

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi LCA del sistema di accumulo termico

R. Petrucci, F. Dominici, M. Rallini, L. Torre



Report RdS/PTR(2021)/269

ANALISI LCA DEL SISTEMA DI ACCUMULO TERMICO

R. Petrucci, F. Dominici, M. Rallini, L. Torre (Università di Perugia)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo : Tecnologie: presidiare e sviluppare tecnologie di prodotto e di processo essenziali per la transizione energetica.

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico, power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: 2 Accumulo termico

Linea di attività: LA2.13 - Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico cementizio con PCM a più elementi ed LCA del sistema.

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone ENEA

Responsabile del Work package: Raffaele Liberatore ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Ottimizzazione e realizzazione di materiali a cambiamento di fase stabilizzati in forma per l'utilizzo in sistemi di accumulo termico con calcestruzzo. Analisi LCA del sistema di accumulo termico".

Responsabile scientifico ENEA: Adio Miliozzi

Responsabile scientifico UNIPG: Luigi Torre

Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE.....	4
2 INTRODUZIONE TEORICA AL LIFE CYCLE ANALYSIS.....	6
3 LAVORO SVOLTO.....	8
3.1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE.....	8
3.2 COSTRUZIONE DELL'INVENTARIO – ASSUNZIONI E MODELLI.....	9
4 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	14
4.1 LCA E LCIA DEL CALCESTRUZZO ATTIVO.....	14
4.2 LCA E LCIA DEL MODULO COMPLETO.....	18
4.3 LCA E LCIA LEGATO ALL'UTILIZZO DEL MODULO COMPLETO.....	23
4.4 DISCUSSIONE RISULTATI OTTENUTI.....	39
4.5 CASO STUDIO – DISTANZA TOTALE PARI A 750 KM E PERCORSO INTERNO PARI A 5 KM.....	42
5 CONCLUSIONI.....	47
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	48
APPENDICE A – ALBERO DI PROCESSO DEL CALCESTRUZZO ATTIVO.....	49
APPENDICE B – CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DANNI PER IL CALCESTRUZZO ATTIVO.....	50
APPENDICE C – ALBERO DI PROCESSO DEL MODULO COMPLETO.....	51
APPENDICE D – CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DANNI PER IL MODULO COMPLETO.....	52
APPENDICE E – CARATTERIZZAZIONE – PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA E TERMICA.....	53

Sommario

In questo documento sono state illustrate le metodologie per lo sviluppo di uno studio LCA dell'intero modulo attivo.

Tale studio è stato fatto per gradi, ossia considerando prima gli elementi di base (calcestruzzo attivo a base dei Sali PCM), fino ai sotto-assemblaggi, ossia il singolo elemento attivo (basato su suddetto calcestruzzo, sul tubo per lo scambio termico e sulla struttura di rinforzo in carpenteria metallica), per finire con il modulo completo di coibente e pavimento.

Nel caso del calcestruzzo attivo è stato notato come i flussi di maggiore criticità ambientale sono legati all'uso della fibra di acciaio e quello del cemento, mentre i Sali PCM forniscono complessivamente un contributo inferiore al 20%.

Nel caso del modulo totale, i contributi di maggiore rilievo all'impatto ambientale sono dati dai tubi, dalle parti strutturali e dal coibente, con un contributo complessivo di circa il 70%. Se si considera che il contributo inerente al consumo energetico ammonta a poco più del 3% e quello del pavimento isolante a poco più del 2%, si può dedurre che il calcestruzzo attivo ha un ruolo più marginale (intorno al 25% del totale).

Oltre a ciò è stata analizzata anche la fase di utilizzo del modulo, parametrizzando due aspetti molto importanti, ossia il trasporto presso l'utilizzatore finale ed un eventuale trasporto interno del nucleo stesso. Come unità funzionale sono stati considerati il singolo kWh di energia elettrica o termica ottenute dal modulo, come sostitute della controparte rispettivamente di rete o da gas naturale. E' stato misurato una sorta di pay-back time ambientale, sia relativamente all'impatto complessivo (tempo per il quale l'impatto assume un valore negativo) che degli indicatori di impatto e di danno ambientale. E' stato notato che il pay-back time, come era lecito attendersi, aumenta all'aumentare dell'entità del trasporto presso l'utilizzatore finale (si tratta del trasporto iniziale), ma soprattutto di quello interno (tragitto quotidiano). Da ciò un aspetto fondamentale sarebbe quella di adottare strategie logistiche e impiantistiche volte a minimizzare l'entità dei suddetti trasporti. A tal proposito, è stato calcolato che un trasporto interno di oltre 6,5 km vanificherebbe l'utilizzo del modulo da un punto di vista dell'impatto ambientale.

E' stato anche dimostrato che il risultato LCA inerente alla fase di uso del modulo è fortemente dipendente dal contesto geografico (Country dependant) e tecnologico. Per quanto riguarda l'aspetto geografico, il risultato varia molto in funzione del mix energetico del paese considerato. In paesi caratterizzati da un mix energetico a basso impatto ambientale il guadagno legato all'uso del modulo è inferiore o si concretizza in un arco di tempo più elevato. Nel caso dell'energia termica, se invece del gas naturale si fa il confronto con altri sistemi, si ha un guadagno importante in termini di pay-back time.

Alla fine, è stato sviluppato su di un caso studio, in cui è stato considerato il caso di un trasporto iniziale di 750 km e di uno interno di 5 km.

1 Introduzione

Lo scopo di questo studio è la verifica della performance ambientale del modulo di accumulo energetico sviluppato da ENEA e UniPG [1], attraverso la relativa Analisi del Ciclo di Vita (LCA).

In primo luogo è stato studiato l’impatto della miscela attiva di materiali utilizzata come calcestruzzo, la quale rappresenta l’aspetto fondamentale affinché il modulo espleti la propria funzione di accumulo di energia. Tale sistema era stato denominato anche “Calcestruzzo Attivo”, formato da una miscela di sali, da una serie di fibre sia metalliche che polimeriche e dalla diatomite. Naturalmente nella miscela è stata anche considerata tutta la serie di inerti normalmente utilizzata nei calcestruzzi da costruzione.

Successivamente lo studio è stato esteso al singolo elemento attivo, ossia quello composto dal calcestruzzo, dai tubi all’interno dei quali fluisce il fluido di scambio termico, e dalle strutture di carpenteria metallica utilizzate per il rinforzo strutturale.

Dal singolo elemento si è passati ad analizzare l’intero nucleo attivo, composta da una matrice di 7 righe e 6 colonne di singoli elementi impilati insieme (Figura 1), quindi di un totale di 42 moduli, circondati da una coibentazione a base di lana di roccia su tre quarti della superficie esterna. La superficie inferiore del modulo è stata immaginata poggiare al di sopra di un pavimento di mattoni forati ad elevata efficienza di isolamento (schema di Figura 2).

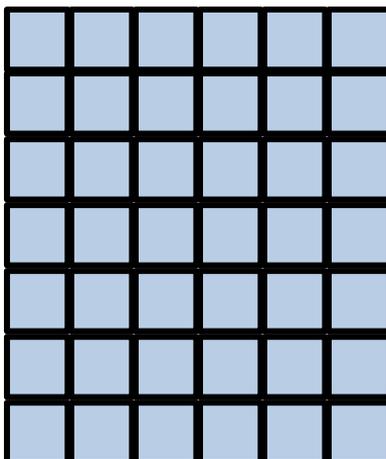


Figura 1: Schema di riferimento del nucleo attivo di un modulo di accumulo termico.

Il materiale coibente ha lo scopo di minimizzare le perdite termiche, così come il pavimento menzionato. Il tipo di coibente qui identificato è il ProRox SL 960 della Rockwool, ossia un pannello rigido di spessore 100 mm (il massimo disponibile nel mercato) e dimensioni superficiali pari a 1000x600 mm. Il peso specifico di questo prodotto è pari a 100 kg/m². Il peso specifico del materiale costituente il singolo nucleo è circa 2500 kg/m², derivante dal fatto che all’interno del cemento vi sono anche il tubo riscaldante in acciaio inox e la gabbia di acciaio.

La superficie esterna del nucleo è coibentata con uno spessore di 400 mm di suddetto sistema (4 strati di pannelli). L’ingombro complessivo, escluse le tubazioni esterne alla coibentazione, sarà di 3,8 m di profondità, 1,9 m di larghezza e 2,12 m di altezza.

Per quanto riguarda la pavimentazione si considera un sistema di forati, nel cui interno è iniettato anche del materiale isolante termico ed acustico. Un esempio è quello dei sistemi NormaBlok® Più, che sono usati per murature mono strato, i quali possono essere completati in fase di produzione da un materiale isolante iniettato nei fori (ad esempio polistirene caricato con grafite), in modo da ottenere prestazioni termiche molto elevate anche con spessori contenuti (Informazioni prese dal sito della Fornaci Laterizi Danesi).

E’ stato ipotizzato di inserire il nucleo intero all’interno di un classico modulo container, le cui dimensioni standard sono pari a 5,86 m di lunghezza, 2,31 m di larghezza e 2,36 m di altezza.

Si ritiene opportuno anticipare che tale componente, essendo un elemento ausiliario, è stato trascurato nel calcolo degli impatti ambientali inerenti alla fase di produzione del modulo, mentre è stato incluso nel calcolo degli impatti generati dal trasporto del modulo stesso dal produttore all'utilizzatore ed anche nel proprio tragitto quotidiano all'interno di un distretto industriale.

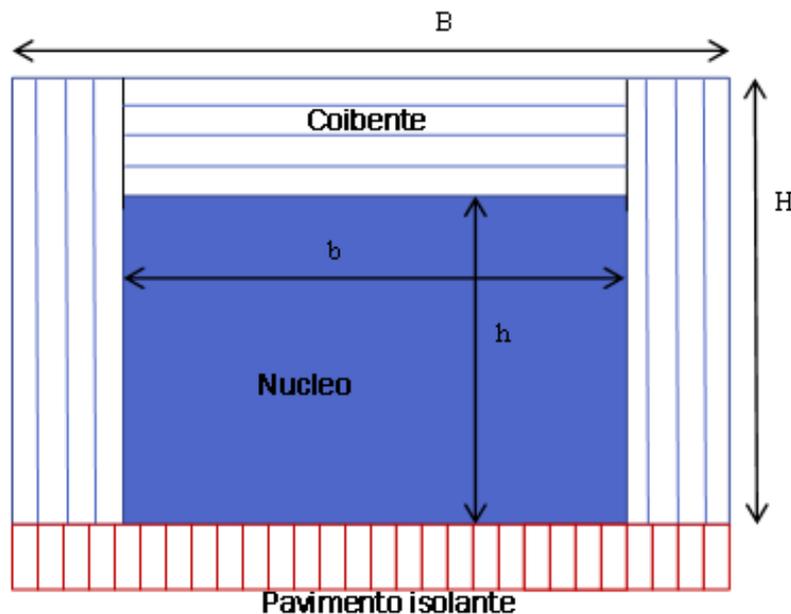


Figura 2: Schema del nucleo completato del materiale di coibentazione ed isolamento termico.

A questo proposito, è stata studiata anche la fase di uso del sistema in questione, valutando eventuali benefit ambientali legati alla produzione di energia termica o elettrica mediante l'utilizzo del nucleo intero, rispetto alla produzione di una equivalente quantità ottenuta dai sistemi standard (rete elettrica nazionale o uso di gas naturale). E' stato costruito lo studio sulla base di uno scenario conservativo (più penalizzante), ossia è stato ipotizzato che il nucleo fosse interamente costruito in un luogo (azienda produttrice o concessionaria) e fosse trasportato altrove. Oltre a ciò, nelle condizioni di utilizzo si ipotizza che il modulo debba essere movimentato internamente al distretto industriale, allo scopo di collezionare energia a valle di un sistema produzione funzionante ad elevate temperature e per il quale la controparte di energia termica a medio-bassa temperatura sarebbe andata perduta, e utilizzato altrove.

Questo ultimo studio ha consentito di stabilire dei pay-back time ambientali ed energetici in funzione della distanza totale (D_{tot} (km)) percorsa dal modulo dal produttore all'utilizzatore e quella percorsa all'interno del singolo distretto considerato (D_{int} (km)). Anche per alcuni indicatori è stato adattato un approccio del tutto simile, così come per i danni ambientali.

Sono stati eseguiti anche degli LCA fatti su casi studio, per mostrare che alcuni dei risultati ottenuti sono dipendenti dal contesto geografico (Country Dependent) o da quello tecnologico, inerenti alla produzione rispettivamente di energia e calore.

Infine, lo studio LCA di uno dei casi studio è stato sviluppato con lo scopo di avere una fotografia (istantanea) della performance ambientale inerente alla fase di utilizzo del modulo.

2 Introduzione Teorica al Life Cycle Analysis

Da un punto di vista pratico la generazione e l'applicazione di un approccio di tipo LCA (Life Cycle Assessment) e/o LCE (Life Cycle Engineering) può essere inteso come la creazione di un strumento decisionale e come garanzia della sostenibilità di una serie di materiali, quindi di un prodotto, ma anche di un progetto industriale legato al prodotto stesso.

Da un punto di vista concettuale, invece, il LCA può essere considerato una sorta di evoluzione della tecnica di analisi energetica. In più, rispetto a questa, tiene conto delle emissioni e delle risorse utilizzate per la creazione di un prodotto in quanto tali, e non solo in quanto in possesso di un proprio potenziale energetico. Cioè non solo considerando che ogni materiale, attraverso il proprio potere calorifico, può essere trasformato in energia. Quindi, il relativo utilizzo, come materia in se stessa, va tenuta in considerazione non solo per il fatto che si va a depauperarne il potenziale di produrre energia, ma anche perché questo comporta un consumo di risorse (sfruttamento), oltre che per il fatto che la relativa estrazione, lavorazione e smaltimento comportano delle interazioni con l'ambiente, determinandone una sostanziale ed importante alterazione (Figura 3). Di questo la sola analisi energetica non può tenere conto.

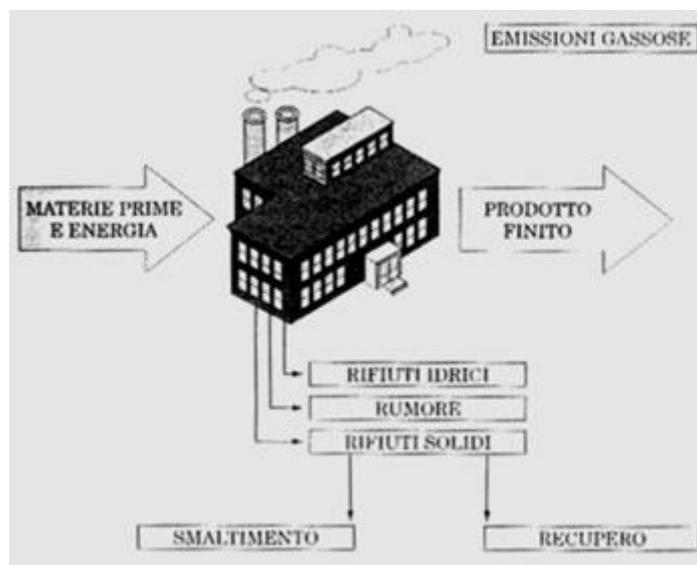


Figura 3: Schematizzazione delle interazioni con l'ambiente afferenti le attività umane.

L'LCA può essere intesa come una metodologia che stravolge l'approccio tipico dell'ingegneria tradizionale, la quale privilegia lo studio separato dei singoli elementi dei processi produttivi. Si passa ad una visione sistemica, in cui tutti i processi di trasformazione, a partire dall'estrazione dalle materie prime, fino allo smaltimento dei prodotti a fine vita, sono presi in considerazione, in quanto partecipano alla realizzazione della funzione per la quale essi sono progettati. In poche parole, tutto comporta una interazione con l'ambiente (Figura 4), ne determina un'alterazione e provoca degli effetti su di esso, quindi delle conseguenze su chi vive in esso.

L'Analisi del ciclo di vita può essere studiata in base a diversi approcci, in funzione anche allo scopo per il quale tale studio viene effettuato. Il primo tipo, denominato "approccio dalla culla al cancello" (cradle to gate), riguarda l'analisi del ciclo di vita di un prodotto/sistema (dei relativi flussi energetici e materiali) dalle fasi di estrazione delle materie prime utilizzate in esso, fino all'uscita dall'impianto di produzione. La seconda tipologia è denominata "dalla culla alla tomba" (cradle to grave), e, invece, oltre a coprire la parte del ciclo di vita fino all'uscita dall'impianto di produzione di un prodotto/sistema, riguarda anche la fase di esercizio, mantenimento e quella riguardante il fine vita (compreso l'eventuale riciclo totale o parziale – "cradle to cradle").

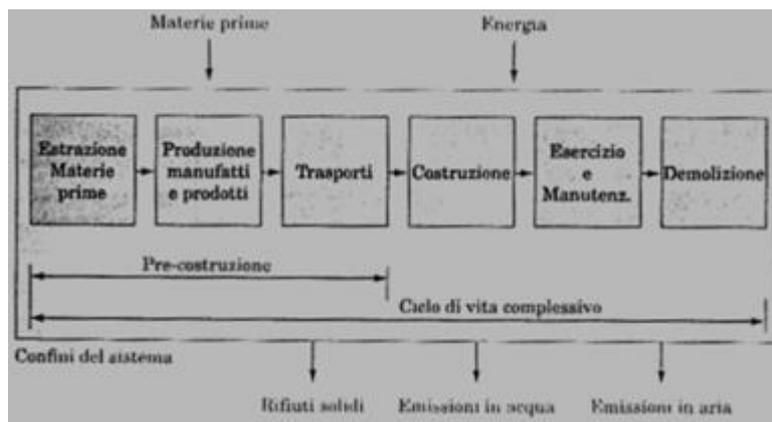


Figura 4: Fasi di processo di cui si occupa un LCA parziale o totale.

Per lo sviluppo di questo studio è stato necessario basarsi su alcuni riferimenti normativi fondamentali, di cui per alcuni è stato fatto cenno, ma ce ne sono anche altri, elencati nelle righe seguenti:

- ISO 14040:2006 - Environmental Management – Life cycle assessment – Principles and framework;
- ISO 14044:2006 - Environmental Management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines;

La struttura di un LCA si può articolare su quattro fasi sequenziali, fondamentali per la buona riuscita dell'analisi in questione:

1. Definizione dello scopo: In questa fase, si va anche a definire l'unità funzionale, che serve a misurare in modo tangibile ed inequivocabile la prestazione (sempre in relazione allo scopo o alle caratteristiche intrinseche del prodotto/sistema analizzato) del flusso in uscita;
2. Analisi dell'inventario: In questa fase le informazioni che concernono i processi sono organizzati in termini del LCA. Ciò significa che vengono creati modelli che rappresentano il processo produttivo (soprattutto in termini di flussi in ingresso ed in uscita). Inoltre, sempre in questa fase tutti gli input e gli output sono normalizzati (scalati) rispetto all'unità funzionale;
3. Attribuzione degli impatti: Ossia capire gli effetti immediati di una particolare azione e le conseguenze che queste hanno a livello ambientale;
4. Interpretazione dei risultati: Ciò serve anche a comprendere le fasi critiche relative al ciclo di vita di un prodotto/sistema, quindi come migliorare la performance ambientale;

Per quanto concerne le principali categorie di impatto, questi sono suddivisi come segue:

- Ecologici: Agiscono sugli esseri viventi e sull'ecosistema in generale;
- Salute umana e sicurezza;
- Consumo delle risorse (energia e materiali);
- Degradazione del habitat;

Per quanto invece riguarda gli effetti di maggior rilievo, derivanti da questi impatti ambientali, questi sono:

- Riscaldamento globale ed assottigliamento fascia stratosferica di ozono;
- Acidificazione e "Nutrient enrichment";
- Formazione del fotosmog e "Human and eco-toxicity";
- Consumo delle risorse;

Per poter avere un computo totale dell'impatto ambientale derivante da una determinata azione umana, è opportuno scegliere un apposito indicatore quantitativo per ogni effetto.

In fine, per quanto riguarda la metodologia di attribuzione dei valori alle categorie di impatto o agli effetti causati, vi sono una serie di possibilità o di modelli di calcolo. Nel caso in esame è stato utilizzato un metodo che consente di monitorare a 360° l'impatto ambientale delle operazioni svolte, di considerare sia separatamente che raggruppandoli i tipi di impatto per categorie e calcolarne un punteggio globale, riferendosi così alle categorie di impatto piuttosto che ai differenti tipi di danni ambientali. Tale aspetto sarà meglio delucidato più avanti.

3 Lavoro svolto

In questa sezione sarà descritto il lavoro svolto in termini di metodologia di studio ed i vari stadi del LCA, inclusa la metodologia di costruzione degli inventari. I risultati ottenuti saranno discussi in un paragrafo a parte.

3.1 Scopo e campo di applicazione

Lo studio LCA è stato portato avanti sulla base delle prescrizioni inerenti alle norme ISO 14040 e 14044. In particolare, per ognuno dei prodotti elencati alla fine della sezione introduttiva, è stata rispettata la sequenza delle fasi canoniche riportate precedentemente, ossia Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, Analisi dell'Inventario dei dati in ingresso ed in uscita al sistema produttivo in esame, Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) ed Interpretazione.

Come anticipato nella sezione introduttiva, lo studio in questione è stato portato avanti su tre macro aree di intervento:

- Produzione del calcestruzzo attivo: ciò ha comportato la costruzione di modelli, inventari, ecc., di tutta una serie di prodotti necessari alla produzione di suddetto prodotto;
- Singolo elemento attivo: costituito dal calcestruzzo di cui sopra e dalle strutture metalliche;
- Modulo completo: costituito dai 42 elementi, dal coibente e dal basamento isolante;

E' stato anticipato che è stata inclusa anche una fase di uso, che determina la produzione di energia elettrica o termica, al posto delle rispettive controparti di rete o derivanti da sistemi standard. A questo proposito, sono stati analizzati anche dei veri e propri casi studio.

