UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Sostenibilità ambientale nei sistemi di filtrazione dell'aria: analisi LCA comparativa di tre filtri particellari

Candidato:

Davide Simonetti

Relatore:

Prof. Michele Germani

Correlatrice:

Dott.ssa Federica Cappelletti

Anno Accademico 2025/2026

Sommario

Indice delle figure 3
Indice delle tabelle 3
1 Introduzione 4
1.1 Scopo del lavoro di tesi 4
1.2 Struttura della tesi 4
2 Materiali e tecnologie ad impronta ridotta per componenti strutturali 6
2.1 La decarbonizzazione della filiera dell'alluminio: un'analisi di sostenibilità e supporto decisionale tramite LCA 6
2.2 Integrazione e sostenibilità nello stampaggio: il ruolo dei sistemi IMC nelle valutazioni LCA 8
2.3 Analisi comparativa delle tipologie di MDF in letteratura 10
3 Metodologia e scopo dell'analisi 13
3.1 Obiettivo dell'analisi 15
3.2 Unità funzionale 15
3.3 Confini del sistema 15
3.4 Categorie di impatto ambientale, modelli e indicatori 16
3.5 Fonti e allocazione 19
3.6 Riferimento temporale e geografico 19
3.7 Limitazioni 19
4 Analisi di Inventario 21
4.1 Descrizione delle materie prime 21
4.2 Trasporti 22
4.3 Processi produttivi 23
4.4 Scarti 24
4.5 Modellazione della fase di Fine Vita e assunzioni 25
5 Risultati e discussione 26
5.1 Analisi di scenario: impatto potenziale della fase di End-of-Life 37
6 Conclusioni 40
6.1 Conclusioni 40
6.2 Sviluppi futuri 41
7 Bibliografia 44

Indice delle figure

Figura 1 - Comparazione impatti sul climate change [Kg CO2 eq] del ciclo vita dei filtri in alluminio, plastica e MDF 26
Figura 2 - Comparazione impatti sul climate change [Kg CO2 eq] delle fasi del ciclo vita filtro alluminio 28
Figura 3 - Comparazione impatti sul climate change [Kg CO2 eq] telai alluminio, plastica e MDF 32
Figura 4 - Comparazione impatti ambientali sul climate change [Kg CO2 eq] processo di scarti filtro alluminio e plastica/MDF 34
Figura 5 - Comparazione sul climate change [Kg CO2 eq] trasporto scenario nazionale ed europeo dei tre filtri 36
Figura 6 - Comparazione scenari fine vita sul climate change 38

Indice delle tabelle

Tabella 1. Categorie di impatto (EF Method 3.1) 17
Tabella 2. Componenti e datasets 21
Tabella 3. Trasporti e datasets 22
Tabella 4. Processi produttivi e datasets 23
Tabella 5. Tempi ciclo e potenze assorbite 23
Tabella 6. Trattamento processo scarti 24
Tabella 7. Modellazione Scenari Fine Vita 25
Tabella 8. Comparazione impatti ambientali del ciclo vita del filtro in alluminio, plastica e MDF 27
Tabella 9. Comparazione impatti ambientali ciclo vita filtro in alluminio 29
Tabella 10. Comparazione impatti ambientali telaio alluminio, plastica e MDF 33
Tabella 11. Comparazione impatti ambientali per il processo scarti del filtro alluminio e filtro plastica/MDF 34
Tabella 12. Comparazione impatti ambientali scenari trasporto nazionale ed europeo dei tre filtri 36
Tabella 13. Comparazione scenari fine vita incenerimento e discarica 38

1 Introduzione

Negli ultimi decenni, l'attenzione dell'opinione pubblica sulla sostenibilità ambientale e la spinta verso la transizione ecologica è costantemente aumentata. Sempre più consumatori si stanno interessando alla questione e si assiste ad un cambiamento delle preferenze di acquisto a favore di prodotti sostenibili. Questo impone al settore industriale una profonda revisione dei processi produttivi e dei criteri di selezione dei materiali. La riduzione dell'impronta di carbonio e l'ottimizzazione dell'uso delle risorse sono diventati requisiti primari nella progettazione di componenti di largo consumo.

È quindi necessario quantificare gli impatti ambientali attribuibili a prodotti o a servizi, derivanti dai flussi di materiali dall'ambiente e verso l'ambiente (risorse estratte ed emissioni). La metodologia per quantificare gli impatti ambientali è quella dell'LCA (Life Cycle Assesment), riconosciuta a livello scientifico ed industriale come principale riferimento e basata su normative specifiche (UNI EN ISO 14040/44).

1.1 Scopo del lavoro di tesi

Il presente lavoro di tesi si propone di effettuare una valutazione comparativa dell'impatto ambientale nel loro ciclo di vita di tre filtri strutturalmente equivalenti ma caratterizzati da telai realizzati in tre diversi materiali: alluminio, plastica ABS (acrilonitrile butadiene stirene) e MDF (medium-density fibre board).

1.2 Struttura della tesi

L'elaborato si apre con un'introduzione generale che inquadra il contesto industriale di riferimento, evidenziando le criticità ambientali del settore e le motivazioni alla base della ricerca, fino a definire gli scopi primari dello studio. Per approfondire il lavoro nella letteratura scientifica esistente, l'analisi dello stato dell'arte ripercorre le principali applicazioni della metodologia LCA ai sistemi di filtrazione, esaminando le evidenze teoriche relative agli impatti dei materiali strutturali presi in esame.

La sezione metodologica entra nel dettaglio operativo con la definizione del modello LCA, all'interno del quale vengono formalizzati in modo rigoroso l'obiettivo dell'analisi, l'unità funzionale e i confini del sistema. Su questa base si innesta l'analisi dell'inventario,

dedicata interamente alla raccolta, bilanciamento e modellazione dei dati primari forniti dall'azienda e dei dati secondari integrativi.

La fase analitica culmina nella presentazione dei risultati e nella relativa discussione, dove si confrontano quantitativamente i principali indicatori di impatto ambientale per ciascun materiale, evidenziando il contributo specifico delle singole fasi del ciclo di vita. L'indagine si chiude con le conclusioni, che sintetizzano i risultati principali, definiscono con trasparenza i limiti dello studio e traducono le evidenze emerse in raccomandazioni pratiche per la progettazione sostenibile dei futuri sistemi di filtrazione.

2 Materiali e tecnologie ad impronta ridotta per componenti strutturali.

Il presente capitolo analizza lo stato dell'arte relativo all'applicazione della metodologia LCA nel settore dei sistemi di filtrazione, con particolare influenza dei materiali strutturali sull'impatto ambientale complessivo del prodotto.

Per inquadrare correttamente l'analisi comparativa tra telai in alluminio, plastica e MDF oggetto di questo studio, risulta fondamentale esaminare quanto sviluppato finora dalla letteratura scientifica.

Il presente capitolo ripercorre le principali ricerche svolte nel campo dell'LCA applicato ai materiali e processi del telaio, evidenziando le metodologie consolidate, i limiti attuali e i criteri di scelta dei materiali.

2.1 La decarbonizzazione della filiera dell'alluminio: un'analisi di sostenibilità e supporto decisionale tramite LCA

La transizione verso un'economia globale a basse emissioni di carbonio pone il settore industriale di fronte a un paradosso complesso: la necessità di incrementare la produzione di materiali chiave per la sostenibilità e, al contempo, l'urgenza di abbatterne drasticamente l'impatto ambientale. In questo scenario, l'alluminio occupa una posizione emblematica. Essenziale per la decarbonizzazione di settori strategici come i trasporti leggeri, le costruzioni ad alta efficienza energetica e le tecnologie per le energie rinnovabili, l'alluminio deve far fronte a una domanda globale prevista in crescita dell'80% entro il 2050 come dimostrato in una recente ricerca (Chuyi ge et al. 2026).
Risolvere questo fondamentale dilemma tra impellente fabbisogno produttivo e stringenti vincoli climatici richiede un approccio analitico rigoroso e sistemico. L'applicazione della LCA alla filiera dell'alluminio risponde precisamente a questa esigenza, offrendo uno strumento in grado di superare le valutazioni parziali o locali per abbracciare l'intero ciclo di vita del materiale, dall'estrazione della bauxite al riciclo a fine vita.
A tal proposito lo studio di [Chuyi ge et al. 2026] si propone di applicare la metodologia LCA come un dispositivo a duplice valenza: da un lato, come diagnostica quantitativa per mappare i flussi di risorse, quantificare le emissioni ed evidenziare con precisione

anatomica gli *hotspot* ambientali del settore con particolare riferimento all'elettrolisi dell'alluminio primario (processo attraverso cui si produce metallo vergine partendo dal minerale grezzo) e ai consumi di energia elettrica; dall'altro, come guida strategica alle decisioni, atta a valutare l'effettivo potenziale di riduzione emissiva offerto dalle tecnologie avanzate, dalla riconversione del mix energetico e dal potenziamento dell'alluminio secondario. Questo studio analizza l'intera catena produttiva dell'alluminio, utile a creare un piano pratico per ridurre le emissioni di CO2.

L'analisi dell'inventario e dei bilanci di massa della filiera dell'alluminio evidenzia un marcato squilibrio nella distribuzione degli impatti ambientali lungo le diverse fasi produttive. Attraverso la quantificazione dei dati emissivi su scala globale, la LCA permette di circoscrivere con precisione gli *hotspot* critici su cui è necessario concentrare gli interventi di mitigazione.

I dati di inventario rivelano che la fase di elettrolisi dell'alluminio primario costituisce il principale fattore di criticità, essendo da sola responsabile del 70,9% delle emissioni complessive dell'intera filiera. A questa segue la produzione di allumina, che incide per il 16,5%, mentre le fasi rimanenti quali l'estrazione della bauxite, la raffinazione e i processi di lavorazione a monte e a valle generano quote nettamente inferiori. Esaminando la natura di queste emissioni in base alla fonte d'origine, emerge come il consumo di energia elettrica rappresenti il vero e proprio nucleo del problema, coprendo il 59,6% dell'impronta carbonica totale del comparto. Questa marcata dipendenza dal vettore elettrico chiarisce come la decarbonizzazione del settore sia indissolubilmente legata alla trasformazione dei sistemi energetici di alimentazione.

