuare l'analisi LCA basando la fase di Life Cycle Inventory sul database Ecoinvent comprendente un set di dati che rappresentano varie attività e processi umani. Aderendo agli standard ISO 14040 e 14044, fornisce dati per la valutazione della sostenibilità durante tutto il ciclo di vita del prodotto. La nuova versione di Ecoinvent, ottenuta grazie ad un miglioramento progressivo dell'approccio, data la disponibilità di più dati sui processi di trattamento e riciclaggio, è stata sviluppata in modo da abbandonare il solo approccio cut-off includendo altri approcci così da garantire una completa gestione dei dati. Tenere conto in modo accurato di tutti i sottoprodotti e dei

materiali potenzialmente riciclabili nei calcoli di allocazione e sostituzione è fondamentale per una rappresentazione più accurata dell'impatto ambientale di un prodotto.

CAPITOLO 2

PRODUCT ENVIRONMENTAL FOOTPRINT

2.1 STRUTTURA E UTILIZZO DELLE PEF

Con lo scopo di contribuire allo sviluppo di un mercato unico per prodotti green, la commissione europea ha definito una metodologia comune per la valutazione dei potenziali impatti ambientali di prodotti e servizi, andando a considerare l'intero ciclo di vita.

La Product Environmental Footprint (PEF) ha come obiettivo principale quello di fornire degli orientamenti tecnici il più possibile dettagliati per effettuare lo studio LCA. Questo per poter aumentare la comparabilità di studi e risultati condotti da persone differenti sullo stesso prodotto. La PEF permette di superare le problematiche emerse dall'utilizzo dei metodi di calcolo preesistenti. Infatti, mentre questi forniscono uno spettro di alternative per una determinata scelta metodologica, la PEF consente di ottenere un'unica alternativa così da poter effettuare studi più coerenti ed esaurienti.

Il modello proposto dalla metodologia PEF, come nel caso dell'analisi LCA, si basa sul concetto di "ciclo di vita del prodotto" che prende in considerazione tutti i flussi di risorse e gli interventi ambientali associati a un prodotto dal punto di vista della catena di approvvigionamento.

Per produrre studi PEF affidabili è necessario che vengano rispettati una serie di principi analitici fondamentali che forniscono orientamenti generali nell'applicazione di tale metodo. Devono essere considerati rispetto a ciascuna fase dello studio, dalla definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, attraverso la raccolta dati, la valutazione dell'impatto e la verifica dei risultati. I principi analitici, riportati a seguire, sono definiti dalla raccomandazione della commissione del 9 aprile 2013 (2013/179/EU)

- Principio di rilevanza: tutti i metodi utilizzati e i dati raccolti per quantificare la PEF devono essere rilevanti per lo studio;
- Principio di completezza: la quantificazione della PEF deve comprendere tutti i flussi di materiale/energia significativi sotto il profilo ambientale e gli altri interventi ambientali previsti nel rispetto dei confini definiti del sistema, dei requisiti relativi ai dati e dei metodi di valutazione di impatto impiegati;
- Principio di coerenza: in tutte le fasi dello studio sulla PEF deve essere garantita una rigorosa conformità alla presente guida per garantire la coerenza interna e la comparabilità con analisi simili;
- Principio di precisione: deve essere compiuto ogni sforzo possibile per ridurre le incertezze sia nella modellazione del sistema produttivo che nella comunicazione dei risultati;
- Principio di trasparenza: le informazioni sulla PEF devono essere divulgate in modo tale da fornire agli utilizzatori previsti la base necessaria per decidere e consentire alle parti interessate di valutarne la fondatezza e l'attendibilità.

È necessario eseguire e rispettare una successione di fasi affinché l'analisi possa essere considerata attendibile.

- Definizione del sistema. Viene identificato il prodotto oggetto dell'analisi, stabilendo i confini di sistema ovvero quali processi e fasi del ciclo di vita del prodotto saranno inclusi nello studio. Consente di definire le unità di analisi ossia le unità funzionali a cui saranno riferiti i dati e i risultati, individuando le categorie di impatto ambientale considerate rilevanti per il prodotto.
- Raccolta dati quantitativi e qualitativi relativi ai flussi di materia, energia e rifiuti generati in ciascuna fase del ciclo di vita del prodotto. I dati possono provenire da

diverse fonti come fornitori, banche dati, misure dirette e stime. L'LCI è un processo iterativo. Infatti, man mano che i dati vengono raccolti e si apprende di più sul sistema, potrebbero essere identificati nuovi requisiti o limitazioni dei dati che richiedono un cambiamento nelle procedure di raccolta dei dati in modo che gli obiettivi dello studio siano comunque raggiunti.

- La valutazione degli impatti consente di quantificare gli impatti ambientali potenziali associati ai flussi di materia, energia e rifiuti identificati nella fase precedente. Inoltre, consente di aggregare gli impatti per categoria e per fase del ciclo di vita.
- L'interpretazione dei risultati ottenuti implica un'analisi allo scopo di identificare le fasi del ciclo che maggiormente contribuiscono agli impatti ambientali valutati rispetto a parametri di riferimento o a obiettivi di sostenibilità. Questo permette di individuare le potenziali opportunità di miglioramento ambientale.
- L'ultima fase consiste nel redigere un report che descriva in modo chiaro e completo le fasi del processo, i dati raccolti, i risultati ottenuti e le conclusioni raggiunte. Tale report dovrà poi essere comunicato alle parti interessate.

Oltre alle cinque fasi principali, il processo di realizzazione della PEF può includere anche un piano di miglioramento [3].

2.1.1 Obiettivo e scopo

La definizione degli obiettivi rappresenta la prima fase di uno studio PEF e consente di definire il contesto generale dello studio stesso. La chiarezza degli obiettivi è fondamentale per garantire la coerenza tra obiettivi, metodi, risultati e applicazioni previste. Inoltre, favorisce il raggiungimento di un obiettivo comune. Il metodo PEF implica che alcuni aspetti

della definizione degli obiettivi siano decisi a priori. Nella definizione degli obiettivi occorre individuare le applicazioni previste e il grado di profondità e rigore analitico dello studio.

Lo scopo dello studio PEF descrive nel dettaglio il sistema che deve essere valutato e le specifiche tecniche. La sua definizione dovrà essere in linea con gli obiettivi definiti dallo studio e dovrà includere l'unità funzionale, il confine di sistema, le categorie di impatto e limitazioni.

Nello specifico, l'unità funzionale rappresenta la prestazione principale del prodotto, espressa in termini quantitativi e qualitativi. Essa definisce "cosa" viene analizzato e fornisce un riferimento univoco a cui rapportare tutti i flussi di materia, energia e rifiuti associati al ciclo di vita del prodotto. Il flusso di riferimento, invece, quantifica la quantità di prodotto necessaria per soddisfare l'unità funzionale definita rappresentando la quantità di prodotto su cui si basano i calcoli dell'impatto ambientale.

Il confine del sistema definisce quali parti del ciclo di vita del prodotto e quali fasi e processi del ciclo di vita associati appartengono al sistema analizzato, ad eccezione di quei processi esclusi in base alla regola di cut-off. Queste esclusioni vengono solitamente applicate ad input del sistema ritenuti non significativi.

Lo scopo della valutazione dell'impatto del ciclo di vita è raggruppare i dati LCI raccolti in base ai rispettivi contributi in ciascuna categoria di impatto ambientale.

2.1.2 Life cycle inventory (LCI)

Come base per la modellazione PEF è necessario che venga compilato un inventario di tutti i materiali, energia e rifiuti in ingresso e in uscita e delle emissioni per la catena di approvvigionamento del prodotto. Questa fase viene chiamata Life Cycle Inventory (LCI).

L'inventario del ciclo di vita nella metodologia PEF si basa su una classificazione ben definita dei flussi di materia ed energia che attraversano il sistema oggetto di studio. Questa classificazione distingue tra due categorie principali:

- I flussi elementari sono definiti come "materiale o energia che entra nel sistema oggetto di studio e che è stato estratto dall'ambiente senza precedente trasformazione umana, o materiale o energia che esce dal sistema oggetto di studio e che viene rilasciato nell'ambiente senza successiva trasformazione umana" [4]. Rappresentano quindi, le risorse primarie prelevate dall'ambiente o le emissioni direttamente rilasciate nell'ambiente.
- I flussi non elementari, invece, richiamano tutti gli altri input e output di un sistema che non sono flussi elementari e per essere trasformati in questi richiedono sforzi di modellazione.

Questa distinzione tra i flussi nell'inventario è fondamentale per identificare chiaramente le risorse prelevate dall'ambiente e le emissioni in esso rilasciate, facilitando la comprensione e l'interpretazione dei risultati dell'analisi. La modellazione LCI è quindi completata solo quando tutti i flussi non elementari sono espressi come flussi elementari.

Nella metodologia PEF la fase di fine vita inizia quando il prodotto e il suo imballaggio vengono scartati dall'utente finale e termina quando il prodotto stesso ritorna all'ambiente come rifiuto o entra a far parte del ciclo di vita di un altro prodotto. La fase di fine vita include la gestione di tutti i rifiuti generati dal prodotto, non solo quelli derivanti dall'utente finale. Pertanto, occorre considerare anche i rifiuti prodotti in tutte le fasi del ciclo di vita, dalla produzione alla distribuzione, fino alla vendita al dettaglio e all'utilizzo.

2.1.3 LCIA

La Valutazione dell'Impatto del Ciclo di Vita (LCIA) ha l'obiettivo di raggruppare e aggregare i dati raccolti nella fase di inventario. Questo processo mira a trasformare i numerosi dati quantitativi dell'LCI in informazioni sintetiche e comprensibili, relative all'impatto ambientale complessivo del prodotto in esame.

La classificazione rappresenta una fase cruciale nella metodologia PEF, con l'obiettivo di collegare i flussi di materia ed energia raccolti nella fase di inventario alle relative categorie di impatto dell'impronta ambientale. In alcuni casi, un input o un output possono contribuire a più di una categoria di impatto.

Con caratterizzazione si intende la fase che segue la classificazione ed ha l'obiettivo di quantificare il contributo di ciascun flusso di materia ed energia alle diverse categorie di impatto. Permette di trasformare dati quantitativi dell'inventario, espressi in unità fisiche, in valori che rappresentano l'impatto potenziale di ciascun flusso sulle diverse categorie di impatto. La caratterizzazione avviene dapprima moltiplicando il valore fisico di ciascun flusso LCI per un fattore di caratterizzazione specifico per la categoria di impatto a cui è stato assegnato. I fattori di caratterizzazione sono valori numerici che convertono le unità fisiche in unità equivalenti che riflettono la relativa gravità in termini di impatto ambientale. Dopodiché, per ogni categoria di impatto, vengono sommati i contributi di tutti i flussi LCI classificati. Il risultato così ottenuto rappresenta l'impatto ambientale complessivo del prodotto in quella specifica categoria. La scelta di fattori di caratterizzazione affidabili e aggiornati è fondamentale per garantire la robustezza dei risultati dell'analisi. Inoltre, è importante seguire le linee guida specifiche per la caratterizzazione definite nella metodologia PEF per garantire la comparabilità dei risultati tra studi diversi.

2.1.4 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione dei risultati di uno studio PEF rappresenta un passaggio fondamentale per estrarre valore dall'analisi e raggiungere gli obiettivi prefissati. Due aspetti chiave guidano questo processo:

- il primo è garantire che le prestazioni del modello PEF corrispondano agli obiettivi e ai requisiti di qualità dello studio. In questo senso, l'interpretazione del ciclo di vita può ispirare miglioramenti iterativi del modello PEF fino al raggiungimento di tutti gli obiettivi e requisiti;
- il secondo scopo è trarre conclusioni e raccomandazioni valide dall'analisi, a sostegno dei miglioramenti ambientali.

Richiede una comprensione profonda del contesto, degli obiettivi dello studio e delle implicazioni ambientali dei risultati ottenuti. L'interpretazione delle informazioni contenute nello studio PEF consente di ottenere uno strumento per il miglioramento ambientale e la comunicazione di valore.

Occorre precisare che la Product Environmental Footprint non è stata ideata con lo scopo di sostituire la Life Cycle Assessment, ma rappresenta uno strumento specifico pensato per il contesto europeo. Può essere considerato come una versione semplificata dell'LCA così da poter facilitare la comprensione dell'impronta ambientale di un prodotto da parte di un pubblico più ampio.

I risultati ottenuti, tramite l'applicazione della PEF, possono dirsi comparabili con quelli derivanti da un'analisi LCA unicamente se si basano sulle stesse regole di categoria dell'impronta ambientale (PEFCR). Infatti, negli ultimi anni, la crescente domanda di questo strumento da parte di aziende, governi e consumatori, che indica un impegno sempre maggiore verso la sostenibilità in tutti i settori della società, ha però generato un bisogno di

regole per poter confrontare i risultati di prodotti appartenenti alla stessa categoria. Per tale ragione, è stato sviluppato il PEFCR con lo scopo di fornire indicazioni specifiche per il calcolo dei potenziali impatti ambientali del ciclo di vita dei prodotti.

Nel caso in cui gli studi vengano effettuati su prodotti che non rientrano nell'ambito PEFCR, si può applicare il metodo PEF. Altri due casi in cui è possibile attuarlo sono per lo studio di prodotti non rientranti nel campo di applicazione del PEFCR, con la possibilità di utilizzare i requisiti di questo insieme alla lista dei requisiti del PEFCR applicabile e per lo sviluppo del PEFCR stesso [5].

2.2 CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

La formula dell'impronta circolare (CFF) si basa sull'idea di allocare equamente gli oneri e i crediti ambientali tra i diversi attori coinvolti nel ciclo di vita di un prodotto che utilizza materiale riciclato. Aiuta a determinare quanto carico ambientale (o credito) dovrebbe essere assegnato alle diverse fasi del ciclo di vita di un prodotto, in particolare quando è coinvolto il contenuto riciclato. La formula è suddivisa in tre componenti:

Materiale

$$(1 - R_1)E_V + R_1 * \left[AE_{recycled} + (1 - A)E_V * \frac{Q_{sin}}{Q_p} \right] + (1 - A)R_2 * \left(E_{recyclingEoL} - E_V^* * \frac{Q_{sout}}{Q_p} \right)$$

Energia

$$(1 - B)R_3 * (E_{ER} - LHV * X_{ER,heat} * E_{SE,heat} - LHV * X_{ER,elec} * E_{SE,elec})$$

Smaltimento

$$(1 - R_2 - R_3) * E_D$$

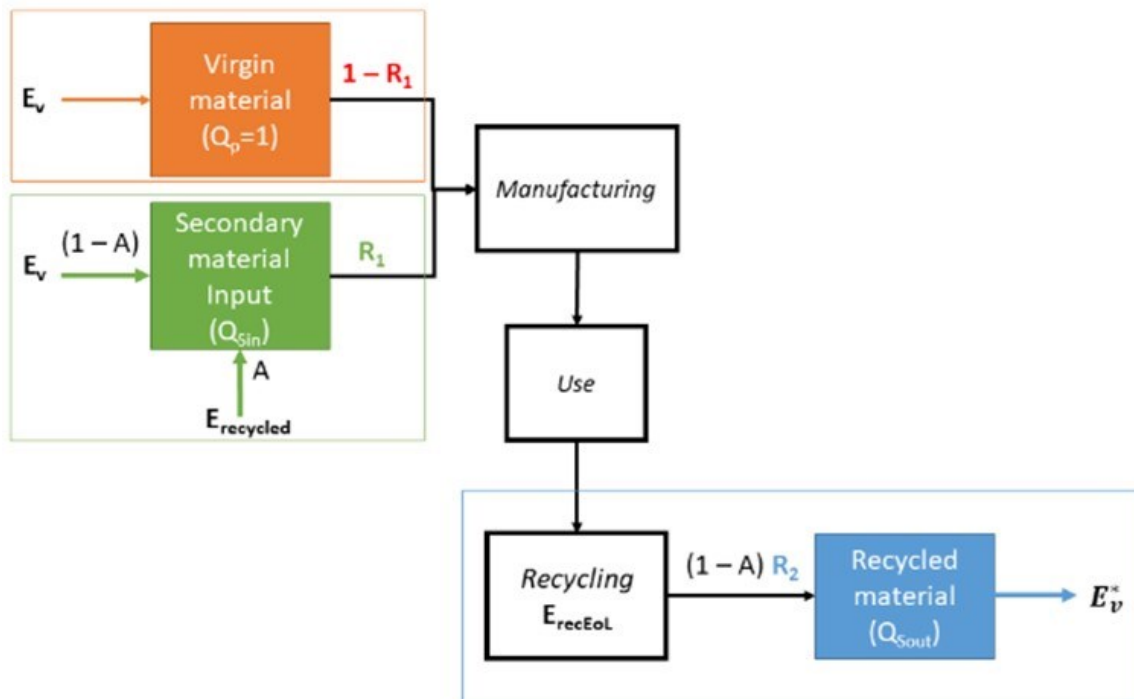


Figura 2: Schema della Circular Footprint Formula

Nella CFF sono utilizzati differenti parametri che consentono di andare a quantificare l'impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita del prodotto. I parametri fondamentali per la corretta applicazione della CFF sono:

- A: fattore di ripartizione degli oneri e dei crediti. Tale parametro consente di definire la suddivisione degli oneri e dei crediti tra i fornitori e gli utilizzatori dei materiali riciclati, fornendo un contributo positivo per la valutazione dell'impatto del riciclo;
- B: fattore di allocazione dei processi di recupero energetico. Definisce la modalità in cui le risorse e le emissioni associate ai processi di recupero energetico vengono allocate all'interno dell'analisi;

- Q_{sin} : qualità del materiale secondario in ingresso. Rappresenta il quantitativo di materiale riciclato all'inizio del processo. Ciò influenza il rendimento complessivo del riciclo;
- Q_{sout} : qualità del materiale secondario in uscita. Esso indica la qualità del materiale riciclato alla fine del processo, fornendo un riferimento per controllare l'efficienza del riciclo;
- Q_p : qualità della materia prima. Esprime la qualità della materia prima vergine, fornendo un riferimento per confrontare l'efficienza del riciclo;
- R_1 : definisce la percentuale di materiale in ingresso che è stato riciclato in un sistema precedente;
- R_2 : definisce la percentuale di materiale prodotto destinato al riciclo successivo;
- R_3 : definisce la percentuale di materiale utilizzata per il recupero energetico;
- E_{rec} : indica le emissioni specifiche e le risorse consumate per unità funzionale durante il processo di riciclaggio;
- E_{recEoL} : emissioni e risorse del riciclo al fine vita. Rappresenta le emissioni specifiche e le risorse consumate dal processo di riciclo alla fine della vita del prodotto;
- E_v : emissioni e risorse dall'acquisizione di materiale vergine. Permette di quantificare le emissioni specifiche e le risorse consumate dal processo di riciclo alla fine della vita del prodotto;
- E_v^* : emissioni e risorse dall'acquisizione di materiale vergine sostitutivo. Consente di valutare le emissioni specifiche e le risorse consumate dall'acquisizione e dalla pre-lavorazione di materiale vergine che potrebbe essere sostituita con materiali riciclabili;

- E_{ER} : emissioni e risorse dal recupero energetico. Misura le emissioni specifiche e le risorse consumate durante il processo di recupero energetico;
- E_{SE} : emissioni e risorse dalla sostituzione di energia. Indica le emissioni e le risorse consumate derivanti dalla specifica fonte di energia sostitutiva, come calore ed energia;
- E_D : emissioni e risorse dallo smistamento dei rifiuti. Valuta le emissioni specifiche e le risorse consumate nello smistamento del materiale di scarto alla fine della vita del prodotto, senza recupero energetico;
- X_{ER} : efficienza del processo di recupero energetico. Rappresenta l'efficienza complessiva del processo di recupero energetico, includendo sia l'aspetto termico che elettrico;
- LHV: potere calorifico inferiore del materiale per recupero energetico. Indica il potere calorifico inferiore del materiale presente nel prodotto utilizzato per il recupero energetico.

Questi parametri consentono di sviluppare un quadro completo per la valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto, consentendo così di identificare e migliorare aspetti specifici del ciclo di vita per promuovere la sostenibilità ambientale.

È importante, per l'utilizzo del metodo PEF, che gli utenti comunichino tutti i parametri. Il fattore A ha un ruolo fondamentale nella ripartizione degli oneri e dei crediti dovuti al riciclo e alla produzione di materiale vergine tra due cicli di vita, ovvero quello di fornitura e quello dovuto all'utilizzo di materiale riciclato. Ha lo scopo di rispecchiare le dinamiche di mercato. Se il fattore A dovesse avere valore unitario rifletterebbe un approccio 100:0, andando ad assegnare tutti i crediti al contenuto riciclato. Una problematica nel metodo PEF è che in

esso non si vanno a considerare i benefici legati alla riciclabilità dei materiali del prodotto di partenza.

Indicativamente il valore di tale fattore deve rientrare nell'intervallo $0,2 \leq A \leq 0,8$ così da poter valutare entrambi gli aspetti del riciclaggio: il contenuto riciclato e la riciclabilità a fine vita. Come detto in precedenza, la determinazione dei valori del fattore A è data dall'analisi di mercato, attraverso le seguenti linee guida:

- $A = 0.2$: indica una bassa offerta di materiali riciclabili a discapito di una elevata domanda di mercato. La formula si concentra sulla riciclabilità a fine vita, avvicinandosi a una proporzione di 0:100, dove il primo valore indica la riciclabilità ed il secondo il contenuto riciclato;
- $A = 0.8$: riflette un'alta offerta di materiali riciclabili ed una bassa domanda. La formula nel seguente caso andrà a privilegiare il contenuto riciclato con una proporzione vicina a 100:0;
- $A = 0.5$: indica un equilibrio tra l'offerta e la domanda. Nel seguente caso la formula cerca un compromesso andando a puntare sia sulla riciclabilità a fine vita che sul contenuto riciclato.

Essendo dipendente dal mercato, il fattore A consente una flessibilità capace di adattarsi alle variazioni nell'offerta e nella domanda di materiali riciclabili. Questo approccio mira a riflettere le diverse realtà del mercato per ottenere una valutazione più accurata dell'impatto ambientale dei prodotti.

Il fattore B ha la funzione di fattore di allocazione per i processi di recupero energetico, applicandosi sia agli oneri che ai crediti nell'ambito degli studi della PEF.