Come sarà meglio descritto nella definizione dell'inventario, sono stati sviluppati anche dei modelli parametrici, che consentono di adeguare in maniera rapida ed efficace l'inventario inerente ad ogni prodotto in caso di future modifiche, di razionalizzazione, ottimizzazione della relativa composizione, o in caso di variazione di condizioni e parametri di processo. Tale adeguamento è funzionale anche alla possibilità di aggiornare con continuità i dati inerenti agli impatti ambientali.

Secondo le regole che disciplinano l'esecuzione dello studio LCA, in questa fase si deve definire anche l'unità funzionale dei vari sistemi allo studio. Per unità funzionale si intende la prestazione quantificata di un sistema/prodotto/servizio, da utilizzare come base di riferimento. Ad essa sono riferiti (scalati) tutti i flussi di dati generati dall'analisi LCA ed è anche una quantità fondamentale per sviluppare analisi comparative tra prodotti, che espletano la medesima funzione (soprattutto se la performance dei termini di confronto è differente).

Nel caso del calcestruzzo attivo è stata considerata come unità funzionale il singolo kg di prodotto finale, privo di qualsivoglia involucro o imballaggio.

Nel caso del singolo elemento attivo è stata considerata come unità funzionale il singolo nucleo (unità (p)), così come nel caso del modulo completo.

Per valutare la performance del modulo nella relativa fase di utilizzo, ossia come mezzo di recupero energetico o di erogazione di energia termica ed elettrica, come unità funzionale è stato considerato 1 kWh di energia termica o elettrica prodotta o risparmiata.

Per quanto riguarda l'orizzonte temporale dei dati, per quanto possibile, si fa riferimento alla produzione dell'anno 2021. Molti dati sono stati ricavati da riferimenti bibliografici recenti. Per quanto riguarda la qualità degli stessi, nella discussione di come è stato costruito l'inventario si forniranno maggiori dettagli.

Per quanto riguarda i confini del sistema, si anticipa che molti dettagli, soprattutto quantitativi, saranno forniti nella fase successiva (Definizione dell'Inventario), ma si può comunque anticipare che è stato escluso solo la produzione del container entro cui può essere caricato il modulo, per portarlo a destinazione o per movimentarlo internamente al distretto industriale di riferimento.

Lo scopo di questa fase è stato quello di studiare l'impatto ambientale potenziale, generato dalla mera fase di produzione dei sistemi sopra menzionati. Nel caso della fase di uso, l'analisi ha lo scopo di stabilire non solo gli impatti (inclusi gli indicatori), ma l'andamento degli stessi in funzione delle condizioni di fornitura e di utilizzo del modulo completo, le quali sono rappresentate rispettivamente dal trasporto presso il sito industriale di utilizzo e dal trasporto interno.

Questo consentirebbe di comprendere anche come ottimizzare gli aspetti elencati, relativamente all'opportunità di realizzare i vari moduli in situ e di minimizzare il più possibile i trasporti interni, come si vedrà dai risultati. Sono state ricavate delle leggi matematiche che legano empiricamente gli aspetti (parametri indicati) al pay-back time, agli indicatori di impatto principali (Parametri mid-term) e ai parametri attestanti il danno ambientale (parametri end-term).

A questo proposito, come pay-back time (ambientale) è stato definito il tempo di utilizzo del modulo, oltre il quale il punteggio globale del LCA (LCA score – punteggio singolo) relativo alla produzione di 1,00 kWh di energia elettrica o termica diventa inferiore alla controparte di rete. Questo è stato legato sia al variare dell'entità del trasporto presso l'utilizzatore finale che internamente al distretto considerato.

3.2 Costruzione dell'Inventario – Assunzioni e modelli

Per quanto riguarda l'inventario inerente alla produzione del calcestruzzo attivo il punto di partenza è stato quello di modellare la produzione della miscela di Sali PCM. Si è partiti dalle condizioni di laboratorio, le quali sono state scalate su dimensioni pilota o di produzione industriale almeno in termini di consumi energetici. La miscela di Sali secchi è costituita nel seguente modo:

- Nitrato di potassio – KNO_3 – 56,35%;
- Nitrato di sodio – NaNO_3 – 43,65%;

Per quanto riguarda le condizioni di lavorazione, è stata impostata una temperatura in fase di miscelazione pari a 84 °C per un tempo di circa 15 minuti. Sono state ignorate eventuali perdite per evaporazione, dato l'esiguo tempo di miscelazione. Da ciò, per la valutazione della spesa energetica è stato sviluppato un modello parametrico basato sulla seguente espressione (Equazione 1) :

$$Q = \frac{(1-\xi)mC_p\Delta T}{3,6\eta} \quad \text{Equazione 1}$$

dove con il termine C_p è il calore specifico (in questo caso della miscela (1,98 kJ/kg°C), la quale è portata in temperatura prima dell'aggiunta dei Sali, ed il termine η rappresenta l'efficienza del sistema, considerata pari a 0,90. Il termine ξ rappresenta la frazione in peso della parte solida dei Sali all'interno della miscela a base acquosa (pari a 0,625), ΔT è pari a 61 °C, m è la massa totale (1,00 kg). Il termine al denominatore pari a 3,60 serve per la trasformazione dei MJ in kWh.

Oltre a tale energia vi è quella legata alla miscelazione meccanica del sistema. La potenza di comuni sistemi industriali relativa all'agitazione di 1 m³ di qualsiasi mezzo [2] (compreso quelli in processi di fermentazione) varia tra 0,1-12 kW/m³ (Patel et al., 2006). Secondo la teoria relativa al modello di Skelland & Ramsey, un valore raccomandato è pari a 0,50÷0,75 kW/m³. Può dipendere anche dalle caratteristiche del dispositivo utilizzato, sulla base della seguente equazione (Equazione 2):

$$\frac{P}{V} \sim D^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equazione 2}$$

dove P è la potenza in ingresso al dispositivo, V è il volume del sistema miscelato e D è il diametro del miscelatore. Il volume totale è dato dalla seguente relazione (Equazione 3):

$$V = \frac{m(1-\xi)}{\rho_{Acq}} + \xi \left(\frac{\chi_k}{\rho_k} + \frac{\chi_{Na}}{\rho_{Na}} \right) \quad \text{Equazione 3}$$

Nel caso in esame è stato considerato il valore superiore dell'intervallo indicato, allo scopo di fornire un dato conservativo. Relativamente alla formula, il termine ρ_k e ρ_{Na} rappresentano le densità dei due Sali sopra menzionati (2,26 kg/l per il nitrato di sodio e 2,11 kg/l per quello di potassio. I termini χ_k e χ_{Na} , rappresentano le frazioni i volume dei due sali considerati.

Come anticipato, il tempo di miscelazione è pari a 15 minuti. E' stato usato un rapporto tra acqua e Sali pari a 60:100 in peso, il quale influenza anche il consumo di energia per il riscaldamento, mentre quello per la miscelazione dipende dal volume effettivamente occupato dalla miscela totale. Da ciò, l'energia totale

spesa è stata parametrizzata sulla base della frazione in peso di ognuna delle tre componenti, ossia i due Sali e dell'acqua, sulla base della seguente relazione (Equazione 4):

$$E_{Tot} = Q + 7,50 * 10^{-4}V \quad \text{Equazione 4}$$

dove $7,50*10^{-4}$ è l'energia meccanica spesa nella miscelazione del singolo m^3 di soluzione, Q e V sono noti dalle formule precedenti.

Le energie in gioco sono state contestualizzate rispetto al mix energetico nazionale (Italiano), senza alcuna distinzione tra la controparte elettrica e quella termica, ossia considerando solo quella elettrica.

Come unità funzionale è stata considerata una miscela liquida di Sali pari a 1,00 kg e sono state escluse perdite di qualsivoglia natura.

Anche la quantità d'acqua e dei due Sali è parametrizzata, come riportato nelle equazioni seguenti (Equazione 5 e Equazione 6):

$$m_{Acq} = 1 - \xi \quad \text{Equazione 5}$$

$$m_i = \xi \chi_i \quad (i = k \text{ or } Na) \quad \text{Equazione 6}$$

Una seconda fase ha riguardato la modellazione della produzione della miscela tra sali e diatomite. A questo proposito, è stata considerata la produzione della miscela secca, ottenuta a partire dalla preparazione di un letto poroso di diatomite, sulla quale è versata la miscela umida di Sali. Sono state fatte le seguenti considerazioni nel passaggio dal modello su scala di laboratorio a scala industriale:

- Il rapporto diatomite:miscela secca di Sali è pari a 20:80 in peso;
- Stadio di essiccazione in forno a vuoto portato avanti alla temperatura di 84 °C e per una durata pari a 4 ore almeno;
- Si suppone che il mero stadio termico agevoli solo in minima parte la rimozione dell'acqua presente, ma che questa sia dovuta in larga misura all'azione della pompa da vuoto. Da ciò, l'energia elettrica totale impiegata è data dalla somma di quella termica e quella della pompa;

Nel caso in oggetto, la formula utilizzata per stimare il consumo di energia termica è la relazione (6), in cui il termine η ammonta a 0,60 (maggiori perdite per la durata elevata delle operazioni e per l'azione della pompa da vuoto, che porta via anche il calore prodotto. Da ciò si considera sempre lo stesso tipo di modello parametrico (Equazione 7), che è funzione della frazione di acqua presente, pari a 0,48 = $(m_i - m_f)$, ossia massa iniziale (umida), alla quale viene sottratta la massa finale (secca):

$$Q = \frac{(m_i - m_f)mC_P\Delta T}{3,6\eta} \quad \text{Equazione 7}$$

Per quanto riguarda l'energia spesa dalla pompa da vuoto, si considera la seguente relazione (Equazione 8):

$$E = (m_i - m_f) \left(\frac{Q\Delta P}{eff} \right) \frac{t}{1000} \quad \text{Equazione 8}$$

dove Q è la portata espressa in m^3/s (nel nostro caso 18 m^3/ora), ΔP è la depressione (100000 Pa) applicata, eff non è altro che l'efficienza (0,72 per una comune pompa radiale) e t è la durata totale del processo (8 ore). Si ottiene un valore in kWh/ m^3 . E' stato ipotizzato che l'acqua evaporata è smaltita direttamente come vapore in atmosfera e l'energia totale è la somma di quelle riportate sopra.

Come unità funzionale si considera 1,00 kg di materiale (allo stato secco) totale a base dei componenti sopra citati.

L'incapsulamento vero e proprio ha comportato l'esecuzione di una ulteriore operazione, di natura meramente energivora e senza l'utilizzo di alcun materiale, ne di base ne accessorio.

Per il calcolo dell'energia si parte dal materiale secco molto friabile e si suppone che sia grossolanamente sferico.

E' stato sviluppato un modello parametrico, che tiene conto delle dimensioni iniziali del prodotto e di quelle finali, sulla base dell'Equazione 9 (Legge di Bond) [2]:

$$E = 1,25 * E_i \sqrt{\frac{100}{L_2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{L_1}{L_2}}} \right)}$$

Equazione 9

dove il termine L indica il diametro equivalente delle particelle espresso in micron all'inizio (pedice 1) e alla fine (pedice 2). Il termine E_i indica l'indice di lavoro (espresso in kWh/ton). Il termine 1,25 è stato adottato per tenere conto di eventuali inefficienze del processo, quindi per rendere il modello maggiormente conservativo. In sostanza l'energia spesa è stata aumentata del 25%.

Nel caso in esame il materiale è stato assimilato al gesso (almeno in termini di consistenza), il cui indice di lavoro vale 8,15 kWh/ton. Il diametro equivalente si calcola a partire dal volume (V) reale dei frammenti rilevati all'inizio e alla fine, di forma rettangolare, assimilata a quello di una sfera equivalente, sulla base della seguente espressione (Equazione 10):

$$L = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$

Equazione 10

Nel caso in oggetto è stato misurato un diametro equivalente iniziale delle particelle pari a $1,13 * 10^5 \mu\text{m}$ ed un diametro finale pari $1,10 * 10^4 \mu\text{m}$.

E' stata considerata un'unità funzionale pari a 1,00 kg di additivo attivo: così è stato denominato per semplicità il materiale ottenuto. Sono state trascurate perdite di materiale e scarti durante il processo.

Per quanto riguarda ciò che è stato denominato "Calcestruzzo attivo", oggetto della prima valutazione in termini di LCA, è stata considerata una fase di miscelazione con betoniera.

Come unità funzionale per la costruzione del modello è stato considerato il peso di 1000 kg di calcestruzzo, inclusi inerti ed additivi.

Per quanto riguarda Autobetoniera per miscelazione calcestruzzo, si considera un dispositivo industriale del tipo CIFA RS1 1300, avente le seguenti caratteristiche:

- Power input = 85 kW;
- Capacità = 12 m³;

I tempi di miscelazione tipici vanno da 1 a 3 minuti [3]. In questo caso si considerano i 3 minuti (modello conservativo) e un sistema che lavora a metà capacità, rispetto al massimo di 120 m³/ora. Da questo si ricava una spesa energetica pari a 0,71 kWh/ m³ di calcestruzzo trattato (si trascurano gli scarti). L'inventario sviluppato è stato riportato in Tabella 1.

Tabella 1: Inventario inerente alla produzione della data unità funzionale di calcestruzzo attivo.

Materiale	Fu = 1 m ³	Fu = 1 Ton
Acqua (kg)	160,00	69,44
Cemento Portland (kg)	360,00	156,24
Sabbia (kg)	829,00	359,79
Brecciolino (kg)	368,00	159,71
Breccia (kg)	405,00	175,77
PCM Incapsulati (kg)	127,00	55,12
Fibre PP (kg)	1,00	0,434
Fibre metalliche (kg)	50,00	27,70
Superfluidificante (kg)	4,43	1,92
Energia (kWh)	0,71	0,308
<i>Peso totale (kg)</i>	<i>2304,43</i>	<i>1000,00</i>

Naturalmente, non tutti i materiali utilizzati erano presenti nel database del software preso in considerazione (in questo caso Ecoinvent 3.6). Da ciò, è stato necessario modellare la diatomite calcinata a partire dalla considerazione che la relativa energia di macinazione ha un entità molto simile a quella con quella inerente alla produzione dei carbonati di calcio. A suddetta energia si deve aggiungere quella di calcinazione in una fornace verticale (1,90 MJ/kg) [4]. E' stata modellata la produzione di una quantità di 1,00 kg di materiale (unità funzionale) in Italia.

Per quanto riguarda le emissioni, sono state considerate quelle di polveri fini legate alla lavorazione e alla movimentazione: stima intorno allo 0,02% (in particolato fine) del peso totale.

Oltre a suddetto materiale, è stato necessario modellare la produzione delle fibre corte di acciaio. E' stato preso in considerazione un acciaio basso legato, sottoposto ad operazioni di wire drawing [5]. Per tenere conto delle operazioni di taglio della fibra continua e di eventuali altre operazioni non note, il contributo del wire drawing è stato maggiorato del 20%. Anche in questo caso, come unità funzionale è stata considerata 1,00 kg di fibra corta pronta all'uso e sono stati trascurati gli scarti.

Infine, è stato necessario modellare la produzione del super fluidificante acrilico a base acquosa. Sono stati considerati dei sistemi caratterizzati da un contenuto in peso acqua: prodotto acrilico pari a 80:20. E' stato considerato un sistema presente nel database del software ed in particolare un legante arilico secco al 35%, al quale aggiungere dell'acqua deionizzata.

Sono state incluse nel relativo inventario anche i consumi energetici afferenti le operazioni di miscelazione, caratterizzate da un consumo energetico pari a 0,75 kWh/m³ (densità del prodotto ricavata dalla relativa scheda tecnica).

Come unità funzionale è stata considerata una quantità di prodotto pari a 1,00 kg e sono stati trascurati scarti e perdite.

Per quanto riguarda la modellazione del singolo elemento completo ed energeticamente attivo, nel relativo inventario sono stati inseriti il tubo riscaldante di acciaio inox e le strutture di carpenteria (acciaio), oltre ad un peso di calcestruzzo attivo equivalente a coprire un volume di 0,15 m³.

E' stata considerata l'operazione relativa alla gettata del cemento in un cassero di legno, il cui contributo è stato trascurato, mentre è stata inclusa la spesa energetica legata all'utilizzo di un sistema di vibrazione, avente una potenza di lavoro pari a 1,5 kW (a regime 75% del massimo), che per un pilastro come quello in questione è attivo per un tempo pari a 1 minuto (indicazione fornita dal relativo produttore).

Come unità funzionale si considera al momento il singolo nucleo attivo (1 p/fu), senza fare alcun riferimento alla relativa performance.

Infine, per quanto riguarda la fase di produzione, è stato modellato il processo di impilamento ed isolamento del modulo completo, formato, come anticipato, da 42 elementi in totale. Nel processo di impilamento stesso, ogni singolo elemento è sollevato e messo in posizione secondo una matrice di 7 righe e 6 colonne.

Per il computo energetico inerente alle operazioni di sollevamento ed impilamento è stato considerato un modello parametrico, che ha consentito di calcolare l'energia spesa in fase di allestimento (caricamento) della pila mediante un apposito carro ponte, attraverso la seguente formula (Equazione 11):

$$E_{Tot} = 1,50n \left(\frac{mgh_0}{\eta} \right) L \sum_i^k i \quad \text{Equazione 11}$$

dove n e k sono rispettivamente il numero di colonne e righe, L è il lato della sezione resistente del singolo elemento costituente il nucleo (0,22 m), m è la massa del singolo elemento di nucleo stesso (363 kg), h₀ è la quota minima iniziale inerente alla prima riga, assunta pari a 1,50 m, g è l'accelerazione di gravità ed il termine η è un fattore di efficienza del sistema, considerato pari a 0,75. Il termine 1,50 è un fattore che consente di tenere conto che, per ragioni di sicurezza, un singolo nucleo è impilato sull'altro sollevandolo ad una quota maggiorata del 30% rispetto al relativo lato. Oltre a ciò, consente di tenere conto anche dell'energia spesa dal carro ponte nel tragitto orizzontale a pieno carico;

Come detto, il nucleo completo viene corredato di materiale coibente ed è stato considerato anche il contributo di un pavimento isolante (refrattario), come anticipato nelle sezioni iniziali.

Il container utilizzato per il trasporto o la messa a disposizione è stato considerato solo come mezzo ausiliario di contenimento del nucleo, quindi non è stato inserito nell'inventario. Non è neanche detto che sarà utilizzato nella realtà, soprattutto per i sistemi costruiti in situ. Non è detto che non sia richiesta disposta semplicemente su un altro mezzo o sistema di locomozione.

Come detto, è stata assunta un'unità funzionale pari ad un singolo nucleo completo attivo (1 p/fu). Sono statini inclusi nell'inventario 1117 kg di coibentazione, 317 kg di pavimento isolante e circa 6 kg di piping di connessione (tubi in inox).

Nel processo di connessione dei tubi in acciaio inox sono state incluse le seguenti operazioni:

- Operazioni di piegamento a 180° con raggio di curvatura di 50 mm: 36 x 2 operazioni di piegatura, fatte su tubi da 100 mm di lunghezza;
- Saldatura tubi alla struttura pre-esistente con sistema ad arco (Arc Welding);
- Taglio a misura di barre commerciali da 3 m sottoposte anche a piegature a 90° (0,15 ore di utilizzo piegatrice - tube bending);

E' stato ipotizzato che la fase di coibentazione comporti degli scarti di materiale: Waste of mineral wool pari a $2,17 \cdot 10^{-2}$ kg per kg di materiale coibente. Degli scarti sono stati considerati anche nella costruzione del pavimento isolante con il sistema di forati, nel cui interno è presente anche del materiale isolante termico ed acustico (polistirene da 40 kg/m³ caricato con grafite al 6% secondo dati provenienti da banche dati commerciali, confermate anche nel database Ecoinvent).

E' stata rilevata una percentuale di foratura è del 60%, il che vuol dire che il 60% del volume è occupato dal polistirolo caricato.

Per poter valutare l'effettiva convenienza nell'uso del nucleo presso un qualsiasi utilizzatore finale, è stato incluso nell'inventario anche il trasporto, il quale è stato parametrizzato sia rispetto sia al percorso verso suddetto utilizzatore che al percorso interno al distretto industriale.

In merito a questo ultimo aspetto era stato ipotizzato che il nucleo assorbisse "scarti energetici a medio-bassa temperatura" da un sistema produttivo funzionante ad elevate temperature (carica), per poterli successivamente sfruttare (scarica) presso un utilizzatore in localizzato prossimità dal sito di carica stessa.

Per quanto riguarda il trasporto, si considera, non solo il peso del nucleo attivo, ma anche quello del coibente e del pavimento refrattario.

Non conoscendo la distanza che, di volta in volta, il nucleo dovrà percorrere, è stato sviluppato, come detto, un modello parametrico basato sul peso dell'assemblaggio totale, che è stato calcolato ed è costante, oltre che sulla variabile della distanza percorsa D_{tot} . A tal proposito, il peso totale trasportato ammonta a 17,261 Ton/modulo.

Oltre a ciò, la valutazione di performance ambientale/energetica è stata calcolata sulla base dell'accumulo teorico giornaliero di energia termica totale del modulo, la quale è compresa tra 220 e 250 kWh/giorno.

Il rendimento totale nel restituire tale energia sotto forma di calore è del 80% circa ($180 \div 200$ kWh/giorno – Valore medio pari a 190 kWh/giorno). Il rendimento totale nel restituire tale energia sotto forma di elettricità è circa del 20% (40-50 kWh/giorno – Valore medio pari a 45 kWh/giorno).