Sulla base di questo quadro diagnostico, l'impiego della LCA come strumento decisionale consente di valutare ed evidenziare l'efficacia di tre direttrici strategiche fondamentali per la transizione ecologica del settore:

- Innovazione e Tecnologie Avanzate**:** L'implementazione di soluzioni tecnologiche di frontiera nei processi termici ed elettrolitici come l'adozione di anodi inerti e l'efficientamento avanzato delle celle di elettrolisi, presenta un potenziale di abbattimento delle emissioni che può raggiungere il 71,87%.

- Ottimizzazione del Mix Energetico**:** La riconversione della matrice di approvvigionamento elettrico verso fonti rinnovabili (idroelettrico, solare ed eolico) consente un abbattimento emissivo superiore al 50%. Questo passaggio risulta determinante per recidere il legame strutturale tra la produzione di alluminio e le fonti fossili ad alta intensità di carbonio, come il carbone.
- Circolarità e Valorizzazione dell'Alluminio Secondario**:** Il potenziamento della filiera del riciclo dei rottami rappresenta la leva a più alto impatto e rendimento. La rifusione dell'alluminio a fine vita genera un'impronta emissiva estremamente ridotta, pari a soli 0,92 kg di CO_2 equivalente per chilogrammo di metallo prodotto. La progressiva sostituzione dell'alluminio primario con quello secondario permette di conseguire una riduzione del 96% delle emissioni di carbonio e un contestuale risparmio economico dell'80%, dimostrando una perfetta convergenza tra sostenibilità ambientale e redditività finanziaria.

In conclusione, l'applicazione sistemica della metodologia LCA all'intera catena del valore dell'alluminio offre una guida chiara ed empiricamente fondata per orientare sia le politiche pubbliche sia gli investimenti industriali. Evitando il rischio di spostare l'impatto ambientale da una fase all'altra della filiera, la LCA fornisce la base per definire piani di transizione mirati. L'ulteriore integrazione di questo strumento con la *Life Cycle Costing* (LCC) permetterà di coniugare le metriche ambientali con la sostenibilità economico-finanziaria, accelerando in modo decisivo la trasformazione a basse emissioni dell'industria globale dell'alluminio.

2.2 Integrazione e sostenibilità nello stampaggio: il ruolo dei sistemi IMC nelle valutazioni LCA

Nel panorama manifatturiero contemporaneo, l’industria delle materie plastiche è fortemente sollecitata a coniugare le performance tecniche con la sostenibilità ambientale. All’interno di un’analisi LCA, lo studio dello stato dell’arte dei processi di trasformazione richiede una particolare attenzione alle tecnologie emergenti, poiché ridefiniscono i confini tradizionali del sistema-prodotto e ne modificano i profili d’impatto energetico e materiale.

Tradizionalmente, la produzione di componenti plastici rinforzati richiede un processo a due stadi: la compoundazione iniziale del polimero con gli additivi, seguita dal raffreddamento, pellettizzazione e dal successivo riscaldamento per lo stampaggio ad iniezione. Questa frammentazione comporta un notevole dispendio energetico e una degradazione termica delle fibre.

A superamento di questi limiti si inserisce la tecnologia IMC (Injection Molding Compounding), un sistema innovativo che integra la fase di compounding e quella di stampaggio ad iniezione in un'unica macchina continua.

A conferma del potenziale di questa tecnologia, la letteratura recente ha iniziato a quantificare i benefici ambientali e prestazionali legati all'adozione dell'IMC.

In questa direzione, nell'articolo di [Kirschnick et aL, 2026] viene condotta una valutazione preliminare del ciclo di vita (LCA) per valutare e confrontare gli impatti ambientali del processo IMC con quelli della produzione standard in due fasi. Vengono considerati due scenari per l'IMC, ciascuno dei quali differisce per requisiti di macchinari, consumo energetico e utilizzo dei materiali. Si utilizzano polipropilene e fibre di vetro riciclati meccanicamente, considerati nella LCA utilizzando un approccio cut -off senza attribuire crediti per la sostituzione di materiali (primari) con materiale riciclato. L'unità funzionale è definita dal componente in materiale composito ottenuto tramite il rispettivo processo, assumendo una funzionalità identica in tutti gli scenari confrontati. I dati dell'inventario sono ottenuti da esperimenti iniziali, letteratura e dal database ecoinvent.

I risultati dell'analisi mostrano come nello scenario Conservativo (il caso più prudente), il guadagno in termini di prestazioni ambientali rispetto al processo convenzionale IM+C risulta minimo. In questo caso, i minori consumi di materiali ed energia vengono quasi azzerati dal maggior impatto legato ai requisisti dei macchinari aggiuntivi. Per quanto riguarda lo scenario ottimistico (dove l'integrazione delle macchine è ottimizzata al massimo), sfruttando appieno le efficienze di processo, l'IMC dimostra di poter ridurre gli impatti ambientali globali per la produzione di compositi fino al 34%.

I driver principali di impatto risultano essere il consumo energetico e l'uso di metalli in tutte le categorie intermedie analizzate. Inoltre, gli impatti ambientali dei componenti

prodotti sono fortemente condizionati dal mix di fornitura dell'elettricità, rendendo il sito geografico dello stabilimento una variabile determinante.

Per esprimere al massimo il potenziale della tecnologia IMC, la ricerca e lo sviluppo devono concentrarsi sull'ottimizzazione della connessione meccanica e di flusso tra l'estrusore continuo e la presa discontinua, la calibrazione dei parametri di processo (energia di taglio e tempi di permanenza in fuso), da ultimo serve una formulazione mirata dei materiali riciclati e l'impiego di additivi specifici per migliorare sia la lavorabilità sia la qualità finale del componente.

Lo studio inoltre raccomanda di valutare l'energia su tre livelli: Inventario separato in modo da misurare l'energia reale per confrontare l'efficienza dei processi e guidare le ottimizzazioni future, Analisi di localizzazione in modo da valutare l'impatto in relazione alle fonti energetiche locali, infine, un'analisi multi-categoria per monitorare più indicatori ambientali per evitare il fenomeno del shift-down (trasferimento involontario dei danni da una categoria di impatto all'all'altra).

Alla luce dei risultati ottenuti, lo stampaggio a iniezione convenzionale impiegato per la variante in plastica costituisce uno degli hotspot energetici e ambientali principali dell'intero ciclo di vita del filtro. Per mitigarne l'impatto e migliorare la sostenibilità di questo componente, una prospettiva tecnologica promettente è rappresentata dall'IMC. Come dimostrato in letteratura per compositi termoplastici e riciclati, l'integrazione di compounding e stampaggio in un'unica fase di plastificazione consente di ridurre il consumo energetico globale e il degrado del materiale. L'adozione dell'IMC per la produzione del telaio in plastica specialmente in uno scenario di processo ottimizzato consentirebbe di abbattere significativamente la carbon footprint del componente, rendendo la plastica un'alternativa strutturale decisamente più competitiva e sostenibile.

2.3 Analisi comparativa delle tipologie di MDF in letteratura

L'impronta ambientale dell'MDF non è un valore monolitico, ma varia in modo sostanziale a seconda delle tecnologie produttive e dei leganti impiegati. A tal proposito, lo studio di [Mohammad Ghorbanzadeh et al., 2026] offre un confronto diretto tra quattro categorie

di MDF: MDF convenzionale, MDF (MB) prodotto utilizzando bagassa e resina fenolo-formaldeide, MDF (MM) realizzato con resina melammina-formaldeide e MDF (ML2) a base di resina urea-formaldeide e con il 40% di lignosolfato di calcio.

Gli impatti ambientali della produzione di pannelli di fibra a media densità (MDF) sono stati analizzati in tre fasi di fabbricazione: preparazione delle fibre, formazione dei pannelli e lavorazione finale. Sono stati modellati cinque scenari di produzione realistici per ottimizzare l'uso di materiali ed energia, mostrando un percorso di miglioramento progressivo verso una performance ambientale ottimale. I risultati della valutazione ambientale classificano gli impatti in quattro categorie: salute umana, qualità degli ecosistemi, tossicità ed esaurimento delle risorse minerali.

L’analisi LCI mostra che il legno vergine, a causa del suo contenuto di umidità naturalmente elevato, è un fattore importante nel consumo di energia durante tutto il processo di produzione, soprattutto nelle fasi di preparazione e asciugatura delle fibre. Questo fatto mette in evidenza un compromesso fondamentale nell'uso dei materiali a base biologica: pur offrendo benefici in termini di riduzione del carbonio, i requisiti energetici per la loro lavorazione possono ridurre significativamente questi vantaggi se non gestiti con attenzione. Per affrontare questa sfida, l'utilizzo di residui lignocellulosici e di altre fonti di biomassa rappresenta una strategia efficace per ridurre sia la domanda energetica che gli impatti ambientali associati, a patto che la scelta del materiale di partenza consideri l'intero spettro delle implicazioni di processo.

Per quanto riguarda gli impatti legati ai materiali, l'analisi mostra che i sistemi di resina a base di petrolio, in particolare UF e MF (melammina formaldeide), rappresentano i componenti più impattanti dal punto di vista ambientale nella produzione convenzionale di MDF, in particolare l’MDF (MM) ha avuto le prestazioni peggiori, con un aumento dell'impatto ecotossicologico fino a 1,5 PDF (potentially disappeared fraction) il 15% in più rispetto l’MDF convenzionale, mentre l'MDF (MB), prodotto utilizzando bagassa e resina fenolo-formaldeide, ha le migliori prestazioni ambientali, con il suo impatto sul consumo di risorse equivalente a 10,1 kg di minerale, il 45% in meno rispetto all'MDF convenzionale. Inoltre, i risultati mostrano anche che nella categoria di impatto sulla

salute umana, l'MDF (MM) con un valore di 0,0083 DALY (disability adjusted life year, equivale alla perdita dell'equivalente di un anno di vita in piena salute) e l'MDF convenzionale con un valore di 0,0082 DALY hanno i danni maggiori.