I rapporti di qualità, espressi come $\frac{Q_{sin}}{Q_p}$ e $\frac{Q_{sout}}{Q_p}$, rappresentano un elemento fondamentale nella CFF, poiché permettono di valutare la qualità sia dei materiali riciclati in ingresso che in uscita. Questi rapporti sono significativi in due contesti distinti:

1. Rapporto $\frac{Q_{sin}}{Q_p}$ associato al contenuto riciclato: questo è importante nel caso di un'uguaglianza tra E_v e E_v^* . Sono necessari entrambi i rapporti di qualità per catturare sia la qualità dei materiali riciclati in ingresso che il rapporto associato alla riciclabilità al fine vita.
2. Caso specifico dei processi di sostituzione (By-product) dove risulta essere fondamentale considerare entrambi i rapporti di qualità per garantire una valutazione accurata.

L'approccio utilizzato per la determinazione dei rapporti di qualità nella CFF è flessibile, consentendo di adattarsi alle specificità delle situazioni economiche e fisiche in cui vengono impiegati. Questo consente di ottenere una valutazione completa delle implicazioni ambientali dei materiali riciclati in un contesto di Carbon Footprint.

La formula CFF rappresenta un compromesso tra gli approcci 100:0 e 0:100, garantendo una prospettiva più equilibrata sull'impatto ambientale dei prodotti nell'economia circolare.

In generale, la formula dell'impronta circolare rappresenta un prezioso strumento per valutare l'impatto ambientale dei prodotti nel contesto dell'economia circolare. Tuttavia, è importante riconoscerne i limiti, considerando attentamente la scelta del fattore di allocazione e la qualità dei dati disponibili.

Oltre a quanto detto sopra, è importante sottolineare che la formula CFF è ancora in fase di sviluppo e perfezionamento. Sono in corso ricerche per migliorare la sua accuratezza e la sua applicabilità a una più ampia gamma di prodotti e sistemi [5].

Inoltre, è importante ricordare che l'LCA è solo uno degli strumenti a disposizione per valutare la sostenibilità di un prodotto. L'analisi deve essere integrata con altre considerazioni, come gli aspetti sociali ed economici, per ottenere una valutazione completa del prodotto.

2.3 LIMITI E DIFFICOLTA' NEL REPERIMENTO DI DATI

È importante sottolineare come, in un'ottica di Product Environmental Footprint, possa risultare complesso reperire dati ed informazioni. Infatti, la scarsa disponibilità dei dati può essere causata dal fatto che non tutte le aziende effettuino un'analisi PEF o non comunichino i risultati qualora dovessero eseguirla. Di conseguenza, i dati disponibili potrebbero essere non completi o non comparabili, con metodologie di calcolo differenti tra le aziende. Inoltre, la mancanza di dati a livello di singole componenti o materiali, ostacolano la valutazione dell'impatto di specifici aspetti del prodotto.

La metodologia PEF, basata sull'analisi LCA, è articolata e richiede competenze specifiche per la sua applicazione, che non tutte le aziende possiedono, e l'interpretazione dei risultati della PEF può essere complessa, data la molteplicità di indicatori utilizzati.

Un'altra considerazione che è opportuno fare è data dalla mancanza di standardizzazione. Infatti, attualmente non esiste un formato univoco per la presentazione dei dati PEF. Questo genera un ostacolo nel momento in cui sia necessario eseguire un confronto. Inoltre, le categorie di prodotto e gli indicatori utilizzati possono variare in dipendenza dallo studio generando confusione.

In generale è importante puntualizzare come una mancanza di una piattaforma centralizzata per la raccolta e la consultazione dei dati ostacoli la trasparenza e la comparabilità.

Nonostante questo, si stanno realizzando diverse iniziative miranti a migliorare la disponibilità e la qualità dei dati. La Commissione Europea ha definito quali siano i requisiti per un'analisi PEF con l'obiettivo di armonizzare le metodologie di calcolo e la prestazione dei dati. Diverse organizzazioni stanno sviluppando database di dati PEF; quello sviluppato dalla Commissione Europea prende il nome di Product Environmental Footprint Database. Inoltre, sono stati sviluppati strumenti online per facilitare il calcolo della PEF da parte delle aziende e la valutazione da parte dei consumatori. La maggiore disponibilità e accessibilità di dati PEF di alta qualità è fondamentale per promuovere la produzione e il consumo di prodotti più sostenibili, riducendo l'impatto ambientale del ciclo di vita dei prodotti.

CAPITOLO 3

MODELLAZIONE EFFETTUATA TRAMITE SIMAPRO

3.1 DISTINTA BASE DEL PRODOTTO ATM SD400

L'ATM SD400 prodotto dall'azienda italiana Sigma S.p.A. è un dispositivo di automazione bancaria (Automated Teller Machine) progettato per offrire una vasta gamma di servizi finanziari ai clienti in modo rapido, sicuro e conveniente. Sigma S.p.A. è un'azienda italiana con sede a Fano, nelle Marche, specializzata nella progettazione, realizzazione e fornitura di soluzioni e servizi nel settore dell'automazione bancaria, dei sistemi di biglietteria self-service e del pedaggio.

L'azienda ha fornito la distinta base del macchinario (BOM – Bill Of Materials), documento che elenca tutti i componenti, i sottoassiemi, i semilavorati e le materie prime necessari per realizzare un prodotto finito, come punto di partenza per effettuare la modellazione. Il software di modellazione per effettuare l'analisi LCA utilizzato è stato SimaPro v9.1.

LIVELLO	CODICE	DESCRIZIONE	UM	QTA	MATERIALE	LAVORAZIONI PRINCIPALI	LAVORAZIONI SECONDARIE
1		CONFIGURAZIONE BASE ST400EVO	N° pezzi	1			
2		GR. CABINET ST400 EVO	N° pezzi	1			
3	##	SENS TEMP METAL RING -40+125°C	N° pezzi	1		componente elettrico	/
3	##	FASCETTA RICCO UMS-24-45	N° pezzi	16	Nylon 6/6	injection moulding	/
3	##	SPIRALINA RICCO HW-10-12-PE	metri	0,15	Nylon 6/6	/	/
3	##	INTERRUTTORE I4720 OMEGA	N° pezzi	1	70% TP: 30% Steel, chromium steel 18/8	Vedi allegato	/
3	##	INTERRUTTORE BIPOLARE DPTD I4700	N° pezzi	1	70% TP: 30% Steel, chromium steel 18/8	Vedi allegato	/
3	##	PULSANTE DPTD 10A	N° pezzi	1	70% TP: 30% Steel, chromium steel 18/8	Vedi allegato	/
3	##	CAVO VENTOLA ST400 ON/OFF	N° pezzi	1		componente elettrico	/
3	##	CAVO VGA M/M 0,5m	N° pezzi	1		componente elettrico	/
3	##	ATTACCO CON FORO Ø80.16.1	N° pezzi	1	PA6	injection moulding	/
3	##	CATENA P. CAVI E88.16.028 L.800	N° pezzi	1	PA6	injection moulding	/
3	##	GUIDA SOLAR 13mm 700/910	N° pezzi	1	Steel, low-alloyed	Zinc coat, pieces	/
3	##	SUPPORTO PANNELLO OPERATORE 7"	N° pezzi	1	Steel, low-alloyed	Laser machining, metal, with CO2-laser, 2000W power; Bending 360 kN; Weld	Zinc coat, coils
3	##	SUPP. GUIDE STAMPANTE TICKET	N° pezzi	1	Steel, low-alloyed	Laser machining, metal, with CO2-laser, 2000W power; Bending 360 kN	Zinc coat, coils
3	##	PIASTRINA CONTATTO DI MASSA	N° pezzi	1	Steel, chromium steel 18/8	Laser machining, metal, with CO2-laser, 2000W power	/
3	##	GUARN. PIVILENE ADES. L.18 S.15	N° pezzi	1	Pivylene	estrusione	/
1	##	CARTER SCHEDA LED	N° pezzi	1	Steel, low-alloyed	Laser machining, metal, with CO2-laser, 2000W power; Bending 360 kN	Zinc coat, pieces
3	##	TORNETTA M3x20 M/F h1=6 S=5,5	N° pezzi	2	Brass	Steel removed by turning, average, computer numerical controlled	/

Figura 3: BOM dell'ATM SD400

All'interno della BOM sono contenute diverse informazioni che consentono di andare a realizzare il prodotto.

Il codice identificativo rappresenta un codice univoco assegnato ad ogni componente all'interno di una distinta base. Consente di distinguere un componente da tutti gli altri

identificandolo in modo univoco, indipendentemente dalla sua posizione nella gerarchia della distinta base o dal numero di volte che viene utilizzato. Inoltre, può essere utilizzato per collegare il componente ad altre informazioni come la sua descrizione, la quantità, il costo unitario e il fornitore. Oltre a tracciare il componente durante il processo di produzione e della ricezione dei materiali all'assemblaggio finale del prodotto, il codice identificativo può essere utilizzato per gestire le scorte dei componenti.

La sua struttura può variare a seconda delle specifiche dell'azienda. Tuttavia, include: un codice univoco del componente e della distinta base a cui appartiene, il livello del componente nella gerarchia della distinta ed alcune aziende possono inserire altre informazioni quali il codice identificativo del materiale. Viene assegnato automaticamente dal sistema software utilizzato per la gestione della distinta base oppure manualmente.

La descrizione del componente nella distinta base è una sezione che fornisce dettagli sul singolo elemento all'interno. Lo scopo principale è fornire informazioni utili sia per la gestione che per l'utilizzo. Una descrizione ben strutturata, infatti, diventa fondamentale per avere una migliore identificazione e tracciabilità del componente, fornire informazioni chiare sul componente e tutti i soggetti coinvolti nel processo produttivo garantendo una migliore comunicazione ed una corretta gestione del componente stesso. Una descrizione dettagliata aiuta a ridurre gli errori nella selezione, nell'approvvigionamento e nell'utilizzo del componente corretto, evitando sprechi di tempo e denaro.

Il costo unitario del componente nella distinta base è il costo associato a una singola unità di un determinato componente. È un'informazione fondamentale per la stima del costo complessivo del prodotto finito e per la gestione degli approvvigionamenti. Può variare a seconda della complessità del componente e del sistema utilizzato per la gestione della distinta base. È possibile calcolare il costo unitario di un componente sommando il costo del

materiale usato per realizzarlo, il costo della manodopera impiegata per produrre il componente stesso ed i costi indiretti associati alla produzione del componente che includono i costi delle attrezzature, dell'energia e del trasporto.

Il costo unitario svolge un ruolo importante per la stima del costo complessivo del prodotto finito, ottenuto sommando i costi unitari di tutti i componenti utilizzati per la realizzazione del prodotto. Inoltre, aiuta a controllare i costi di produzione e a identificare eventuali scostamenti rispetto al budget. Un calcolo accurato e aggiornato del costo unitario dei componenti permette di prendere decisioni informate, ottimizzare i processi e migliorare la redditività dell'azienda.

L'elenco dei fornitori dei componenti è una sezione che consente di identificare le aziende da cui è possibile acquistare ciascun componente utilizzato per realizzare il prodotto finito. Selezionare in modo accurato il fornitore permette di assicurarsi che i componenti siano sempre disponibili per la produzione evitando ritardi ed interruzioni del processo produttivo, favorendo la comparazione dei prezzi tra diversi fornitori. Tale informazione diventa essenziale in un'ottica di analisi LCA in quanto consente di determinare la distanza tra il fornitore e la sede di produzione così da valutare le emissioni prodotte dal trasporto dei componenti.

Oltre a fornire una panoramica completa dei componenti necessari per realizzare un prodotto, la distinta base include dettagli importanti per la realizzazione del prodotto finito. La massa di ogni singolo componente e del prodotto finito è fondamentale per la stima del peso complessivo e per il calcolo delle forze durante il suo utilizzo. La densità dei materiali impiegati è un dato importante per la valutazione del volume occupato dal prodotto e per l'ottimizzazione degli imballi.

Le lavorazioni e i trattamenti del componente nella distinta base (BOM) descrivono le operazioni che devono essere eseguite per trasformarlo dalla materia prima nella forma e nelle caratteristiche desiderate per il prodotto finito.

In un'ottica di analisi LCA di un prodotto, le lavorazioni e i trattamenti a cui sono sottoposti i componenti durante il loro ciclo di vita possono avere un impatto significativo sull'ambiente. L'analisi permette di individuare le fasi del ciclo di vita che generano i maggiori impatti ambientali.

3.2 MODELLAZIONE IN SIMAPRO

Il concetto del ciclo di vita è un concetto basilare che si riferisce alla necessità di valutare gli oneri e i benefici associati a prodotti, settori e progetti adottando una prospettiva del ciclo di vita, ovvero dall'estrazione delle materie prime alla fine della vita. Questo concetto può essere applicato per valutare i pilastri ambientali, economici e sociali di un prodotto o un servizio. Il pilastro ambientale riferito al ciclo di vita è supportato principalmente dalla metodologia LCA. Rispetto ad altre metodologie con una prospettiva più limitata, la LCA ha il vantaggio di tenere conto del potenziale spostamento degli oneri tra le fasi del ciclo di vita e tra gli impatti ambientali, consentendo una valutazione completa e sistematica.

Nell'effettuare l'analisi LCA del prodotto fornito dall'azienda Sigma diventa di necessaria importanza conoscere, partendo dalla distinta base, la suddivisione dei componenti in sottoassiemi che permettono di ottenere il prodotto finito.

Partendo dal presupposto che il software utilizzato per l'analisi LCA sia già fornito di Ecoinvent nella v3.6 [6], database più completo presente in commercio, e che segua una logica basata sul diagramma ad albero, è stato riprodotto l'ATM all'interno di SimaPro.

3.2.1 Obiettivo ed ambito

All'avvio di SimaPro viene richiesto di aprire un progetto o una libreria. Il progetto è un'area in cui vengono memorizzati i dati che si stanno per raccogliere ed elaborare. Una libreria invece è un tipo speciale di progetto che contiene al suo interno dati standard forniti con SimaPro o altri fornitori di dati. Dapprima si crea nel dettaglio la descrizione del prodotto che si vuole modellare nel software, inserendo il nome e l'utente che sta lavorando al progetto. Dopo questo primo passaggio, è necessario selezionare la banca dati usata tra quelle proposte dal software. In questo caso si è scelto di utilizzare Ecoinvent v3.6, database globale di dati LCA che fornisce informazioni quantitative sugli impatti ambientali di prodotti, processi e attività. È uno dei database LCA più utilizzati al mondo ed include dati su ampia scala coprendo diversi settori industriali e geografici. Inoltre, i dati sono sottoposti a rigorosi controlli di qualità per garantire la loro accuratezza ed affidabilità, questo è possibile anche grazie ad un regolare aggiornamento.

Oltre ai criteri per i confini del sistema può essere fissata una soglia al di sotto della quale non viene considerata la raccolta dei dati per un possibile input o output. Su SimaPro è possibile studiare l'effetto dei diversi confini di sistema, usando i parametri per passare da un confine ad un altro.

3.2.2 LCI

La sezione dedicata all'inventario fornisce l'accesso ai processi e alle fasi del prodotto che rappresentano le due principali tipologie di dati in SimaPro. La descrizione del sistema viene usata come documentazione aggiuntiva in alcuni processi.

La qualità dei dati di inventario può essere strutturata in base alla rappresentatività, completezza, precisione e adeguatezza e coerenza. In un concetto di "qualità dei dati" la

componente con un peso maggiore è la rappresentatività. Infatti, lo scopo dell'LCA è quello di riflettere la realtà fisica di una catena di fornitura esistente o di una futura catena di fornitura teorica guidata da meccanismi di mercato. Questo implica che i modelli del ciclo di vita devono essere conformi a ciò che accade realmente o che si preveda che accada.

La capacità dei dati di inventario di rappresentare accuratamente gli impatti ambientali di un sistema è fondamentale per una valutazione affidabile. In questo contesto, due aspetti strettamente correlati assumono un ruolo chiave: la rappresentatività e l'adequatezza. La rappresentatività si concentra sul grado in cui i dati raccolti riflettono il "vero" scenario del processo oggetto di analisi. Questo implica la considerazione di tre dimensioni:

- Tecnologia: i dati devono rispecchiare le tecnologie effettivamente impiegate nel processo considerando eventuali innovazioni o modifiche apportate nel tempo;
- Geografia: l'origine geografica dei materiali, delle componenti e delle emissioni associate al processo deve essere accuratamente rappresentata;
- Tempo: i dati devono riferirsi a un periodo di tempo definito e rappresentativo del normale funzionamento del sistema.

Una scarsa rappresentatività può portare a conclusioni errate e fuorvianti sull'impatto ambientale del sistema, con potenziali conseguenze negative per la presa di decisioni e la gestione ambientale.

L'adequatezza valuta se la scelta e la quantità di dati raccolti sono sufficienti a descrivere correttamente gli impatti ambientali del sistema. Questo aspetto considera:

- Livello di dettaglio: la granularità dei dati deve essere appropriata per cogliere gli impatti significativi, evitando una raccolta eccessiva di informazioni non pertinenti;
- Incertezza: la variabilità e l'incertezza associate ai dati devono essere valutate e considerate nella valutazione complessiva dell'impatto ambientale;

- Qualità dei dati: i dati devono essere attendibili, consistenti e provenienti da fonti credibili.

Un'analisi con dati inadeguati può portare a una sottostima o a una sovrastima degli impatti ambientali, ostacolando la comprensione completa del reale profilo ambientale del sistema. La combinazione di rappresentatività e adeguatezza garantisce che i dati di inventario forniscano la base per una valutazione accurata e affidabile degli impatti ambientali di un sistema. È importante sottolineare che la rappresentatività e l'adeguatezza dei dati di inventario sono concetti dinamici che possono richiedere una revisione periodica, in considerazione di cambiamenti nel sistema, nelle tecnologie o nelle normative.

I dati in SimaPro sono strutturati in modo tale da poter distinguere tra dati rilevanti solo per l'attuale progetto LCA e dati che possono essere utili in qualsiasi progetto. Quest'ultimo tipo viene archiviato in delle librerie e non nel progetto. Per poter effettuare l'analisi, si vanno a raccogliere dati quantitativi sui flussi di materiali ed energia associati al prodotto o processo. In questo caso le fonti dei dati possono includere fornitori, banche dati LCA commerciali come Ecoinvent e misurazioni dirette eseguite in azienda. Se si dovesse necessitare di dati dalla libreria, come Ecoinvent, occorre tenere in considerazione che non si tratterebbe di dati di tipo primario, ma dati secondari, perdendo quindi nell'accuratezza dell'analisi stessa. È possibile anche apportare modifiche ai dataset presenti nelle librerie commerciali andando a copiarli e modificando la copia. Questo potrebbe essere utile, ad esempio, per adeguare un particolare processo ad un contesto geografico diverso.

Ogni processo è fornito in due versioni: unitario e di sistema. Si è liberi di scegliere quello più opportuno senza influenzare i risultati finali. Tuttavia, è opportuno fare delle considerazioni da tenere presente quando si sceglie la versione migliore per il progetto analizzato. Una versione di processo unitario contiene solo emissioni e input di risorse da

una fase di processo e riferimenti a input di altri processi unitari. Quando viene scelto il processo di sistema tutte le emissioni sono contenute nel processo stesso senza riferimenti ad altri. Può essere considerato come una scatola nera. In generale, verranno utilizzati i processi di sistema negli screening LCA.

I database di input-output contengono dati per settore economico anziché per processo come avviene nei database convenzionali. Il vantaggio di utilizzare questo tipo di dati è che si ha una valutazione per un'intera economia. Lo svantaggio è che il risultato potrebbe non essere sufficientemente specifico per le domande di ricerca. Il motore di calcolo di SimaPro utilizza un metodo iterativo per calcolare le reti di processo. Ciò ha il vantaggio di poter calcolare anche strutture di dati "in loop". È possibile visualizzare i dati non in loop in SimaPro in due modi: una struttura ad albero gerarchica e una struttura a rete. In una struttura ad albero, ogni processo viene mostrato con i suoi input. Se ad un processo si collegano due input, questo viene mostrato due volte e per questo motivo è un metodo poco efficiente di mostrare i dati. In una struttura a rete, invece, ogni processo viene mostrato una sola volta. La differenza più importante è che la struttura ad albero non può essere utilizzata se i dati vengono eseguiti in loop. Se saranno presenti, SimaPro genererà automaticamente una struttura a rete.

La parte più importante della fase LCI è la costruzione di un albero dei processi che descriva quelli rilevanti in un ciclo di vita. La struttura dei dati in SimaPro contiene due principali elementi costitutivi:

1. I processi sono gli elementi costitutivi dell'albero contenenti dati ambientali, nonché dati sugli input economici e output;
2. Le fasi del prodotto non contengono informazioni ambientali, ma consentono di descrivere il prodotto nel suo intero ciclo di vita.

Un processo in SimaPro contiene dati su: flussi ambientali e sociali (emissioni, rifiuti solidi, utilizzo di materie prime), flussi economici (input da altri processi, output economici, uscite di rifiuti per ulteriori trattamenti), parametri (costanti che possono essere definiti a livello di processo, progetto e database).

The screenshot shows the SimaPro software interface with the 'Input/output' tab selected. The interface is divided into several sections, each containing a table for data entry. Blue callout boxes provide additional information about the data entry fields and their relationships.

- Known outputs to technosphere. Products and co-products:** This section contains a table with columns for Name, Amount, Unit, Quantity, Allocation %, and Category. A callout box states: "Quattro schede danno accesso alla documentazione, input/output, parametri e descrizione del sistema".
- Known outputs to technosphere. Avoided products:** This section contains a table with columns for Name and Amount. A callout box states: "Elabora output, qui puoi specificare più output e utilizzare le percentuali di allocazione".
- Inputs:** This section contains a table with columns for Name, Sub-compartment, Amount, Unit, Distribution, and SD. A callout box states: "I prodotti evitati (espansione dei confini del sistema) vengono sottratti dagli impatti totali".
- Emissions to air, Emissions to water, Emissions to soil:** These sections contain tables with columns for Name, Sub-compartment, Amount, Unit, Distribution, and SD. A callout box states: "Risorse estratte dalla natura".
- Final waste flows:** This section contains a table with columns for Name, Sub-compartment, Amount, Unit, Distribution, and SD. A callout box states: "Input da altri processi, qui ti colleghi ad altri record di processo SimaPro. È possibile separare gli input con e senza un'unità di massa".
- Non material emissions:** This section contains a table with columns for Name, Sub-compartment, Amount, Unit, Distribution, and SD. A callout box states: "Emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo, nonché flussi di rifiuti, parametri sociali e parametri economici".
- Social issues, Economic issues:** These sections contain tables with columns for Name, Sub-compartment, Amount, Unit, Distribution, and SD. A callout box states: "Rifiuti che vengono trattati. Qui è possibile collegarsi a un'emissione o a un rifiuto solido un processo di trattamento dei rifiuti in SimaPro".
- Known outputs to technosphere. Waste and emissions to treatment:** This section contains a table with columns for Name, Amount, Unit, Distribution, and SD. A callout box states: "Rifiuti che vengono trattati. Qui è possibile collegarsi a un'emissione o a un rifiuto solido un processo di trattamento dei rifiuti in SimaPro".