Questa energia può essere considerata anche come quella che si potrebbe risparmiare in un dato impianto, che, in assenza di tale modulo, verrebbe completamente perduta.

E' stata presa come unità funzionale la quantità di energia risparmiata ogni giorno, sia nel caso della controparte termica che di quella elettrica (1 kWh). L'ipotesi fondamentale è stata che il nucleo permanga all'interno di un sito industriale per un determinato periodo di tempo (molto lungo), che si attivo solo nei giorni lavorativi e per il 90% dei giorni disponibili. Ciò consente di sviluppare un modello parametrico che è funzione dei giorni di permanenza (N_D), in base alla seguente parametrizzazione (Equazione 12):

$$N_U = 0,60N_D \quad \text{Equazione 12}$$

dove 0,60 sta ad indicare che il nucleo può essere attivo per un tempo pari al 60% del tempo di permanenza in giorni. Ciò è calcolato sulla base del numero di giorni lavorativi in un anno.

Per l'implementazione dei modelli è stato utilizzato il software SimaPrò, versione 9.1.1 ed è stato selezionato lo strumento di valutazione ReCiPe 2016(H/A).

4 Risultati e discussione

In questa sezione sono riportati i risultati ottenuti in termini di LCA, quindi in termini di impatti ambientali potenziali per i sistemi studiati, ossia del calcestruzzo attivo, del singolo elemento e del modulo completo. Oltre a ciò sono stati valutati gli aspetti inerenti all'utilizzo di energia accumulata dal nucleo completo come sostituyente della controparte ottenuta dalla rete o da sistemi (Termodinamici) standard. Ciò anche in funzione delle condizioni di fornitura (trasporto presso il cliente finale - D_{tot}) ed operative (trasporto interno - D_{int}) e del tempo di utilizzo.

4.1 LCA e LCIA del calcestruzzo attivo

Per quanto riguarda l'analisi del ciclo di vita del solo calcestruzzo attivo, in Figura 5 è riportato l'albero di processo inerente alla fase di produzione. Tale diagramma è meglio visibile nell'appendice A.

Si nota chiaramente dal grafico che il risultato evidenzia un impatto ambientale molto modesto, in quanto il punteggio singolo ammonta a 11,40 mPt. Oltre a questo si nota che i componenti del calcestruzzo in questione che determinano la maggior parte dell'impatto sono il cemento Portland (30%), ma soprattutto la fibra di acciaio, malgrado la relativa frazione in peso sia molto modesta. Risulta molto rilevante anche il contributo dei PCM incapsulati, il quale ammonta al 27,20%. La miscela di Sali contribuisce per il 17,80%, la diatomite per l'1,29%, mentre il restante 8,93% è legato all'energia spesa nella fase di incapsulamento.

Una situazione del tutto simile è descritta nel grafico inerente al contributo al processo (o al punteggio totale), riportato in Figura 6. A questo proposito, la fibra di acciaio (materiale e relative lavorazioni) contribuisce per il 37% del punteggio totale, mentre il cemento contribuisce per il 30%. I sali di potassio e di sodio contribuiscono rispettivamente per l'11,17% e per 6,46%, mentre gli inerti contribuiscono complessivamente per poco più del 4%. L'energia totale di processo da un contributo del 9,34%.

In Tabella 2 sono riportati i flussi di maggiore rilievo in termini di impatti generati. Si nota come le emissioni potenziali di fondo legate alla produzione delle materie prime inerenti ai vari componenti siano abbastanza importanti. Si tratta di emissioni in aria ed in acqua.

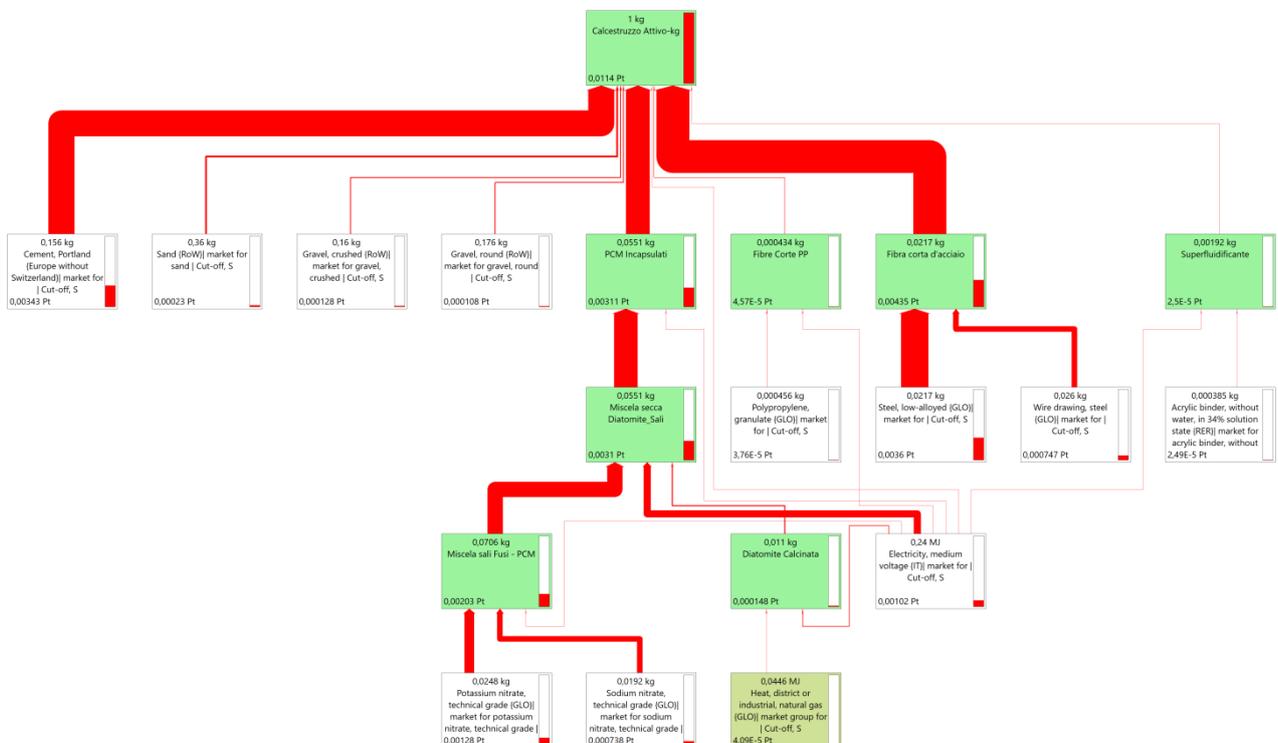


Figura 5: Schema ad albero del modello LCA visualizzato con i punteggi normalizzati e pesati con un criterio di cut-off dello 0,3%.

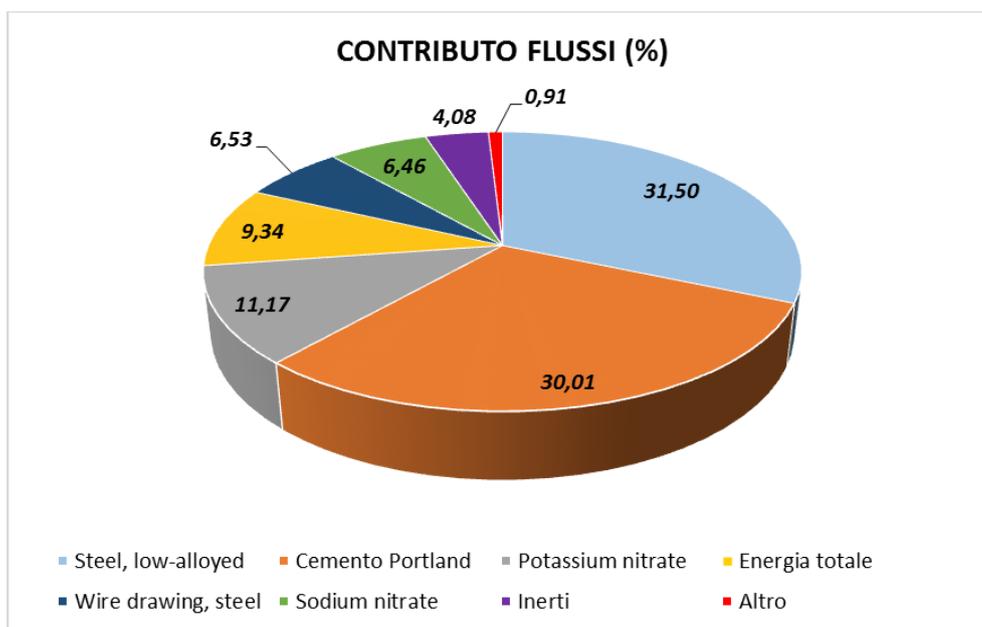


Figura 6 : Contributo al processo dei flussi singoli.

Tabella 2: Inventario dei flussi di maggiore rilievo per l'impatto ambientale.

Flusso	Unità	Valore
MATERIE PRIME		
Acqua, uso turbine	lt	697,97
EMISSIONI IN ARIA		
Anidride carbonica, fossile	g	241,61
Particolato fine < 2.5 µm	mg	154,27
Anidride solforosa	mg	419,94
Ossidi di azoto	mg	549,37
Metano, fossile	mg	363,26
EMISSIONI IN ACQUA		
Chromium VI	mg	4,91
Zinc	mg	15,45
Arsenic	mg	0,42
Water	lt	703,78

In Tabella 3 sono stati riportati i contributi inerenti ad ogni ingrediente (dato aggregato) alle varie categorie di impatto (con annessi indicatori). Il quadro in questione è stato rappresentato anche graficamente in Appendice B. Si nota come il cemento utilizzato determini il maggior contributo per le categorie legate al riscaldamento globale (effetto serra), alla formazione di Ozono negli strati più bassi dell'atmosfera. Importante è anche per aspetti legati alle Radiazioni Ionizzanti e all'acidificazione dei terreni.

Per quanto riguarda i PCM incapsulati, il loro contributo di maggior rilievo si ha agli impatti legati all'occupazione di suolo, al consumo di risorse minerarie e fossili, oltre che alla formazione di ozono. I contributi sono importanti anche per quanto riguarda le radiazioni ionizzanti e l'acidificazione.

Per quanto riguarda le fibre di acciaio, la loro presenza contribuisce in modo notevole alle categorie di impatto legate all'eutrofizzazione delle acque dolci e marine, a fenomeni di tossicità per l'ecosistema marino e terrestre, ma soprattutto alla tossicità per gli esseri umani.

Per quanto riguarda la valutazione del danno, in Tabella 4 (grafico riportato sempre in appendice B), si nota come il cemento sia responsabile di una frazione importante degli effetti sulla salute umana, ma

soprattutto sulla qualità dell’ecosistema. In termini di consumo di risorse sono i PCM incapsulati gli ingredienti che hanno maggiore rilevanza, mentre sulla salute umana sono le fibre di acciaio. Gli inerti sono responsabili di un contenuto molto modesto a tutti gli effetti sull’ambiente (sempre inferiore al 6% del totale).

Tabella 3: Indicatori di categoria di impatto divisi in percentuale con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).

Categoria di impatto	Inerti (%)	Cemento (%)	PCM Incapsulati (%)	Fibra di acciaio (%)	Altro (%)
Global warming, Hum. H.	3,32	53,08	25,81	16,96	0,83
Global warming, Terr. Eco	3,32	53,08	25,81	16,96	0,83
Global warming, Fr-Wa Eco	3,32	53,09	25,80	16,96	0,83
Stratosph. ozone depl.	6,37	18,28	54,39	20,11	0,85
Ionizing radiation	4,84	40,45	36,97	16,69	1,04
Ozone formation, Hum. H.	9,74	39,78	29,56	20,23	0,69
Fine partic. matter form.	5,56	21,63	41,73	30,41	0,66
Ozone formation, Terr. Eco	9,70	39,33	29,37	20,89	0,72
Terrestrial acidification	6,40	31,73	38,22	22,75	0,90
Freshwater eutrophication	3,89	22,94	24,74	47,68	0,75
Marine eutrophication	3,26	18,49	21,08	56,43	0,74
Terrestrial ecotoxicity	10,16	20,31	14,81	53,96	0,76
Marine ecotoxicity	3,51	12,21	11,12	72,45	0,72
Hum. carcinog. toxicity	1,20	3,41	3,85	91,36	0,18
Hum. non-carcinog. toxicity	4,73	16,64	17,38	60,40	0,85
Land use	6,81	3,72	84,99	4,37	0,12
Mineral resource scarcity	0,46	6,17	76,57	16,76	0,05
Fossil resource scarcity	7,24	27,50	46,07	15,75	3,43
Water consumpt., Hum. H.	34,78	11,02	28,77	20,59	4,84
Water consumpt., Terr. Eco	38,21	11,64	18,18	26,77	5,20
Water consumpt., Aq. Eco	25,89	8,42	19,87	42,32	3,50

Tabella 4: Parametri legati al danno ambientale divisi in percentuale - metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).

Categoria di danno	Inerti (%)	Cemento (%)	PCM Incapsulati (%)	Fibra in acciaio (%)	Altro (%)
Salute Umana	3,98	29,52	26,22	39,61	0,63
Ecosistema	4,42	38,53	37,81	17,46	0,74
Risorse	5,98	23,53	51,75	15,94	2,73

Facendo riferimento al grafico di Figura 7, si nota come gli impatti di maggiore importanza, ossia quelli che danno un contributo molto importante al computo totale di questo materiale, sono legate al riscaldamento globale (38,88%), alla formazione di particolato fine (31,56%) e alla tossicità umana (25,29%). Gli altri tipi di impatti offrono un contributo estremamente basso alla performance ambientale del calcestruzzo attivo.

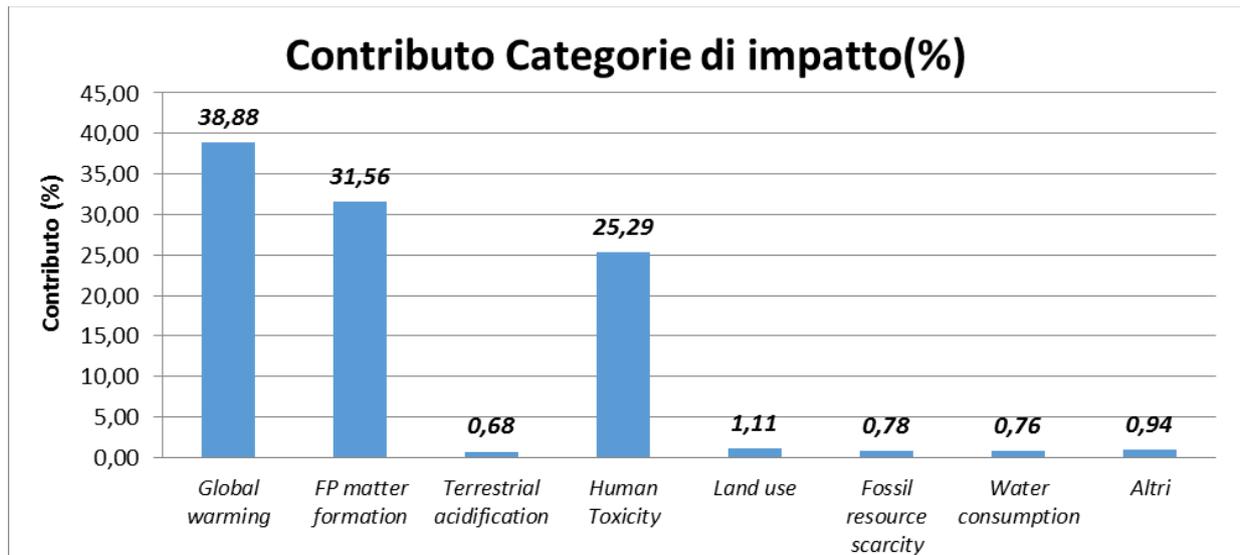


Figura 7: Categorie di impatto più rilevanti, coinvolte nella produzione del calcestruzzo attivo.

In termini di danni ambientali (Figura 8), si nota come la produzione del materiale in oggetto non abbia quasi alcuna rilevanza in termini di consumo di risorse e molto poca in termini di perdita della biodiversità (Qualità dell'ecosistema). Al contrario, la maggior parte del danno (quasi il 93% dell'impatto totale), è ascrivibile alla salute umana.

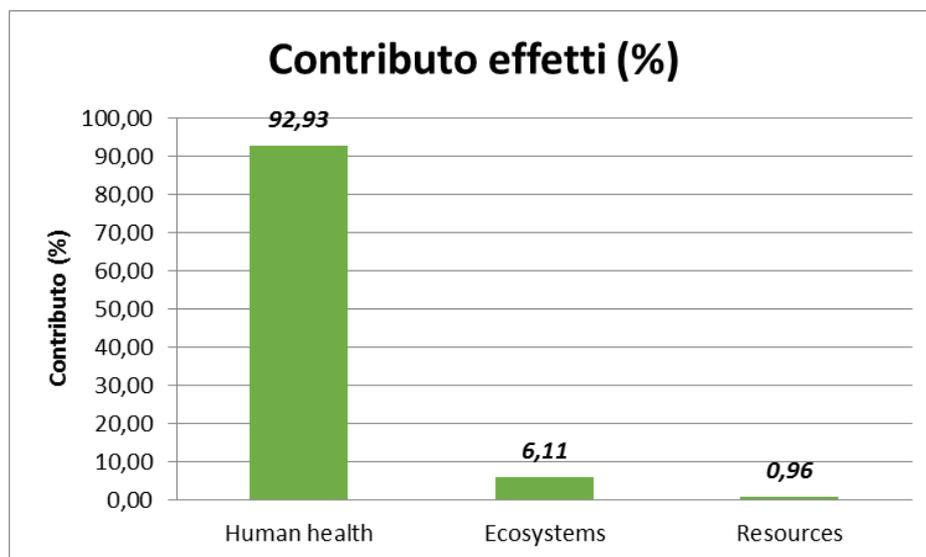


Figura 8: Danni ambientali di maggiore rilievo nella produzione del calcestruzzo attivo.

Come si vede, in Tabella 5 sono quantificati i danni ambientali descritti, ossia quelli sulla salute umana, sulla qualità dell'ecosistema e sul consumo delle risorse.

Tabella 5: Indicatori di categoria di danno valutate con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).

Categoria di danno	Unità	Valore
Salute Umana	DALY	$6,31 \cdot 10^{-7}$
Ecosistema	Species*yr	$1,25 \cdot 10^{-9}$
Risorse	USD2013	$1,54 \cdot 10^{-2}$

La prima tipologia è espressa in DALY (Disability-adjusted life year), ossia attesa di vita corretta per disabilità. Si tratta di una misura della gravità globale di una malattia, espressa come il numero di anni persi a causa della malattia stessa, per disabilità o per morte prematura. La validità di tale indicatore è

riconosciuto anche dall'OMS, che lo ha adottato a partire dal 2000. Il DALY è una misura sempre più comune nel settore della sanità pubblica e nella valutazione dell'impatto sulla salute delle malattie. Esso estende il concetto di anni di vita potenziali persi a causa di una morte prematura includendo gli anni di vita sana persi in virtù del cattivo stato di salute o di disabilità [6]. In tal modo, la mortalità e la morbilità sono combinati in un unico indicatore comune.

Statistiche giapponesi sulla speranza di vita vengono utilizzati come riferimento per la misura della morte prematura, in quanto i giapponesi sono il popolo che gode dell'aspettativa di vita più lunga [7].

L'unità di misura "Species*yr" indica il numero di specie perse in un anno all'interno di un'area di 1 m².

La scarsità delle risorse è espressa come surplus in termini di costi legati alla produzione futura di risorse su un lasso di tempo infinito (assumendo una produzione annuale costante) e considerando un 3% di tasso di sconto. L'unità di misura è appunto lo USD2013.

Sono stati quantificati anche gli indicatori di impatto legate alle categorie di maggiore importanza, i quali sono stati riassunti in Tabella 6: Indicatori di categoria di impatto valutate con il metodo ReCiPe 2016 mid-point (H/A).

Tabella 6: Indicatori di categoria di impatto valutate con il metodo ReCiPe 2016 mid-point (H/A).

Indicatore di impatto	Unità	Valore
Global Warming	kgCO ₂ _eq.	0,258
Fine particulate	kgPM<2.5_eq.	3,41*10 ⁻⁴
Human Toxicity	kg1,4-DCB_eq.	0,233

4.2 LCA e LCIA del modulo completo

Come anticipato, è stato svolto anche lo studio LCA sul modulo completo, pronto alla spedizione, quindi senza considerare alcun trasporto, allo scopo di comprendere quali siano gli aspetti più penalizzanti dello stesso dal punto di vista ambientale, relativamente alla fase di produzione.

Come si nota dall'albero di processo di Figura 9 (meglio rappresentato in Appendice C), il punteggio inerente alla costruzione del sistema di accumulo completo ammonta a 338 Pt, che rappresenta un impatto abbastanza elevato in senso assoluto, senza però far riferimento alla relativa funzione/performance o al fatto che lo stesso ha un peso estremamente elevato.

La maggior parte del contributo può essere attribuito alla costruzione della parte attiva del modulo, che appunto ammonta a circa il 73,50%. La coibentazione ha un ruolo molto importante, legata al materiale che la costituisce, che ammonta al 23,40%. La produzione del pavimento isolante ha un ruolo più marginale (2,30%).