L'entità di questi impatti, insieme ai miglioramenti significativi osservati negli scenari che incorporano alternative adesive a base biologica (lignosolfonato di calcio e fenolo-formaldeide), conferma che la sostituzione delle resine rappresenta l'intervento più rilevante per ridurre l'impronta ambientale della produzione di MDF; infatti, l'MDF (ML2), utilizzando scarti di legno e riducendo il consumo di elettricità, offre le migliori prestazioni nella categoria qualità dell'ecosistema con un impatto di 1,02 PDF. Inoltre, l'analisi comparativa tra configurazioni di produzione dipendenti dai combustibili fossili e quelle che utilizzano materiali sostenibili dimostra che l'MDF prodotto con componenti a base biologica e materie prime derivanti da scarti mostra costantemente una performance ambientale superiore in diverse categorie di danno. I risultati dimostrano che è possibile fare progressi concreti verso la sostenibilità combinando innovazioni nei sistemi adesivi, utilizzo di fibre provenienti dai rifiuti e interventi di ottimizzazione energetica, tutto tecnicamente fattibile con le tecnologie attuali o a breve termine e senza compromettere le prestazioni del prodotto.

In conclusione, questa ricerca fornisce prove convincenti che adottando strategie sostenibili integrate lungo tutta la filiera, dalla selezione delle materie prime all'ottimizzazione dei processi produttivi, l'industria del MDF può contribuire efficacemente a ridurre i propri impatti ambientali e allo stesso tempo assumere un ruolo di leadership nella transizione verso una produzione industriale più sostenibile.

Questo risultato giustifica l'importanza di selezionare con attenzione il dataset d'inventario (LCI) per il telaio in MDF nel capitolo 4, fornendo un riferimento utile per interpretare le prestazioni del filtro rispetto alle soluzioni in alluminio e plastica.

3 Metodologia e scopo dell'analisi

L'analisi di sostenibilità ambientale ha l'obiettivo di analizzare prodotti o servizi al fine di valutare il carico ambientale ad essi correlato. In particolare, nel presente progetto sono stati applicati la metodologia e gli strumenti della LCA.

L'LCA è una metodologia che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività (UNI EN ISO 14040 – UNI EN ISO 14044). Essa prende in esame l'intero ciclo di vita di un prodotto o di un servizio "dalla culla alla tomba" e il loro potenziale impatto ambientale inteso come:

- Uso e consumo delle risorse naturali (estrazione e lavorazione delle materie prime);
- Conseguenze ambientali dovute alla produzione, al trasporto, all'uso, riuso e manutenzione fino al riciclo e alla sua collocazione finale.

L'analisi LCA è un mezzo che esprime in termini numerici il potenziale impatto ambientale sui diversi macrosistemi terrestri, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia e delle emissioni nell'ambiente, permettendo di confrontare in modo quantitativo prodotti o servizi simili e di individuare e valutare le opportunità per diminuire gli impatti ambientali.

La normativa di riferimento è la ISO 14040/14044: 2021, nella quale sono descritte le fasi e le modalità di svolgimento dell'analisi. L'analisi ambientale svolta e relazionata nel presente documento è stata realizzata in conformità a tale normativa.

Per l'analisi LCA il software utilizzato è stato Simapro (V9.6.0.1), uno strumento strutturato per mappare le relazioni complesse che intercorrono tra le singole fasi del ciclo vita di un prodotto. Il software permette di convertire i flussi fisici di input (materie prime, vettori energetici, risorse idriche) e di output (emissioni in atmosfera, acqua e suolo) in categorie di impatto ambientale quantificabili. Simapro analizza queste relazioni attraverso una struttura a nodi interconnessi, calcolando l'albero di contribuzione per identificare gli hotspot ambientali del sistema.

L’inventario dei dati secondari, necessario per colmare le lacune sui processi standardizzati, è stato attinto dal database Ecoinvent (V3.10). per la gestione dei processi multifunzionali e del fine vita dei materiali è stata selezionata l’allocazione cut-off by classification.

Questo modello si basa su una logica di allocazione ben definita:

- Responsabilità dell’impatto: il produttore di un materiale è interamente responsabile degli impatti legati alla sua estrazione e trasformazione, fino al momento in cui il prodotto esaurisce la sua funzione e viene eliminato dal sistema di utilizzo primario.
- Onere del riciclo: al punto di eliminazione (il cut-off), il materiale viene considerato un rifiuto a impatto zero. Se questo rifiuto viene raccolto e riciclato, gli impatti ambientali del processo di riciclo stesso vengono interamente imputati al sistema successivo che utilizzerà la materia prima seconda.
- Crediti ambientali: coerentemente, il sistema che produce il rifiuto non riceve alcun credito ambientale per il fatto di aver avviato il materiale a riciclo, né il sistema successivo eredita gli impatti dell’estrazione originaria del materiale vergine.

Questo approccio garantisce una tracciabilità lineare, evita il rischio di doppi conteggi ed è particolarmente indicato per valutare in modo conservativo l’impatto reale dei processi manifatturieri.

Per convertire i dati di inventario in indicatori di impatto, l’analisi ha adottato il metodo Environmental Footprint (EF) 3.1 (V1.01). Il metodo si basa su raccomandazioni scientifiche consolidate a livello globale e raggruppa le emissioni e i consumi in categorie d’impatto specifiche. L’algoritmo di caratterizzazione del metodo EF correla i flussi elementari calcolati da Simapro ai rispettivi fattori di equivalenza chimico-fisica, restituendo un profilo ambientale oggettivo, standardizzato e confrontabile del sistema analizzato.

La tesi segue lo schema proposto dalle normative ISO 14040/14044 e di seguito si riportano i passi seguiti.

3.1 Obiettivo dell'analisi

Obiettivo dell'analisi LCA è stato quello di comparare l'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita di un filtro prodotto con tre diverse opzioni di materiale per il telaio esterno (alluminio, plastica e MDF).

L'analisi mira a identificare la soluzione di telaio con la minor impronta ecologica per guidare le scelte di ecoprogettazione del prodotto.

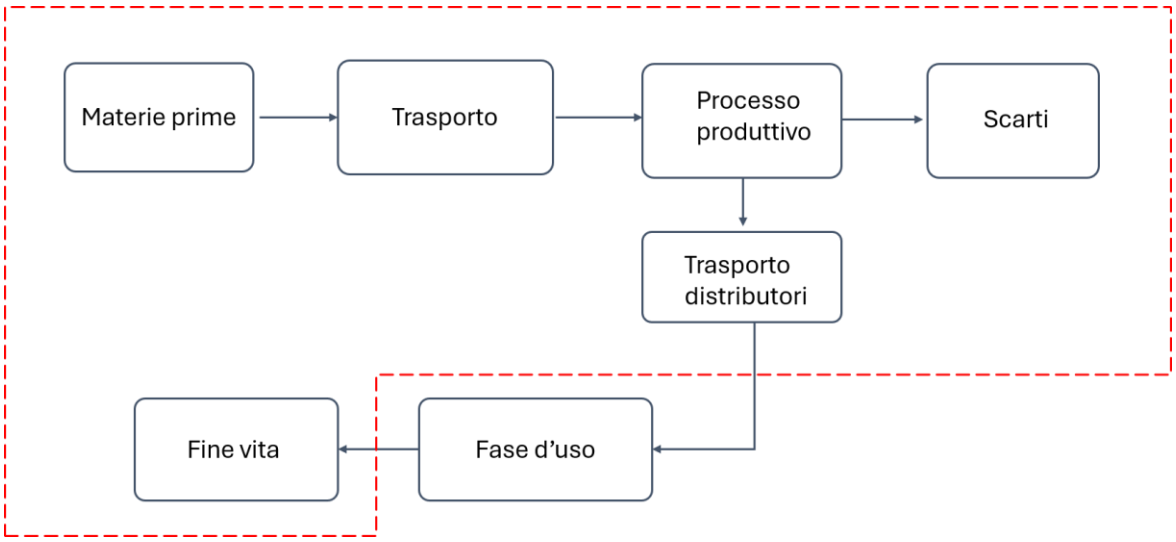
3.2 Unità funzionale

L'unità funzionale considerata è definita come:

"Filtrare gli inquinanti dell'aria in ambito industriale".

3.3 Confini del sistema

Lo studio adotta un approccio Cradle-to-Grave (dalla culla alla tomba).



Sono esclusi dai confini del sistema la fase d'uso (consumi di risorse durante il funzionamento, manutenzione o sostituzione di parti).

L’analisi svolta ha interessato le seguenti fasi e relative grandezze:

- Materiali: comprende l’estrazione delle risorse naturali, raffinazione e produzione di tutte le materie prime (componenti comuni + materiali dei telai);
- Processo produttivo: sono inclusi in questa fase le risorse consumate durante la fase di trasformazione della materia prima e i rifiuti prodotti; rappresenta il processo realizzato presso Sifim s.r.l. La quota di energia elettrica necessaria alle macchine e all’impianto è modellata considerando la composizione reale dello stabilimento, ossia coperta per il 28% da energia solare fotovoltaica autoprodotta in loco e per il restante 72% da energia prelevata dalla rete elettrica nazionale.
- Trasporto: sono inclusi in questa fase i consumi in termini di combustibile e le emissioni legati alla fase di trasporto medio delle materie prime dai fornitori allo stabilimento produttivo. inoltre, è stato preso in considerazione il trasporto medio del prodotto finito al cliente finale (distinto tra scenario nazionale ed europeo). Infine, è stato valutato il trasporto degli scarti di lavorazione dalla fabbrica agli impianti di smaltimento, termovalorizzazione e riciclo.
- Scarti: l’alluminio è destinato al processo di riciclo per il recupero della materia prima. La fibra di vetro viene gestita come rifiuto speciale e presa in carico da ditte autorizzate, le quali si occupano del trasporto e del successivo avvio a recupero termico (termovalorizzatori). Infine, l’EVA (etilene vinil acetato) e il poliuretano sono avviati allo smaltimento finale in discarica. Per tutti gli scenari sono ipotizzati 100 Km di trasporto.
- Fine Vita: è stato valutato per il solo telaio in alluminio lo scenario di fine vita distinto in due scenari distinti:
    1. Scenario discarica
    2. Scenario Incenerimento

3.4 Categorie di impatto ambientale, modelli e indicatori

Le categorie di impatto e gli indicatori utilizzati per lo studio LCA sono riportati e descritti brevemente nella Tabella 1 e ricavati mediante applicazione del metodo di calcolo EF

Method 3.1, metodo di valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti. Tale metodo e le relative categorie di impatto sono state introdotte dalla Commissione europea attraverso la Raccomandazione (UE) 2021/2279 per regolamentare il calcolo, la valutazione, la convalida e la comunicazione a tutti gli interessati dell'impronta ambientale dei prodotti e dei servizi. Come software è stato utilizzato simapro, mentre come database Ecoinvent.