Figura 4: Esempio di processo in SimaPro

Nella figura n.4 è possibile vedere un esempio di processo rappresentato in SimaPro. Esso costituisce l'elemento base per gli alberi di processo.

Le fasi di prodotto vengono usate per descrivere la struttura del prodotto, la fase di utilizzo e il percorso di smaltimento del prodotto stesso. Ogni fase può fare riferimento sia a dei processi sia ad altre fasi del prodotto. All'interno di SimaPro, l'elemento denominato fasi del prodotto è suddiviso in cinque diverse fasi di prodotto, ciascuna con la propria struttura:

- Assiemi (elenco dei materiali e sottoassiemi, elenco dei processi di produzione, trasporto ed energia). L'assemblaggio può essere inteso come la definizione del prodotto. In caso di prodotti complessi gli assiemi possono essere collegati ad altri sottoassiemi;
- Cicli di vita: contengono collegamenti ad assieme, processi di utilizzo, scenario di smaltimento o rifiuti ed eventuali cicli di vita aggiuntivi, ed è per questo che sono utili per riassumere il ciclo di vita di un prodotto nella sua interezza;
- Scenari di smaltimento: consentono di descrivere il processo di fine vita di interi prodotti che possono essere ancora riutilizzati oppure disassemblati. SimaPro contiene al suo interno anche scenari di rifiuti che permettono di descrivere i flussi di rifiuti in termini di materiali e non di prodotto;
- Disassemblaggi: descrivono lo smontaggio dei componenti;
- Riutilizzo: descrive il modo in cui i prodotti possono essere riutilizzati.

Il prodotto, l'ATM SD400 dell'azienda Sigma, è stato riportato in SimaPro seguendo le indicazioni fornite dalla distinta base, come visibile nella Figura n.5. All'interno del progetto, è stata creata una categoria per ciascun assieme e sono stati riportati i singoli componenti in base al livello di appartenenza. Per ciascun componente è stato identificato il materiale e le lavorazioni sia primarie che secondarie importando da Ecoinvent i dati di riferimento [7].



Figura 5: BOM riportata in SimaPro

Questi collegamenti sono stati possibili formulando delle ipotesi sulla base del luogo di provenienza del componente ed il metodo di analisi LCA; in questo caso si è scelto Cut-off, che fa riferimento all'approccio di allocazione del riciclo di materiale già citato 100:0, nella versione unitaria. Nelle tabelle a seguire sono stati riportati i dataset di Ecoinvent sia per i materiali più comuni che per la componentistica elettronica.

Tabella 1: Materiali nel dataset di Ecoinvent

MATERIALE	ECOINVENT v3.6
Aluminium	Aluminium, primary, ingot {RoW} market for Cut-off, U
ABS	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for Cut-off, U
Steel chromium 18/8	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for Cut-off, U
Steel low-alloried	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, U
Nylon 6	Nylon 6 {RER} market for nylon 6 Cut-off, U
Nylon 6-6	Nylon 6-6 {RER} market for nylon 6-6 Cut-off, U

Glass	Flat glass, coated {RoW} market for flat glass, coated Cut-off, U
Rubber	Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U
Brass	Brass {RoW} market for brass Cut-off, U

Tabella 2: Componenti elettronici nel dataset di Ecoinvent

ELEMENTI	ECOINVENT v3.6
Cavi	Cable, unspecified {GLO} market for Cut-off, U
Schede	Printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface {GLO} market for Cut-off, U
LED	Light emitting diode {GLO} market for Cut-off, U
Elettronica	Electronic component, active, unspecified {GLO} market for Cut-off, U

Per quanto riguarda le lavorazioni, sia primarie che secondarie, sono state effettuate le ipotesi riportate nella tabella n.3

Tabella 3: Lavorazioni nel dataset di Ecoinvent

LAVORAZIONE	ECOINVENT v3.6
Injection moulding	Injection moulding {GLO} market for Cut-off, U
Zinc coat, pieces	Zinc coat, pieces {GLO} market for Cut-off, U
Laser machining, metal, with co2-laser, 2000w power	Laser machining, metal, with CO2-laser, 2000W power {GLO} market for Cut-off, U
Bending 360 kn	Impact extrusion of steel, cold, 1 strokes {GLO} market for Cut-off, U
Welding, arc, steel	Welding, arc, steel {GLO} market for Cut-off, U
Aluminum removed by milling, average	Aluminium removed by milling, average {GLO} market for Cut-off, U
Zinc coat, coils	Zinc coat, coils {GLO} market for Cut-off, U

Steel removed by turning, average, conventional	Steel removed by turning, average, conventional {GLO} market for Cut-off, U
Powder coat, steel	Powder coat, steel {GLO} market for Cut-off, U

Una componente essenziale per la valutazione dell'impatto all'interno di un'analisi LCA è data dal trasporto dei singoli componenti dalla sede del fornitore fino all'azienda produttrice.

Per semplificare il calcolo, per ciascun assieme sono state fatte le seguenti considerazioni:

1. Anziché il paese o la città in cui a sede l'azienda produttrice, si è calcolata la distanza in chilometri tra il capoluogo di provincia del fornitore e l'azienda Sigma;
2. Si è individuato il peso totale, diviso per provincia, dei componenti spediti andando a moltiplicare il peso del singolo per la quantità necessaria alla realizzazione del macchinario;
3. Per calcolare le emissioni prodotte, si è moltiplicato il peso dei componenti spediti per la distanza.

I passaggi sono mostrati in figura n.6

1	OPZ MINITECH ST400E EXG INTERN	1			Peso	Km	Totale
.2	.PILA ALCALINA 9V ID1604 6LF22	1		63813 Monte Urano FM			
.2	.RAL 9005 ADATTATORE COMBINATOR	1	0,2394	63900 Fermo FM	FM 0,577086	22	12,69589
.2	.SUPP.SWITCH BATTENTI BP	1	0,011348	60022 Castelfidardo AN	AN 0,011348	75	0,8511
.2	.CAVO RDM4682 N°1	1	0,07	63857 Amandola FM	BO 0,001	285	0,285
.2	.SPESSORE SERRATURA MOTORLOCK	2	0,085343	63846 Monte Giberto FM	RM 0,108983	239	26,04694
.2	.CAVO ALIM. KABA AXESSOR ST400	1	0,01	63857 Amandola FM	VR 0,7	388	271,6
.2	.Distanziatore D10.2 H8	1	0,001	40010 Bologna BO			
.2	.CILINDRO BLOCCO SERRATURA	2	0,0405	63846 Monte Giberto FM			
.2	.KIT TAPPO METALLICO COPRITOPPA	1					
..3	..RAL 7035 TAPPO SERRATURA SAFE	1	0,08127	00131 Roma RM			
..3	..RAL 7035 CONTRASTO TAPPO	1	0,027713	00131 Roma RM			
.2	.RONDELLA STEAB D7 d3,2 A3	2	0,003	63900 Fermo FM			
.2	.SERRATURA MINITECH INTERN.+EME	1	0,7	37057 San Giovanni Lupatoto VR			

Figura 6: Calcolo dei trasporti

Una volta eseguiti i calcoli in Excel, si è proceduto con lo scegliere all'interno del dataset di Ecoinvent la tipologia di trasporto corretta. Nella tabella n.4 sono riportate le scelte effettuate ai fini dello studio.

Tabella 4: Trasporti nel dataset di Ecoinvent

TRASPORTO	ECOINVENT V3.6
Via terra europeo	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U
Via terra internazionale	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U
Via mare	Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship Cut-off, U

Durante l'importazione dei dati in SimaPro è fondamentale prestare attenzione alle unità di misura utilizzate. Il database Ecoinvent utilizza la tonnellata per chilometro (tkm) come unità di misura standard. Tuttavia, in questo caso, i dati sono stati elaborati in chilogrammi (kg). Per evitare conversioni non necessarie, si è optato per mantenere l'unità di misura originale, ovvero il chilogrammo per chilometro (kgkm).

3.2.3 Valutazione dell'impatto

Dopo aver terminato la modellazione dell'inventario, il software restituisce una valutazione degli impatti ambientali sulla base della scelta del modello di calcolo utilizzato. All'interno del database di riferimento, ovvero Ecoinvent v3.6, sono molteplici i metodi di calcolo tra cui scegliere. Considerando di trovarci nel contesto europeo, il metodo più accreditato è l'Ecoinvent Footprint (EF) ed è per questo che si è deciso di utilizzarlo per l'analisi. La versione scelta è stata l'EF 3.0. Comprendere a fondo gli effetti ambientali delle nostre attività richiede un approccio multidisciplinare che consideri diversi aspetti. In particolare, la letteratura scientifica si concentra sempre più sull'impatto ambientale generato dai

consumi e dagli stili di vita individuali. SimaPro è fornito con un gran numero di metodi standard di valutazione dell'impatto. Ciascuno di essi contiene solitamente un numero, solitamente compreso tra 10 e 20, di categorie di impatto. Generalmente l'utente seleziona un metodo completo invece di selezionare singole categorie. In ogni caso SimaPro consente di aggiungere o eliminare categorie andando a modificare la copia di un metodo importata all'interno di un progetto [8].

Per valutare l'impatto, l'EF3.0 fa riferimento a diversi indicatori, tra cui:

- Cambiamento climatico [kg CO₂ eq]: si riferisce all'aumento della temperatura media globale a causa delle emissioni di gas serra. Il maggior contributo è dato dalla combustione di combustibili fossili, come petrolio e carbone. Il potenziale di riscaldamento globale di tutte le emissioni di gas serra è misurato in chilogrammi di anidride carbonica equivalente, ovvero tutti i gas serra vengono confrontati con la quantità di potenziale di riscaldamento globale di 1 kg di anidride carbonica;
- Riduzione dell'ozono [kg CFC11 eq]: lo strato di ozono stratosferico protegge dalle radiazioni ultraviolette. Il suo esaurimento aumenta i casi di tumore alla pelle e danni alle piante. Gli impatti potenziali di tutte le sostanze rilevanti per la riduzione dello strato di ozono vengono convertiti nel loro equivalente di chilogrammi di triclorofluorometano;
- L'indicatore che misura i particolati rileva gli impatti sulla salute umana causati dalle emissioni di particolato (PM) e dei suoi precursori [disease inc.]. Solitamente più sono piccole le particelle e più sono pericolose poiché possono penetrare più in profondità nei polmoni;

- L'esposizione alle radiazioni ionizzate [kBq U-235 eq] può avere effetti sulla salute umana. L'impronta ambientale considera solo le emissioni in condizioni operative normali, senza prendere in considerazione gli impianti nucleari;
- Formazione di ozono fotochimico [kg NMVOC eq]: l'ozono presente al suolo è dannoso. Attacca i composti organici degli animali e delle piante, aumenta la frequenza dei problemi respiratori quando ad esempio è presente nelle città lo smog fotochimico;
- L'acidificazione [mol H⁺ eq] ha contribuito al declino delle foreste di conifere e all'aumento della mortalità dei pesci. Può essere causata dalle emissioni che penetrano nell'aria, nell'acqua e nel suolo. Le fonti più significative sono i processi di combustione nell'elettricità, nella produzione di riscaldamento e nei trasporti. Il contributo è maggiore quando i combustibili contengono un elevato tenore di zolfo;
- Eutrofizzazione terrestre [mol N eq] colpisce gli ecosistemi a causa di sostanze contenenti azoto o fosforo. Questi nutrienti provocano la crescita di alghe o piante specifiche e limitano la biodiversità nell'ecosistema;
- Eutrofizzazione di acqua dolce [kg P eq] colpisce gli ambienti acquatici. Se le alghe crescono troppo rapidamente possono lasciare l'acqua senza abbastanza ossigeno per la sopravvivenza dei pesci. Le emissioni di azoto nell'ambiente acquatico sono causate da fertilizzanti agricoli, ma anche dai processi di combustione. Le emissioni di fosforo, invece, sono prodotte dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane ed industriali;
- L'eutrofizzazione marina [kg N eq] colpisce gli ecosistemi a causa dell'aumento di azoto. Le emissioni sono causate in gran parte dall'uso agricolo di fertilizzante, ma anche dai processi di combustione;

- Ecotossicità di acqua dolce [CTUe] si riferisce ai potenziali impatti tossici su un ecosistema, che possono danneggiare singole specie e il funzionamento dell'ecosistema stesso. Alcune sostanze hanno la tendenza di accumularsi negli organismi viventi;
- La tossicità umana non cancerosa [CTUh] si riferisce ai potenziali impatti sulla salute umana causati dall'assorbimento di sostanze attraverso l'aria, l'acqua o il suolo. Gli effetti diretti dei prodotti sull'uomo non sono misurati;
- La tossicità umana cancerosa [CTUh], come nel caso precedente, riguarda gli impatti sulla salute umana per l'assorbimento di sostanza dal suolo, aria o acqua. Anche per questo indicatore, non è possibile misurare gli effetti diretti prodotti sull'uomo;
- L'uso e la trasformazione del terreno [Pt] per l'agricoltura, le strade, l'edilizia, l'estrazione mineraria possono generare impatti variabili ed includere la perdita di specie, del contenuto di materia organica nel suolo o la perdita del suolo stesso dovuta all'erosione. È un indicatore composito che misura gli impatti su quattro proprietà del suolo: produzione biotica, resistenza all'erosione, rigenerazione delle falde acquifere e filtrazione meccanica;
- L'uso dell'acqua [m3 depriv.] riguarda il suo prelievo da laghi, fiumi o falde acquifere e può comportarne l'esaurimento. La categoria di impatto considera la disponibilità o la scarsità di acqua nelle regioni in cui viene svolta l'attività;
- L'uso delle risorse fossili [MJ] parte dal presupposto che la terra contenga una quantità limitata di risorse non rinnovabili, come i combustibili fossili. L'idea alla base di questa categoria è che l'estrazione di risorse oggi costringerà le generazioni future ad estrarre risorse minori o diverse;

- Per la categoria riguardante l'utilizzo di risorse minerarie e metalliche [kg Sb eq] possono essere fatte le stesse considerazioni di quella precedente.

Tutte queste categorie [8] possono essere raggruppate in due macrogruppi: il primo riguarda le categorie che hanno un impatto che colpisce l'ambiente su scala globale (l'uso delle risorse, il cambiamento climatico e la riduzione di ozono); tutte le altre hanno un impatto che colpisce l'ambiente su scala locale o regionale.

Queste categorie di impatto, basate su un approccio fondato sul consumo, considerano l'intero ciclo di vita del prodotto e attribuiscono gli impatti al consumatore finale. Questo si contrappone all'approccio basato sulla produzione, che invece assegna gli impatti al produttore dei beni. L'utilizzo di entrambi gli approcci è fondamentale per ottenere una visione completa dell'impatto ambientale di un prodotto o servizio. L'approccio basato sul consumo permette di comprendere l'impatto delle nostre scelte di consumo, mentre l'approccio basato sulla produzione aiuta a individuare le aree in cui è possibile migliorare l'efficienza delle filiere produttive.

La normativa ISO richiede che i fattori di caratterizzazione siano basati su dati scientifici facili da comprendere e ben documentati. I metodi standard di valutazione dell'impatto disponibili sono in numero considerevole. Questi metodi sono sviluppati da gruppi di ricerca in tutto il mondo, ma ancora non è stato possibile identificare quale sia il metodo migliore. L'impegno da parte dell'UE-JRC di riunire un gruppo di esperti per valutare oltre 150 metodi di calcolo per indicatori di impatto chiave come il riscaldamento globale e l'eutrofizzazione dimostra una seria dedizione alla trasparenza e alla robustezza scientifica in questo campo cruciale. La definizione di circa 40 criteri generici applicabili a tutte le categorie di impatto, unitamente a 10-20 criteri specifici per ogni categoria, evidenzia la meticolosa attenzione ai dettagli e la considerazione di diverse sfaccettature che influenzano la valutazione

dell'impatto. Tale approccio multidimensionale garantirà che gli indicatori sviluppati siano completi, affidabili e adatti a guidare decisioni informate verso una maggiore sostenibilità. I criteri scientifici alla base dello studio sono: completezza del campo di applicazione, rilevanza ambientale, robustezza e certezza scientifica, documentazione e trasparenza, applicabilità. Tutti i metodi sono stati valutati in base a questi criteri ed è stata formulata una raccomandazione che consente di garantire quali metodi siano i migliori. L'adozione di un sistema a tre livelli di raccomandazione, che tiene conto del grado di maturità scientifica delle diverse categorie di impatto, dimostra un approccio pragmatico e lungimirante. Riconoscere che la scienza in alcuni settori è ancora in evoluzione permette di integrare le migliori conoscenze disponibili, pur lasciando spazio per futuri perfezionamenti. Tuttavia, è importante sottolineare la necessità di un aggiornamento periodico di tali metodologie, per garantire che riflettano le più recenti acquisizioni scientifiche e gli sviluppi normativi.

CAPITOLO 4

APPLICAZIONE CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

4.1 MODELLAZIONE FINE VITA DI UN PRODOTTO

La gestione del fine vita di un prodotto rappresenta una fase cruciale nel suo ciclo di vita, con importanti implicazioni per l'ambiente, l'economia e la società. In un'ottica di circolarità, possono essere impiegati differenti metodologie per gestire i prodotti arrivati alla fine del ciclo di vita utile:

1. Minimizzare la quantità di rifiuti generati durante la fase di progettazione e produzione del prodotto. Tale metodo riduce l'impatto ambientale complessivo e minimizza i costi di smaltimento, favorendo un'economia di tipo circolare. Di contro è una metodologia che potrebbe richiedere ingenti investimenti iniziale nelle fasi di progettazione e produzione;
2. Dare una nuova vita a un prodotto ancora funzionante evitando lo smaltimento. Questo permette di conservare le risorse iniziali riducendo i rifiuti e prolungando la vita utile di un prodotto. D'altra parte, richiede infrastrutture dedicate, di sensibilizzare il consumatore e la collaborazione tra diverse parti;
3. Ripristinare la funzionalità di un prodotto difettoso o danneggiato, evitando così la sostituzione con uno nuovo. Questo permette di prolungare la vita utile dei prodotti andando contemporaneamente a ridurre i rifiuti e a favorire l'economia circolare, ma di contro non sempre è una procedura applicabile a tutte le tipologie di prodotto;
4. Trasformare i materiali di un prodotto giunto al termine del suo ciclo di vita in nuove materie prime per la produzione di altri beni, consentendo di conservare le risorse naturali e di ridurre l'inquinamento. Tale processo può essere effettuato unicamente

se si è in possesso di infrastrutture efficienti e di tecnologie adeguate in grado di separare accuratamente i materiali;

5. Recuperare l'energia dai rifiuti non riciclabili attraverso processi di incenerimento riducendo in questo modo la quantità di rifiuti da smaltire in discarica e producendo energia utilizzabile. La problematica maggiore è che tale metodo può comportare la generazione di emissioni inquinanti se non correttamente gestito;
6. Depositare rifiuti non riutilizzabili, riparabili, riciclabili o valorizzabili. Ovviamente tale procedura comporta il consumo del suolo rischiando di generare percolato e gas serra. Per tale motivazione rappresenta l'ultima opzione da considerare.

Per selezionare quale possa essere la metodologia di gestione del fine vita più appropriata è opportuno effettuare diverse considerazioni. Prima di tutto occorre considerare la tipologia di prodotto in esame ed in modo particolare le sue caratteristiche fisiche e la composizione dei materiali. In secondo luogo, è importante avere accesso alle infrastrutture che possiedono impianti di riciclo e in generale smaltimento che seguano le normative vigenti. Ciascun metodo di gestione del fine vita precedentemente analizzato possiede un impatto ambientale differente che deve essere tenuto in considerazione nel momento della scelta.

Come precedentemente detto, la gestione dei rifiuti rappresenta una delle questioni fondamentali per il risparmio energetico, sia per quanto riguarda la produzione del prodotto che poi sarà rifiuto che per la raccolta di questi, la gestione e la destinazione finale. In generale, il riciclo di un prodotto consente un risparmio energetico significativo rispetto alla produzione di materiali vergini.

È importante precisare come ogni materiale richieda un processo di riciclo specifico con un consumo energetico differente. Similmente, le tecnologie e i metodi utilizzati per il riciclo influenzano il consumo energetico, questo in base anche all'efficienza del processo stesso

che dovrà minimizzare gli sprechi di energia e massimizzare il recupero di materiale. Un altro fattore da tener conto è dato dalla movimentazione dei materiali da riciclare dai siti di raccolta agli impianti di riciclo e viceversa che presenta una considerevole influenza sul consumo energetico complessivo.

Tuttavia, effettuare un processo di riciclo non è sempre privo di consumi energetici. L'energia necessaria per il riciclo deve essere confrontata con l'energia risparmiata evitando i processi di estrazione, lavorazione e di trasporto delle materie prime vergini.

4.2 RISPARMIO DI ENERGIA NEI PROCESSI DI RICICLO DEI MATERIALI

In un'ottica di riduzione dell'impatto ambientale di un prodotto, una prima importante scelta che può essere effettuata è data dall'utilizzo di materiale secondario rispetto a quello vergine. Il risparmio energetico in questo caso varia in modo significativo a seconda del materiale specifico utilizzato. In generale, la produzione di materiali secondari richiede un consumo energetico inferiore rispetto all'estrazione e alla lavorazione di materie prime vergini.

Analizzando i materiali appartenenti al caso di studio è stato possibile risalire alla percentuale di energia risparmiata nel caso di utilizzo di materiale secondario anziché vergine.