La parte attiva del modulo comprende la parte in calcestruzzo, le strutture metalliche di rinforzo ed i tubi in acciaio inox. A questo proposito, il tubo in questione è il componente che contribuisce in misura preponderante all'impatto totale del sistema, essendo responsabile di poco meno del 35% del punteggio totale. Il calcestruzzo attivo determina una quota parte di impatto pari al 21,30%, mentre la struttura metallica di rinforzo del 17,30%. Gli aspetti energetici appaiono poco significativi, in quanto il relativo contributo è di circa il 2,28%.

In Figura 10 è rappresentato il contributo dei singoli flussi principali al punteggio ricavato dallo studio in questione. Come si può vedere, il quadro che emerge è molto simile a quello appena descritto. L'utilizzo dell'acciaio inox per la costruzione dei tubi riscaldanti è responsabile per la maggior parte dell'impatto (32,88% del punteggio totale). A questo si aggiunge il contributo dell'acciaio strutturale e della lavorazione di tutti i materiali metallici utilizzati (rispettivamente il 14,61% e 4,13%).

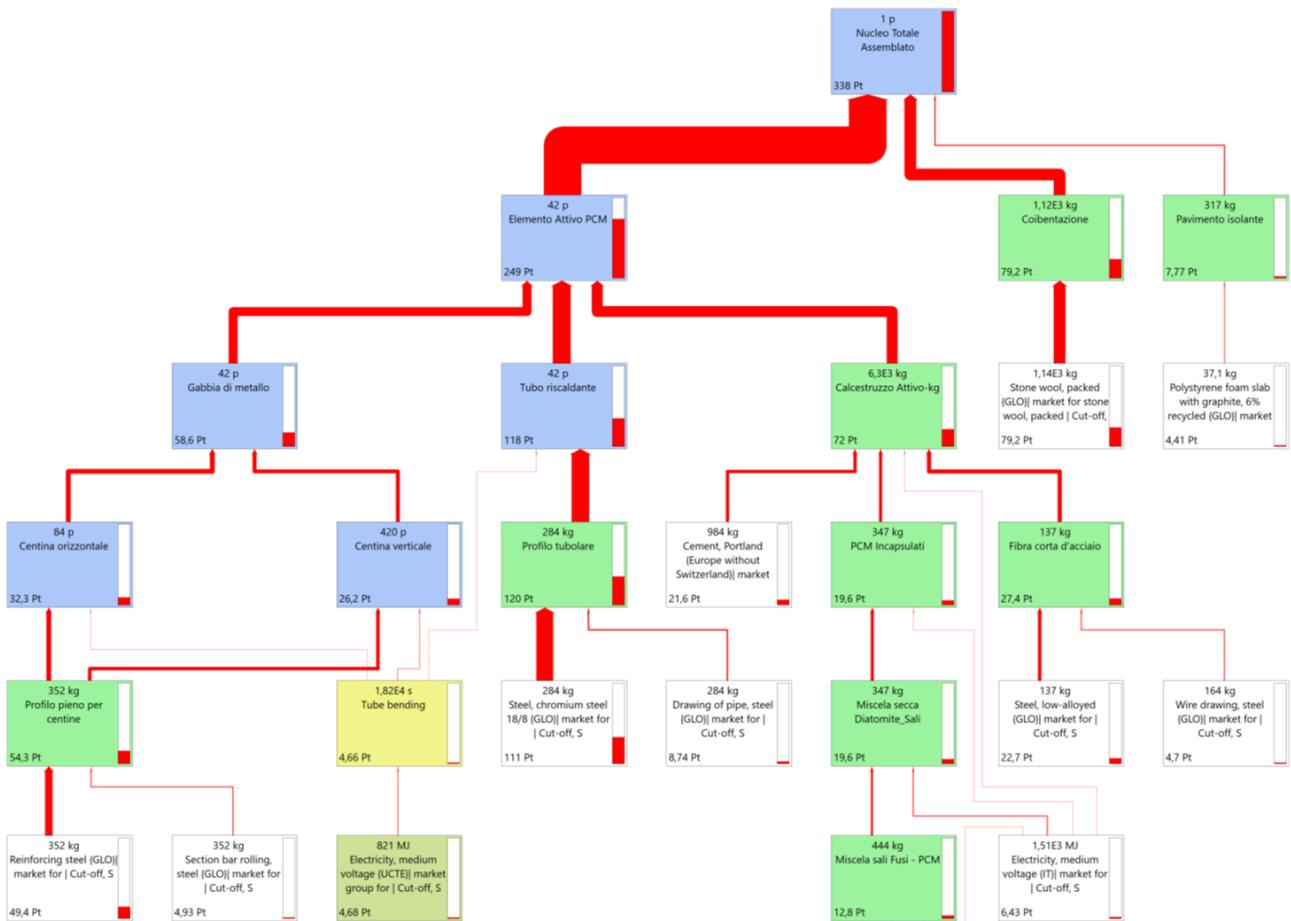


Figura 9 : Schema ad albero del modello LCA del nucleo completo, visualizzato con i punteggi normalizzati e pesati con un criterio di cut-off pari a 1%.

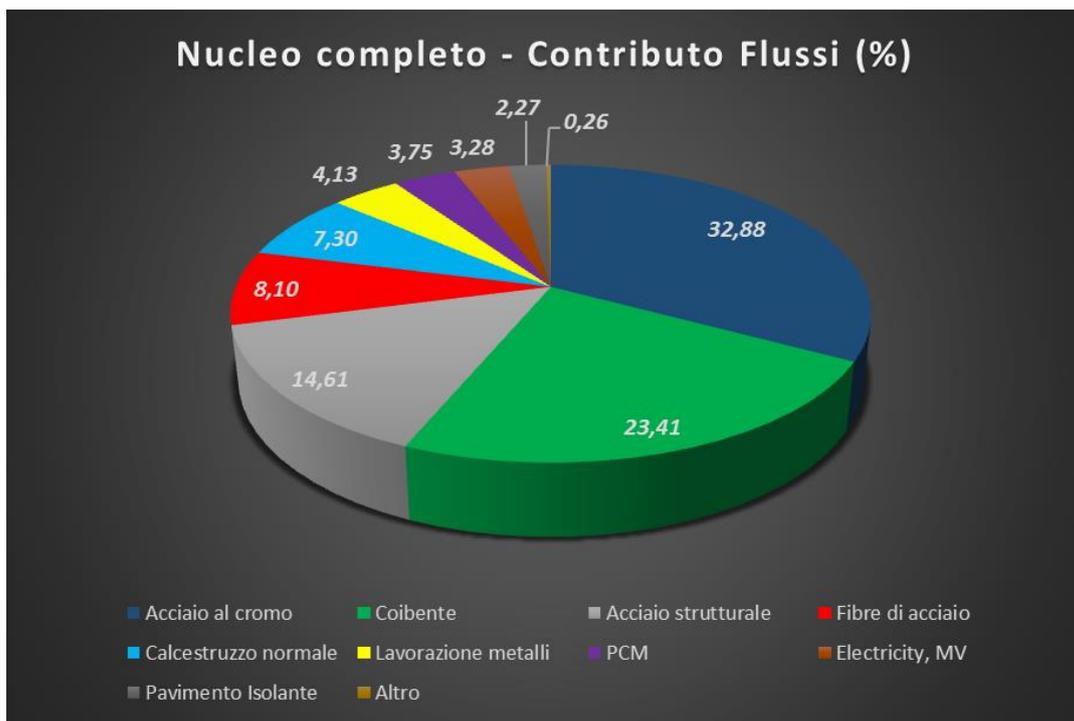


Figura 10 : Contributo al processo dei flussi singoli per il sistema di accumulo pronto alla spedizione.

Per tutti gli altri flussi si ha una situazione perfettamente in linea con quanto precedentemente descritto. In Tabella 7 sono riportati i flussi di maggiore rilievo in termini di impatti generati. Si nota come le emissioni legate alla produzione delle materie prime inerenti ai vari componenti siano molto importanti. Si tratta di emissioni in aria ed in acqua. In termini di consumo di materie prime, si nota come l'acqua per produzione energetica costituisca l'aspetto più critico (ci si riferisce sempre all'energia con cui sono state prorate le varie specie componenti i vari ingredienti e non alla mera esecuzione delle fasi di produzione del nucleo completo).

Tabella 7: Inventario dei flussi di maggiore rilievo per l'impatto ambientale del modulo completo.

Flusso	Unità	Valore
MATERIE PRIME		
Acqua, uso turbine	m ³	787,04
EMISSIONI IN ARIA		
Anidride carbonica, fossile	kg	5108,89
Particolato fine < 2.5 µm	kg	6,59
Anidride solforosa	kg	16,46
Ossidi di azoto	kg	12,95
Metano, fossile	kg	14,14
Chromium VI	kg	6,41
EMISSIONI IN ACQUA		
Zinc	g	410,18
Chromium VI	g	134,87
Arsenic	g	2,74
Water	m ³	41421,46

Come si può vedere in Tabella 8 (il relativo grafico è stato incluso nell'appendice D), la produzione dell'elemento attivo, ossia la pila da 42 singoli elementi, è responsabile della maggior parte degli impatti generati, contribuendo in quasi tutte le categorie di impatto per una quota parte che va dal 67% al 78% del totale. Vi sono situazioni estreme, come per categorie come "Terrestrial Ecotoxicity", "Hum. non-carcinog. Toxicity" e "Fossil resource scarcity" in cui tale contributo si avvicina o va ben oltre il 90%. Le uniche categorie in cui il contributo, pur essendo preponderante non supera il 60%, sono quelle legate alle conseguenze sull'ecosistema legate al consumo idrico o all'acidificazione del terreno.

Il contributo della coibentazione a tutte le categorie di impatto ambientale è significativo e si attesta tra il 18% ed il 30% del totale. Fa eccezione categorie come "Terrestrial ecotoxicity", "Hum. non-carcinog. Toxicity" e "Fossil resource scarcity", per le quali il contributo è inferiore al 9% e la categoria "Terrestrial acidification", alla quale contribuisce per oltre il 42%.

Il piping di connessione determina un contributo molto basso (inferiore a 1%) nel caso di tutte le categorie di impatto. Il pavimento isolante fornisce un contributo non trascurabile per poche categorie di impatto. L'unica per la quale si ha il superamento del 10% riguarda gli impatti sulla salute umana inerenti al consumo idrico.

In termini di valutazione del danno, in Tabella 9 è mostrato come la produzione dei 42 moduli singoli sia responsabile della maggior parte dei danni ambientali, sia relativamente al consumo di risorse che della qualità dell'ecosistema, ma soprattutto un termini di salute umana (il relativo grafico è stato inserito nell'appendice D). Anche il materiale coibente gioca un ruolo molto importante sui danni ambientali, soprattutto nel caso del peggioramento della qualità dell'ecosistema, grazie ad un contributo di poco meno del 30%. Il pavimento isolante determina quasi il 10% del contributo totale in termini di consumo delle risorse.

Dal grafico di Figura 11 si nota come la categoria di impatto di maggiore rilievo è quella legata all'emissione di particolato fine, in quanto contribuisce per oltre il 40% all'impatto ambientale totale inerente alla costruzione del modulo. Di rilevanza molto simile sono le categorie legate al riscaldamento globale e alla

salute umana, il cui contributo ammonta rispettivamente al 28,92% e al 26,94%. Tutte le altre categorie sono potenzialmente poco significative.

Tabella 8: Indicatori di categoria di impatto per il nucleo completo divisi in percentuale con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).

Categoria di impatto	Elemento attivo (%)	Piping di connessione (%)	Coibentazione (%)	Pavimento isolante (%)
Global warming, Hum. H.	68,00	0,57	27,13	4,29
Global warming, Terr. Eco	68,00	0,57	27,14	4,29
Global warming, Fr-Wa Eco	68,00	0,57	27,13	4,29
Stratosph. ozone depl.	74,57	0,73	22,32	2,38
Ionizing radiation	78,07	1,10	18,24	2,59
Ozone formation, Hum. H.	68,02	0,62	27,56	3,80
Fine partic. matter form.	67,98	0,87	29,47	1,68
Ozone formation, Terr. Eco	67,05	0,61	28,50	3,84
Terrestrial acidification	54,83	0,59	42,07	2,51
Freshwater eutrophication	72,65	0,76	25,52	1,06
Marine eutrophication	72,56	0,73	25,34	1,37
Terrestrial ecotoxicity	88,72	1,62	8,56	1,10
Marine ecotoxicity	73,74	0,71	24,12	1,42
Hum. carcinog. toxicity	74,50	0,76	23,32	1,43
Hum. non-carcinog. toxicity	94,16	1,03	4,30	0,51
Land use	73,18	0,79	24,42	1,61
Mineral resource scarcity	70,22	0,34	28,15	1,29
Fossil resource scarcity	93,05	1,12	4,03	1,81
Water consumpt., Hum. H.	57,91	0,49	30,30	11,30
Water consumpt., Terr. Eco	71,10	0,47	22,16	6,27
Water consumpt., Aq. Eco	70,63	0,49	22,61	6,26

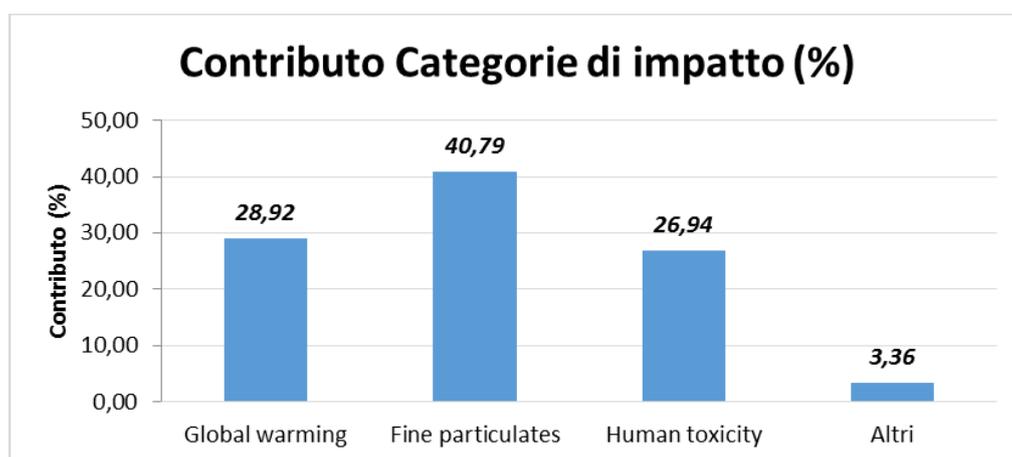


Figura 11 : Categorie di impatto più rilevanti, coinvolte nella produzione del nucleo completo.

Tabella 9: Parametri legati al danno ambientale per il nucleo completo, divisi in percentuale con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).

Categoria di danno	Elemento attivo (%)	Piping di connessione (%)	Coibentazione (%)	Pavimento isolante (%)
Salute Umana	73,92	0,81	23,09	2,18
Ecosistema	66,67	0,59	29,31	3,43
Risorse	63,69	0,59	25,98	9,74

In termini di danni ambientali, quello di maggiore rilievo riguarda la salute umana, perché rappresenta circa il 93% dell’impatto totale. Molto meno rilevante è la degradazione dell’ecosistema (5,53% dell’impatto totale), e quasi trascurabili sono gli effetti in termini di consumo delle risorse (Figura 12).

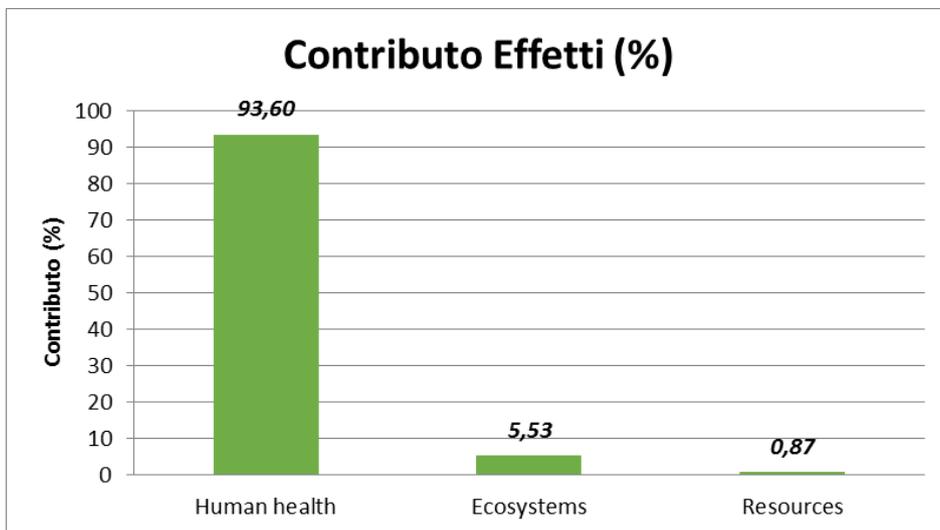


Figura 12 : Danni ambientali di maggiore rilievo nella produzione del modulo attivo completo.

I risultati della quantificazione dei danni sono stati riassunti in Tabella 10, ossia quelli legati alla salute umana, la qualità dell’ecosistema ed il consumo delle risorse.

Sono stati quantificati anche gli indicatori di impatto legate alle categorie di maggiore importanza, i quali sono stati riassunti in Tabella 11.

Tabella 10: Indicatori di categoria di danno valutate con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il modulo complessivo.

Categoria di danno	Unità	Valore
Salute Umana	DALY	1,90*10 ⁻²
Ecosistema	Species*yr	2,84*10 ⁻⁵
Risorse	USD2013	380,00

Tabella 11: Indicatori di categoria di impatto valutate con il metodo ReCiPe 2016 mid-point (H/A) per il modulo completo.

Indicatore di impatto	Unità	Valore
Global Warming	kgCO ₂ _eq.	5690,00
Fine particulate	kgPM<2.5_eq.	13,00
Human Toxicity	kg1,4-DCB_eq.	7350,00

I risultati ottenuti potrebbero far apparire la produzione di questo tipo di sistema altamente critica dal punto di vista ambientale, soprattutto perché l’analisi è stata fatta prescindendo dal relativo utilizzo. Nella realtà, la funzione del modulo è quella di consentire un recupero energetico per effetto dell’assorbimento di calore da sistemi di produzione (anche energetica), che operano a temperature elevate. Il calore perduto in questi sistemi è assorbito dai sistemi di accumulo oggetto dello studio, i quali successivamente possono renderla disponibile per la produzione di calore ed elettricità (anche se in questo ultimo caso il rendimento risulta abbastanza basso).

Lo studio dell’impatto ambientale ha molto più senso se si considera, quindi, la performance dei moduli di accumulo, come è stato fatto nelle sezioni successive. Lo scopo del presente paragrafo è stato quello di mettere in luce solo gli aspetti ambientali legati ai vari componenti del nucleo o quelli legati alle varie fasi di produzione, per consentire al relativo ideatore di verificare la possibilità di apportare migliorie, in termini di materiali e processi, più favorevoli dal punto di vista della performance ambientale.

4.3 LCA e LCIA legato all'utilizzo del modulo completo

In questa sezione sono descritti i risultati ottenuti considerando l'utilizzo del modulo completo come strumento di produzione energetica, quindi come alternativa alla rete nazionale per quanto concerne l'energia elettrica o come alternativa a quella ottenuta da gas naturale prodotto in un distretto industriale per quanto riguarda la controparte termica.

Questo comporta il trasporto del nucleo presso il distretto industriale di utilizzo ed il percorso interno necessario ad acquisire energia da un determinato sito per poi sfruttarla in un luogo o a beneficio di impianto limitrofo.

La prima situazione che è stata studiata riguarda la distanza massima percorsa dal nucleo all'interno del dato distretto industriale, entro la quale il relativo utilizzo come fonte energetica resti conveniente. Per fare ciò è stato monitorato l'andamento del punteggio singolo dell'analisi LCA, svolta con lo strumento ReCiPe2016(H/A), inerente alla produzione di 1 kWh di energia termica o elettrica in funzione della distanza interna.

Il modello è stato costruito considerando solo il trasporto interno del nucleo, mentre la relativa costruzione è stata trascurata. L'energia termica o quella elettrica, o meglio il singolo kWh a queste associato, sono state trattate come prodotti (vergini) evitati.

Il nucleo risulta molto pesante, quindi il relativo trasporto è estremamente oneroso anche dal punto di vista ambientale. È stato ipotizzato che tale trasporto (ciò vale anche per tutti gli altri modelli che sono stati costruiti e che saranno illustrati nelle sezioni successive) sia eseguito con un mezzo Euro 4 con capacità di trasporto compreso tra 16 e 32 Ton. Il nucleo completo pesa circa 19 tonnellate, se viene incluso nel computo anche il contributo del pavimento e del coibente.

Si ricorda che la resa di energia termica è molto superiore a quella di energia elettrica, ma che la produzione di energia termica (da gas naturale) ha un impatto ambientale inferiore a quella della controparte elettrica. Da ciò, la sostituzione di energia elettrica di rete con quella prodotta mediante qualsiasi altro mezzo di recupero energetico comporta un benefit ambientale superiore al caso della sostituzione della controparte termica. I due aspetti considerati si bilanciano parzialmente tra loro, quindi le differenze tra i risultati ottenuti utilizzando il modulo come mezzo di recupero di energia termica o come mezzo di recupero di energia elettrica non sono troppo differenti.

Come si vede dal diagramma di Figura 13, per ottenere un benefit ambientale dalla suddetta sostituzione, sarebbe necessario evitare un percorso interno del modulo superiore ai 6,5 km. Includendo però nel modello anche la costruzione del modulo ed il trasporto presso il sito di utilizzo, malgrado siano processi eseguiti una tantum, la soglia di tolleranza si abbassa. Da ciò si può affermare che un percorso entro i 5,50 km rappresenti ancora un buon margine di sicurezza. Naturalmente, minore è il tragitto interno e maggiori sono i benefit ambientali ottenuti, quindi sarà minore anche il pay-back time ambientale del modulo.