Tabella 1. Categorie di impatto (EF Method 3.1)

CATEGORIA D'IMPATTO	**UNITÀ DI MISURA**	**DESCRIZIONE**
Climate change	kg CO2 eq	Capacità di un gas a effetto serra di influenzare i cambiamenti della temperatura media globale dell'aria a livello del suolo e alle successive variazioni di diversi parametri climatici e dei loro effetti (espresso in 100 anni).
Ozone depletion	kg CFC11 eq	Degradazione dell'ozono stratosferico dovuta alle emissioni di sostanze lesive dell'ozono, quali gas contenenti cloro e bromo di lunga durata.
Ionising radiation	kBq U-235 eq	Effetti negativi sulla salute umana causati da emissioni radioattive.
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	Formazione di ozono al livello del suolo della troposfera causata da ossidazione fotochimica di composti organici volatili (VOC) e monossido di carbonio (CO) in presenza di ossidi di azoto (NOx) e luce solare.
Particulate matter	disease inc.	Effetti avversi sulla salute umana causati dalle emissioni di particolato (PM) e dai suoi precursori (NOx, SOx, NH3).
Human toxicity, non-cancer	CTUh	Effetti negativi sulla salute degli esseri umani causati dall'assunzione di sostanze tossiche per inalazione di aria, ingestione di cibo/acqua, penetrazione cutanea, nella misura in cui si tratta di sostanze non cancerogene non causate da

		particolato/smog provocato dalle emissioni di sostanze inorganiche o da radiazioni ionizzanti.
Human toxicity, cancer	CTUh	Effetti negativi sulla salute degli esseri umani causati dall'assunzione di sostanze tossiche per inalazione di aria, ingestione di cibo/acqua, penetrazione cutanea, nella misura in cui si tratta di sostanze cancerogene.
Acidification	mol H+ eq	Ripercussioni delle sostanze acidificanti sull'ambiente.
Eutrophication, freshwater	kg P eq	I nutrienti (principalmente azoto e fosforo) di scarichi fognari e terreni agricoli fertilizzati accelerano la crescita di alghe e altra vegetazione nelle acque. Il deterioramento di materiale organico consuma ossigeno provocando così carenza dello stesso e, in alcuni casi, moria ittica.
Eutrophication, marine	kg N eq	
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	I nutrienti (principalmente azoto e fosforo) di scarichi fognari e terreni agricoli fertilizzati accelerano la crescita di vegetazione. Il deterioramento di materiale organico consuma ossigeno provocando così carenza dello stesso.
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	Impatti tossici su un ecosistema, che danneggiano le singole specie e modificano la struttura e la funzione dell'ecosistema.
Land use	Pt	Utilizzo e trasformazione del territorio con attività quali agricoltura, costruzione di strade, case, miniere, ecc.
Water use	m3 depriv.	Uso di m3 di acqua connesso alla scarsità locale di acqua.
Resource use, fossils	MJ	Quantificazione dei consumi energetici di un sistema produttivo nell'arco dell'intero ciclo di vita.
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	Quantità in kg di antimonio equivalente.

3.5 Fonti e allocazione

I dati utilizzati per realizzare l'analisi LCA relazionata nel presente documento sono stati derivati da colloqui con i responsabili dell'azienda Sifim s.r.l. Per la descrizione del sistema prodotto sono stati raccolti:

- Distinta base (Bill of Materials- BOM) composizione e quantità in massa di ciascun componente comune e dei tre telai alternativi
- Informazioni sulle distanze medie di approvvigionamento dei componenti e sui flussi di spedizione degli scarti di lavorazione verso i centri di smaltimento o recupero
- Fabbisogno di energia elettrica necessario per le operazioni di taglio, lavorazione e assemblaggio del filtro e mix energetico specifico utilizzato
- Percentuale e tipologia di scarti prodotti all'interno dello stabilimento produttivo durante lavorazione e assemblaggio filtro

3.6 Riferimento temporale e geografico

L'anno di riferimento dell'analisi è il 2025.

La selezione dei dati di sfondo per la modellazione del ciclo di vita dei filtri è stata condotta ricercando la massima coerenza tra l'ambito geografico reale dei processi e la disponibilità di dataset nei database ambientali:

- Materiali dei telai e componenti: la modellazione è stata effettuata utilizzando dataset europei e globali
- Produzione e mix energetico: per la parte di energia acquistata è stato utilizzato un dataset energetico italiano, per la parte prodotta da fotovoltaico è stato utilizzato un dataset globale
- Trasporti: per la logistica è stato usato un dataset europeo

3.7 Limitazioni

Per limitazioni del database:

- Per la colla incollaggio telaio tessuto e la guarnizione tenuta in assenza di un dataset specifico è stato selezionato il dataset più affine (poliuretano espanso flessibile).

Altre assunzioni:

- Per il filtro in MDF non sono stati considerati gli scarti per il processo produttivo del telaio, inoltre in fase di modellazione del telaio è stato inserito la massa del materiale senza ulteriori processi.
- Per il filtro in Plastica ABS non sono stati considerati gli scarti per il processo produttivo del telaio, limitazione accettabile dato che lo stampaggio ad iniezione produce scarti inferiori al processo di formatura dell'alluminio.
- Il processo produttivo energetico è stato considerato identico per tutti e tre i filtri.

4 Analisi di Inventario

4.1 Descrizione delle materie prime

I costituenti utilizzati per la modellazione dei filtri sono stati forniti dall'azienda e modellati utilizzando i datasets disponibili all'interno di EcoInvent (Tabella 2). Essi costituiscono le materie prime utilizzate.

Tabella 2. Componenti e datasets

COMPONETE	MATERIALE	PESO SU FILTRO	PESO GREZZO	DATASET MATERIALE
Telaio alluminio	Alluminio anodizzato	1.15	1.44	Aluminium alloy, AlMg3 {GLO}| market for aluminium alloy, AlMg3 | Cut-off, U
Processo telaio alluminio				Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO}| market for metal working, average for aluminium product manufacturing | Cut-off, U
Telaio plastica	ABS	0.57	0.57	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}| market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer | Cut-off, U
Processo telaio plastica				Injection moulding {GLO}| market for injection moulding | Cut-off, U
Telaio MDF	MDF	1.82	1.82	Medium density fibreboard {RER}| market for medium density fibreboard | Cut-off, U
Tessuto plissettato	Fibra vetro N8010	0.718	0.73	Glass fibre {GLO}| market for glass fibre | Cut-off, U

Distanziale plissettattura	EVA AS 3115	0.68	0.72	Ethylene vinyl acetate copolymer {RER}| market for ethylene vinyl acetate copolymer | Cut-off, U
Colla incollaggio telaio tessuto	ST1069+ST1001	0.217	0.22	Polyurethane, flexible foam {RER}| market for polyurethane, flexible foam | Cut-off, U
Guarnizione tenuta	ST1043+ST1001	0.025	0.03	Polyurethane, flexible foam {RER}| market for polyurethane, flexible foam | Cut-off, U
Reti esterne	Alluminio 99,5 verniciato	0.205	0.23	Aluminium alloy, AlMg3 {GLO}| market for aluminium alloy, AlMg3 | Cut-off, U

4.2 Trasporti

Per la modellazione della fase dei trasporti, l'azienda ha indicato i fornitori e i relativi distributori per le materie prime utilizzate, oltre ai mezzi di trasporto impiegati nelle varie tratte. Sono stati quindi ricavate le distanze percorse in funzione del tipo di mezzo utilizzato. I data sets impiegati sono i seguenti:

Tabella 3. Trasporti e datasets

	MEDIA DISTANZA	**TIPO TRASPORTO**	**DATASET**
NAZIONALI	341,86 Km	Su gomma	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 | Cut-off, U
EUROPEI	1330 Km	Su gomma	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 | Cut-off, U

4.3 Processi produttivi

Per la modellazione del processo produttivo, l'azienda ha fornito i dati relativi ai consumi di risorse nell'annualità 2025 (Tabella 4).

Tabella 4. Processi produttivi e datasets

	QUANTITÀ	% DEL FABBISOGNO	DATASET
Acquistata	595808	72	Electricity, low voltage {IT}| market for electricity, low voltage | Cut-off, U
Prodotta da fotovoltaico	206454	28	Electricity, low voltage {IT}| electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted | Cut-off, U

La quantificazione dei consumi di energia elettrica associati alla fabbricazione dei tre filtri è stata condotta analizzando i tempi ciclo di lavorazione e la potenza elettrica dei singoli macchinari coinvolti nelle diverse fasi di trasformazione (Tabella 5).