Ad esempio, la quantità di energia risparmiata nell'utilizzo di materiale metallico secondario per la produzione di un prodotto dipende da diversi fattori, tra cui:

- Tipo di metallo: ogni metallo ha un diverso contenuto energetico incorporato, ovvero la quantità di energia necessaria per estrarlo, raffinarlo e trasformarlo in un prodotto utilizzabile. In generale, i metalli con un alto contenuto energetico incorporato, come

l'alluminio e il rame, offrono i maggiori risparmi energetici quando vengono utilizzati nella loro versione riciclata;

- Processo di produzione: possono essere utilizzati diversi processi di produzione per creare prodotti da materiali metallici, sia primari che secondari. I processi che utilizzano meno energia, come la fusione e la formatura secondaria, generalmente comportano maggiori risparmi energetici rispetto ai processi più energivori come la fusione primaria e la laminazione;
- Efficienza del processo di riciclo: La quantità di energia necessaria per riciclare un materiale metallico dipende dall'efficienza del processo di riciclo. I processi di riciclo più efficienti consumano meno energia e generano meno rifiuti, portando a maggiori risparmi energetici complessivi;
- Distanza di trasporto: la distanza percorsa dalle materie prime al sito di produzione e dai prodotti finiti ai consumatori influenza l'impatto energetico complessivo. L'utilizzo di materiali riciclati locali può ridurre le emissioni di gas serra associate al trasporto, contribuendo ulteriormente ai risparmi energetici.

Per fornire una stima precisa del risparmio energetico ottenuto utilizzando materiale metallico secondario per un prodotto specifico, è necessario considerare tutti questi fattori. Tuttavia, in generale, l'utilizzo di materiali riciclati può comportare significativi risparmi energetici rispetto all'utilizzo di materiali primari. Ad esempio, da letteratura, la produzione di alluminio da materiale riciclato richiede circa il 95% in meno di energia rispetto alla produzione da minerale bauxite vergine, la produzione di acciaio da rottame d'acciaio richiede circa il 70% in meno di energia rispetto alla produzione da minerale di ferro vergine,

mentre la produzione di rame da rame riciclato richiede circa il 90% in meno di energia rispetto alla produzione da minerale di rame vergine.

L'utilizzo di materiali metallici secondari, anche grazie al risparmio energetico già citato, non solo riduce l'impatto ambientale associato alla produzione di metalli, ma contribuisce anche a conservare le risorse naturali e a ridurre la quantità di rifiuti inviati alle discariche.

Passando ora all'analisi dei materiali plastici, anche l'utilizzo di plastica riciclata per la produzione di nuovi prodotti è noto offrire significativi vantaggi energetici rispetto all'impiego di plastica vergine derivata da materie prime fossili. La plastica con alto contenuto energetico incorporato garantisce un maggior risparmio energetico con il riciclo rispetto al materiale vergine. Visto il quantitativo differente di plastiche trovabili in commercio, si è ipotizzato di racchiudere sotto un'unica voce tutti i derivati attribuendo un risparmio energetico pari al 50%.

La ricerca in letteratura di energia risparmiata ha permesso di identificare il fattore di risparmio. Tale valore è ottenuto sottraendo al 100% l'energia risparmiata con l'utilizzo di materiale secondario. Nella tabella n.5 è stato riportato per ciascun materiale il valore di energia risparmiata ed il conseguente fattore di risparmio.

Tabella 5: Calcolo del fattore di risparmio

MATERIALE	ENERGIA RISPARIATA	FATTORE DI RIASPARMIO
Aluminium	95% [9]	0.05
Brass	80% [10]	0.2
Steel	75% [10]	0.25
ABS	50% [11]	0.5
Nylon	50% [11]	0.5
Glass	5% [11]	0.95
Rubber	50% [11]	0.5
Plastic	50% [11]	0.5

4.3 LINEE GUIDA FORNITE DALLA PEF

Nel contesto della PEF e metodologia già citata della Circular Footprint Formula (CFF), l'Allegato-C funge da set di dati cruciale che fornisce informazioni essenziali per il calcolo dell'impatto ambientale dei prodotti. Questo set di dati comprende un'ampia gamma di materiali e le loro applicazioni, offrendo parametri preziosi per i calcoli CFF. Il set di dati dell'Allegato-C è progettato per facilitare l'applicazione della CFF, fornendo una raccolta completa con i dati suggeriti da utilizzare come parametri all'interno della formula per vari materiali e varie località geografiche europee. Le sue caratteristiche principali includono:

- Copertura dei materiali: il set di dati copre un ampio spettro di materiali comunemente utilizzati nella produzione di prodotti, inclusi metalli, plastica, legno, vetro e tessuti;
- Dati specifici dell'applicazione: per ciascun materiale, il set di dati fornisce dati su misura specifici per le sue varie applicazioni. Ciò garantisce che i calcoli del CFF riflettano accuratamente l'impatto ambientale del materiale nel contesto dell'uso previsto;
- Parametri CFF: il set di dati include i parametri essenziali richiesti per i calcoli CFF;
- Fonti dei dati: il set di dati si basa su fonti affidabili e credibili, garantendo l'accuratezza e la validità delle informazioni fornite. Ciò migliora l'affidabilità dei calcoli CFF.

Il set di dati dell'Allegato-C costituisce una risorsa inestimabile per coloro che applicano la metodologia CFF. La sua copertura completa di materiali, dati specifici dell'applicazione e parametri CFF facilmente disponibili semplificano i calcoli, migliorano la precisione e promuovono la trasparenza e la comparabilità. Utilizzando questo set di dati è possibile

valutare efficacemente l'impatto ambientale dei prodotti e prendere decisioni per la progettazione e la produzione sostenibili del prodotto.

Tabella 6: Valori parametri ricavati dall'Allegato-C

MATERIALE	A	R1	R2	Qin	Qout
Aluminium	0.2	0	0.9	1	1
Brass	0.2	0	0.9	1	1
Glass	0.2	0	0.9	1	1
Steel	0.2	0.18	0.9	1	1
Rubber	0.5	0	0	0.9	0.9
Plastic	0.5	0	0	0.9	0.9
Nylon	0.5	0	0	0.9	0.9

Nella tabella n.6 sono stati riportati i valori dei parametri necessari all'applicazione della CFF ricavati dal dataset dall'Allegato-C delle linee guida PEF [3]. Considerando il caso di studio di applicazione della CFF allo smaltimento della macchina Sigma, nella necessità di modellare materiali non presenti nell'Allegato-C, si sono approssimati i valori a materiali simili come, ad esempio, nel caso dell'ottone che è stato approssimato all'alluminio.

4.4 MODELLAZIONE IN SIMAPRO DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

Dopo aver condotto uno studio di ricerca sui dati per ottenere il fattore di risparmio di energia per la produzione di materia prima secondaria in modo da poter applicare la CFF, in SimaPro è stato creato un nuovo processo di smaltimento. Considerando che la CFF può essere suddivisa in tre aree (materia, energia e smaltimento) il primo passo è stato modificare la copia di ciascun materiale inserendo ciascuna parte della formula nell'apposito spazio. Classificando meticolosamente i materiali nei rispettivi ambiti, è possibile valutare efficacemente il loro impatto ambientale e identificare opportunità di miglioramento.

Circular Footprint Formula for RPCs :

$$CFF_{RPCs} = \underbrace{(1 - R_1) \times E_v}_{\text{Amount of virgin material}} + \underbrace{R_1 \times (A E_{\text{recycled}} + (1 - A) E_v \times \frac{Q_{sin}}{Q_p})}_{\text{Amount of secondary (recycled) material input}} + \underbrace{(1 - A) R_2 \times (E_{\text{recEoL}} - E_v^* \times \frac{Q_{sout}}{Q_p})}_{\text{Amount of secondary material output}}$$

Figura 7: Termini della CFF trasportati in SimaPro

L'equazione presentata evidenzia tre termini chiave che rappresentano l'impatto ambientale associato ai materiali utilizzati in un prodotto [12]:

1. Il termine arancione racchiude le emissioni e le risorse impiegate per estrarre e pretrattare le materie prime vergini. Quindi rappresenta l'impatto ambientale iniziale associato alla produzione di materiali nuovi;
2. Il termine verde rappresenta il risparmio ottenuto sottraendo le emissioni e le risorse associate al riciclo del materiale secondario (inclusi raccolta, trasporto) dalle emissioni e dalle risorse del materiale vergine che è stato sostituito dal materiale riciclato. Quantifica il beneficio ambientale derivante dall'utilizzo di materiali riciclati al posto di quelli vergini.
3. il termine blu rappresenta le emissioni e le risorse che si ipotizzano saranno impiegate per acquisire e lavorare il materiale vergine che verrà, in futuro, sostituito da materiali riciclati. In altre parole, considera l'impatto ambientale potenziale associato alla produzione futura di materiale vergine che verrà rimpiazzato da materiali riciclati nel corso del ciclo di vita del prodotto.

Combinando questi tre termini, l'equazione fornisce una valutazione completa dell'impatto ambientale del prodotto, considerando: l'impatto iniziale dell'acquisizione di materie prime (vergini e riciclate); i benefici derivanti dal riciclo di materiali e dalla sostituzione di quelli

vergini; l'impatto potenziale associato alla futura produzione di materiale vergine che verrà sostituito dal riciclo.

L'utilizzo di questa equazione permette di prendere in considerazione l'intero ciclo di vita dei materiali, promuovendo la circolarità. Infatti, si incoraggia l'utilizzo di materiali riciclati per ridurre l'impatto ambientale iniziale e si valorizza il potenziale di riciclo futuro, diminuendo la necessità di estrarre nuove materie prime. L'equazione ci aiuta a capire quanto un prodotto sia "ecologico" considerando l'impatto di tutti i materiali utilizzati, sia vergini che riciclati. Tiene conto di quanto si risparmia utilizzando materiali riciclati e di quanto impatto ambientale si potrebbe generare in futuro se si utilizzassero materiali vergini al posto di quelli riciclati. In questo modo, promuove la produzione di prodotti con un ciclo di vita più sostenibile e circolare.

La formula per il calcolo dell'impatto ambientale dei materiali riciclati, pur nella sua semplicità, racchiude cinque parametri chiave che influenzano significativamente il risultato finale:

- Parametro A: fattore di allocazione. Il parametro A rappresenta la quota di oneri e crediti ambientali da attribuire rispettivamente al riciclo e alla produzione di materiale vergine. l'utilizzo di materiali recuperati. L'assegnazione di un valore specifico al parametro A dipende da diversi fattori, tra cui il tipo di materiale, il contesto di mercato e gli obiettivi specifici dell'analisi.
- R1: percentuale di materiale riciclato in ingresso. R1 rappresenta la quota di materiale impiegato nella produzione che proviene da processi di riciclo pregressi. Indica, in altre parole, la quantità di materiale "secondario" immessa nel ciclo produttivo.

- R2: percentuale di materiale riciclabile in uscita. R2 stima la frazione di materiale contenuto nel prodotto finito che potrà essere teoricamente riciclato al termine del suo ciclo di vita. Un valore alto di R2 indica un prodotto progettato per la riciclabilità, massimizzando il potenziale recupero di materiali a fine vita.
- Indici di qualità: Q_{sin}/Q_p e Q_{sout}/Q_p . Questi indici misurano la qualità del materiale riciclato rispetto al materiale vergine corrispondente. Il rapporto Q_{sin}/Q_p confronta la qualità del materiale riciclato in ingresso alla produzione, mentre Q_{sout}/Q_p valuta la qualità del materiale riciclabile in uscita dal prodotto. Valori vicini a 1 indicano una qualità simile tra materiale riciclato e vergine, mentre valori inferiori a 1 segnalano una potenziale degradazione delle proprietà durante i cicli di riciclo.

L'analisi approfondita dei cinque parametri chiave della formula permette di comprendere a pieno le sfumature del calcolo dell'impatto ambientale dei materiali riciclati. La scelta di valori appropriati per ciascun parametro richiede una valutazione attenta del contesto specifico, considerando le caratteristiche del materiale, le tecnologie di riciclo disponibili, gli obiettivi di sostenibilità e le dinamiche del mercato.

Nelle figure n.8, n.9 e n.10 è stato riportato l'esempio dell'applicazione della CFF in SimaPro per l'alluminio. Nella prima immagine i valori della formula relativi al materiale vergine sono stati inseriti come prodotti evitati dato che si sta cercando di eliminare la produzione di materiale vergine. Nella seconda immagine i valori di energia sono stati richiamati con il fattore FR quando relativi al processo di riciclo, altrimenti senza. Nella terza immagine è stata inserita la parte della formula relativa allo smaltimento, come spiegato in precedenza nel paragrafo 2.2

Si è deciso di riprendere i flussi come presenti in Ecoinvent v3.6, ad eccezione dei prodotti evitati i quali sono stati inseriti manualmente al solo scopo di applicare la formula. Alcuni

dataset sono doppi o ripetuti tre volte per evidenziare le varie parti di formula a cui fanno riferimento.

Outputs to technosphere: Products and co-products		Amount	Unit	Quantity	Allocation	Waste type	Category	Comment
Aluminium, CFF		1	kg	Mass	100 %	Aluminium	Me., Transformation	Annual production
Outputs to technosphere: Avoided products		Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Aluminium, primary, ingot (RoW) production Cut-off, U		$1*(1-A)*R2*Q_{out} = 0.72$	kg					
Aluminium, primary, ingot (RoW) production Cut-off, U		$1*(1-R1) = 1$	kg					

Figura 8: Parte della CFF riguardante i materiali

Inputs from technosphere: electricity/heat	Amount	Unit
Electricity, medium voltage, aluminium industry (IAI Area, Gulf Cooperatio	$0.0529*FR*(1-A)*R2 = 0.0019$	kWh
Heat, district or industrial, natural gas (CH) market for heat, district or ind	$0.827423076923077*FR*(1-A)*R2 = 0.0298$	MJ
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat production, i	$0.0467236467236467*FR*(1-A)*R2 = 0.00168$	MJ
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat production, i	$0.0180451092117759*FR*(1-A)*R2 = 0.00065$	MJ
Electricity, medium voltage (Europe without Switzerland) market group fc	$0.0529*FR*(R1*A) = 0$	kWh
Electricity, medium voltage (Europe without Switzerland) market group fc	$0.0529*(1-A)*R1*Q_{in} = 0$	kWh

Figura 9: Parte della CFF riguardante l'energia

Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment	Amount	Unit
Dross from Al electrolysis (GLO) market for Cut-off, U	$0.01432*(1-R2) = 0.00143$	kg
Filter dust from Al electrolysis (GLO) market for Cut-off, U	$0.00059*(1-R2) = 5.9E-5$	kg
Inert waste, for final disposal (CH) market for inert waste, for final disposal Cut-c	$0.00191*(1-R2) = 0.000191$	kg

Figura 10: Parte della CFF riguardante lo smaltimento

Contemporaneamente all'inserimento della CFF all'interno di ciascun materiale modificato, sono stati inseriti per ciascun nuovo materiale creato i valori dei parametri necessari alla CFF stessa. Questi parametri sono stati ricavati tramite le ricerche in letteratura, nel caso del FR (fattore di riduzione), e tramite l'Allegato-C della PEF per il resto dei parametri tranne il parametro A. Il parametro A ha subito una modifica, basata su ipotesi relative all'allocazione che si intendeva rappresentare. Nella figura n.11 sono riportati i valori dei vari parametri riguardanti l'alluminio.

Input parameters	Value	Distribution
A	0.2	Undefined
R1	0	Undefined
R2	0.9	Undefined
Qin	1	Undefined
Qout	1	Undefined
FR	0.05	Undefined

Figura 11: Parametri riportati in SimaPro

Dopodiché ciascun materiale è stato richiamato in un proprio processo di smaltimento, come mostrato in figura n.12

Products									
Waste specification			Default material / waste type		Amount		Unit	Quantity	Category
Aluminium Smaltimento CFF			All waste types		1		kg	Mass	Materiali CFF
Outputs to technosphere: Avoided products			Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add									
Inputs									
Inputs from nature			Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max
Add									
Inputs from technosphere: materials/fuels			Amount		Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max
Add									
Inputs from technosphere: electricity/heat			Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Aluminium, CFF			1	kg	Undefined				
Add									

Figura 12: Processo di smaltimento alluminio in SimaPro

Il processo di smaltimento dell'ATM SD400 è stato strutturato in modo da garantire la corretta gestione di ogni singolo materiale presente all'interno del macchinario. In particolare, è stato identificato il metodo di smaltimento per ciascun componente e sono state calcolate le relative emissioni in troposfera. Per ogni materiale presente nell'ATM SD400 è stato definito un metodo di smaltimento specifico. La fase iniziale ha previsto l'identificazione della natura di ciascun componente, classificandolo secondo le normative vigenti in materia di rifiuti. Successivamente, è stato individuato il metodo di smaltimento più idoneo, considerando fattori quali l'impatto ambientale, i costi e le normative applicabili. Per ogni materiale identificato, inoltre, è stato calcolato il peso complessivo da smaltire riferito all'intera macchina. Questi dati sono stati utilizzati come input per stimare le emissioni in troposfera associate al processo di smaltimento. La stima è stata effettuata

partendo dal documento Excel contenente la distinta base che ha permesso di calcolare il peso complessivo di ciascun materiale presente nella macchina.

La figura n.13 mostra la sezione, all'interno di SimaPro, contenente i parametri di progetto, ovvero quelli riferibili all'intero progetto modellato e non al singolo processo come nel caso precedente dell'applicazione della CFF. All'interno di questa sezione sono stati riportati i pesi dei singoli materiali, sotto l'ipotesi di immutabilità di questi.

Peso_tot_ATM400	350.2205
Peso_Nylon6_CFF	0.4705
Peso_steel_low_CFF	114.4308
Peso_aluminium_CFF	1.687856
Peso_vetro_CFF	6.1
Peso_Nylon66_CFF	14.73262
Peso_ABS_CFF	0.693128
Peso_PMMA_CFF	0
Peso_rubber_CFF	0.12942
Peso_steel_chromium_CFF	215.5717
Peso_Brass_CFF	0.1902
Peso_plastic_CFF	1.318004

Figura 13: Pesi complessivi dei singoli materiali

Un ragionamento analogo è stato effettuato per i componenti elettronici, con l'ipotesi di inglobare i componenti più piccoli e difficilmente modellabili nei cavi e nei LED. Inoltre, si è supposto un peso delle schede pari a 0.15kg, essendo un valore non presente nella BOM fornita. Nella figura n.14 sono stati riportati i pesi di tali componenti inseriti come parametri di progetto.

Peso_Cavi_CFF	3.068
Peso_schede_CFF	1.8
Peso_Elettronica_CFF	0.02
Peso_LED_CFF	0.11

Figura 14: Pesi dei componenti elettronici

Nella figura n.15 è stato riportato il processo di smaltimento dell'ATM SD400. In esso sono stati richiamati i processi di smaltimento per i singoli materiali nelle quantità effettive

presenti nella macchina e definite come parametro di progetto. Si può notare che, prima di passare allo smaltimento specifico per ogni categoria di materiale, si è ipotizzato un processo di triturazione da riferire all'intero peso della macchina. In questo modo si è ipotizzato il disassemblaggio dell'ATM precedente al suo smaltimento vero e proprio.

Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment	Amount	Unit
Waste electric and electronic equipment (GLO) treatment of, shredding Cut-off, l	Peso_tot_ATM400 = 350	kg
Glass SD400	Peso_vetro_CFF = 6.1	kg
Aluminium SD400	Peso_aluminium_CFF = 1.69	kg
Schede SD400	Peso_schede_CFF = 1.8	kg
Plastic SD400	Peso_plastic_CFF = 1.32	kg
Steel chromium 18-8 SD400	Peso_steel_chromium_CFF = 216	kg
Cavi elettrici SD400	Peso_cavi_CFF = 3.07	kg
Steel low-alloyed SD400	Peso_steel_low_CFF = 114	kg
Nylon 6 SD400	Peso_Nylon6_CFF = 0.47	kg
Nylon 6-6 SD400	Peso_Nylon66_CFF = 14.7	kg
LED SD400	Peso_LED_CFF = 0.11	kg
Gomma SD400	Peso_rubber_CFF = 0.129	kg
Elettronica SD400	Peso_Elettronica_CFF = 0.02	kg
Brass SD400	Peso_Brass_CFF = 0.19	kg
ABS SD400	Peso_ABS_CFF = 0.693	kg
Add		

Figura 15: Processo di smaltimento dell'ATM SD400

CAPITOLO 5

LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT

5.1 ANALISI DEI DATI RICAVATI DELL'APPLICAZIONE DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

LCIA sta per analisi del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment) ed è una fase fondamentale della valutazione del ciclo di vita (LCA) di un prodotto. L'obiettivo dell'LCIA è quello di tradurre i dati raccolti nella fase di analisi di inventario (LCI), che quantifica i flussi di materiali e di energia associati al prodotto, in indicatori che esprimono l'impatto ambientale potenziale. In altre parole, l'LCIA prende i dati grezzi dell'LCI e li trasforma in informazioni utili per comprendere le conseguenze ambientali del prodotto durante il suo intero ciclo di vita, che va dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento o al riciclo. Per fare ciò, l'LCIA utilizza diverse metodologie per raggruppare e valutare gli impatti ambientali, come ad esempio:

- Caratterizzazione: classifica gli impatti ambientali in base a categorie come il cambiamento climatico, l'acidificazione, l'eutrofizzazione e la tossicità per l'uomo e per l'ambiente;
- Normalizzazione: quantifica l'importanza relativa di ciascun impatto ambientale in base a un riferimento comune, ad esempio il potenziale di riscaldamento globale;
- Valutazione: compara l'impatto ambientale del prodotto con quello di altri prodotti o con un benchmark definito.

Tabella 7: Valori LCIA applicando la CFF

Categoria d'impatto	Rubber	Steel l-a	Steel c	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Alluminio	ABS	Plastic	Cavi elettrici	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	0,37	78,64	-536,41	0,52	16,15	-0,29	-0,61	-24,28	0,76	-0,16	14,00	22,11	182,37	18,07	30,21
Land use	-0,15	249,02	-2913,6	-0,44	-13,72	-1,27	-8,14	-41,54	-0,65	-0,27	167,58	97,55	607,60	75,82	90,66
Water use	0,00	-12,09	-70,27	0,00	-0,06	-0,06	-0,52	-2,97	0,00	-0,01	10,42	4,65	49,18	2,93	8,71
Resource use, fossils	-0,74	497,94	-5618,4	-2,7	-84,86	-5,86	-6,96	-224,02	-3,99	-1,93	201,13	278,10	2346,78	229,16	377,74

I valori ottenuti a seguito dell'analisi del processo di smaltimento effettuata sull'ATM sono riportati nella Tabella n.7. Nelle colonne è possibile vedere i valori ottenuti per lo smaltimento dei singoli materiali al variare dell'indice considerato. Si può notare come, ad eccezione di alcuni indicatori che presentano valori prossimi allo zero, i principali abbiano valori negativi. Questo dimostra una complessiva riduzione dell'impatto dell'intero macchinario, ovvero un recupero, dal punto di vista ambientale, dato dal processo di smaltimento dell'ATM.