Come si vede nel diagramma di Figura 14, il punteggio LCA per la produzione di 1 kWh di energia termica o elettrica diminuisce all'aumentare del tempo di permanenza del modulo presso il distretto, ipotizzando condizioni ottimali di funzionamento nell'erogazione dell'energia. Ad un certo punto il punteggio diventa negativo, ossia attraverso l'utilizzo del modulo per le funzioni descritte, l'utilizzatore va in una sorta di credito ambientale, rispetto all'acquisizione della stessa quota parte di energia erogata da fonti esterne.

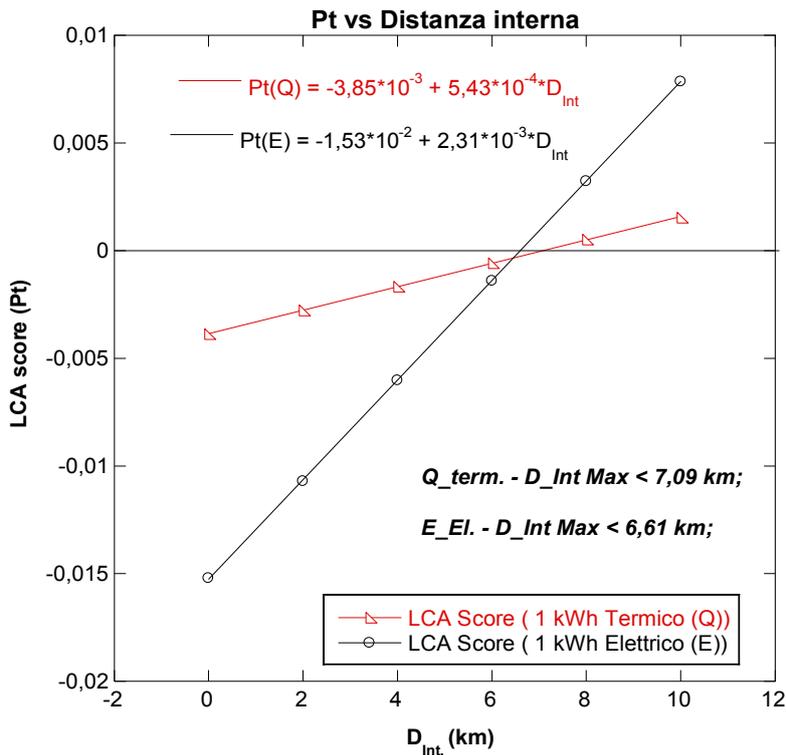


Figura 13 : Andamento del punteggio LCA in funzione della distanza percorsa internamente dal modulo.

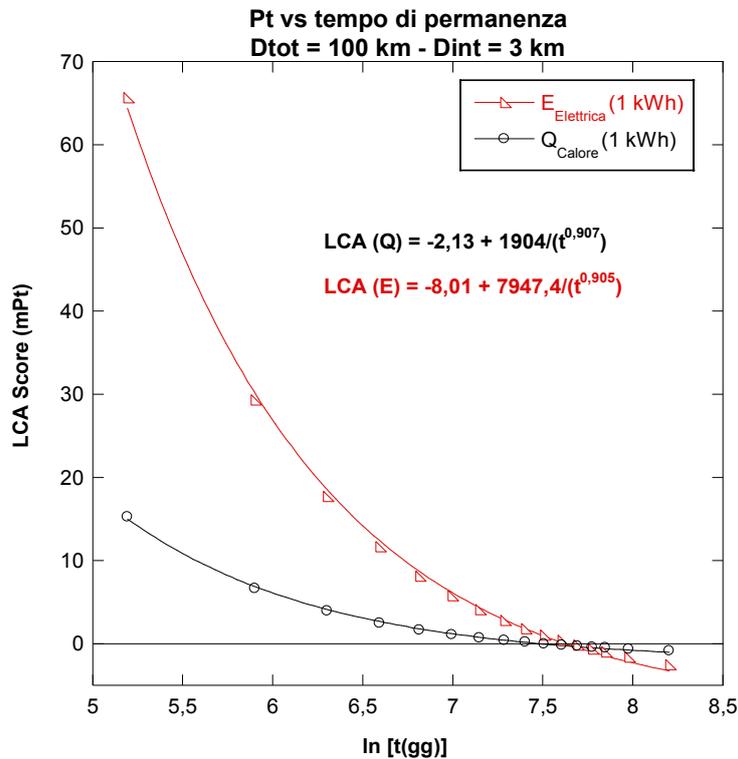


Figura 14 : Andamento del punteggio LCA in funzione del tempo di permanenza per un caso studio legato al modulo trasportato presso un distretto ed operante nella maniera descritta.

Tale momento è definito in questo studio come pay-back time ambientale, il quale diminuisce all'aumentare sia dell'entità del trasporto del modulo presso l'utilizzatore finale che all'aumentare del percorso che il modulo stesso deve fare internamente al distretto di utilizzo. L'andamento del Pay-Back time al variare dei due parametri, ossia distanza tra produttore ed utilizzatore (D_{tot}) ed il percorso interno

(D_{int}) è stato diagrammato sia nel caso dell'utilizzo del sistema come fonte di calore (Figura 15) che come fonte di energia elettrica (Figura 16).

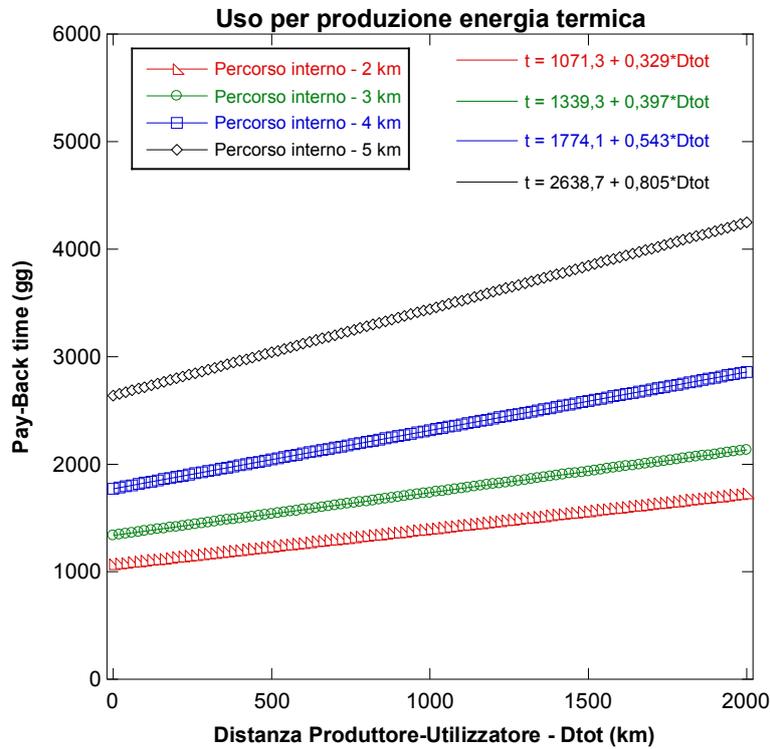


Figura 15 : Andamento del pay-back time in funzione della distanza produttore-utilizzatore per varie entità del trasporto interno – Caso inerente all'erogazione di energia termica.

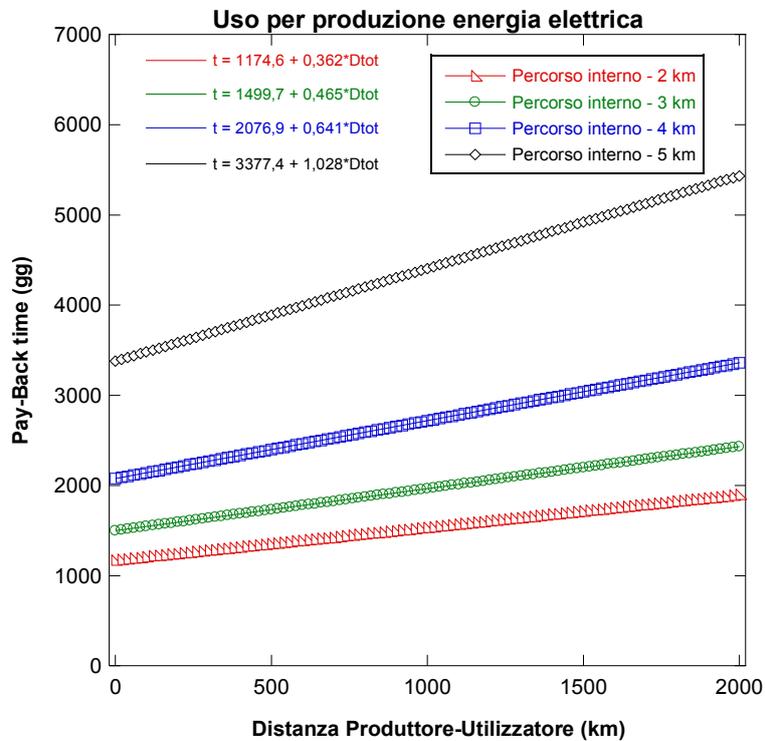


Figura 16 : Andamento del pay-back time in funzione della distanza produttore-utilizzatore per varie entità del trasporto interno – Caso inerente all'erogazione di energia elettrica.

Si nota in entrambi i casi che l'andamento del tempo in questione in funzione della distanza dal produttore all'utilizzatore aumenta in modo lineare, ossia con una proporzionalità diretta, per tutti i valori del trasporto interno considerato.

Tale andamento può essere descritto da una semplice funzione lineare, in cui intercetta e coefficiente angolare sono funzioni dell'entità del trasporto interno stesso, in base a quanto riportato **Equazione 13**.

$$t_{Pay-Back} = A(D_{Int}) + B(D_{Int}) * D_{tot} \quad \text{Equazione 13}$$

Naturalmente i coefficienti A e B sono differenti tra il caso del recupero di energia elettrica e quello dell'energia termica.

E' stato anche studiato l'andamento di questi due parametri al variare della distanza percorsa internamente per entrambe le tipologie di energia considerate (sempre riferite alla produzione di 1 kWh). Come si vede dai grafici di Figura 17 e Figura 18, in entrambi i casi i parametri A e B variano con legge esponenziale al variare dell'entità del percorso interno al distretto industriale, descritto da **Equazione 14** e **Equazione 15**.

$$A(D_{Int}) = k_{A1} + k_{A2} * \exp(k_{A3} * D_{Int}) \quad \text{Equazione 14}$$

$$B(D_{Int}) = k_{B1} + k_{B2} * \exp(k_{B3} * D_{Int}) \quad \text{Equazione 15}$$

dove i valori delle costanti k_{Ai} e k_{Bi} ($i = 1, 2, 3$) sono state riportate in Tabella 12 sia nel caso dell'energia elettrica che termica.

Tabella 12: Valori dei coefficienti k delle equazioni (14) e (15).

Coefficienti di A	Energia Termica	Energia Elettrica
k_{A1}	777,92	803,73
k_{A2}	96,79	95,12
k_{A3}	0,59	0,66
k_{B1}	0,245	0,276
k_{B2}	$2,28 * 10^{-2}$	$2,15 * 10^{-2}$
k_{B3}	0,64	0,71

Combinando le tre equazioni si ottiene l'andamento del pay-back time in funzione sia della distanza interna che di quella totale, per il recupero di energia termica ed elettrica legate al modulo attivo in questione (**Equazione 16**).

$$t_{Pab}(t; D_{Int}; D_{tot}) = k_{A1} + k_{A2} * \exp(k_{A3} * D_{Int}) + [k_{B1} + k_{B2} * \exp(k_{B3} * D_{Int})] * D_{tot} \quad \text{Equazione 16}$$

E' molto difficile stabilire se il trasporto interno possa essere eliminato, perché questo può richiedere la necessità di produrre delle infrastrutture di erogazione e trasporto dell'energia accumulata dal modulo. Naturalmente tutto ciò, oltre ad influenzare potenzialmente l'efficienza del modulo, comporta anche un'interazione ambientale legata alla relativa fase di costruzione. Probabilmente, a parità di efficienza, il contributo di queste ultime all'impatto ambientale del modulo è inferiore al caso del trasporto giornaliero. Per quanto riguarda il trasporto dal produttore all'utilizzatore, questo potrebbe essere evitato costruendo il materiale in situ. Questo significa includere almeno il trasporto del materiale attivo (tutti gli ingredienti relativi al calcestruzzo) e magari ottenere una riduzione nell'entità del trasporto di tutti gli altri componenti. Da ciò, si ritiene che il contributo del trasporto totale possa essere solo mitigato e non completamente eliminato.

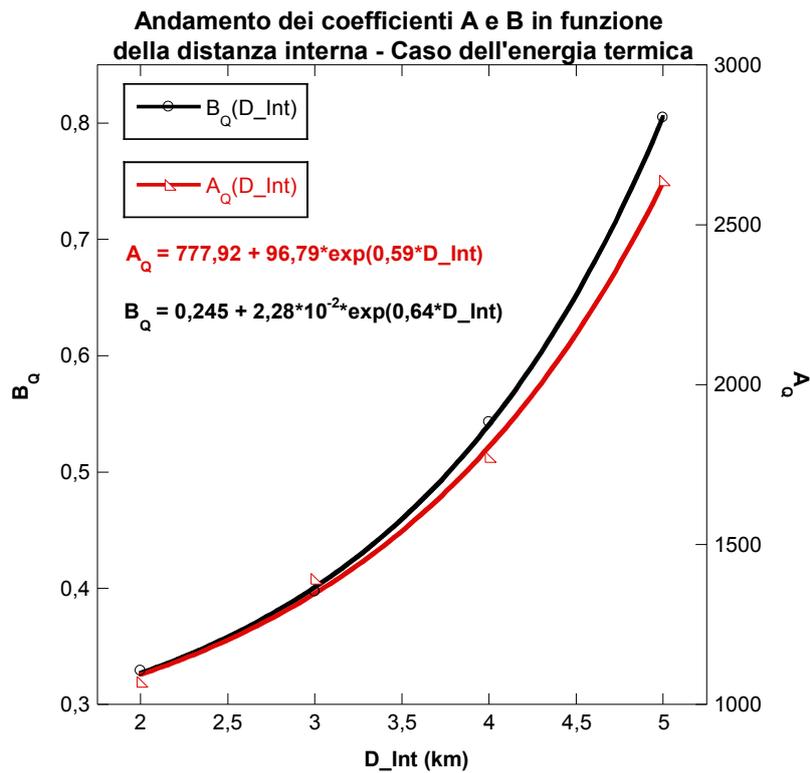


Figura 17 : Andamento dei coefficienti A_Q e B_Q in funzione del trasporto interno – Caso inerente all'erogazione di energia termica.

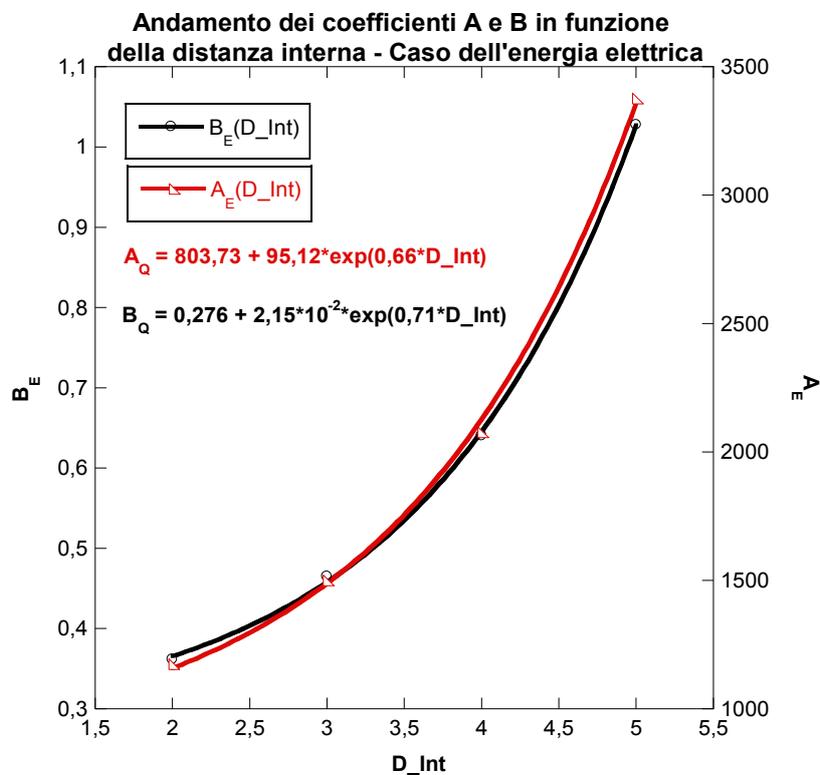


Figura 18: Andamento dei coefficienti A_E e B_E in funzione del trasporto interno – Caso inerente all'erogazione di energia elettrica.

Anche per le categorie di impatto e per i danni ambientale è stata sviluppata una modellazione, che mette in relazione il valore di ognuno dei relativi indicatori/parametri con il tempo di utilizzo del modulo, al variare delle distanze suddette. Questo è stato fatto sia per l'utilizzo de modulo completo come sorgente di calore recuperato che di energia elettrica e, similmente alla situazione precedente, come unità funzionale è stato preso il singolo kWh erogato (sempre come calore o energia elettrica).

Anche nel caso dell'utilizzo del modulo è stato visto che le categorie di impatto di maggiore rilievo, similmente a quanto ricavato per il modulo completo e pronto al trasporto presso il dato distretto industriale (Figura 11), sono Global Warming Potential (GWP), Fine Particulate Matter Formation (FP) e Human Toxicity (HT).

A questo proposito, è stato valutato il valore degli indicatori di impatto suddetti al variare del logaritmo naturale nel tempo di permanenza, come rappresentato in Figura 19, Figura 20 e Figura 21 rispettivamente per quello inerente al riscaldamento globale, la formazione di particolato fine e la tossicità umana e nel caso dell'utilizzo del modulo come sorgente di energia elettrica.

La stessa cosa è stata fatta anche nel caso dell'utilizzo del modulo come sorgente di energia termica, come rappresentato nelle Figura 22, Figura 23, Figura 24.

Come si può notare dai grafici indicati, l'equazione che determina l'andamento con il tempo di utilizzo del modulo del valore dei vari indicatori di impatto, al variare delle distanze percorse è data dalla seguente relazione (**Equazione 17**):

$$I = A(D_{INT}) + \frac{B(D_{TOT})}{t} \quad \text{Equazione 17}$$

dove t è il tempo di utilizzo, D_{INT} (km) è, come più volte indicato, la distanza percorsa dal modulo all'interno del distretto industriale di competenza e D_{TOT} (km) è la distanza dal produttore al distretto industriale stesso. Il termine "I" può indicare il GWP (Potenziale di riscaldamento globale), il FP (Formazione di particolato fine) o il HT (o la tossicità nell'essere umano). I termini A e B dipendono rispettivamente dalla distanza interna percorsa e da quella totale.

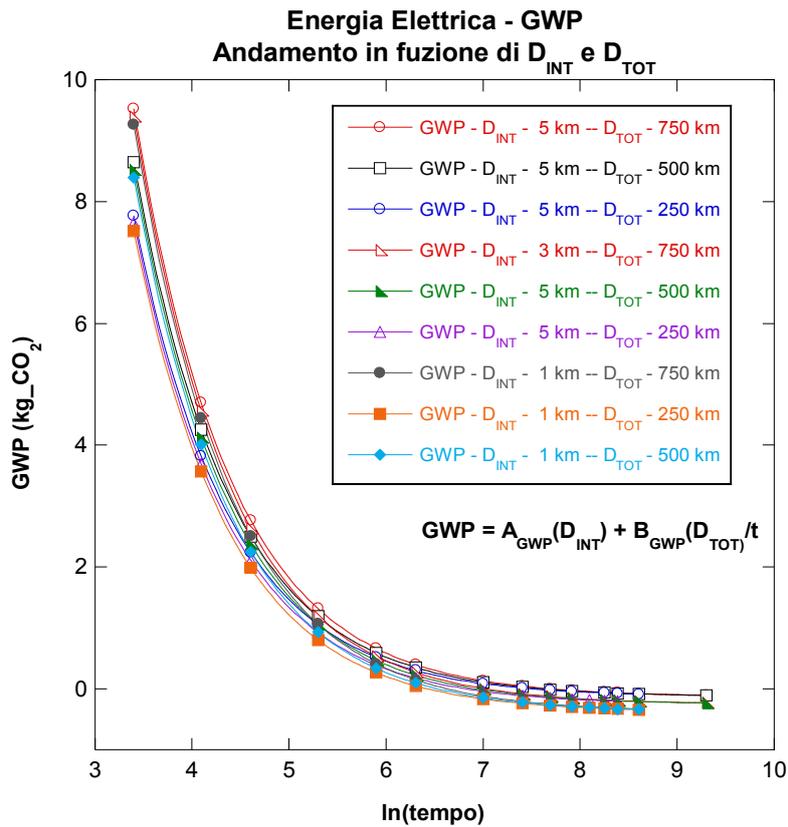


Figura 19: Andamento del GWP inerente alla produzione di energia elettrica al variare della distanza di fornitura (D_{TOT}) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (D_{INT}).