Tabella 5. Tempi ciclo e potenze assorbite

COMPONENTE	LAVORAZIONE	MACCHINA	TEMPO (min)	POTENZA INSTALLATA (KW)	ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA (KWh)
Setto filtrante	Plissettatura setto filtrante	Plissettatrice	1,03	45	0,773
Rete	Stiratura	Stiratrice	0.76	9	0,115
	Taglio a dimensione	Linea taglio trasv. Long.	0,3	3	0,015

	Verniciatura a polvere	Fornitore esterno			
Telaio	Taglio laser	Laser da nastro	1,6	6	0,16
	Piegatura	Piegatrice HF	4,8	7,5	0,6
	Spellatura telaio	Manuale	1,6		
Filtro finito	Posaggio colla+assemblaggio	Impianto incollaggio	3	8	0,4
	Posaggio guarnizione	Impianto guarnizione	0,86	5	0,072
	Controllo + stampa certificato+imballo	Impianto controllo	3	5	0,25

4.4 Scarti

Di seguito si riportano la tipologia e la destinazione degli scarti originati dal ciclo di lavorazione.

Tabella 6. Trattamento processo scarti

MATERIALE	**TRATTAMENTO SCARTI**	**DATASET**
Alluminio	Riciclo	Aluminium (waste treatment) {GLO}| recycling of aluminium | Cut-off, U
EVA e poliuretano	Discarica	Municipal solid waste {RoW}| treatment of municipal solid waste, sanitary landfill | Cut-off, U
Fibra di vetro	Termovalorizzatore	Municipal solid waste {IT}| treatment of municipal solid waste, municipal incineration | Cut-off, U

4.5 Modellazione della fase di Fine Vita e assunzioni

La tabella seguente raccoglie i dati quantitativi di inventario riferiti alla fase di fine vita del filtro particellare in alluminio, gli scenari di smaltimento considerati sono: discarica e incenerimento, per ciascuno viene esplicitato il dataset corrispondente.

Tabella 7. Modellazione Scenari Fine Vita

SCENARIO	PERCENTUALE	DATASET
DISCARICA	100%	Municipal solid waste {RoW}| treatment of municipal solid waste, sanitary landfill | Cut-off, U
INCENERIMENTO	100%	Municipal solid waste {IT}| treatment of municipal solid waste, municipal incineration | Cut-off, U

5 Risultati e discussione

Si riportano di seguito i risultati per le diverse categorie d'impatto sui tre filtri oggetto di studio.

In primo luogo, si mostrano i risultati complessivi ottenuti per la categoria Climate Change (kgCO2eq.) relativi al ciclo vita dei tre filtri compreso la gestione degli scarti (Figura 1).

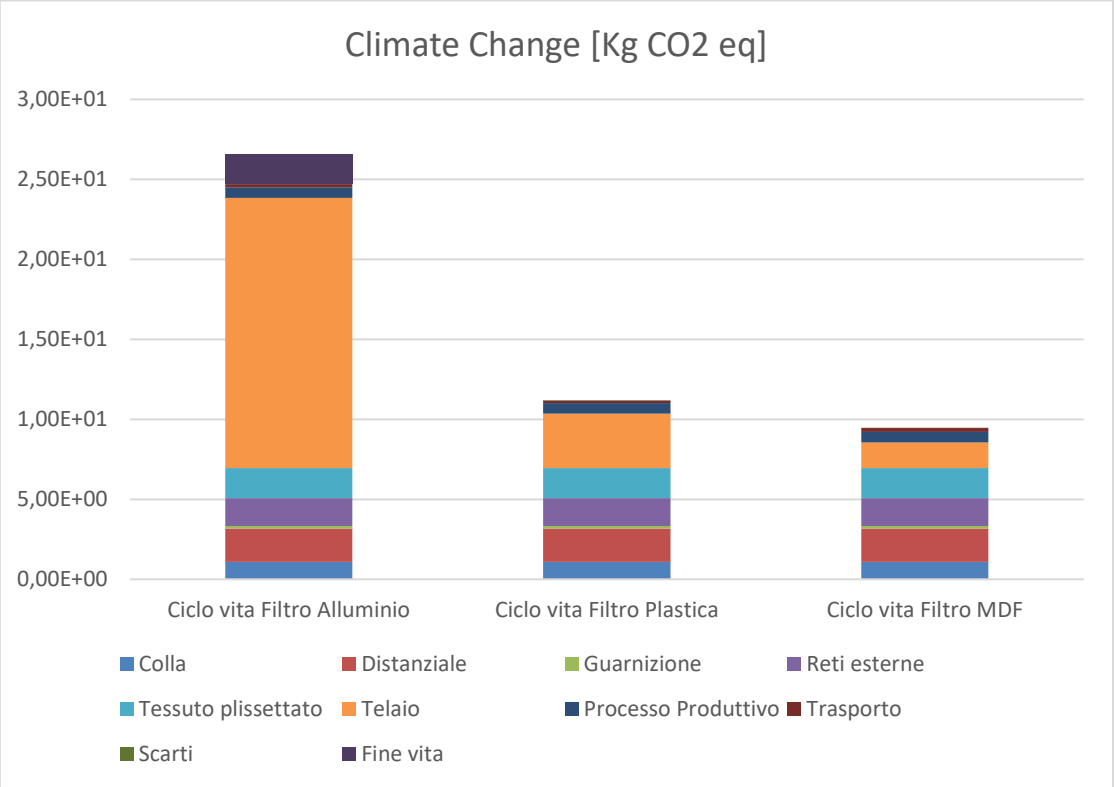


Figura 1 - Comparazione impatti sul climate change [Kg CO2 eq] del ciclo vita dei filtri in alluminio, plastica e MDF

Come evidenziato dal grafico relativo alla categoria d'impatto climate change, emerge una chiara gerarchia tra le tre alternative analizzate.

- Filtro in Alluminio: presenta i valori di emissioni di CO_2 equivalente più alti. Questo risultato è principalmente riconducibile alla quantità di energia utilizzata per l'estrazione e lavorazione dell'alluminio.
- Filtro in Plastica: si colloca al secondo posto per emissioni.

- Filtro in MDF: registra il valore complessivo più contenuto risultando l'opzione con le minori emissioni di gas serra lungo l'intero ciclo di vita.

Di seguito (Tabella 8) si riportano i risultati per tutte le categorie di impatto considerate.

Tabella 8. Comparazione impatti ambientali del ciclo vita del filtro in alluminio, plastica e MDF

Categoria di impatto	**Ciclo vita Filtro Alluminio**	**Ciclo vita Filtro Plastica**	**Ciclo vita Filtro MDF**
Acidification	1,40E-01	5,27E-02	5,05E-02
Climate change	2,66E+01	1,12E+01	9,46E+00
Ecotoxicity, freshwater	2,32E+02	1,07E+02	1,10E+02
Particulate matter	2,57E-06	6,63E-07	6,91E-07
Eutrophication, marine	3,04E-02	1,02E-02	1,07E-02
Eutrophication, freshwater	7,77E-03	2,57E-03	2,66E-03
Eutrophication, terrestrial	2,68E-01	1,06E-01	1,16E-01
Human toxicity, cancer	1,39E-07	3,99E-08	7,15E-08
Human toxicity, non-cancer	3,31E-07	1,71E-07	1,82E-07
Ionising radiation	1,47E+00	7,67E-01	7,99E-01
Land use	7,16E+01	3,12E+01	1,54E+02

Ozone depletion	3,11E-07	2,05E-07	2,26E-07
Photochemical ozone formation	9,15E-02	4,33E-02	4,43E-02
Resource use, fossils	3,16E+02	2,04E+02	1,67E+02
Resource use, minerals and metals	4,19E-04	2,81E-04	2,88E-04
Water use	4,59E+00	3,78E+00	3,50E+00

Scendendo nel dettaglio, l'impatto ambientale è stato ripartito in base alle diverse fasi del ciclo di vita del filtro in alluminio. Nella (Figura 2) viene riportata la scomposizione percentuale dei contributi per ognuna delle categorie di impatto.

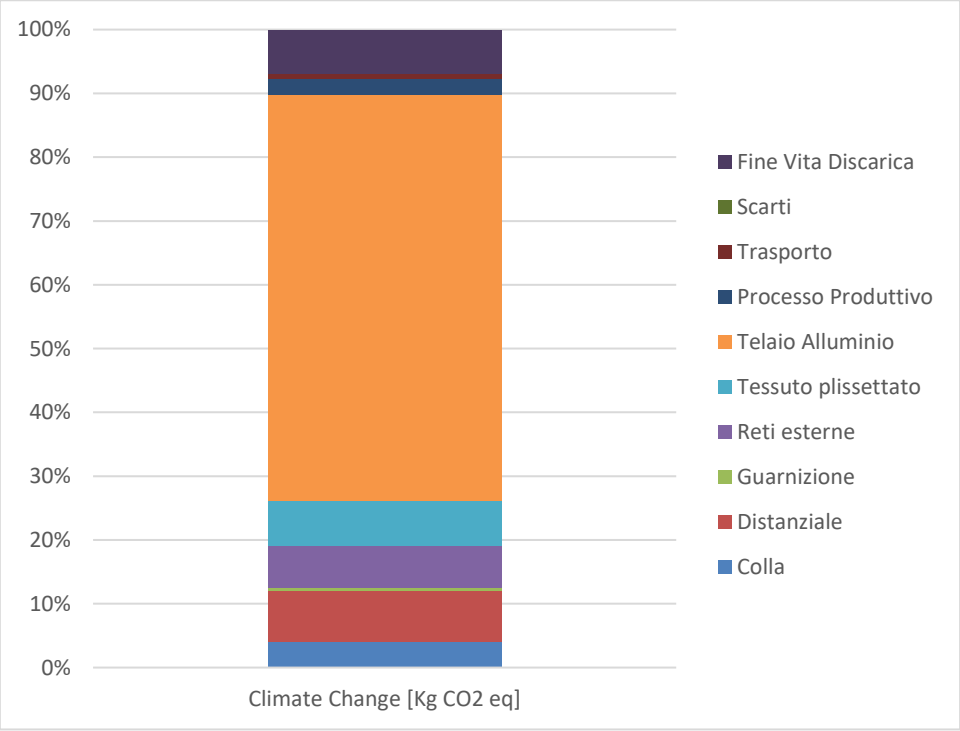


Figura 2 - Comparazione impatti sul climate change [Kg CO2 eq] delle fasi del ciclo vita filtro alluminio

È predominante l'impatto del telaio in alluminio, rispetto all'impatto delle altre fasi del ciclo di vita analizzate. Sul Climate Change:

- Telaio alluminio: ha un peso circa dell'63,6% sull'impatto totale
- Distanziale: ha un peso circa del 7,8% sull'impatto totale
- Tessuto plissettato: hanno un peso circa del 7% sull'impatto totale
- Reti esterne: hanno un peso circa del 6,5% sull'impatto totale
- Colla: ha un peso circa dell'4,2% sull'impatto totale
- Processo produttivo energetico: ha un peso del 2,5% sull'impatto totale
- Trasporto: ha un peso dello 0,75% sull'impatto totale
- Guarnizione: ha un peso dello 0,6% sull'impatto totale
- Processo scarti: ha un peso dello 0,07% sull'impatto totale
- Fine vita: ha un peso del 7% sull'impatto totale

Nel dettaglio, si mostrano i valori assoluti per il ciclo vita del filtro in alluminio per le varie categorie di impatto (Tabella 9), i valori sono stati divisi in due tabelle.