Il grafico n.16 mostra l'andamento degli indicatori al variare dei materiali e dei componenti presenti nel macchinario che sono stati analizzati.

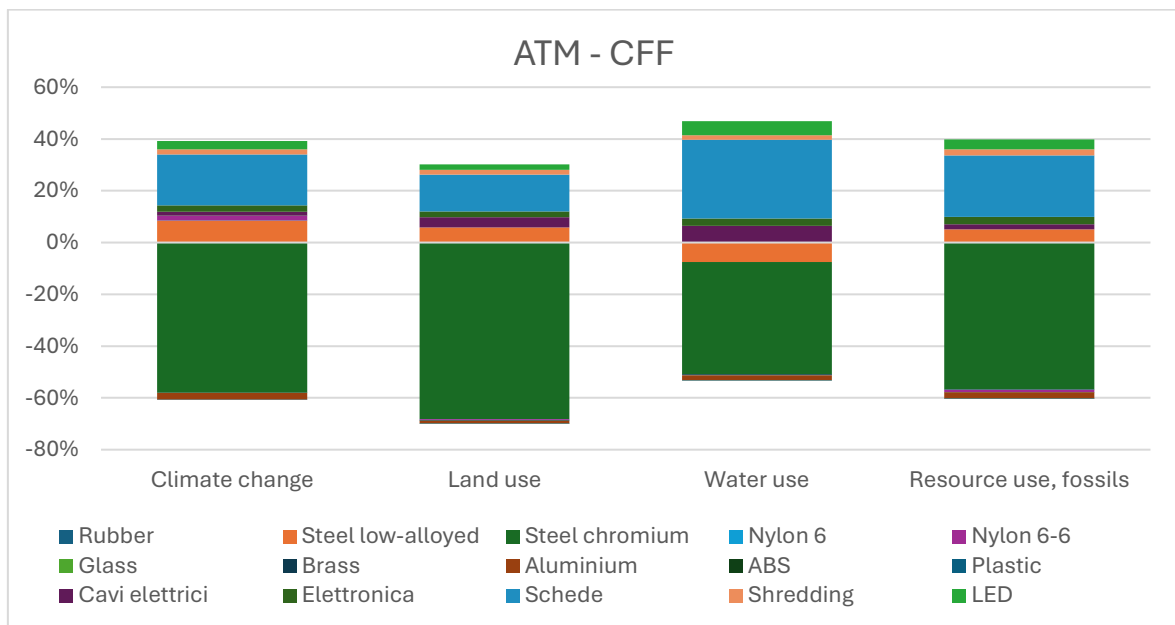


Figura 16: Indicatori LCIA del macchinario applicando la CFF

Cercando di analizzare ciascuna categoria di materiali, nel grafico n.17 è possibile vedere, per ciascun indicatore, il comportamento dei materiali metallici. Come ben visibile, le due tipologie di acciaio, possedenti valori significativi al fine dell'analisi, hanno un comportamento differente: l'acciaio basso legato presenta un andamento positivo solo in alcune categorie quali cambiamento climatico, uso di suolo ed utilizzo di risorse fossili; di contro, l'acciaio inossidabile presenta per le stesse categorie un andamento negativo comportando quindi una riduzione dell'impatto.

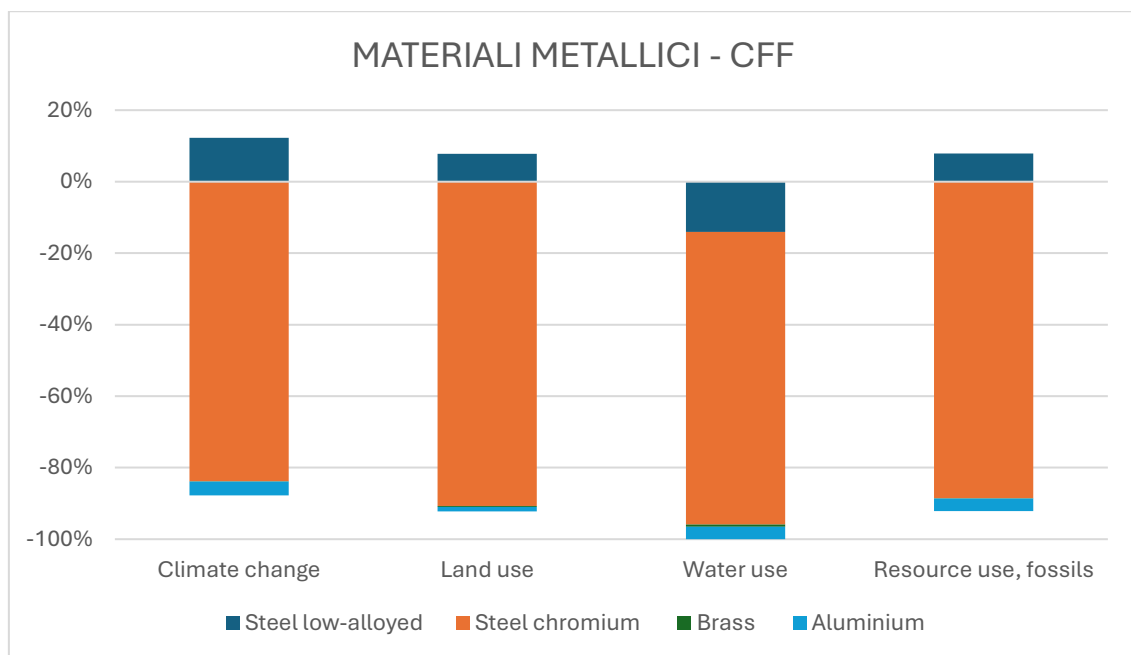


Figura 17: Andamento degli indicatori dei materiali metallici applicando la CFF

Per quanto riguarda le materie plastiche, il nylon 66 è l'unico che mostra significativi scostamenti, come mostrato nel grafico n.18. Per l'indicatore che identifica il cambiamento climatico presenta andamenti positivi, mentre sono negativi gli indicatori di uso di superficie e uso di risorse fossili.

Caso "anomalo" quello dell'indicatore riguardante l'utilizzo di acqua. In questo caso, l'uso di vetro riciclato contribuisce ad una riduzione del 20% sul totale.

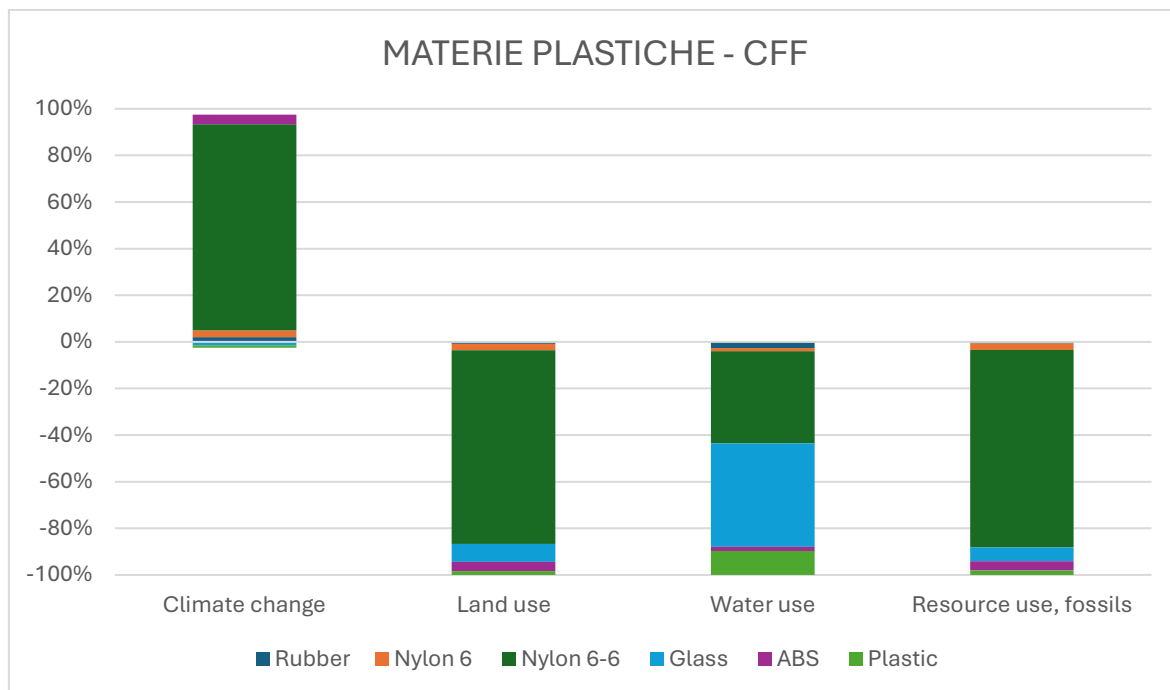


Figura 18: Andamento degli indicatori delle materie plastiche applicando la CFF

Nel grafico n.19 è possibile vedere il comportamento dei componenti elettronici. Per questi occorre effettuare un ragionamento separato rispetto al resto dei materiali. Sotto l'ipotesi di mandare tali componenti in discarica, l'unico parametro della CFF che è stato utilizzato nella modifica dal dataset di Ecoinvent è R_2 rappresentante la porzione di materiale che sarà riciclato in un sistema successivo e considera le inefficienze presenti durante i processi di raccolta. La tipologia di componenti che presenta un maggior impatto ambientale sono le schede.

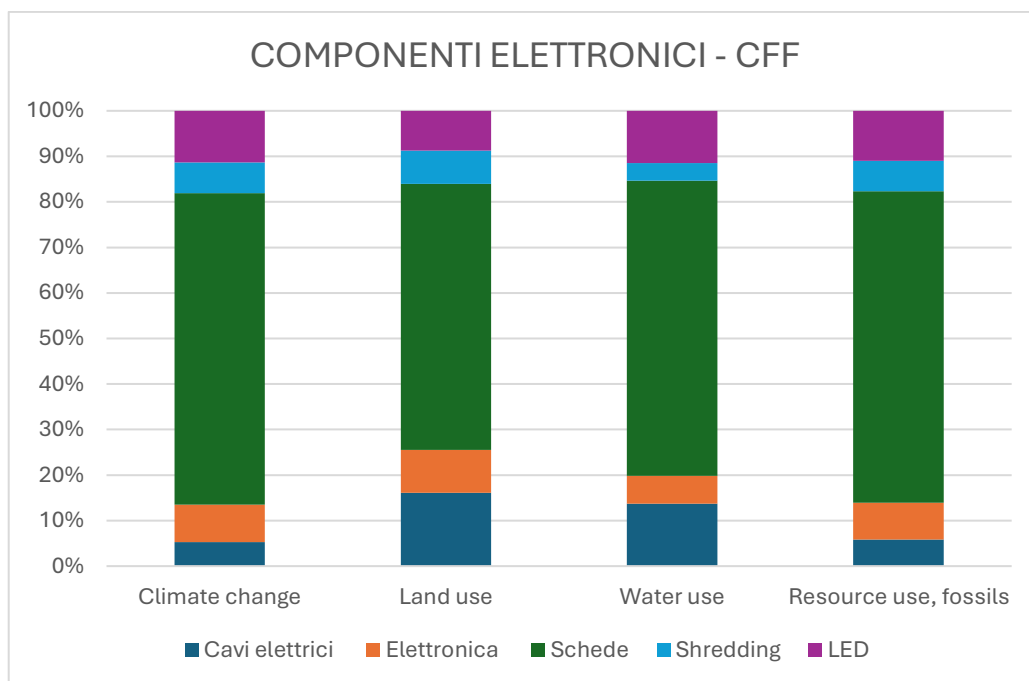


Figura 19: Andamento degli indicatori dei componenti elettronici applicando la CFF

5.2 ANALISI DEI DATI RICAVALI A SEGUITO DELLA MODIFICA DEI PARAMETRI DELLA CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA

5.2.1 Fattore di allocazione (A) nullo

Nella CFF, il fattore di allocazione assume un valore nullo in due casi specifici: prodotto monomateriale oppure sistema di riciclo chiuso. Se un prodotto è composto da un singolo materiale omogeneo, non vi è alcuna diluizione o miscela con altri materiali. In questo scenario, l'intero flusso di materiale è tracciabile e non vi è alcuna perdita o dispersione. Di conseguenza, il fattore di allocazione diventa nullo, poiché non è necessaria alcuna allocazione tra diverse frazioni di materiale. In un sistema di riciclo perfettamente chiuso, tutto il materiale recuperato dai prodotti a fine vita viene riutilizzato per la produzione di nuovi prodotti identici. Non vi è ingresso di materiale esterno e non vi è perdita o dispersione nel processo di riciclo. In questo caso ideale, il fattore di allocazione diventa nullo, poiché l'intero flusso di materiale è contenuto all'interno del sistema chiuso. Questi sono casi teorici

e semplificati. Nella realtà, i prodotti sono spesso composti da materiali misti e i sistemi di riciclo non sono perfettamente chiusi. Di conseguenza, il fattore di allocazione avrà generalmente un valore positivo, che riflette la complessità del sistema e le potenziali perdite di materiale. Tuttavia, la comprensione dei casi in cui il fattore di allocazione è nullo può fornire informazioni utili sull'interpretazione della CFF e sui potenziali miglioramenti nell'efficienza del sistema di riciclo.

Tabella 8: Valori LCIA con il parametro A nullo

	Rubber	Steel low-alloyed	Steel Chromium	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Aluminium	ABS	Plastic	Cavi	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	0,37	117,85	-714,20	0,52	16,15	-0,3	-0,76	-30,32	0,76	-0,2	14,00	22,11	182,37	18,07	30,21
Land use	-0,15	393,91	-3881,1	-0,4	-13,7	-1,3	-10,2	-51,90	-0,6	-0,3	167,6	97,55	607,60	75,82	90,66
Water use	0,00	0,61	-93,57	0,00	-0,06	-0,1	-0,65	-3,71	0,00	-0,0	10,4	4,65	49,18	2,93	8,71
Resource use, fossils	-0,74	950,11	-7478,5	-2,7	-84,9	-5,9	-8,67	-279,60	-4	-1,9	201,1	278,10	2346,78	229,16	377,74

Nella tabella n.8 è possibile vedere i valori ottenuti annullando il fattore di allocazione A di ciascun materiale presente all'interno dell'ATM al variare dell'indicatore. Tali andamenti sono ben visibili nel grafico n.20.

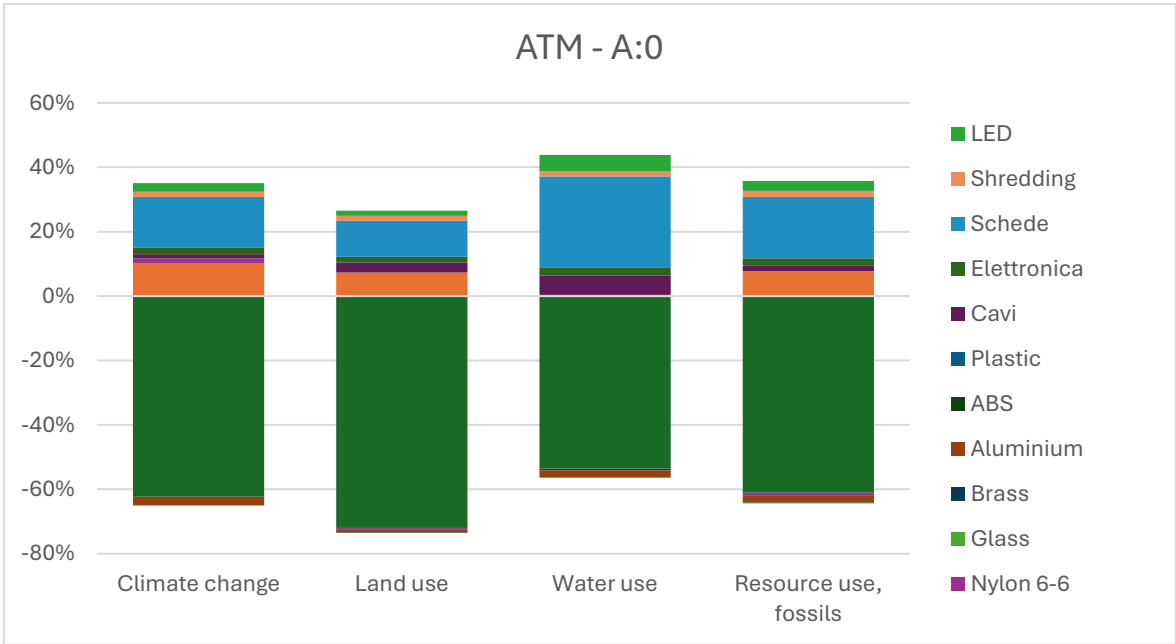


Figura 20: Indicatori del macchinario con il parametro A nullo

Nelle Figure n.21 e n.22 è visibile più nel dettaglio l'andamento degli indicatori considerando i materiali raggruppati per tipologia. Per i materiali metallici le due tipologie di acciaio presentano lo stesso andamento riscontrato nel caso in cui si utilizzi la CFF senza variare i parametri individuati in letteratura. A variare in modo significativo sono i valori dei due materiali sia in negativo, per quanto riguarda l'acciaio inossidabile, rilevando un miglioramento per quanto riguarda l'uso del suolo che delle materie fossili, sia in positivo per l'acciaio basso legante. Quest'ultimo rappresenta un aumento di consumo dei due indicatori precedentemente citati. Analizzando le materie plastiche, invece, il materiale più rilevante è dato dal nylon 66 che, come mostrato nel grafico riportato in Figura n.22, subisce un incremento degli indicatori rispetto al semplice utilizzo della CFF.

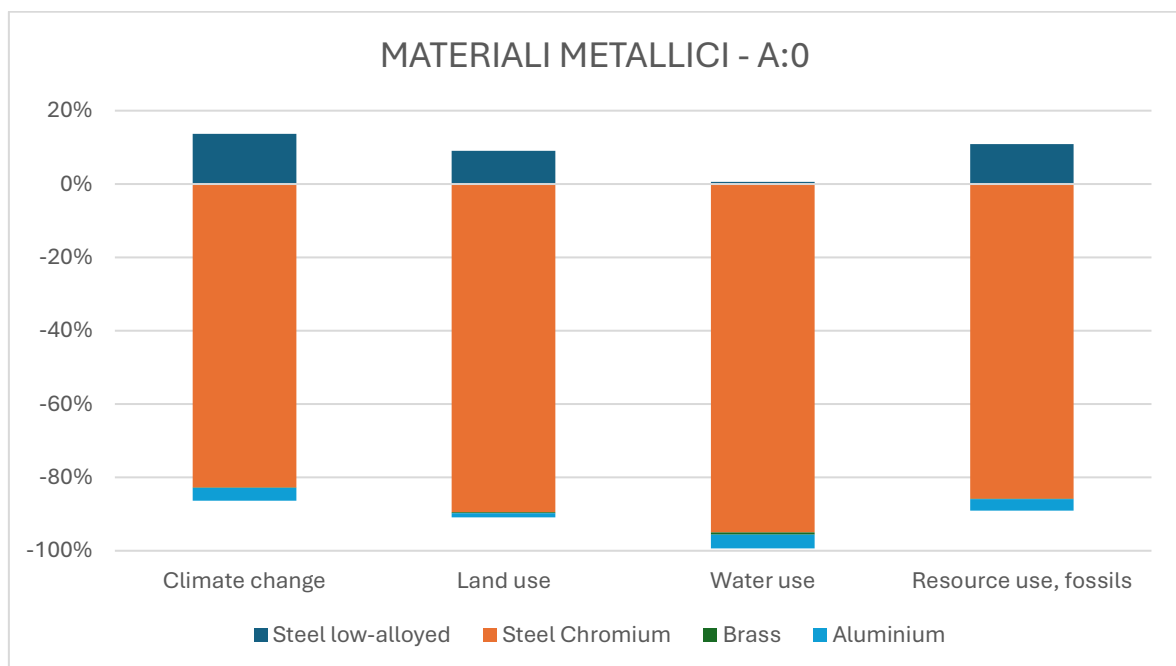


Figura 21: Indicatori dei materiali metallici con parametro A nullo

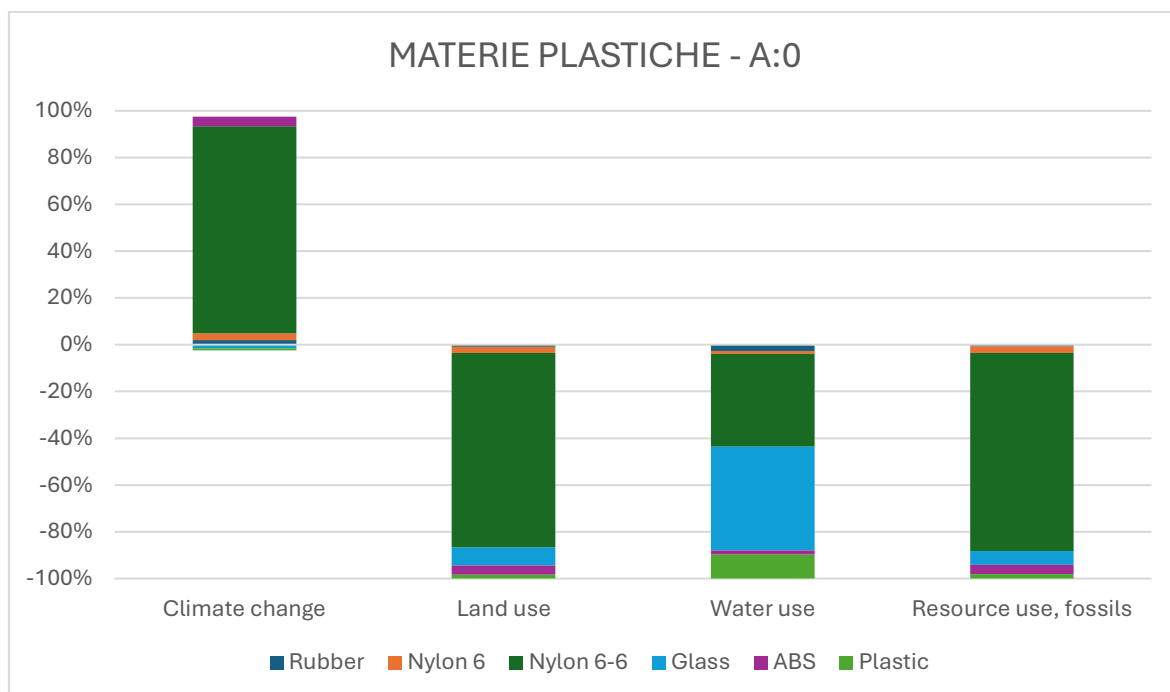


Figura 22: Indicatori delle materie plastiche con parametro A nullo

I componenti elettronici, come segnalato in precedenza, hanno R_2 come unico parametro che modifica i dati prodotti da Ecoinvent. Per tale motivo non variano il loro andamento degli indicatori in questi primi casi.