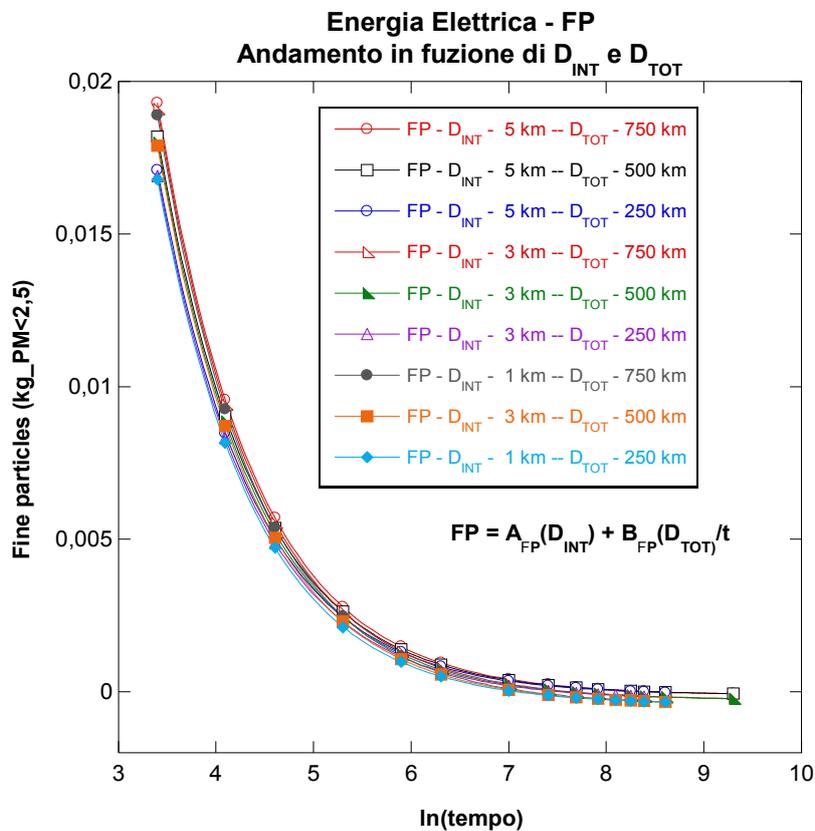


Figura 20: Andamento del FP inerente alla produzione di energia elettrica al variare della distanza di fornitura (D_{TOT}) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (D_{INT}).

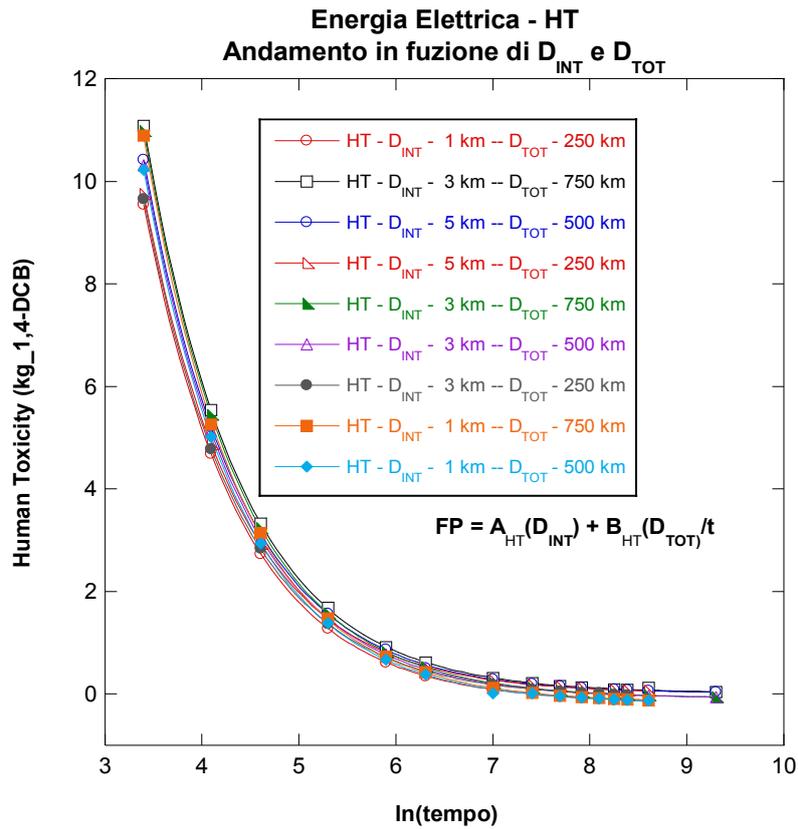


Figura 21: Andamento del HT inerente alla produzione di energia elettrica al variare della distanza di fornitura (D_{TOT}) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (D_{INT}).

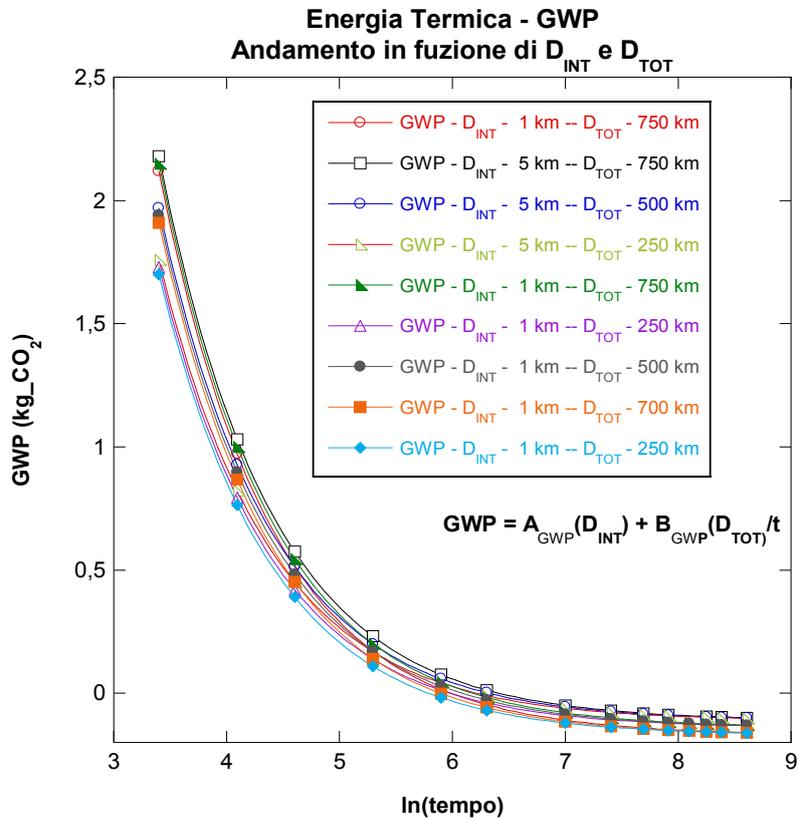


Figura 22: Andamento del GWP inerente alla produzione di energia termica al variare della distanza di fornitura (D_{TOT}) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (D_{INT}).

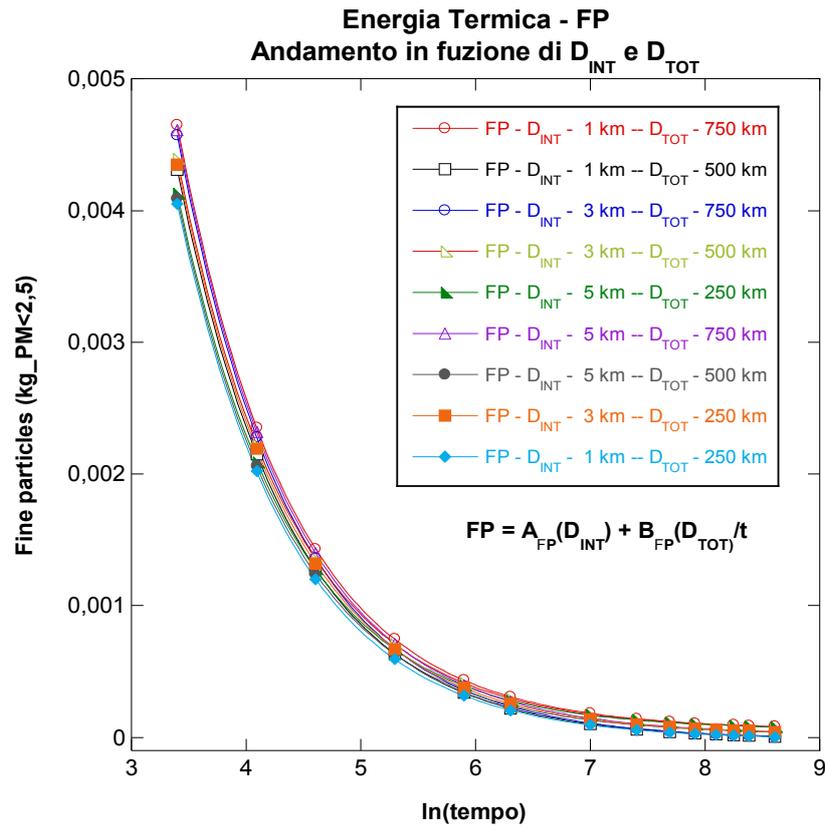


Figura 23: Andamento del FP inerente alla produzione di energia termica al variare della distanza di fornitura (DTOT) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (DINT).

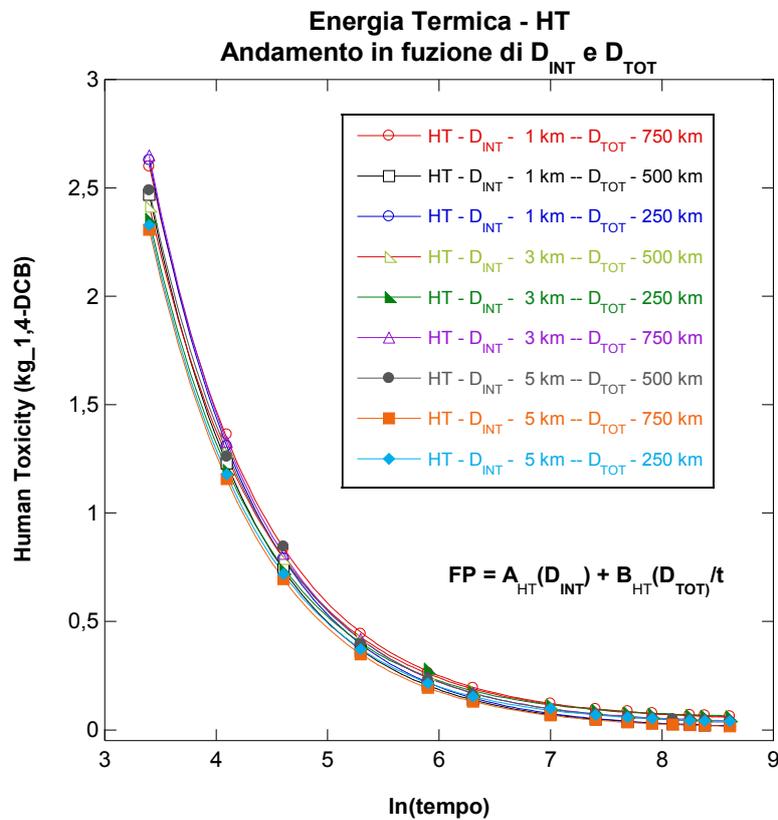


Figura 24: Andamento del HT inerente alla produzione di energia termica al variare della distanza di fornitura (DTOT) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (DINT).

La variazione, come rappresentato nelle Figura 25 e Figura 26 rispettivamente per i parametri A e B, è pressoché lineare, secondo quanto riportato nelle seguenti relazioni (Equazione 18 e Equazione 19).

$$A(D_{INT}) = A + B * D_{INT} \quad \text{Equazione 18}$$

$$B(D_{TOT}) = C + F * D_{TOT} \quad \text{Equazione 19}$$

dove i valori dei vari coefficienti A, B, C e F sono riportati in Tabella 13 per i vari indicatori. Oltre a ciò, sostituendo i valori trovati nell'equazione (16), si può riscrivere la legge di variazione degli indicatori stessi nel tempo e al variare del percorso coperto (Equazione 20).

$$I(t; D_{INT}, D_{TOT}) = A + B * D_{INT} + \frac{C+F*D_{TOT}}{t} \quad \text{Equazione 20}$$

Tabella 13: Valori dei coefficienti A, B, C E F delle equazioni (18) e (19) per i vari indicatori di impatto.

Indicatore di impatto	Coefficienti	Energia Termica	Energia Elettrica
Potenziale di riscaldamento globale - GWP	A	-0,187	-0,446
	B	0,015	0,063
	C	49,58	207,00
	F	0,026	0,116
Formazione di particolato fine - FP	A	-1,50*10 ⁻⁷	-5,09*10 ⁻⁴
	B	1,02*10 ⁻⁵	7,90*10 ⁻⁵
	C	0,114	0,488
	F	3,20*10 ⁻⁵	1,24*10 ⁻⁴
Tossicità per l'essere umano - HT	A	0,014	-0,219
	B	- 1,04*10 ⁻²	4,23*10 ⁻²
	C	63,81	271,48
	F	2,15*10 ⁻²	8,29*10 ⁻²

Si nota come nel caso della produzione di energia elettrica pari ad un singolo kWh, indicatori come il GWP e la FP arrivano ad assumere valori negativi per tempi di permanenza abbastanza lunghi, ossia si ottiene una sorta di credito ambientale. Questo vuol dire che dopo un determinato intervallo di tempo si ha potenzialmente una sorta di risparmio in emissioni che generano sia l'effetto serra (scala globale) che la produzione di polveri sottili (scala locale/regionale).

Naturalmente tutto ciò è riferito alla produzione di energia elettrica come sostitute della controparte prodotta da rete elettrica nazionale (Country Dependent). Ci implica che il quadro rappresentato ha valore entro i confini nazionali.

Nel caso in cui il modulo fosse utilizzato al di fuori dei confini Italiani, la situazione può cambiare radicalmente, in base al sistema di produzione energetica dello stato considerato.

Relativamente all'indicatore della tossicità per gli esseri umani, nel caso di trasporti iniziali a lunga distanza e tragitti intorno ai 5 km, non si riesce ad ottenere un valore negativo, quindi neanche ad ottenere alcun credito ambientale e, di conseguenza, alcun risparmio in emissioni di sostanze tossiche.

Nel caso della produzione di energia sotto forma di calore (come sostituto dell'energia ottenuta da gas naturale) il quadro appare anche peggiore, in quanto l'unico indicatore di impatto che assume valori negativi è quello inerente al riscaldamento globale.

Rispetto al caso dell'energia elettrica, quello dell'energia termica non dipende dal sistema di produzione energetica del dato paese, quindi i dati possono essere considerati più stabili rispetto all'aspetto geografico. Comunque, il quadro può cambiare se viene modificato il metodo di produzione di energia termica, rispetto al riferimento considerato.

Uno studio del tutto simile è stato fatto anche per la valutazione dei danni ambientali ed in particolare per Salute umana (Human Health – HH), Qualità dell'ecosistema (Ecosystem – ECO) e per il consumo di risorse (Resources - RES).

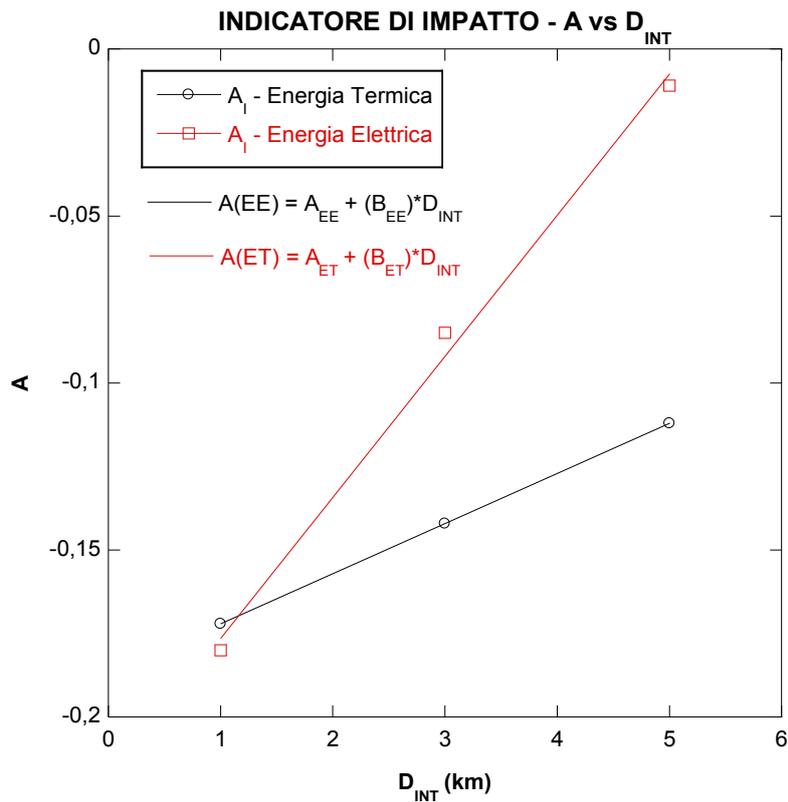


Figura 25: Andamento del coefficiente A in funzione del trasporto interno per i vari indicatori sia nel caso inerente all'erogazione di energia elettrica che termica.

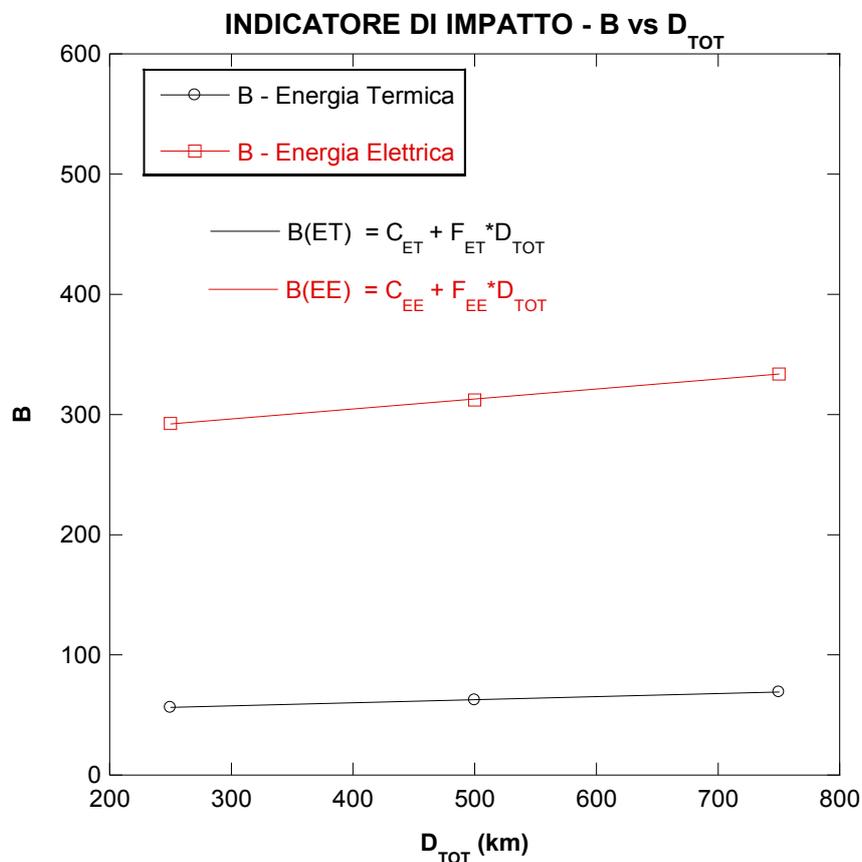


Figura 26: Andamento del coefficiente B in funzione del trasporto totale per i vari indicatori sia nel caso inerente all'erogazione di energia elettrica che termica.

Le equazioni che regolano l'andamento dei valori inerenti a suddetti effetti ambientali sono le stesse (almeno da un punto di vista formale) di quelle inerenti agli indicatori di impatto viste in precedenza.

Come si può vedere nei grafici inerenti alle Figura 27, Figura 28 e Figura 29 l'andamento dei valori del determinato danno ambientale in funzione del logaritmo naturale del tempo di utilizzo del modulo è del tutto analogo a quello degli impatti ambientali descritti precedentemente. Questo almeno per quanto riguarda la produzione di energia elettrica. La situazione è, comunque del tutto analoga anche nel caso della produzione di energia termica, come si vede nei grafici di Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

I valori di A e B per i tre effetti ambientali sono stati trovati mediante interpolazione grafica, similmente agli indicatori di impatto (Figura 33 e Figura 34).

I valori dei vari coefficienti sono stati riassunti in Tabella 14 per tutti i danni ambientali che sono stati quantificati.

Tabella 14: Valori dei coefficienti A, B, C E F delle equazioni per i vari danni ambientali.

Indicatore di impatto	Coefficienti	Energia Termica	Energia Elettrica
Human Health	A	$-8,45 \cdot 10^{-7}$	$-2,00 \cdot 10^{-7}$
	B	$1,26 \cdot 10^{-8}$	$2,94 \cdot 10^{-8}$
	C	$1,68 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$
	F	$8,30 \cdot 10^{-7}$	$4,80 \cdot 10^{-7}$
Ecosystem	A	$-5,68 \cdot 10^{-10}$	$-1,87 \cdot 10^{-11}$
	B	$7,03 \cdot 10^{-11}$	$2,85 \cdot 10^{-10}$
	C	$2,42 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$
	F	$1,26 \cdot 10^{-10}$	$4,40 \cdot 10^{-10}$
Resources	A	$-2,62 \cdot 10^{-2}$	$-2,97 \cdot 10^{-2}$
	B	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$4,85 \cdot 10^{-3}$
	C	3,45	13,98
	F	$3,46 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$

Per quanto riguarda l'erogazione di energia elettrica, similmente a quanto visto nel caso degli indicatori di impatto, dopo un determinato periodo di tempo molti indicatori assumono un valore negativo, ossia, rispetto all'utilizzo di elettricità di rete, si ha un credito o un risparmio in termini di danni ambientali. Nel caso in esame ciò accade per la salute umana e per la qualità dell'ecosistema: aumentando il tempo di utilizzo del modulo, il ricorso all'energia elettrica da questo erogata al posto di quella di rete (vergine), determina la salvaguardia della qualità della vita delle persone e della biodiversità. Si evita la perdita di anni di vita per le persone stesse a la perdita di specie animali e vegetali.