Tabella 9. Comparazione impatti ambientali ciclo vita filtro in alluminio

Categoria di impatto	Colla incollaggio telaio tessuto	Distanziale plissettatura	Guarnizione tenuta	Reti esterne	Tessuto plissettato
Acidification	4,95E-03	6,79E-03	6,74E-04	1,04E-02	1,38E-02
Climate change	1,09E+00	2,09E+00	1,49E-01	1,75E+00	1,88E+00
Ecotoxicity, freshwater	5,66E+01	1,15E+01	7,72E+00	1,20E+01	7,07E+00
Particulate matter	3,65E-08	6,14E-08	4,97E-09	2,60E-07	1,06E-07

Eutrophication, marine	9,17E-04	1,40E-03	1,25E-04	1,86E-03	2,88E-03
Eutrophication, freshwater	4,07E-04	4,29E-04	5,55E-05	5,62E-04	5,03E-04
Eutrophication, terrestrial	9,88E-03	1,44E-02	1,35E-03	1,94E-02	3,06E-02
Human toxicity, cancer	7,47E-09	6,90E-09	1,02E-09	1,39E-08	4,83E-09
Human toxicity, non-cancer	1,40E-08	2,37E-08	1,91E-09	1,60E-08	9,60E-08
Ionising radiation	1,59E-01	1,52E-01	2,16E-02	8,26E-02	1,60E-01
Land use	4,44E+00	6,16E+00	6,06E-01	3,99E+00	4,95E+00
Ozone depletion	4,31E-08	7,73E-08	5,88E-09	1,20E-08	2,56E-08
Photochemical ozone formation	4,36E-03	1,00E-02	5,94E-04	6,00E-03	9,47E-03
Resource use, fossils	2,23E+01	5,70E+01	3,04E+00	1,80E+01	2,50E+01
Resource use, minerals and metals	1,47E-05	1,69E-05	2,01E-06	1,84E-05	2,14E-04
Water use	3,34E-01	4,97E-01	4,55E-02	3,50E-01	4,33E-01

Categoria di impatto	**Telaio Alluminio**	**Processo Produttivo**	**Trasporto nazionale**	**Scarti**	**Fine Vita Discarica**	**Totale**
Acidificati on	9,89E-02	2,95E-03	7,84E-04	3,12E-05	5,75E-04	1,40E-01

Climate change	1,69E+01	6,60E-01	1,97E-01	1,73E-02	1,84E+00	2,66E+01
Ecotoxicity, freshwater	1,00E+02	2,50E+00	7,47E-01	1,95E-01	3,37E+01	2,32E+02
Particulate matter	2,06E-06	1,61E-08	1,59E-08	5,92E-10	7,73E-09	2,57E-06
Eutrophication, marine	1,76E-02	4,39E-04	2,95E-04	9,90E-05	4,81E-03	3,04E-02
Eutrophication, freshwater	5,38E-03	1,66E-04	1,32E-05	1,09E-06	2,56E-04	7,77E-03
Eutrophication, terrestrial	1,82E-01	4,77E-03	3,22E-03	1,30E-04	1,79E-03	2,68E-01
Human toxicity, cancer	1,01E-07	2,01E-09	1,38E-09	5,17E-11	3,49E-10	1,39E-07
Human toxicity, non-cancer	1,51E-07	1,00E-08	1,73E-09	2,28E-10	1,60E-08	3,31E-07
Ionising radiation	8,13E-01	7,65E-02	3,57E-03	1,30E-04	2,68E-03	1,47E+00
Land use	4,39E+01	3,78E+00	1,66E+00	7,65E-02	2,02E+00	7,16E+01
Ozone depletion	1,24E-07	1,74E-08	3,94E-09	1,39E-10	1,15E-09	3,11E-07
Photochemical ozone formation	5,67E-02	2,01E-03	1,19E-03	4,66E-05	1,13E-03	9,15E-02

Resource use, fossils	1,76E+02	1,04E+01	2,78E+00	9,89E-02	1,08E+00	3,16E+02
Resource use, minerals and metals	1,41E-04	1,11E-05	6,34E-07	2,10E-08	1,18E-07	4,19E-04
Water use	2,98E+00	4,89E-01	1,14E-02	-5,67E-03	-5,47E-01	4,59E+00

Le valutazioni sui filtri in plastica e MDF vengono qui ristrette ai soli elementi differenzianti: la produzione del telaio e la gestione degli scarti di produzione del filtro,l'analisi grafica si focalizza sull'indicatore climate change (Figura 3).

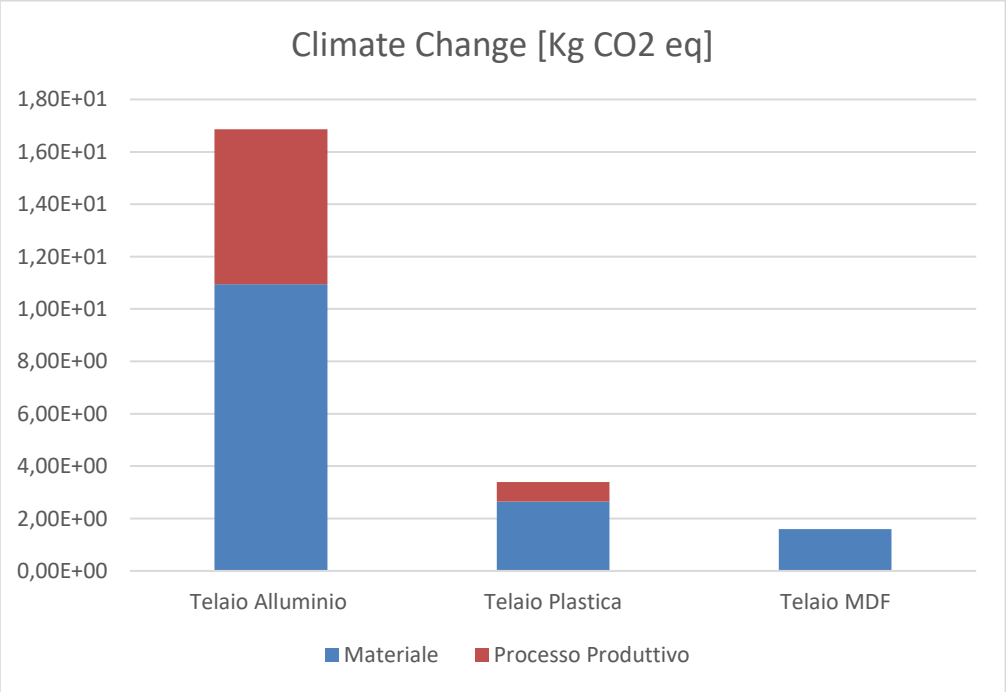


Figura 3 - Comparazione impatti sul climate change [Kg CO2 eq] telai alluminio, plastica e MDF

Di seguito, si riportano i valori assoluti per tutte le altre categorie d'impatto (Tabella 10).

Tabella 10. Comparazione impatti ambientali telaio alluminio, plastica e MDF

Categoria di impatto	Unità	Telaio alluminio	telaio plastica	telaio MDF
Acidification	mol H+ eq	9,89E-02	1,24E-02	9,85E-03
Climate change	kg CO2 eq	1,69E+01	3,40E+00	1,60E+00
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1,00E+02	9,22E+00	1,14E+01
Particulate matter	disease inc.	2,06E-06	1,65E-07	1,86E-07
Eutrophication, marine	kg N eq	1,76E-02	2,28E-03	2,66E-03
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5,38E-03	4,34E-04	5,19E-04
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1,82E-01	2,24E-02	3,20E-02
Human toxicity, cancer	CTUh	1,01E-07	2,64E-09	3,36E-08
Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,51E-07	7,56E-09	1,76E-08
Ionising radiation	kBq U-235 eq	8,13E-01	1,13E-01	1,43E-01
Land use	Pt	4,39E+01	5,94E+00	1,28E+02
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,24E-07	2,03E-08	4,00E-08
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	5,67E-02	9,84E-03	1,04E-02
Resource use, fossils	MJ	1,76E+02	6,57E+01	2,76E+01
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,41E-04	2,72E-06	9,74E-06
Water use	m3 depriv.	2,98E+00	1,63E+00	1,35E+00

Di seguito un'analisi sul climate change per il solo processo degli scarti del filtro in alluminio e plastica/ MDF che condividono lo stesso processo.