5.2.2 Fattore di allocazione (A) unitario

Nella formula CFF, un fattore di allocazione pari a uno indica che l'impatto ambientale di un prodotto è interamente attribuito al flusso di materiale in cui si trova attualmente. In altre parole, non vi è alcuna ripartizione dell'impatto tra i diversi flussi di materiale coinvolti nel ciclo di vita del prodotto. Questo scenario può verificarsi in due casi: flusso di materiale monomateriale, se il prodotto è composto da un unico tipo di materiale, tutto l'impatto è associato a quel materiale; sistema chiuso senza dispersioni, se il sistema di produzione è perfettamente chiuso e non vi sono dispersioni di materiale nell'ambiente, l'impatto rimane all'interno del sistema. In questo caso, il fattore di allocazione per ogni flusso di materiale sarebbe uno, indipendentemente dalla sua posizione nel ciclo di vita. Un fattore di

allocazione pari a uno rappresenta una semplificazione teorica e raramente rispecchia la realtà. Nella maggior parte dei casi, i processi produttivi sono multi-output e generano flussi di materiali eterogenei con differenti impatti ambientali.

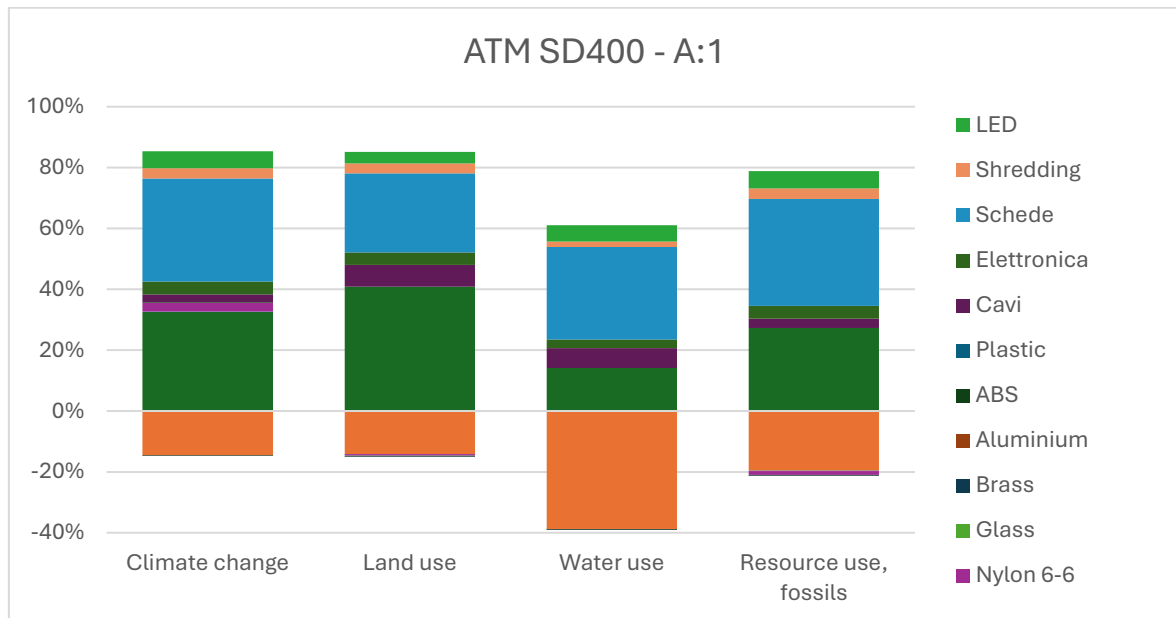


Figura 23: Indicatori del macchinario con parametro A unitario

A differenza dei casi precedenti, per quanto riguarda le due tipologie di acciaio si evince un ribaltamento di tendenza nei tre indicatori principali. In questo caso, come è possibile vedere sia nel grafico riportato in Figura n.23 che più chiaramente in Figura n.24, l'acciaio inossidabile presenta valori positivi mentre quello basso legato genera valori negativi. Per quanto riguarda le materie plastiche, tale gruppo di materiali si allinea con quanto visto in precedenza evidenziando il nylon 66 come unico materiale che presenta valori rilevanti. Gli indicatori maggiormente accentuati seguono la tendenza delle casistiche precedenti, come mostrato nella Figura n.25.

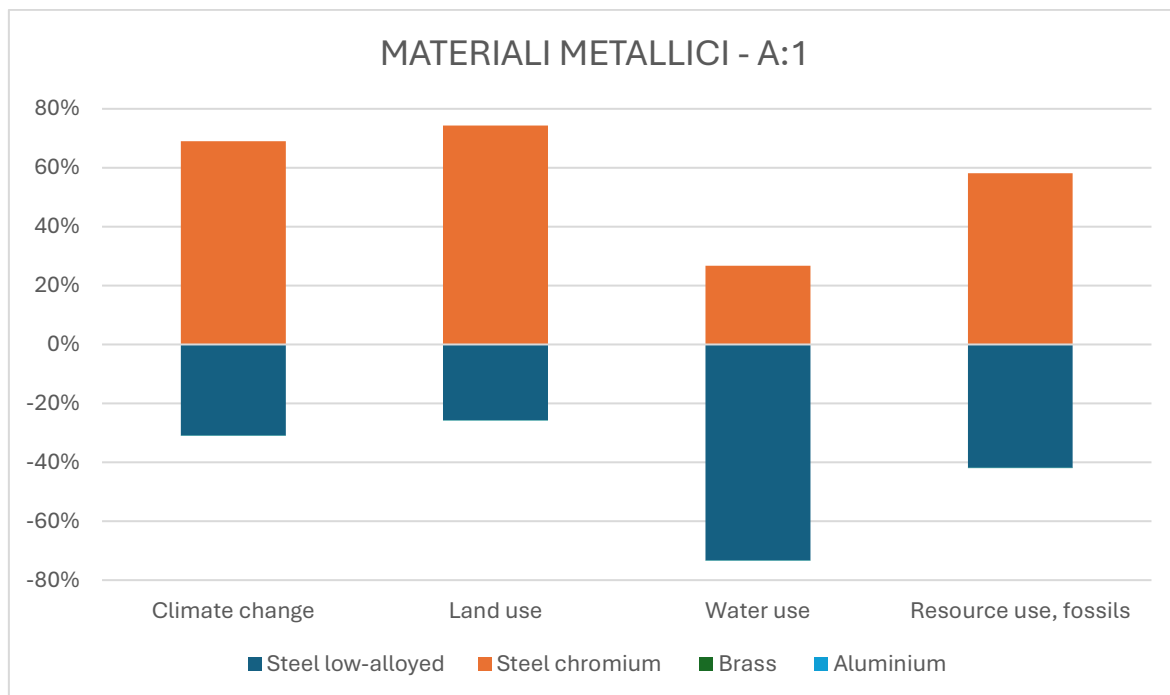


Figura 24: Indicatori dei materiali metallici con parametro A unitario

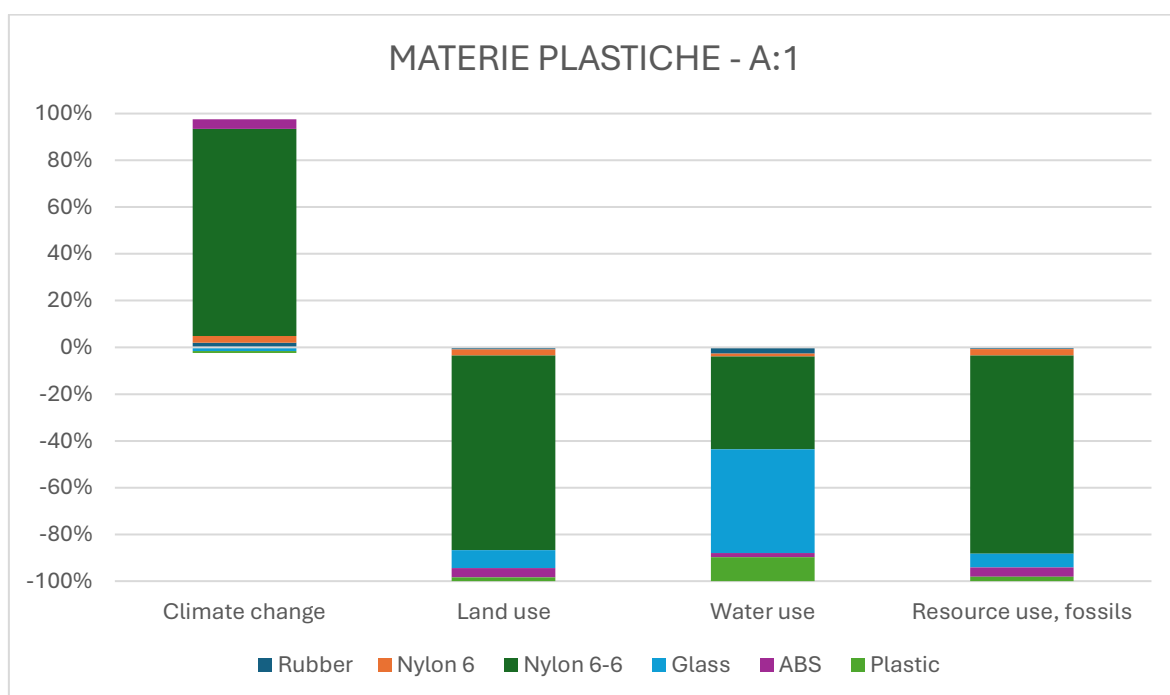


Figura 23: Indicatori delle materie plastiche con parametro A unitario

5.2.3 Percentuale di materiale riciclato da un sistema precedente (R_1) nulla

Nella formula CFF, un valore pari a zero per il parametro R_1 indica che nessun materiale presente nel prodotto è stato riciclato da un sistema precedente. Ciò significa che tutti i materiali utilizzati nel prodotto sono materiali vergini estratti per la prima volta dall'ambiente. Un valore R_1 pari a zero implica che il prodotto ha un elevato impatto ambientale associato all'estrazione e alla lavorazione delle materie prime. Questo perché la produzione di materiale vergine spesso comporta processi ad alta intensità energetica e può portare a conseguenze ambientali significative, come emissioni di gas serra, inquinamento delle acque e degrado del territorio. Dal punto di vista dell'economia circolare, un valore R_1 pari a zero non è auspicabile in quanto rappresenta un approccio lineare alla gestione delle risorse, in cui le risorse vengono estratte, utilizzate e scartate senza considerare il loro potenziale di riutilizzo o recupero. Per migliorare la circolarità di un prodotto e ridurre l'impronta ambientale, è essenziale aumentare la percentuale di contenuto riciclato (R_1). Ciò può essere ottenuto attraverso varie strategie, come ad esempio:

- Progettare prodotti riciclabili: incorporare materiali facilmente riciclabili e ridurre al minimo l'uso di materiali misti o progetti complessi che ostacolano i processi di riciclaggio;
- Implementare programmi di riciclaggio efficaci: stabilire sistemi efficienti di raccolta e smistamento per garantire che i materiali riciclabili siano adeguatamente deviati dalle discariche e reintrodotti nel ciclo produttivo;
- Promuovere la consapevolezza dei consumatori: educare i consumatori sull'importanza del riciclaggio e incoraggiarli a fare scelte informate sui prodotti che acquistano.

Aumentando l' R_1 , i prodotti possono allontanarsi da un modello lineare e abbracciare un approccio più circolare, riducendo il loro impatto ambientale e contribuendo a un sistema di gestione delle risorse più sostenibile.

Tabella 9: Valori LCIA applicando la CFF con R_1 nullo

Categoria d'impatto	Rubber	Steel, low-alloyed	Steel chromium	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Aluminium	ABS	Plastic	Cavi	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	0,7	248,1	406,6	5,1	142,6	5,6	0,5	11,1	4,1	0,5	14,0	22,1	182,4	18,1	30,2
Land use	1,5	801,8	2234,8	-0,4	-12,1	25,0	16,9	23,4	-0,1	1,1	167,6	97,6	607,6	75,8	90,7
Water use	0,2	31,3	275,2	1,4	142,9	1,4	0,5	0,8	1,7	0,1	10,4	4,7	49,2	2,9	8,7

Il grafico riportato nella Figura n.26 mostra l'andamento dei dati ottenuti a seguito dell'analisi LCA generata dalla modifica del parametro R_1 , visibili nella tabella n.9. Indicativamente è possibile notare come l'utilizzo nullo di materiale riciclato comporti valori in percentuale globalmente positivi, comportando un aumento dell'impatto in questa casistica. Per i componenti elettronici è possibile mantenere le stesse considerazioni effettuate nelle casistiche precedenti.

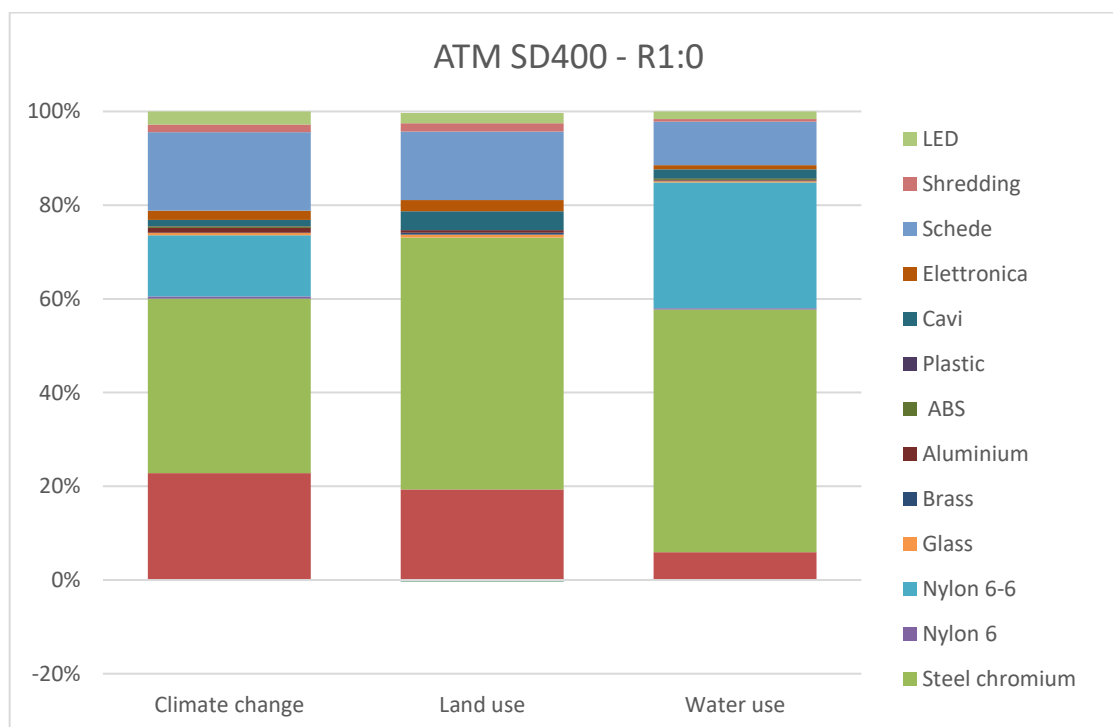


Figura 26: Indicatori del macchinario con parametro R_1 nullo

5.2.4 Percentuale di materiale riciclato da un sistema precedente (R_1) unitaria

Nella formula CFF, un valore di R_1 pari a 1 indica che l'intero materiale del prodotto proviene da un sistema precedente di riciclo. In questo scenario, l'impatto ambientale associato all'estrazione e alla lavorazione delle materie prime vergini è completamente eliminato, poiché il prodotto viene interamente realizzato con materiali riciclati. Ciò si traduce in una riduzione significativa dell'impronta ambientale complessiva del prodotto e rappresenta un ideale da perseguire nell'ottica di un'economia circolare. Tuttavia, è importante sottolineare che raggiungere un R_1 unitario non sempre è fattibile o pratico per tutti i prodotti. Esistono diverse limitazioni che possono ostacolare il raggiungimento di questo obiettivo:

- Disponibilità di materiale riciclato: la quantità e la qualità dei materiali riciclati disponibili potrebbero non essere sufficienti per soddisfare la domanda di produzione;
- Proprietà tecniche: le caratteristiche dei materiali riciclati potrebbero non essere sempre perfettamente compatibili con le esigenze di specifiche applicazioni, richiedendo compromessi o adattamenti nel design del prodotto;
- Efficienza del processo di riciclo: i processi di riciclo possono essere energeticamente intensi e generare emissioni, influenzando l'impatto ambientale complessivo del prodotto riciclato;
- Contaminanti: i materiali riciclati potrebbero contenere tracce di contaminanti indesiderabili, necessitando di processi di purificazione supplementari che potrebbero aumentare l'impatto ambientale.

L'obiettivo di massimizzare il contenuto di riciclato (R_1) nei prodotti rimane fondamentale per ridurre l'impatto ambientale del sistema produttivo e promuovere la transizione verso un'economia circolare.

Tabella 10: Valori LCIA applicando la CFF con parametro R_1 unitario

Categoria d'impatto	Rubber	Steel, low-alloyed	Steel chromium	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Aluminium	ABS	Plastic	Cavi	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	0,4	174,1	-847,0	-2,9	-71,0	0,1	-0,8	-26,1	-0,7	-0,2	14,0	22,1	182,4	18,1	30,2
Land use	0,3	675,3	-4620,9	7,3	230,4	0,6	-21,9	-48,8	10,4	-0,4	167,6	97,6	607,6	75,8	90,7
Water use	0,0	30,3	-332,8	-0,6	-116,8	-0,2	-0,8	-2,6	-0,5	0,0	10,4	4,7	49,2	2,9	8,7

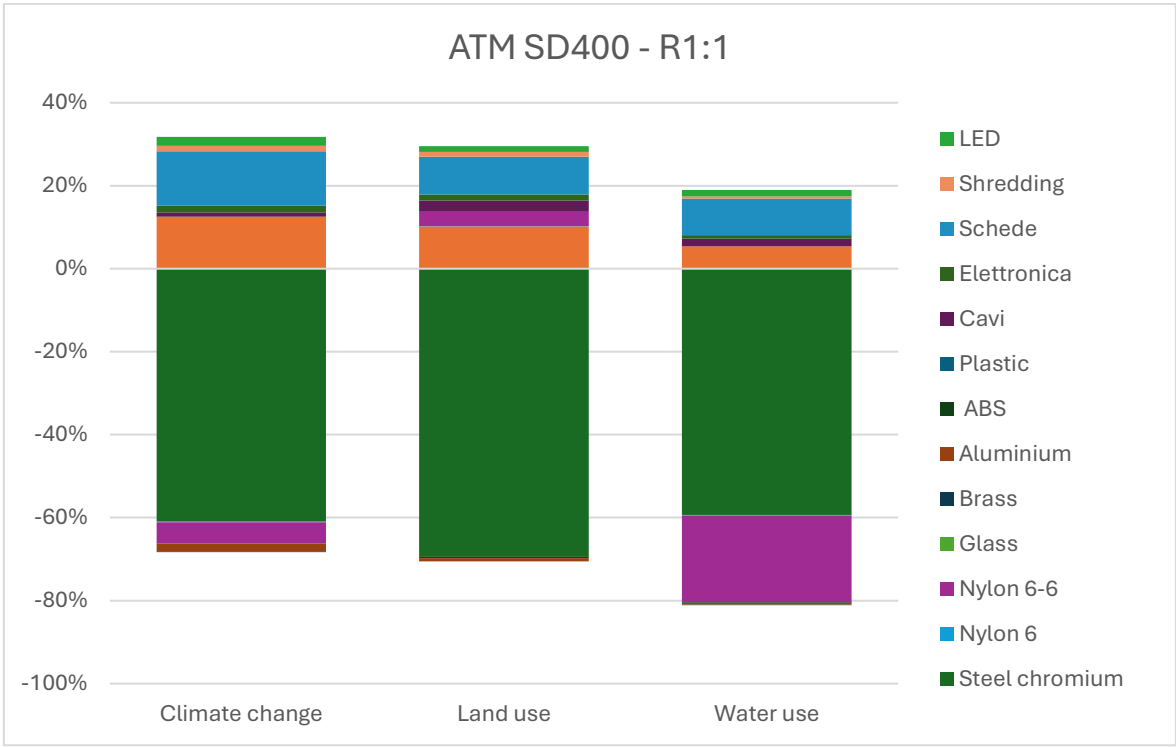


Figura 27: Indicatori del macchinario con parametro R_1 unitario

La tabella n.10 e, di conseguenza, il grafico n.27 mostrano, come prevedibile sulla base delle assunzioni fatte, un andamento in percentuale negativo soprattutto dovuto all'acciaio e al nylon 6-6.