Nel caso di trasporti iniziali più lunghi e percorsi interni di 5 km non si ha più la possibilità di avere crediti in termini di consumo (quindi il risparmio) di risorse.

Il quadro rappresentato (potenziale), similmente a quanto detto per gli indicatori di impatto, ma anche in riferimento all'impatto totale, è "Country Dependent", in quanto dipende dal sistema elettrico dello stato cui si fa riferimento. La trattazione precedente è sicuramente valida entro i confini nazionali.

Per quanto riguarda la produzione di energia termica, al contrario, si riesce ad andare in credito anche nel caso del consumo delle risorse. Ciò vale se si usa come riferimento l'energia termica prodotta dal gas naturale, sia in termini quantitativi che qualitativi.

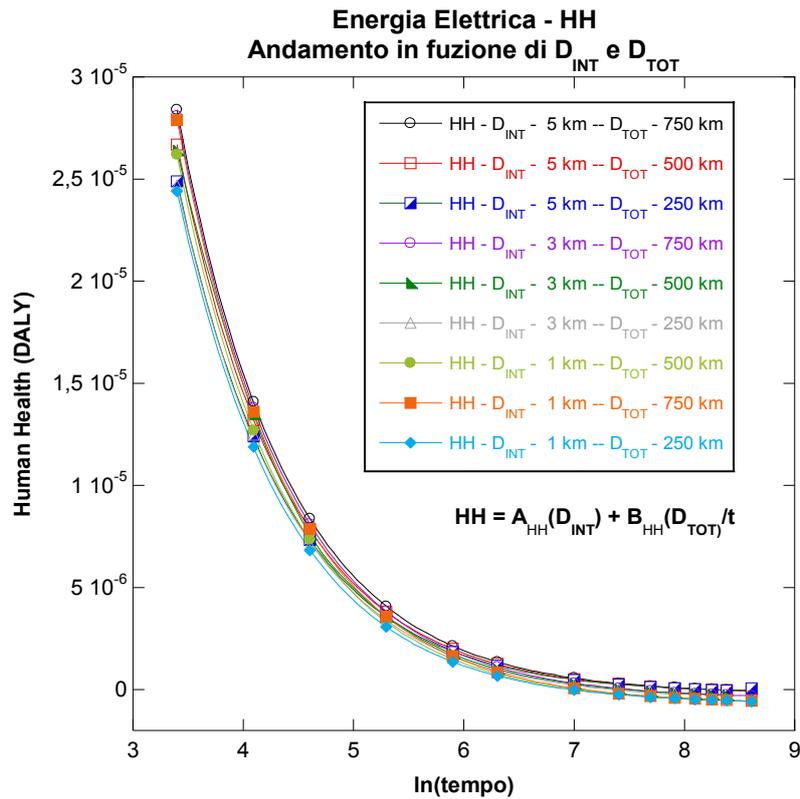


Figura 27: Andamento del valore degli effetti sulla salute umana per la produzione di energia elettrica al variare della distanza di fornitura (DTOT) e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (DINT).

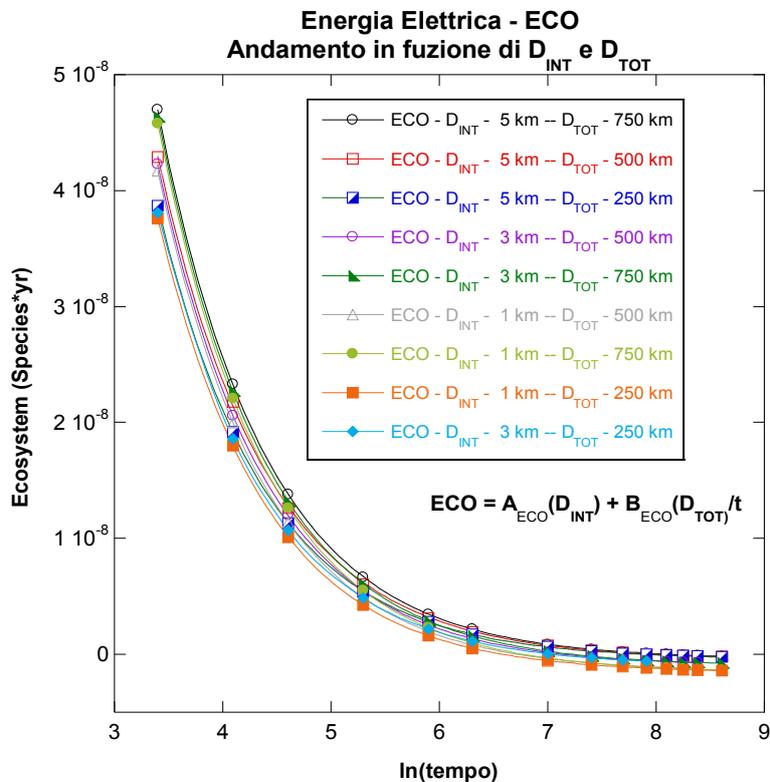


Figura 28: Andamento del valore degli effetti sulla qualità dell'ecosistema per la produzione di energia elettrica al variare della distanza di fornitura (DTOT) e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (DINT).

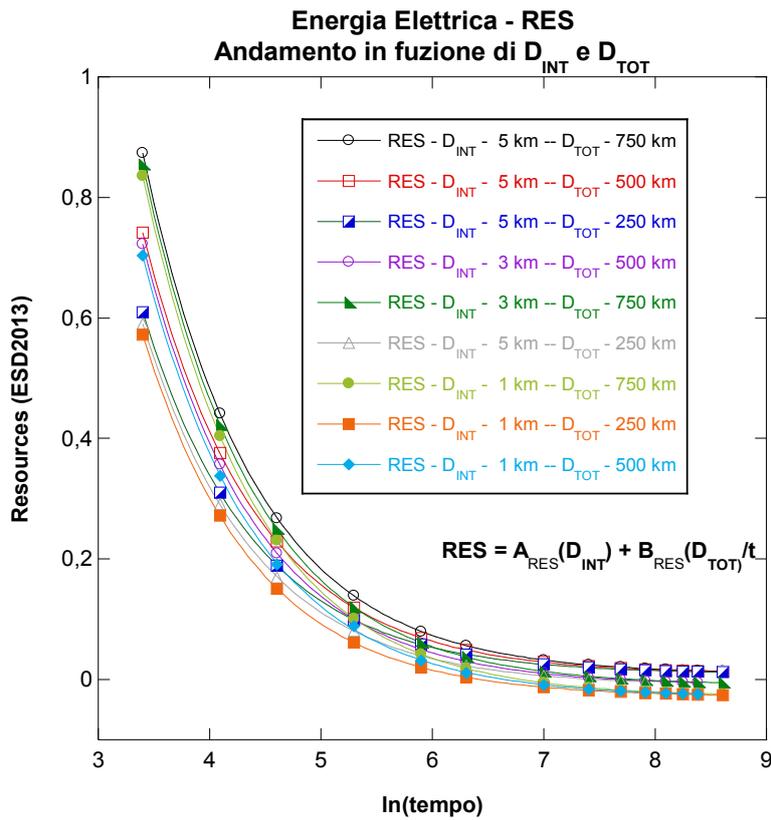


Figura 29: Andamento del valore degli effetti legati al consumo delle risorse per la produzione di energia elettrica al variare della distanza di fornitura (DTOT) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (DINT).

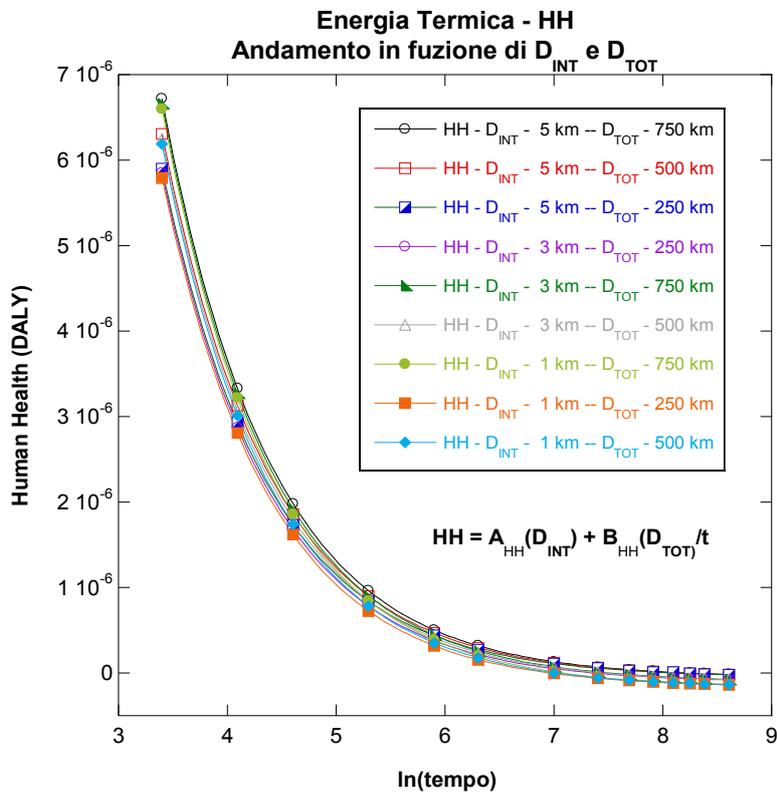


Figura 30: Andamento del valore degli effetti sulla salute umana per la produzione di energia termica al variare della distanza di fornitura (DTOT) del modulo e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (DINT).

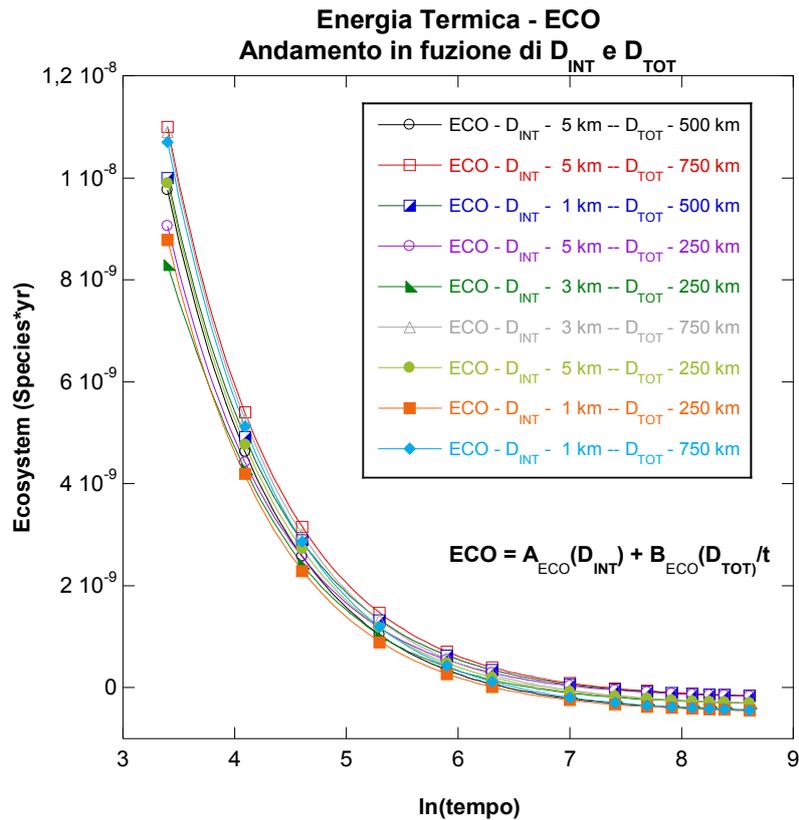


Figura 31: Andamento del valore degli effetti sulla qualità dell'ecosistema per la produzione di energia termica al variare della distanza di fornitura (D_{TOT}) e di quella percorsa quotidianamente nel relativo uso (D_{INT}).

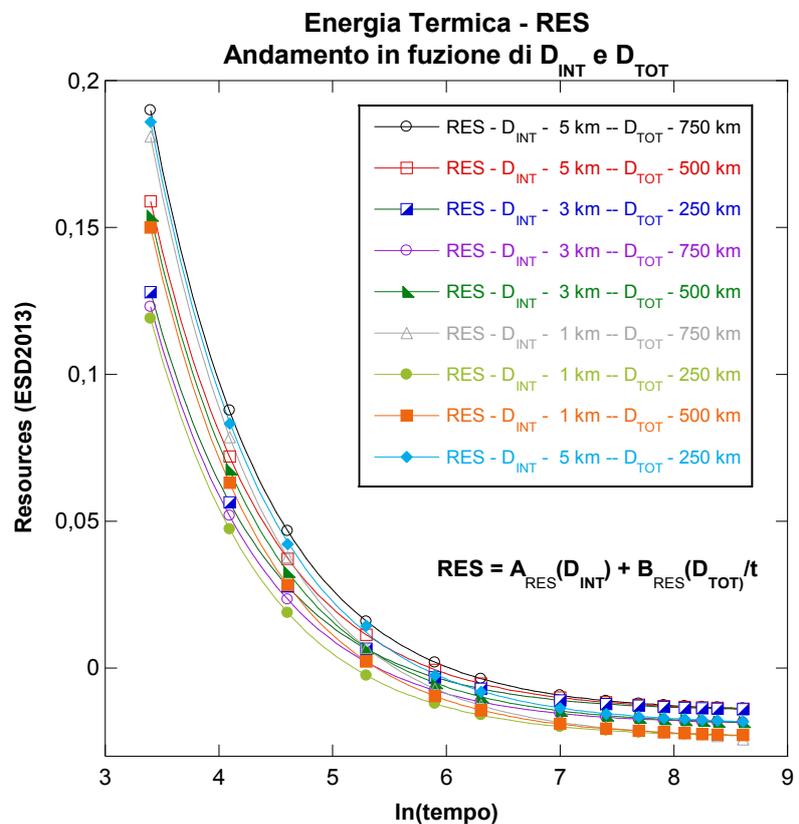


Figura 32: Andamento del valore degli effetti legati al consumo delle risorse per la produzione di energia termica al variare della distanza di fornitura (D_{TOT}) e di quella percorsa quotidianamente (D_{INT}).

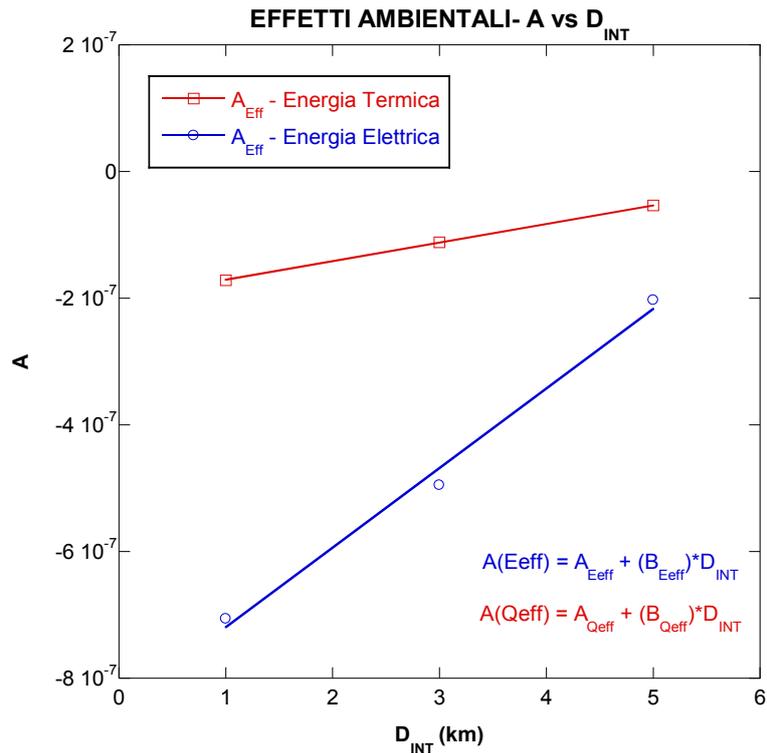


Figura 33: Andamento del coefficiente A in funzione del trasporto interno per i vari effetti ambientali sia nel caso inerente all'erogazione di energia elettrica che termica.

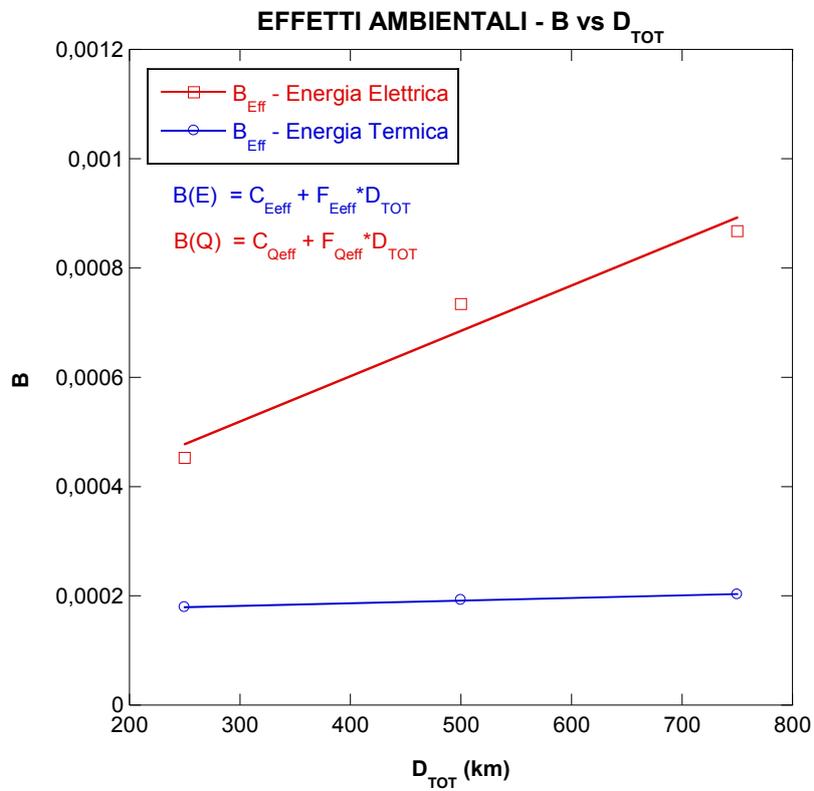


Figura 34: Andamento del coefficiente B in funzione del trasporto totale per i vari effetti ambientali sia nel caso inerente all'erogazione di energia elettrica che termica.

4.4 Discussione risultati ottenuti

Da quanto emerso nella sezione precedente, la performance ambientale del modulo è fortemente dipendente dalla distanza, che intercorre tra fornitore e utilizzatore finale, ma anche dall'entità del percorso che quotidianamente deve essere coperto nelle operazioni di accumulo e successiva erogazione dell'energia accumulata stessa.

Gli aspetti suddetti incidono fortemente anche sull'entità del pay-back time ambientale del modulo, che comunque è sempre molto lungo. Probabilmente si può affermare, almeno sulla base del quadro considerato e delle condizioni al contorno, che la mera (sicura) convenienza nell'utilizzo del modulo si ha intorno ai 20 anni di utilizzo. Naturalmente tutto questo è riferito agli aspetti ambientali legati allo sfruttamento del singolo kWh di energia termica ed elettrica, in luogo della controparte prodotta da rete o da mezzi standard.

Oltre a ciò, è emerso che anche gli aspetti descritti possono essere considerati relativi, perché la performance ambientale del modulo, se lo si considera come mero mezzo alternativo di produzione di energia, è fortemente legata al modo in cui l'energia di riferimento "evitata" viene prodotta.

Per quanto riguarda l'uso come una sorta di "pila" per l'erogazione di energia elettrica, il risparmio (eventuale) potenziale in termini ambientali dipende fortemente dal sistema di produzione energetica dello stato, entro i cui confini il modulo si trova ad essere impiegato. I risultati presentati, infatti, sono relativi all'utilizzo entro i confini Italiani (quadro medio di energia prelevata dalla rete elettrica nazionale).

Relativamente all'utilizzo del modulo come mezzo di erogazione di energia termica, il risparmio dipende, invece, dal tipo di combustibile o sistema di produzione di calore preso come riferimento. Il quadro analizzato fino a questo momento era legato all'utilizzo di gas naturale all'interno di un distretto industriale.

Per dimostrare quanto detto, è stato considerando un caso studio, riferito alla performance ambientale legata all'utilizzo del modulo in corrispondenza del quindicesimo anno, all'interno di un generico distretto distante 750 km dal sito di produzione. E' stato considerato una situazione operativa abbastanza sfavorevole, ossia che il modulo debba eseguire un percorso interno di 5 km.

Sono stati confrontati i risultati ottenuti rispetto all'erogazione di 1 kWh di energia elettrica da parte del modulo e la stessa quantità ottenuta mediante rete elettrica di alcune nazioni o contesti medi (Italia, Germania, Francia, Svezia, Giappone e Europa (senza la Svizzera)).

In base al grafico di Figura 35, relativo alla produzione di un singolo kWh di energia elettrica, la produzione di tale quantità mediante il modulo in questione, può essere conveniente da un punto di vista ambientali nei confronti della controparte ottenuta da rete elettrica, in paesi come Italia, Giappone o in un sistema medio Europeo (senza la Svizzera). Al contrario, sembrerebbe che tale convenienza diminuisca rispetto alla produzione secondo i sistemi di rete elettrica di Francia, Germania e Svezia. Abbattendo/eliminando i trasporti e prolungando il tempo di utilizzo si può ottenere un miglioramento anche rispetto a paesi caratterizzati da una rete elettrica "più virtuosa" da un punto di vista ambientale.