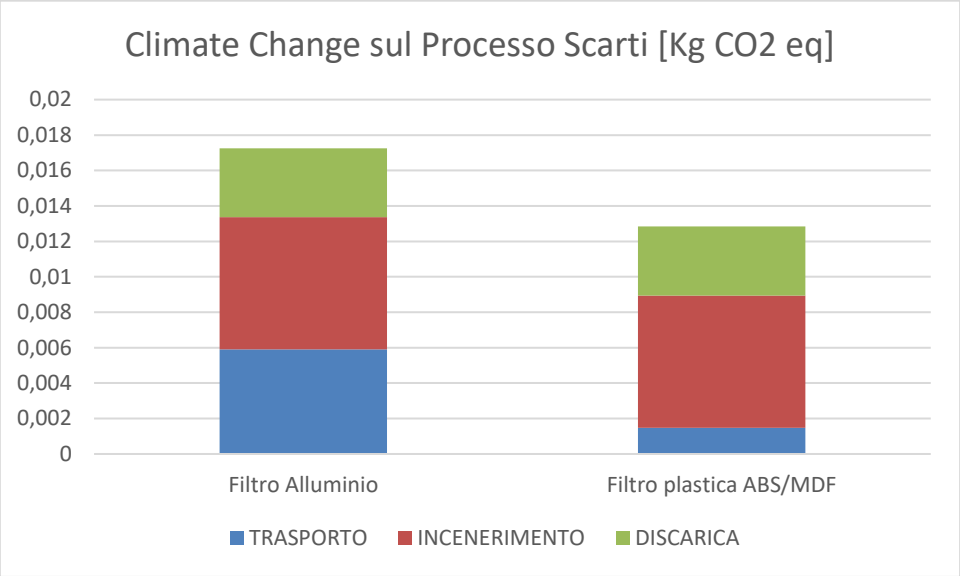


Figura 4 - Comparazione impatti ambientali sul climate change [Kg CO2 eq] processo di scarti filtro alluminio e plastica/MDF

Nel dettaglio, si mostrano i valori assoluti per tutte le altre categorie d'impatto (Tabella 11).

Tabella 11. Comparazione impatti ambientali per il processo scarti del filtro alluminio e filtro plastica/MDF

Categoria di impatto	Unità	Processo scarti filtro alluminio	Processo scarti filtro plastica/MDF
Acidification	mol H+ eq	3,12E-05	1,36E-05
Climate change	kg CO2 eq	1,73E-02	1,28E-02
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1,95E-01	1,78E-01
Particulate matter	disease inc.	5,92E-10	2,34E-10

Eutrophication, marine	kg N eq	9,90E-05	9,23E-05
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,09E-06	7,90E-07
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1,30E-04	5,80E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	5,17E-11	2,06E-11
Human toxicity, non-cancer	CTUh	2,28E-10	1,89E-10
Ionising radiation	kBq U-235 eq	1,30E-04	4,99E-05
Land use	Pt	7,65E-02	3,94E-02
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,39E-10	5,09E-11
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	4,66E-05	1,98E-05
Resource use, fossils	MJ	9,89E-02	3,64E-02
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,10E-08	6,80E-09
Water use	m3 depriv.	-5,67E-03	-5,92E-03

Infine, un'analisi sul climate change legato alla fase di distribuzione logistica dei tre diversi tipi di filtro. Per garantire la comparabilità dei risultati si sono ipotizzate le medesime tratte per i due scenari: cliente nazionale medio e cliente europeo medio.

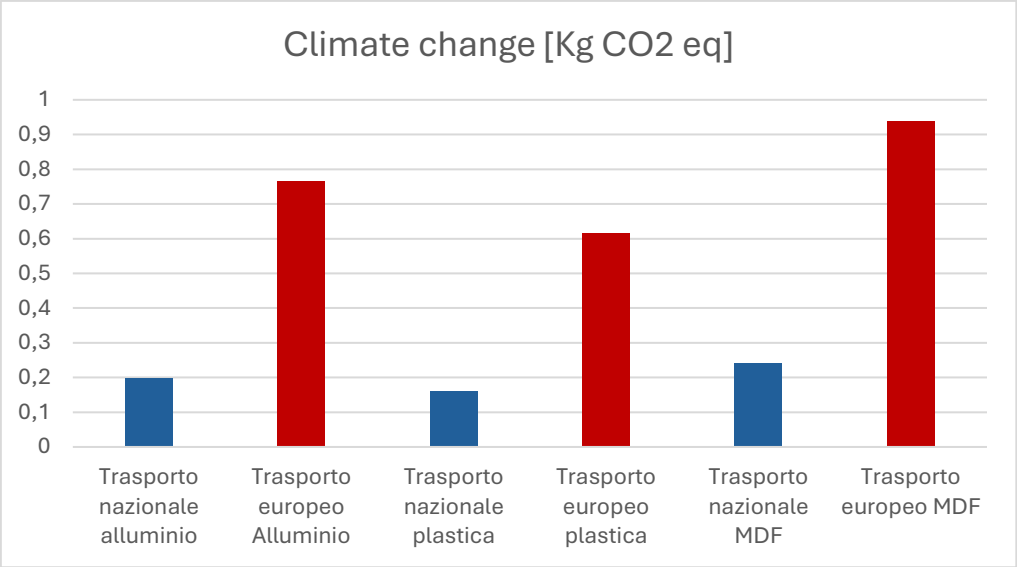


Figura 5 - Comparazione sul climate change [Kg CO2 eq] trasporto scenario nazionale ed europeo dei tre filtri

Di seguito si riportano i valori assoluti per tutte le altre categorie d'impatto.

Tabella 12. Comparazione impatti ambientali scenari trasporto nazionale ed europeo dei tre filtri

Categorie di impatto	Trasporto nazionale alluminio	Trasporto europeo Alluminio	Trasporto nazionale plastica	Trasporto europeo plastica	Trasporto nazionale MDF	Trasporto europeo MDF
Acidification	7,84E-04	3,05E-03	6,31E-04	2,45E-03	9,60E-04	3,74E-03
Climate change	1,97E-01	7,66E-01	1,59E-01	6,16E-01	2,41E-01	9,39E-01
Ecotoxicity, freshwater	7,47E-01	2,91E+00	6,01E-01	2,33E+00	9,15E-01	3,56E+00
Particulate matter	1,59E-08	6,19E-08	1,28E-08	4,98E-08	1,95E-08	7,59E-08
Eutrophication, marine	2,95E-04	1,15E-03	2,38E-04	9,23E-04	3,62E-04	1,41E-03
Eutrophication, freshwater	1,32E-05	5,14E-05	1,06E-05	4,13E-05	1,62E-05	6,30E-05

Eutrophicatio n, terrestrial	3,22E-03	1,25E-02	2,59E-03	1,01E-02	3,94E-03	1,53E-02
Human toxicity, cancer	1,38E-09	5,39E-09	1,11E-09	4,33E-09	1,70E-09	6,60E-09
Human toxicity, non-cancer	1,73E-09	6,75E-09	1,40E-09	5,42E-09	2,12E-09	8,27E-09
Ionising radiation	3,57E-03	1,39E-02	2,87E-03	1,12E-02	4,37E-03	1,70E-02
Land use	1,66E+00	6,44E+00	1,33E+00	5,17E+00	2,03E+00	7,89E+00
Ozone depletion	3,94E-09	1,53E-08	3,17E-09	1,23E-08	4,82E-09	1,88E-08
Photochemic al ozone formation	1,19E-03	4,64E-03	9,60E-04	3,73E-03	1,46E-03	5,68E-03
Resource use, fossils	2,78E+00	1,08E+01	2,24E+00	8,69E+00	3,41E+00	1,33E+01
Resource use, minerals and metals	6,34E-07	2,47E-06	5,10E-07	1,98E-06	7,76E-07	3,02E-06
Water use	1,14E-02	4,44E-02	9,18E-03	3,56E-02	1,40E-02	5,44E-02

5.1 Analisi di scenario: impatto potenziale della fase di End-of-Life

Per arricchire la ricerca, lo studio è stato ampliato con un'analisi di scenario dedicata esclusivamente al filtro in alluminio. Nello specifico sono stati modellati e messi a confronto due scenari alternativi di fine vita:

- Scenario Discarica: in cui il filtro giunto a fine vita viene interamente conferito in discarica controllata, rappresentando l'opzione a minor circolarità.
- Scenario Inceneritore: in cui il filtro giunto a fine vita viene interamente avviata a impianti di termovalorizzazione con recupero energetico.

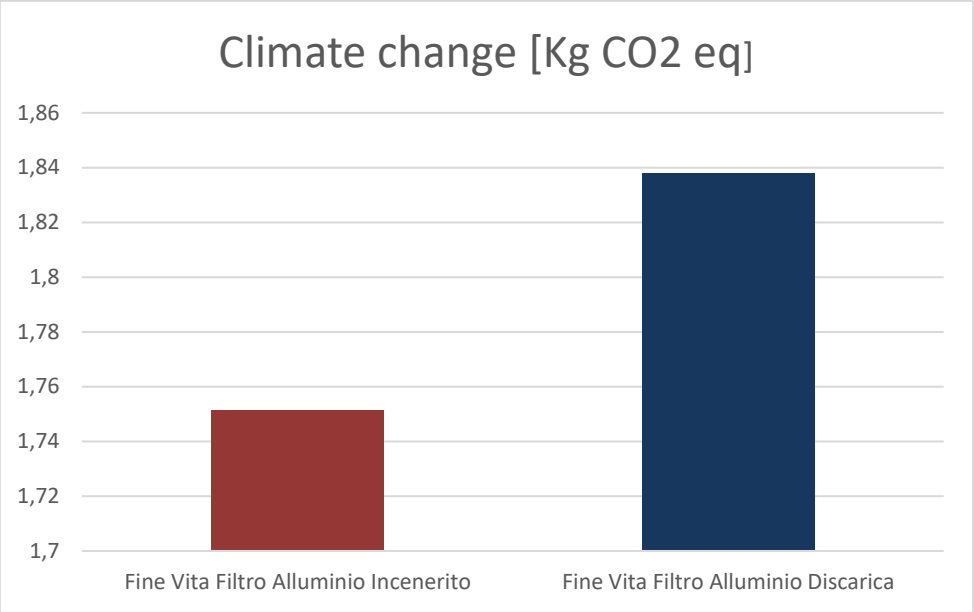


Figura 6 - Comparazione scenari fine vita sul climate change

Di seguito si riportano i valori per tutte le categorie d'impatto.