5.2.5 Percentuale di materiale riciclabile a fine vita (R_2) nulla

Il parametro R_2 gioca un ruolo cruciale nella valutazione della circolarità dei prodotti all'interno della CFF. Esso rappresenta la percentuale di materiale di un prodotto che può essere riciclato a fine vita e reimmesso nel ciclo produttivo. Essenzialmente riflette il potenziale di riciclabilità del prodotto. Nel contesto della CFF, un prodotto con zero percentuale (0%) per il parametro R_2 indica che nessun materiale proveniente dal prodotto può essere riciclato e reimmesso nel ciclo produttivo al termine della sua vita utile. Ciò implica che il prodotto non ha potenziale di riciclabilità e pone una sfida significativa in termini di gestione dei rifiuti e circolarità. Un valore R_2 pari a zero ha diverse implicazioni per l'impronta ambientale del prodotto e la sostenibilità complessiva:

- Maggiore impatto ambientale: l'intero prodotto, una volta giunto al termine del suo ciclo di vita, finirà probabilmente in discariche o inceneritori, con conseguente rilascio di sostanze inquinanti dannose e perdita di risorse preziose;
- Esaurimento delle risorse naturali: la produzione di nuovi prodotti continuerà a dipendere dall'estrazione di materiali vergini, mettendo ulteriormente a dura prova le risorse naturali limitate e gli ecosistemi;
- Sfide nella gestione dei rifiuti: lo smaltimento di prodotti non riciclabili contribuisce al crescente problema dei rifiuti solidi urbani, mettendo a dura prova le infrastrutture di gestione dei rifiuti e portando potenzialmente alla contaminazione ambientale.

Per affrontare il problema del valore R_2 nullo è necessario un approccio articolato.

Dapprima occorre selezionare i materiali dando priorità all'uso di materiali intrinsecamente riciclabili nella progettazione del prodotto per aumentare la probabilità di riciclaggio a fine vita. È necessario progettare per la riciclabilità ideando prodotti tenendo presente lo smontaggio e la separazione dei materiali, semplificando i processi di riciclaggio per

recuperare i singoli componenti. È opportuno lavorare nello sviluppo e nell'espansione di strutture e processi di riciclaggio in grado di gestire in modo efficace una gamma più ampia di materiali.

Altresì è fondamentale educare i consumatori sulla corretta raccolta differenziata e sulle pratiche di riciclaggio per garantire che i materiali raggiungano i flussi di riciclaggio appropriati ideando opzioni di gestione dei rifiuti per materiali che attualmente sono difficili da riciclare.

Tabella 11: Valori LCIA del macchinario applicando la CFF con parametro R_2 nullo

Categoria d'impatto	Rubber	Steel, low-alloyed	Steel, chromium	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Aluminium	ABS	Plastic	Cavi	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	0,4	83,5	185,2	0,5	16,1	-0,3	0,0	-0,1	0,8	-0,2	14,0	22,1	202,0	18,1	30,3
Land use	-0,1	272,5	1117,9	-0,4	-13,7	-1,3	0,1	-0,1	-0,6	-0,3	167,6	97,6	642,7	75,8	90,7
Water use	0,0	-10,7	26,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	10,4	4,7	51,6	2,9	8,7
Resource use, fossils	-0,7	546,1	1951,9	-2,7	-84,9	-5,9	0,0	-1,7	-4,0	-1,9	201,1	278,1	2424,5	229,2	377,8

Andando a modificare la percentuale di materiale riciclabile a fine vita e rendendola nulla è possibile vedere come tutti gli andamenti degli indicatori per ciascun materiale abbiano andamenti positivi. Questo comporta un aumento dell'impatto ambientale dello smaltimento dell'intera macchina.

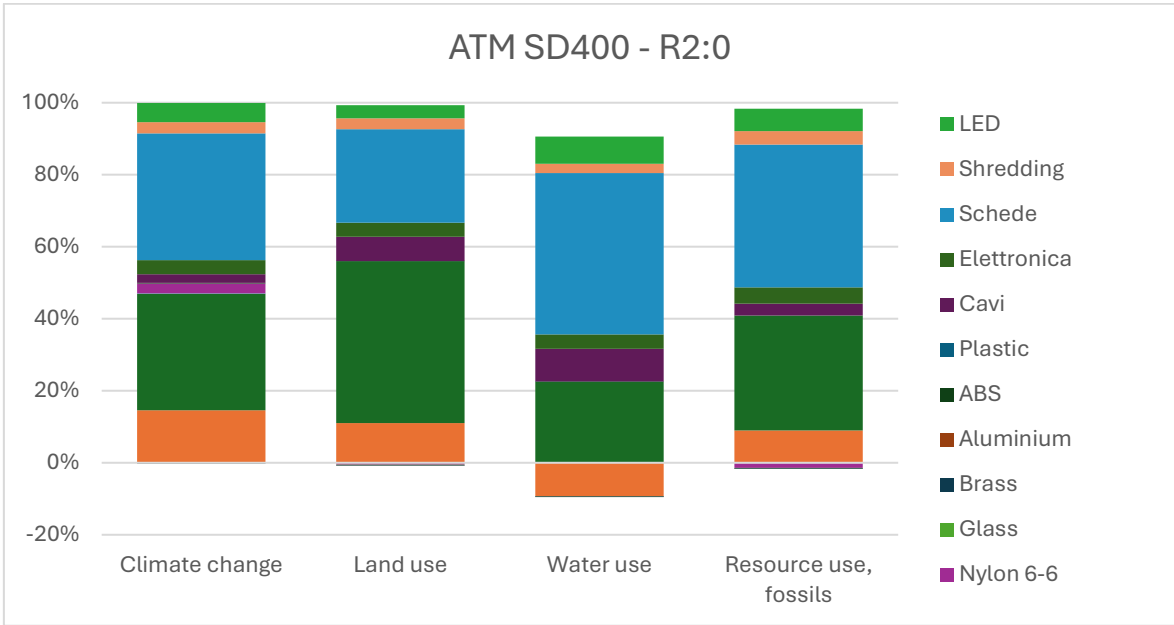


Figura 28: Indicatori del macchinario con parametro R_2 nullo

Per quanto riguarda i componenti elettronici, avendo imposto un valore del parametro R_2 pari a 0.8, i valori dei singoli indicatori in questo specifico caso saranno maggiori. Quanto detto è visibile dall'andamento del grafico n.29 riportato sotto.

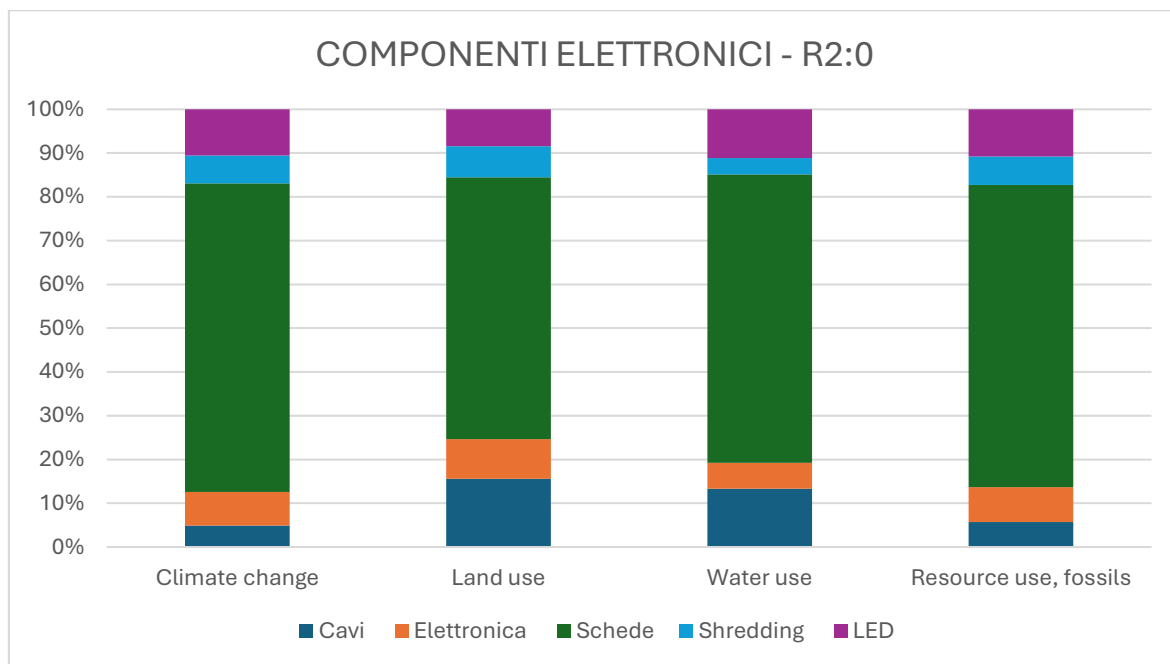


Figura 29: Indicatori dei componenti elettronici con parametro R_2 nullo

5.2.6 Percentuale di materiale riciclabile a fine vita (R_2) unitaria

Nell'ambito della CFF, un valore unitario di R_2 rappresenta un prodotto interamente riciclabile e che può essere pienamente reimmesso nel ciclo produttivo al termine del suo ciclo di vita. Ciò implica che il prodotto abbia il massimo potenziale di riciclabilità e sia in linea con i principi di un'economia circolare.

Un valore R_2 unitario ha diverse implicazioni positive per l'impatto ambientale del prodotto e la sostenibilità complessiva:

- Impatto ambientale ridotto al minimo: la gestione del fine vita del prodotto non contribuisce alla generazione di rifiuti o all'esaurimento delle risorse naturali, poiché i materiali vengono continuamente reimmessi nel processo di produzione;
- Sistema a circuito chiuso: il prodotto esemplifica un sistema a circuito chiuso in cui le risorse vengono utilizzate in modo efficiente e i rifiuti sono ridotti al minimo, riducendo l'impatto ambientale complessivo;
- Gestione sostenibile delle risorse: il prodotto promuove la gestione sostenibile delle risorse massimizzando il recupero e il riutilizzo di materiali preziosi, riducendo la necessità di estrazione di materiale vergine.
-

Tabella 12: Valori LCIA ottenuti applicando la CFF con parametro R_2 unitario

Categoria d'impatto	Rubber	Steel, low-alloyed	Steel, chromium	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Aluminium	ABS	Plastic	Cavi	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	-0,17	78,11	-616,59	-0,63	-19,59	-4,89	-0,68	-26,97	-0,92	-0,34	14,00	22,11	180,19	18,07	30,20
Land use	-1,05	246,41	-3361,6	-3,81	-119,2	-21,93	-9,05	-46,14	-5,61	-0,65	167,58	97,55	603,70	75,82	90,66
Water use	-0,11	-12,24	-80,96	-0,39	-12,22	-1,08	-0,58	-3,30	-0,57	-0,03	10,42	4,65	48,91	2,93	8,71
Resource use, fossils	-5,09	492,59	-6459,5	-18,49	-578,9	-55,01	-7,73	-248,72	-27,24	-3,63	201,13	278,10	2338,15	229,16	377,73

In questo ultimo caso analizzato l'andamento complessivo del macchinario il comportamento dei singoli indicatori è opposto rispetto alla situazione precedente. Nel grafico n.30 è possibile vedere l'andamento degli indicatori per ciascun materiale o componente presente nel macchinario, mentre nel grafico n.32 sono riportati gli andamenti degli indicatori considerando l'ATM nel suo intero. In quest'ultimo caso si evince una tendenza del grafico praticamente opposta rispetto al valore nullo del parametro R_2 .

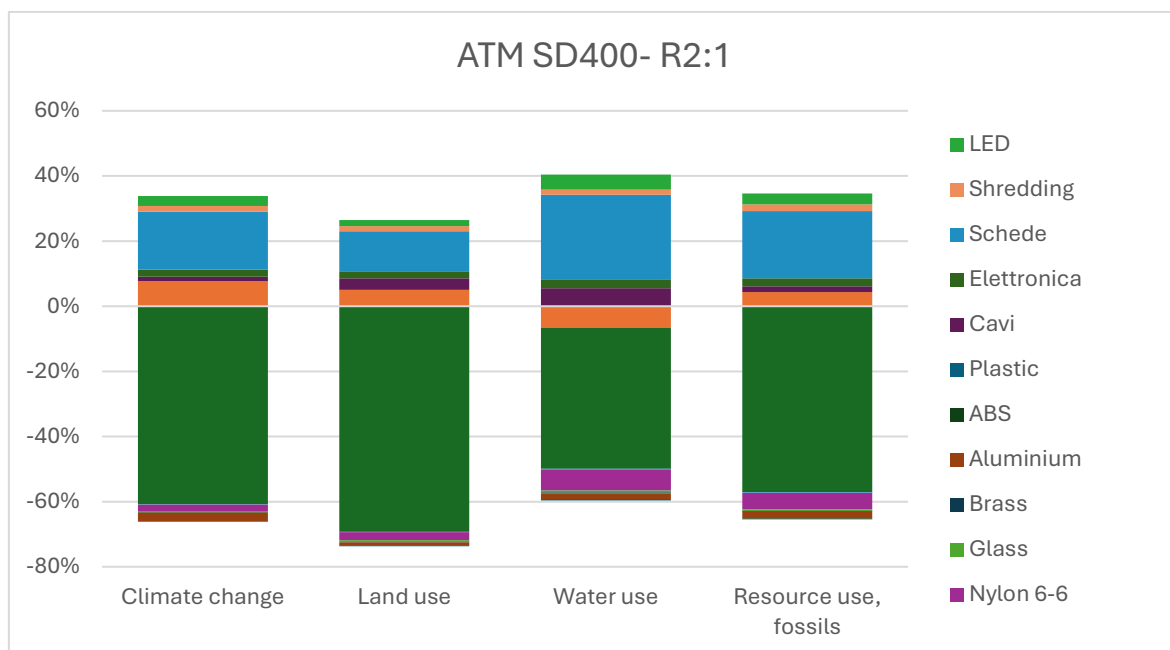


Figura 30: Indicatori del macchinario con parametro R_2 unitario

Infine, nel grafico n.31 è riportato il comportamento dei componenti elettronici pressoché identico alle altre analisi effettuate. Considerando la vicinanza del valore di R_2 rispetto al caso iniziale, i valori degli indicatori per ciascun componente saranno molto più vicini al caso iniziale dell'applicazione della CFF rispetto che al valore degli indicatori ottenuti applicando la CFF con parametro R_2 nullo.

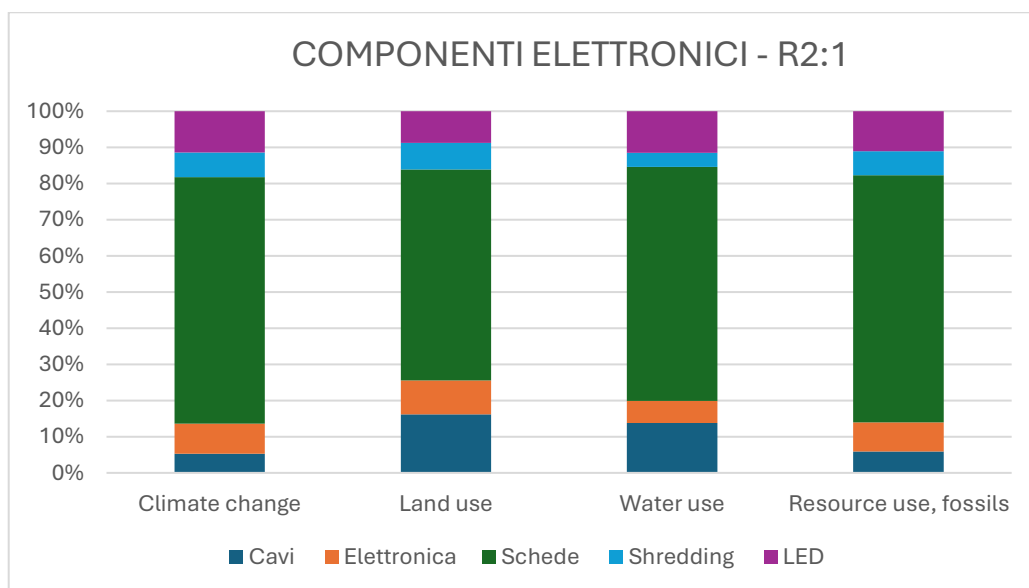


Figura 31: Valore degli indicatori dei componenti elettronici con parametro R_2 unitario

CAPITOLO 6

DISCUSSIONE

6.1 METODO TRADIZIONALE DI MODELLAZIONE DELLO SMALTIMENTO PROPOSTO DA ECOINVENT

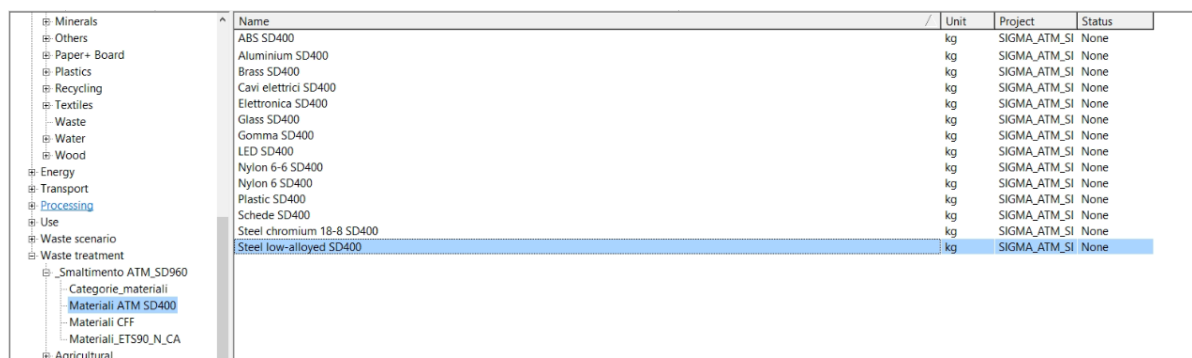
Ai fini dello studio, è stata effettuata un'analisi LCIA utilizzando i dataset proposti da Ecoinvent per lo smaltimento secondo le modalità di applicazione definita da SimaPro. La necessità di questa ulteriore analisi nasce con l'obiettivo di ottenere dati comparabili a quelli generati utilizzando la CFF. Questo consente di comparare i risultati ottenuti dall'applicazione della CFF, sia usando i parametri ricavati dall'Allegato-C che modificandoli, con i risultati che si ottengono tramite i dataset di Ecoinvent. In questo modo è possibile analizzare i miglioramenti che si avrebbero con l'utilizzo della CFF.

Utilizzando Ecoinvent, un quadro LCA ben consolidato e ampiamente riconosciuto, come punto di riferimento, lo studio può valutare efficacemente la robustezza della formula dell'impronta circolare nella quantificazione degli impatti ambientali. Lo studio esegue innanzitutto un LCIA utilizzando il set di dati Ecoinvent all'interno di SimaPro. Questa analisi segue la metodologia LCA standard e fornisce una valutazione completa degli impatti ambientali del prodotto o sistema in esame. Vengono quindi confrontati i risultati ottenuti sia dalla LCIA basata su Ecoinvent che dalla CFF. Questo confronto aiuta a identificare eventuali discrepanze o incongruenze tra i due approcci.

Confrontando i risultati dell'analisi LCIA relativa al fine vita condotta utilizzando la CFF con quelli ottenuti con il tradizionale approccio Ecoinvent è possibile individuare quale metodologia produce una valutazione di impatto ambientale inferiore. Un confronto diretto dei valori numerici può fornire indicazioni iniziali. Tuttavia, occorre interpretare i risultati considerando diversi fattori:

- La CFF ed Ecoinvent utilizzano diversi metodi di allocazione per la gestione dei materiali riciclati e il trattamento di fine vita. Queste differenze metodologiche possono influenzare le risultanti valutazioni di impatto ambientale;
- L'ambito dell'analisi LCIA, che comprende le fasi specifiche del ciclo di vita considerate, può avere un impatto sulla valutazione dell'impatto ambientale. Garantire che entrambe le metodologie siano applicate in modo coerente entro gli stessi confini del sistema;
- La qualità e la rappresentatività dei dati sottostanti utilizzati sia nella CFF che in Ecoinvent possono influenzare l'accuratezza delle valutazioni di impatto ambientale.

Per effettuare l'analisi degli impatti si è dapprima creato un processo di smaltimento del prodotto utilizzando i dataset standard di Ecoinvent senza apportare alcuna modifica. La figura n.32 mostra la creazione del processo di smaltimento del macchinario all'interno di SimaPro.



Name	Unit	Project	Status
ABS SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Aluminium SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Brass SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Cavi elettrici SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Electronica SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Glass SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Gomma SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
LED SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Nylon 6-6 SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Nylon 6 SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Plastic SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Schede SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Steel chromium 18-8 SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None
Steel low-alloyed SD400	kg	SIGMA_ATM_SI	None

Figura 32: Modifica dei materiali presenti nel dataset di Ecoinvent

Prima di inserire all'interno del processo di smaltimento ciascun materiale o componente elettronico, sono state effettuate alcune ipotesi sulla gestione del fine vita. Per quanto riguarda i materiali, l'80% è stato riciclato secondo le metodologie di riciclo specifiche del materiale mentre il 20% è stato mandato in discarica [3].

Un esempio di quanto detto è mostrato nella figura n.33 in cui è possibile vedere la modellazione dell'alluminio su SimaPro

Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment	Amount	Unit	Distribution
Aluminium (waste treatment) (GLO) recycling of aluminium Cut-off, U	0.8	kg	Undefined
Waste aluminium (RoW) treatment of, sanitary landfill Cut-off, U	0.2	kg	Undefined
Add			

Figura 33: Modifica dell'output di smaltimento dell'alluminio in Ecoinvent

I componenti elettronici come, ad esempio, i cavi e le schede, sono stati interamente inviati in discarica senza possibilità di riciclo. La figura n.34 mostra lo smaltimento dei cavi all'interno di SimaPro.

Add				
Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD
Used cable (GLO) treatment of Cut-off, U	1	kg	Undefined	
Add				

Figura 34: Modifica dello smaltimento dei componenti elettronici in Ecoinvent

Nel processo di smaltimento sono state richiamate le modellazioni effettuate per i singoli materiali e componenti presenti nel macchinario inserendo per ciascuno di essi il peso, come riportato nella figura n.35. Successivamente si è proceduto ad effettuare l'analisi degli impatti.

Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment	Amount	Unit
Waste electric and electronic equipment (GLO) treatment of, shredding Cut-off, U	Peso_tot_ATM400 = 350	kg
Glass SD400	Peso_vetro_CFF = 6.1	kg
Aluminium SD400	Peso_aluminium_CFF = 1.69	kg
Schede SD400	Peso_schede_CFF = 1.8	kg
Plastic SD400	Peso_plastic_CFF = 1.32	kg
Steel chromium 18-8 SD400	Peso_steel_chromium_CFF = 216	kg
Cavi elettrici SD400	Peso_cavi_CFF = 3.07	kg
Steel low-alloyed SD400	Peso_steel_low_CFF = 114	kg
Nylon 6 SD400	Peso_Nylon6_CFF = 0.47	kg
Nylon 6-6 SD400	Peso_Nylon66_CFF = 14.7	kg
LED SD400	Peso_LED_CFF = 0.11	kg
Gomma SD400	Peso_rubber_CFF = 0.129	kg
Elettronica SD400	Peso_Elettronica_CFF = 0.02	kg
Brass SD400	Peso_Brass_CFF = 0.19	kg
ABS SD400	Peso_ABS_CFF = 0.693	kg
Add		

Figura 35: Richiamo nello smaltimento del prodotto dei materiali modificati

I risultati ottenuti sono stati riportati nella tabella n.13 e raffigurati nel grafico n.36

Tabella 13: Dati ricavati dall'analisi del prodotto finito

Categoria d'impatto	Rubber	Steel, low-alloyed	Steel, chromium	Nylon 6	Nylon 6-6	Glass	Brass	Aluminium	ABS	Plastic	Cavi	Elettronica	Schede	Shredding	LED
Climate change	18,1	0,9	0,0	0,1	0,0	32,8	2,8	17,4	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Land use	75,8	0,7	0,2	0,3	0,2	26,3	2,2	14,0	0,1	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Water use	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Resource use, fossils	229,2	0,4	0,2	1,6	0,1	14,7	7,5	7,8	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

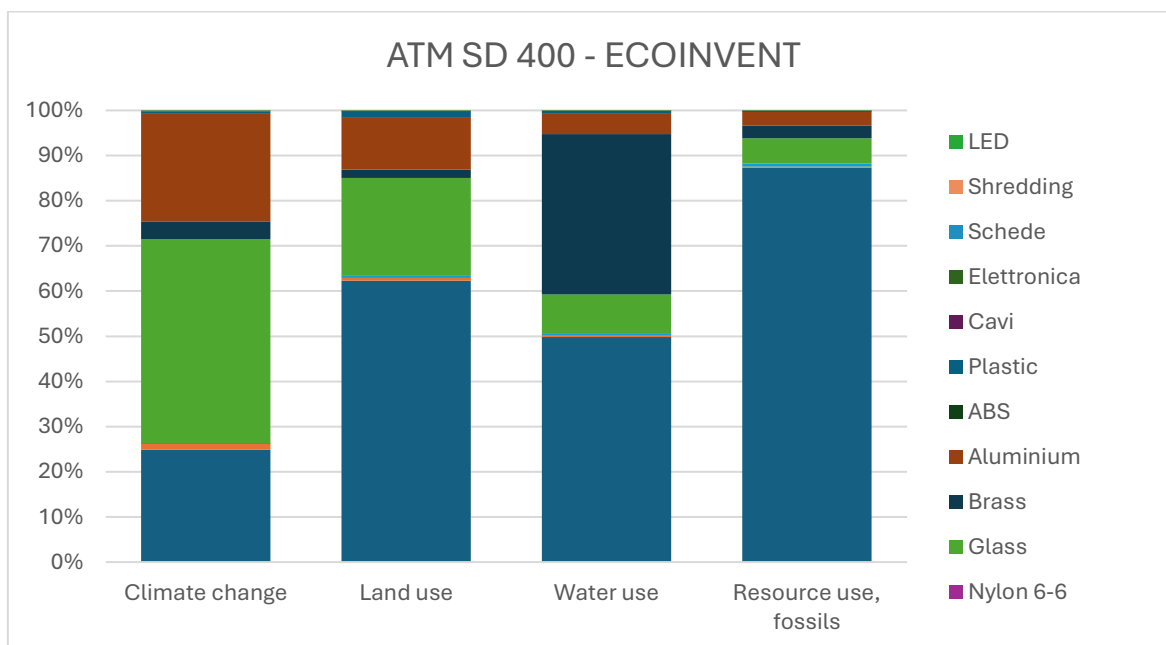


Figura 36: Andamento degli indicatori a seguito dell'analisi del macchinario

Come mostrato nel capitolo precedente in cui sono stati riportati i dati ottenuti a seguito dell'applicazione della CFF, anche al termine di questa analisi gli indicatori più significativi sono il cambiamento climatico, l'uso di suolo, l'uso di acqua e il consumo di risorse fossili.

6.2 CONFRONTO DEI VALORI OTTENUTI IN RAPPORTO ALL'APPLICAZIONE DELLA CFF

L'obiettivo principale rimane quello di comprendere se l'applicazione della CFF in SimaPro comporti una riduzione del valore degli indicatori e, di conseguenza, una riduzione dell'impatto ambientale. Inoltre, avendo modificato i parametri usati per applicare la CFF, è opportuno identificare la casistica con il minor impatto ambientale tra quelle analizzate. Per farlo, ci si basa sui valori ottenuti dall'analisi ambientale confrontati in Excel.

I passi che si sono eseguiti per ottenere tale confronto sono:

1. Importare i dati LCIA in Excel: estrarre i dati da SimaPro in formato compatibili con Excel ed importarli in un foglio di calcolo;
2. Identificare gli indicatori con impatto negativo: per ogni indicatore identificare il valore riscontrato a seguito dell'analisi ed evidenziare i valori negativi che indicano un minore impatto ambientale;
3. Confronto: per ciascuna analisi effettuata, evidenziare chi presenta valori negativi maggiori per ciascun indicatore. Questo consente di identificare la casistica con il minor impatto.

In questa sezione, si riporta un'analisi preliminare volta a valutare l'efficacia della metodologia CFF e ad approfondire il suo comportamento al variare dei parametri. I dati utilizzati sono riportati nella Tabella 14 e visualizzati graficamente nella Figura 37.

Tabella 14: Confronto tra i valori ottenuti nelle analisi

	CFF	A - 0	A - 1	R ₁ - 0	R ₁ - 1	R ₂ - 0	R ₂ - 1	ECOINVENT
Climate change	-198,55	-343,32	380,54	1091,12	-507,37	572,40	-328,10	72,65
Land use	-1691,57	-2526,51	1648,17	4130,12	-2728,36	2448,33	-2287,34	121,70
Water use	-10,09	-21,56	35,81	531,43	-348,15	93,46	-35,86	5,88

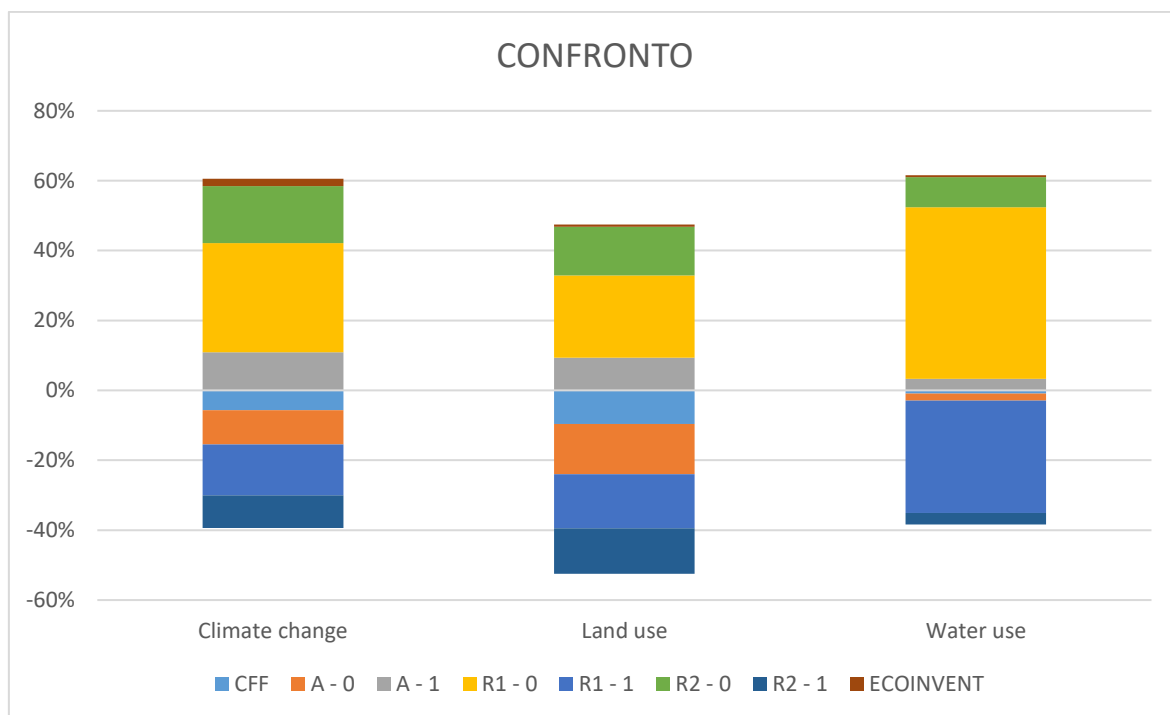


Figura 37: Andamento degli indicatori al variare dell'analisi effettuata

Il caso iniziale, denominato CFF, rappresenta lo scenario di riferimento, in cui sono stati applicati i valori dei parametri della CFF suggeriti dall'Allegato-C della PEF. I risultati ottenuti suggeriscono che la CFF è sensibile al parametro R_1 , ovvero la percentuale di materiale riciclato impiegato influenza i risultati della metodologia.

- $R_1 = 0$: quando la percentuale di materiale riciclato è nulla, tutti gli indicatori assumono valori positivi o prossimi allo zero. Questo scenario rappresenta il caso limite in cui nessun materiale riciclato viene utilizzato nella produzione;
- $R_1 = 100$: quando la percentuale di materiale riciclato è pari al 100%, si ottiene il migliore caso tra quelli analizzati. In questo scenario, tutti i materiali utilizzati nella produzione sono riciclati. Tutti gli indicatori assumono valori negativi o nulli.

Le due casistiche estreme ($R_1 = 0$ e $R_1 = 100$) evidenziano come il parametro R_1 sia quello che maggiormente influenza i risultati della CFF. In termini di valore assoluto, si osservano le quantità maggiori proprio in queste due situazioni.

Il grafico n.38 riporta il confronto tra la casistica iniziale dell'applicazione della CFF e quelle date dalla variazione del parametro R_1 .

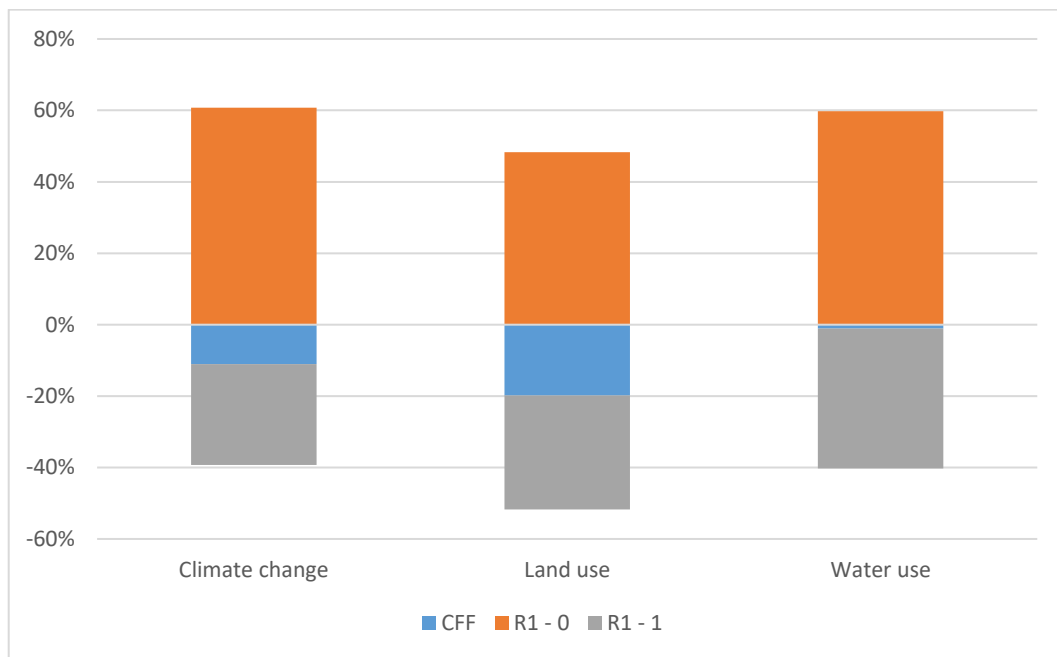


Figura 38: Confronto tra l'applicazione della CFF iniziale, CFF con R_1 nullo e R_1 unitario

Il parametro R_2 nella CFF rappresenta la percentuale del prodotto che verrà riciclata o riutilizzata in futuro. Considera le inefficienze nei processi di raccolta e riciclo. Anche R_2 assume un valore compreso tra 0 e 1:

- $R_2 = 0$: indica che il prodotto non verrà riciclato o riutilizzato a fine vita;
- $R_2 = 1$: indica che il prodotto sarà perfettamente riciclato o riutilizzato a fine vita.

L'impronta circolare di un prodotto diminuisce all'aumentare del valore di R_2 . Quindi, maggiore è il tasso di riciclaggio o riutilizzo, minore è l'impatto ambientale del prodotto (Figura n.39).

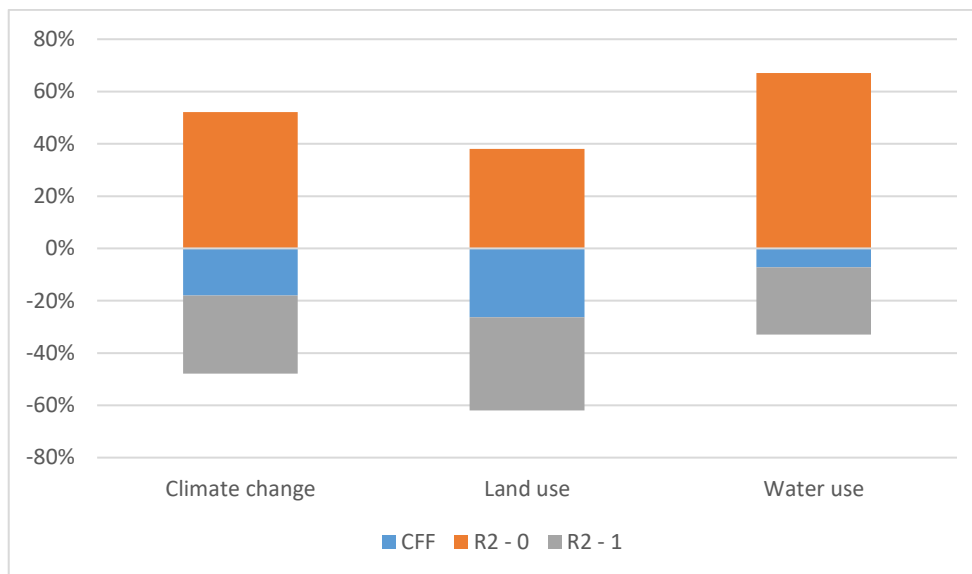


Figura 39: Confronto tra l'applicazione della CFF iniziale, CFF con R_2 nullo e R_2 unitario

Dal confronto tra i risultati ottenuti applicando la metodologia CFF e quelli ottenuti utilizzando il dataset Ecoinvent, si ottiene quanto mostrato dal grafico in Figura n.40. Il grafico mostra chiaramente che la CFF garantisce una notevole riduzione dell'impatto ambientale complessivo del macchinario rispetto al metodo cut-off applicato dal dataset Ecoinvent. Questo risultato suggerisce una migliore accuratezza nel risultato dell'analisi utilizzando un dataset modificato tramite la CFF rispetto a quello disponibile nel database commerciale.

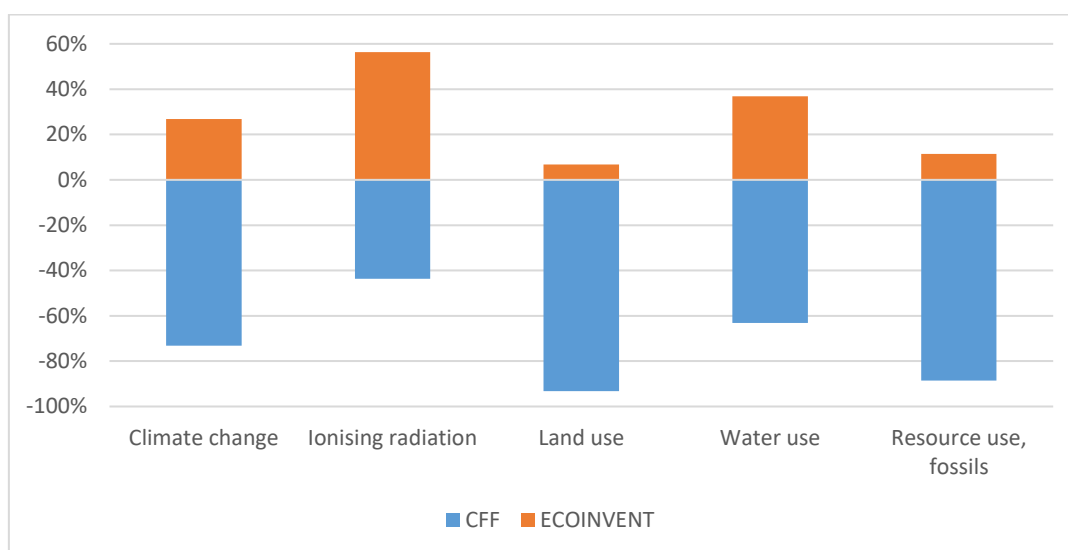


Figura 40: Confronto tra l'applicazione della CFF ed Ecoinvent

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi è confrontare due metodologie per la valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti: il processo di smaltimento suggerito da Ecoinvent applicato al software SimaPro e le direttive europee della PEF riguardanti la formula CFF.

Per raggiungere tale scopo è stata implementata la CFF in SimaPro andando a modificare il dataset di Ecoinvent v3.6 con l'utilizzo di parametri ricavati in letteratura. È importante sottolineare che i risultati ottenuti in questa analisi si riferiscono esclusivamente al macchinario specifico oggetto di studio. Non è possibile estendere automaticamente tali risultati ad altri macchinari o contesti, anche se simili. Ogni macchinario presenta caratteristiche e prestazioni uniche, che possono influenzare significativamente il suo impatto ambientale. Pertanto, i risultati ottenuti per un singolo macchinario non possono essere generalizzati ad altri senza un'analisi approfondita. Di conseguenza, i risultati ottenuti in uno specifico contesto non possono essere applicati direttamente ad altri contesti differenti. Per ottenere una valutazione precisa dell'impatto ambientale di un macchinario, è opportuno effettuare un'analisi LCA specifica per quel macchinario, considerando le sue caratteristiche peculiari e il contesto in cui viene utilizzato.

L'analisi LCA condotta in questo studio si è focalizzata su un modello di macchina ATM considerando esclusivamente lo smaltimento dei materiali che lo compongono. Sebbene questa analisi fornisca informazioni preziose sull'impatto ambientale della fase di smaltimento del macchinario specifico, sarebbe opportuno ampliare lo studio in futuro per includere anche quei materiali che non sono inseriti all'interno dell'ATM.

I risultati mostrano che l'applicazione della CFF in SimaPro consente di ottenere indicatori con valore minore rispetto a quanto proposto di norma dall'utilizzo del semplice dataset di

Ecoinvent. Questo concetto è perfettamente in linea con quanto suggerisce la metodologia alla base dello sviluppo della formula CFF. Dalle analisi effettuate nel corso dello studio si può affermare che la formula CFF risulta più sensibile al cambiamento del parametro R_1 . Nello specifico, un valore di R_1 unitario consente di garantire la riduzione maggiore dell'impatto ambientale del macchinario oggetto di studio per tutti gli indicatori analizzati. Il caso di R_1 unitario implica avere in ingresso interamente materiale secondario riciclato in un sistema precedente. Di conseguenza, i risultati mostrano anche come valori di R_1 nulli corrispondano alla situazione peggiore per tutte le categorie di impatto ambientale. La formula risulta invece meno sensibile al cambiamento dei parametri A e R_2 .

In conclusione, la CFF è un approccio all'analisi dell'impatto ambientale che può essere considerato ancora in fase di sviluppo. Inoltre, parametri utilizzati per modificare il dataset di Ecoinvent, ovvero quelli ricavati dall'Allegato-C della PEF e i fattori di risparmio energetico identificati per ogni materiale, sono rapportabili agli studi effettuati finora. Per ottenere un risultato affidabile è opportuno che tali dati vengano aggiornati con il progredire degli studi presenti in letteratura. Nonostante questi limiti, l'applicazione della formula CFF proposta in questo lavoro di tesi mostra dei risultati coerenti con l'approccio metodologico che ci si aspetta venga utilizzato nel contesto dell'economia circolare, tenendo conto degli sforzi delle imprese nella gestione sostenibile del fine vita.

BIBLIOGRAFIA

- [1] European commission (2010). *General guide for Life Cycle assessment – detailed guidance*
- [2] Tagliabue L. (2015), *Modellazione di riciclo, riuso e recupero energetico nelle analisi del ciclo di vita dei prodotti: confronto fra le equazioni disponibili nella normativa tecnica*. Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia.
- [3] European commission (2017). *Product environmental footprint category rules guidance*.
- [4] UNI (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO14040:2006)*
- [5] Zampori L (2019). *Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method*.
- [6] Weidema B.P., Bauer C., Hischer R., Mutel C., Nemecek T., Reinhard J., Vadenbo C.O., Wernet G. (2013) *Panoramica e metodologia. linee guida sulla qualità dei dati per il database Ecoinvent versione 3*.
- [7] Geodkoop M., Oele M., Leijting J., Ponsioen T., Meijer E. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*
- [8] Sayné Mengual E., Sala S. (2023). *Consumption Footprint and Domestic Footprint: assessing the environmental impacts of EU consumption and production*.
- [9] Stacey M. (2015). *Aluminium recyclability and recycling: towards sustainable cities*
- [10] EuRIC (2019). *Metal recycling factsheet*
- [11] Toto D, (2019). *APR study: Recycled plastics lower energy consumption, greenhouse gas emissions*. Tratto da Recycling today: <https://www.recyclingtoday.com/news/apr-life-cycle-impact-assessment-recycled-pet-hdpe-pp>
- [12] Batlle Bayer L. (2024). *The circular footprint formula (CCF), the EU methodology to credit for circular strategies*. Tratto da Areco.org: <https://areco.org/es/en/the-circular-footprint-formula/>