Tabella 13. Comparazione scenari fine vita incenerimento e discarica

Categoria d'impatto	**Unità**	**Fine Vita Filtro Alluminio Inceneritore**	**Fine Vita Filtro Alluminio Discarica**
Acidification	mol H+ eq	9,84E-04	5,75E-04
Climate change	kg CO2 eq	1,75E+00	1,84E+00
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	6,36E+00	3,37E+01
Particulate matter	disease inc.	9,15E-09	7,73E-09
Eutrophication, marine	kg N eq	5,40E-04	4,81E-03
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,50E-04	2,56E-04

Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,64E-03	1,79E-03
Human toxicity, cancer	CTUh	1,70E-09	3,49E-10
Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,94E-08	1,60E-08
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,75E-03	2,68E-03
Land use	Pt	6,41E-01	2,02E+00
Ozone depletion	kg CFC11 eq	2,18E-09	1,15E-09
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,22E-03	1,13E-03
Resource use, fossils	MJ	1,20E+00	1,08E+00
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,37E-07	1,18E-07
Water use	m3 depriv.	1,50E-01	-5,47E-01

Attraverso questo duplice livello di analisi, lo studio mira a fornire un quadro completo non solo sulla scelta del materiale ottimale, ma anche sull'importanza delle filiere di gestione del rifiuto nel determinare il reale impatto ambientale del prodotto.

6 Conclusioni

6.1 Conclusioni

La presente tesi riassume la valutazione degli impatti ambientali del ciclo vita dei tre filtri in alluminio, plastica e MDF. È stata applicata la metodologia di analisi LCA, utilizzato lo strumento SimaPro e il database Ecoinvent 3.1. I risultati dell'analisi vanno letti in termini comparativi tra le soluzioni alternative analizzate. Dai risultati dell'analisi emergono le seguenti evidenze principali:

- Impatto del telaio: dall'analisi condotta è emerso chiaramente che la fase di produzione dei materiali costituisce il principale hotspot ambientale, in particolare il filtro con telaio in alluminio presenta le emissioni più elevate sull'intero ciclo di vita analizzato, guidato principalmente dall'elevato consumo energetico e dalle emissioni della produzione del metallo primario. Alla luce di questa criticità, i risultati trovano un riscontro diretto nelle soluzioni tecnologiche individuate nello stato dell'arte. In particolare, come ci suggerisce lo studio (Chuyi ge et al. 2026) la sostituzione del dataset dell'alluminio primario con quello secondario (proveniente dalla filiera del riciclo) permetterebbe di ridurre le emissioni di carbonio del 96% rendendo l'opzione in alluminio più sostenibile e competitiva con le altre. Le varianti in plastica e MDF rappresentano alternative nettamente più sostenibili per tutte le categorie d'impatto (ad eccezione della categoria Land Use dove il filtro in MDF è il più impattante). In particolare, sul climate change c'è una riduzione di Kg CO_2 eq per il filtro in plastica e MDF rispettivamente del 58% e 65%. Tenendo conto anche delle ricerche [Kirschnick et aL, 2023] e [Mohammad Ghorbanzadeh et al., 2026] questi risultati possono essere migliorati grazie all'utilizzo dell'IMC, come dataset relativo alla lavorazione del telaio in ABS, in sostituzione dello stampaggio ad iniezione, questo permetterebbe una riduzione di impatti del 34%. Invece, per il telaio in legno, l'utilizzo di MDF (ML2), costituito da scarti di legno e sostituzione delle resine con alternative adesive a base biologica, come dataset per il telaio in sostituzione

dell'MDF convenzionale, può portare a una riduzione degli impatti del 20%. Il telaio in MDF è l'unico ad impattare sul climate change meno delle reti esterne, del distanziale e del tessuto plissettato, questo ci suggerisce che in ottica di miglioramento degli impatti ambientali per il fitrro in MDF conviene agire su altri componenti più impattanti, mentre per il filtro in alluminio e plastica ABS conviene agire sul telaio.

- Incidenza della logistica: lo scenario di trasporto europeo genera l'impatto ambientale più elevato per tutti e tre i filtri per la maggior tratta. Per entrambi gli scenari nazionale ed europeo il filtro in MDF ha l'impatto maggiore seguito dal filtro in alluminio con il 18% di impatti in meno per entrambi gli scenari, infine il filtro in plastica con il 34% di impatti in meno per entrambi gli scenari; questi risultati sono dovuti dal maggior peso del telaio in MDF.
- Gli impatti derivanti dai processi di scarto di produzione sono quantitativamente contenuti, per il filtro in alluminio sono maggiori mentre per il filtro in plastica e MDF, che condividono lo stesso processo, l'impatto ambientale è inferiore del 26%.
- Gli impatti derivanti dallo scenario di fine vita: sul climate change lo scenario di termovalorizzazione è risultato meno impattante del 5%. Per le altre categorie di impatto invece non c'è uno scenario in assoluto meno impattante; per alcune categorie prevale in termini di impatto ambientale lo scenario di discarica per altre lo scenario di termovalorizzazione.

6.2 Sviluppi futuri

Al fine di superare i limiti intrinseci della modellazione condotta in questo studio e di estendere la validità dei risultati in un'ottica industriale, si delineano le seguenti linee di sviluppo futuro:

1. **Integrazione della LCC e analisi Eco-efficiente**

Una transizione ecologica sostenibile deve accoppiare l'aspetto ambientale a quello economico. Uno sviluppo futuro prioritario prevede l'integrazione di uno studio di LCC. L'incrocio dei dati di LCA e LCC permetterà di calcolare indicatori di eco-efficienza,

identificando se il materiale a minor impatto ambientale risulti economicamente sostenibile in termini di costi di produzione, lavorazione e approvvigionamento su scala industriale.

2. **Modellazione dinamica del fine vita e dei tassi di riciclo reali**

Nel presente studio è stato applicato il modello di allocazione cut-off, il quale non attribuisce crediti ambientali per il riciclo a fine vita. Sviluppi futuri dovrebbero prevedere una modellazione che consenta di valutare lo scenario di fine vita reale nei mercati di riferimento:

- per l'alluminio, quantificando il beneficio derivante dal circuito di riciclo chiuso, che abbatte fino al 95% l'energia di produzione rispetto al metallo vergine.
- Per l'ABS, analizzando la fattibilità tecnica e gli impatti del riciclo meccanico post-consumo o della termovalorizzazione con recupero energetico.
- Per l'MDF, investigando l'impatto reale dello smaltimento in discarica o dell'incenerimento rispetto a un potenziale riciclo a cascata nel settore dei pannelli truciolari.

3. **Tracciabilità della catena di fornitura**

Il presente studio vanta un elevato grado di affidabilità scientifica grazie all'utilizzo di dati primari di stabilimento, raccolti direttamente dall'azienda produttrice. Uno sviluppo futuro prevede l'estensione di questo approccio Supply chain LCA completa. L'obbiettivo sarà quello di sostituire i dati secondari (Ecoinvent) relativi alle fasi di estrazione e sintesi a monte con dati primari certificati. Questo consentirebbe di mappare l'effettivo energy mix dei fornitori strategici di alluminio, ABS e MDF e di ottimizzare l'impatto della logistica di approvvigionamento.

Un'analisi di questo tipo permetterebbe all'azienda di implementare politiche green, valutando se l'acquisto di un materiale da un fornitore geograficamente più vicino o dotato di certificazioni ambientali possa mitigare l'impatto intrinseco del materiale stesso.

4. **Validazione delle performance tecniche e della durabilità**

In condizioni operative reali, il telaio in alluminio offre una resistenza meccanica, alla corrosione e all'umidità nettamente superiore rispetto all'ABS e MDF. Uno sviluppo futuro essenziale prevede l'introduzione di un fattore di durabilità nello scenario d'uso. Se l'alluminio garantisse una vita utile doppia rispetto al MDF, l'unità funzionale andrebbe ricalcolata, dimezzando gli impatti del ciclo di produzione dell'alluminio e potendo ribaltare l'esito della classifica ambientale.

5. **Integrazione degli scarti per ABS e MDF e armonizzazione dati inventario**

Il modello attuale presenta un livello di dettaglio asimmetrico dovuto alla disponibilità dei dati aziendali, se per l'alluminio sono stati integrati gli scarti reali di lavorazione, i telai in ABS e MDF sono stati modellati assumendo un'efficienza di utilizzo del materiale ideale, pari al 100%, come evidenziato nelle limitazioni. Uno sviluppo futuro consisterà nell'estendere il monitoraggio interno aziendale anche alle linee di lavorazione dei polimeri e del materiale ligneo per quantificare i rispettivi sfridi. L'ottenimento di questi dati permetterà di aggiornare il modello su Simapro applicando la medesima logica cut-off utilizzata per l'alluminio eliminando l'asimmetria e rendendo il confronto più equo.

7 Bibliografia

- Chuyi Ge, Shou Liu, Ke Jiang, Siyuan Yang, Cheng Liu, Min Huang & Shenxu Bao "Strategic decarbonization of aluminium value chains: A life cycle assessment review for sustainable transition pathways" Rewenable and Sustainable Energy Rewviews, vol 226 Part E, Art 116478, 2026

- Ulrike Kirschnick & Nina Krempl"Comparative life cycle assessment of one-step and two-step injection molding compounding for manufacturing recycled glass fiber/polypropylene composites" Cleaner Production, vol 550, Art 147916, 2026

- Mohammad Ghorbanzadeh Nazarlu, Seyedeh Masoumeh Hafezi, Payam Ghorbannezhad & Majid Azizi "Life cycle assessment of MDF production: implementing bio-based production strategies" Clean Technologies and Environmental Policy, vol 28, Art. 233, 2026

- Ente Italiano di Normalizzazione (UNI). UNI EN ISO 14040:2021. Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento (Milano: UNI, 2021).
- Ente Italiano di Normalizzazione (UNI). UNI EN ISO 14044: 2021. Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida. (Milano: UNI, 2021).