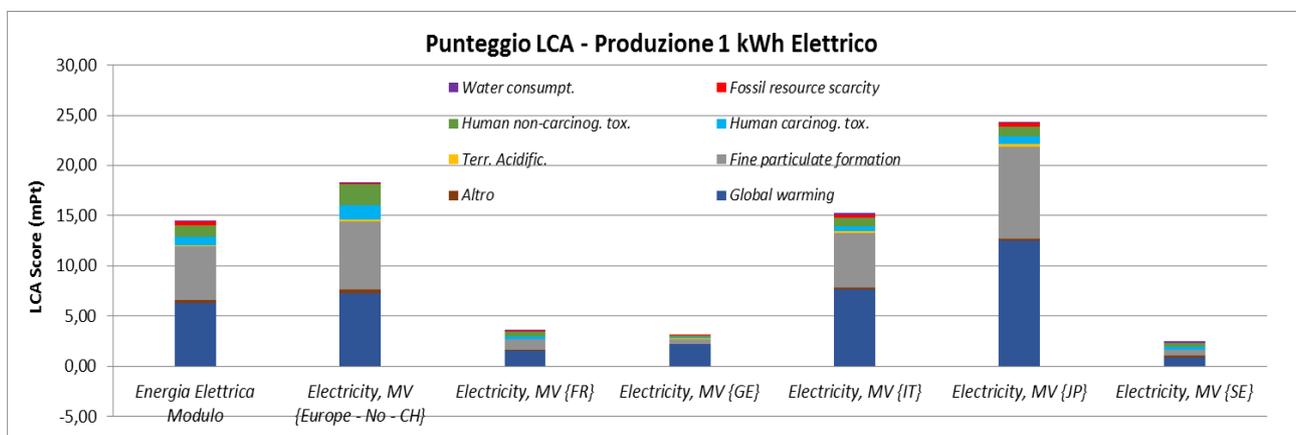


Figura 35: Punteggio LCA inerente alla produzione di un kWh elettrico secondo diversi sistemi.

Al contrario, si può notare (Figura 36) come la produzione di calore mediante il modulo è favorita da un punto di vista ambientale rispetto alle comuni metodologie di produzione basate su gas naturale, vapore e molti altri, soprattutto nel caso di un relativo utilizzo prolungato nel tempo.

Per quanto riguarda la fornitura e l'utilizzo del modulo, la minimizzazione della fase di trasporto rappresenta il fattore comune per l'ottimizzazione della relativa performance ambientale.

Quanto visto si ripercuote anche nell'entità del contributo alla performance ambientale dei vari tipi di sistemi da parte delle categorie di impatto di maggior rilievo (Figura 37 e Figura 38).

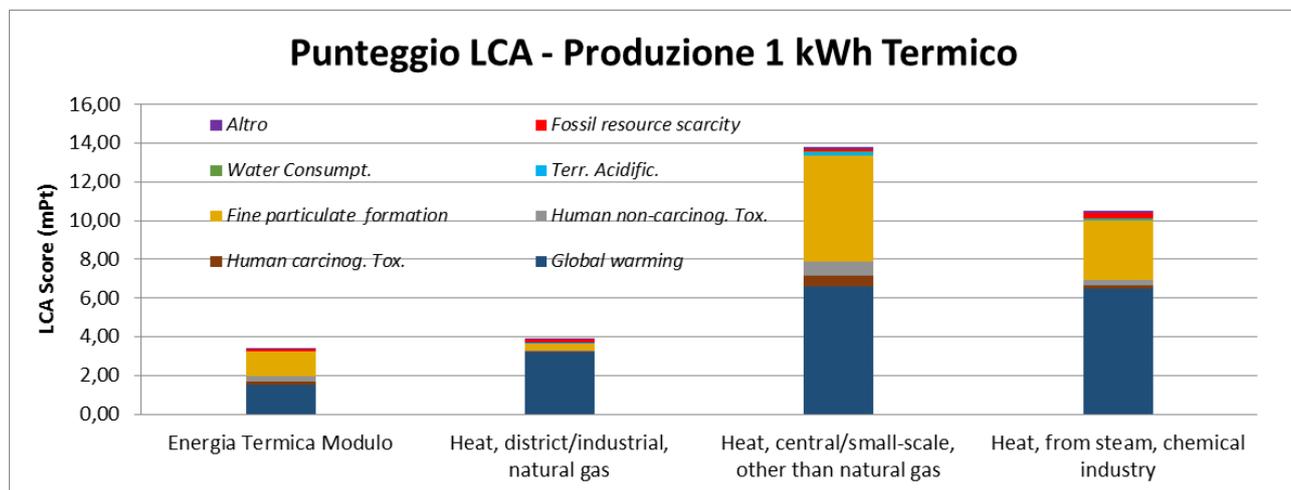


Figura 36: Punteggio LCA inerente alla produzione di un kWh termico secondo diversi metodi.

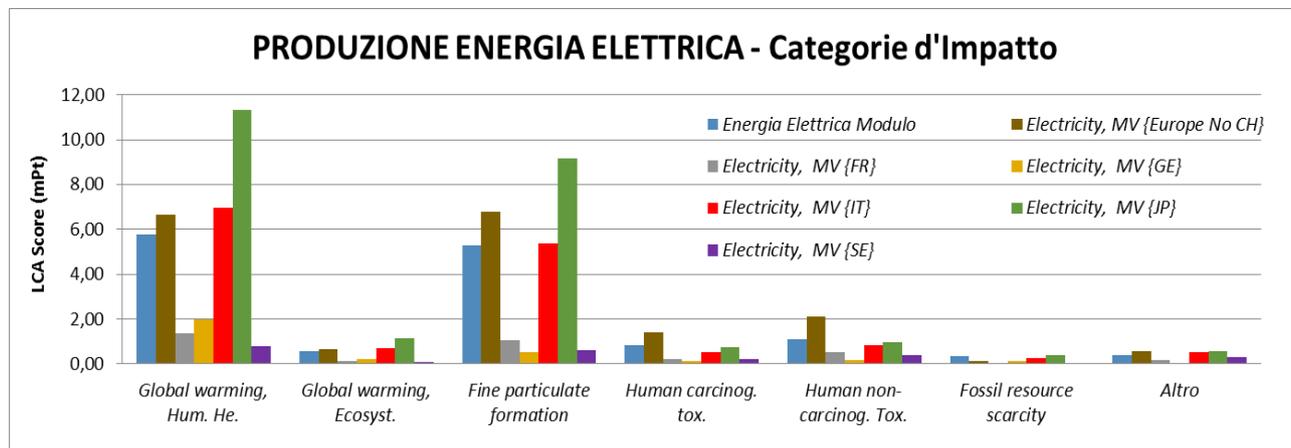


Figura 37: Principali categorie d'Impatto relative alla produzione di un kWh elettrico secondo diversi sistemi.

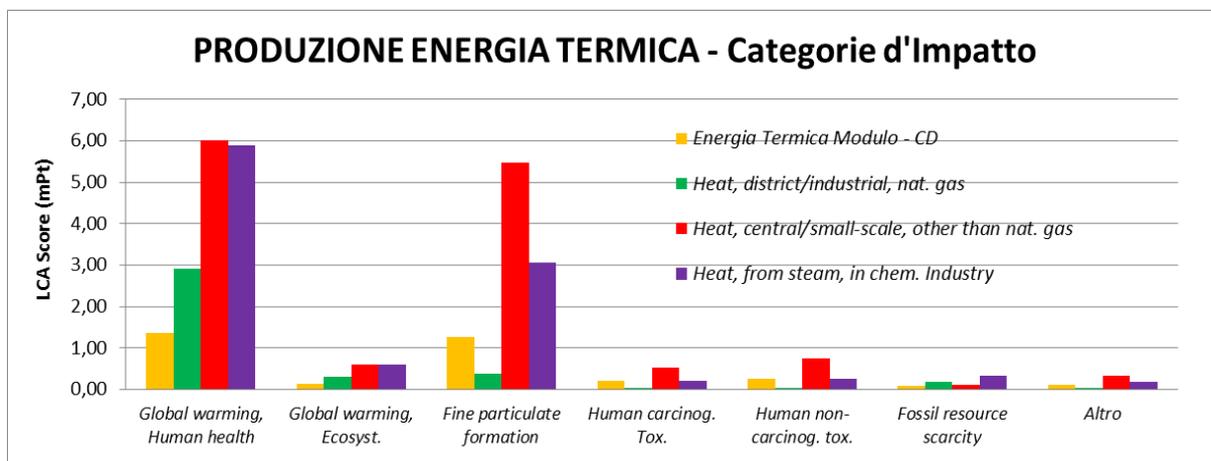


Figura 38: Principali categorie d'Impatto relative alla produzione di un kWh termico secondo diversi sistemi.

A questo proposito, si nota come nel caso dell'utilizzo del modulo come sorgente di energia elettrica, le categorie legate al riscaldamento globale (effetto serra) determinano un contributo molto elevato al punteggio totale. Comunque, nel caso del modulo in questione il contributo è inferiore a quello generato dalla produzione di un equivalente quantità di energia mediante il sistema di rete Giapponese, quello medio Europeo (senza la Svizzera) e quello Italiano. Tale contributo è, al contrario, molto superiore rispetto la caso di Svezia, Germania e Francia.

Una situazione del tutto simile si ha nel caso di categorie legate alla Formazione di Particolato fine, mentre risulta anche peggiore rispetto alle due categorie legate alla tossicità umana. A questo proposito, il contributo è inferiore solo al sistema energetico medio Europeo.

Nel caso dell'utilizzo del modulo per la produzione di calore, il contributo al riscaldamento globale è inferiore rispetto a tutto gli altri sistemi di confronto. Relativamente alla formazione di particolato fine, si ha un quadro sfavorevole solo rispetto al caso della produzione di calore da gas naturale. Nel caso della tossicità umana si ha una situazione molto simile, anche se si ha una leggera criticità anche rispetto alla produzione di energia mediante vapore.

Naturalmente, entrambi i quadri ambientali mostrati possono essere notevolmente migliorati mediante una taglio dei contributi legati ai trasporti.

In termini di danni ambientali si nota (Figura 39) come nel caso della produzione di energia elettrica mediante il modulo attivo il quadro rispecchia quanto visto in precedenza:

- Per quanto riguarda effetti sulla salute umana si ha una situazione leggermente migliore rispetto alla produzione energetica in Italia e molto migliore rispetto alla controparte prodotta con un sistema medio Europeo e Giapponese, mentre si ha una performance estremamente peggiore rispetto alla controparte prodotta in Svezia, Francia e Germania;
- In termini di qualità dell'ecosistema la situazione è del tutto simile rispetto alla categoria precedente. Naturalmente in senso assoluto il contributo è estremamente basso a tale tipo di danno ambientale;
- In termini di consumo delle risorse il contributo è bassissimo ed è inferiore agli altri sistemi nazionali di produzione di energia elettrica;

Nel caso inerente alla produzione di energia termica, in Figura 40 si può notare come i danni ambientali sono nettamente inferiori al caso della controparte prodotta con i vari tipi di combustibili, se si esclude la produzione di calore con gas naturale. Rispetto a questo ultimo caso, infatti, si ha un quadro leggermente migliore.

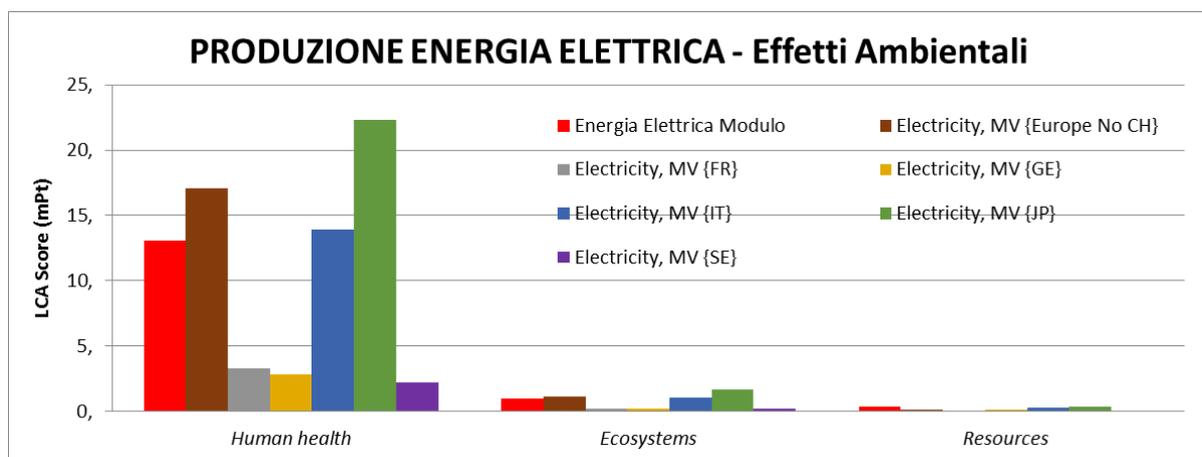


Figura 39: Principali danni ambientali relativi alla produzione di un kWh elettrico secondo diversi sistemi.

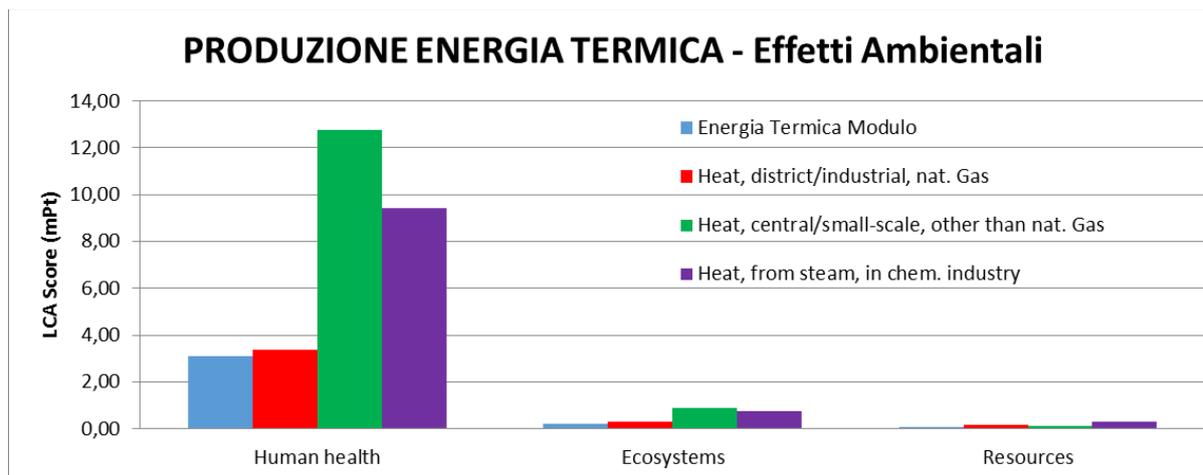


Figura 40: Principali danni ambientali relativi alla produzione di un kWh termico secondo diversi sistemi.

4.5 Caso studio – Distanza totale pari a 750 km e percorso interno pari a 5 km

Come riportato nel titolo, in questa sezione è fornito un quadro inerente alla performance ambientale della produzione di energia elettrica e termica mediante un modulo trasportato presso un utilizzatore sito ad una distanza pari a 750 km dal produttore.

Tale modulo è stato previsto percorrere 5 km al giorno all'interno del distretto industriale di riferimento. È stata considerata la situazione (statica) corrispondente al quindicesimo anno di utilizzo.

Va ribadito che la produzione di una data quantità di energia, indipendentemente dal fatto che sia termica o elettrica, consente il risparmio della controparte ottenuta mediante rete elettrica nazionale o mediante sistemi di approvvigionamento o produzione fondati sui comuni tipi di combustibili (Vergine).

Come si nota dall'albero di processo di Figura 41 suddetta produzione di energia elettrica (sempre riferendoci alle condizioni elencate nella parte introduttiva di questo paragrafo), rispetto alla controparte di rete, determina un modesto beneficio ambientale. A questo proposito, si ha un punteggio globale pari a poco meno di 0,90 mPt.

Si può facilmente notare come il beneficio ambientale relato al risparmio di energia di rete sia pesantemente controbilanciato dal trasporto e, non tanto da quello iniziale, quanto da quello quotidiano. Da ciò emerge che la minimizzazione del tragitto interno può incrementare sensibilmente la performance generale del modulo nello svolgimento delle sue funzioni di base. Come è stato visto nella prima parte di questo documento, tutto ciò può portare anche ad una riduzione rilevante anche del pay-back time.

Nel caso inerente all'uso del modulo come fonte di energia termica (Figura 42), la situazione è abbastanza simile. In senso assoluto, si avrebbe una performance inferiore (quasi la metà) rispetto al caso della produzione energetica (il punteggio globale ammonta a 0,46 mPt), perché quella del calore mediante gas naturale è caratterizzata da un impatto ambientale relativamente basso, come è stato visto anche nel paragrafo precedente.

Quanto detto sopra è ampiamente confermato anche dal grafico di Figura 43, inerente ai flussi di maggiore significato per il ciclo di vita del prodotto considerato. Si nota, a tal proposito, come i flussi legati alla costruzione del modulo abbiano un impatto molto basso rispetto alla produzione energetica (sia nel caso dell'elettricità che del calore). Il trasporto contribuisce a controbilanciare negativamente il beneficio ottenuto dall'uso del modulo attivo.

Per completezza di trattazione è stata eseguita anche la fase di caratterizzazione relativa all'uso del modulo in questione come fonte di energia termica ed elettrica. I relativi grafici sono stati riportati in Appendice E.

Si ha la conferma di come la possibilità di utilizzare il modulo stesso come fonte di energia elettrica, malgrado il basso rendimento che ne risulterebbe, potenzialmente comporterebbe una maggiore performance ambientale rispetto all'uso come fonte di energia termica.

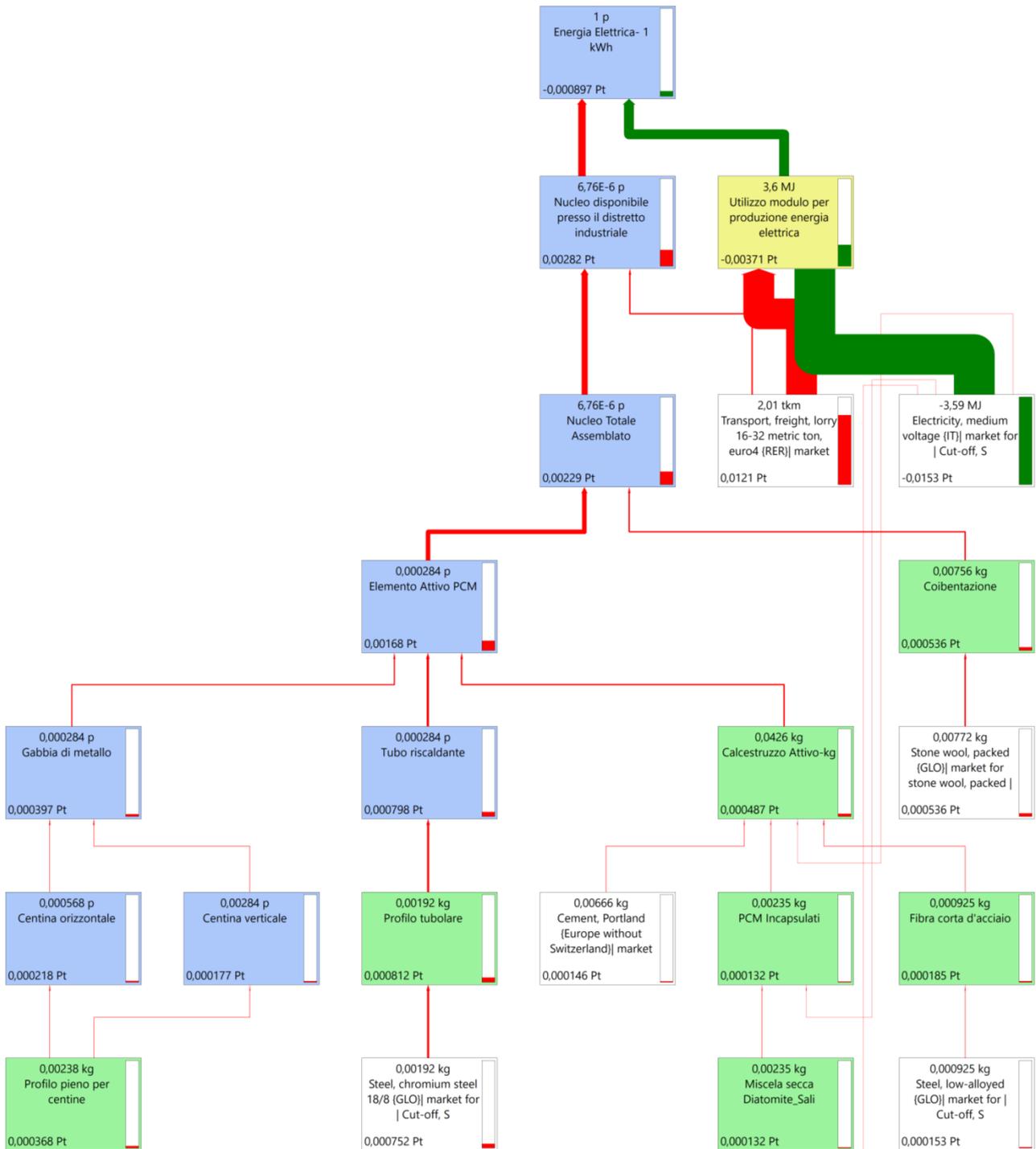


Figura 41: Albero di processo (LCI) inerente all'utilizzo del modulo per la produzione di 1 kWh elettrico.

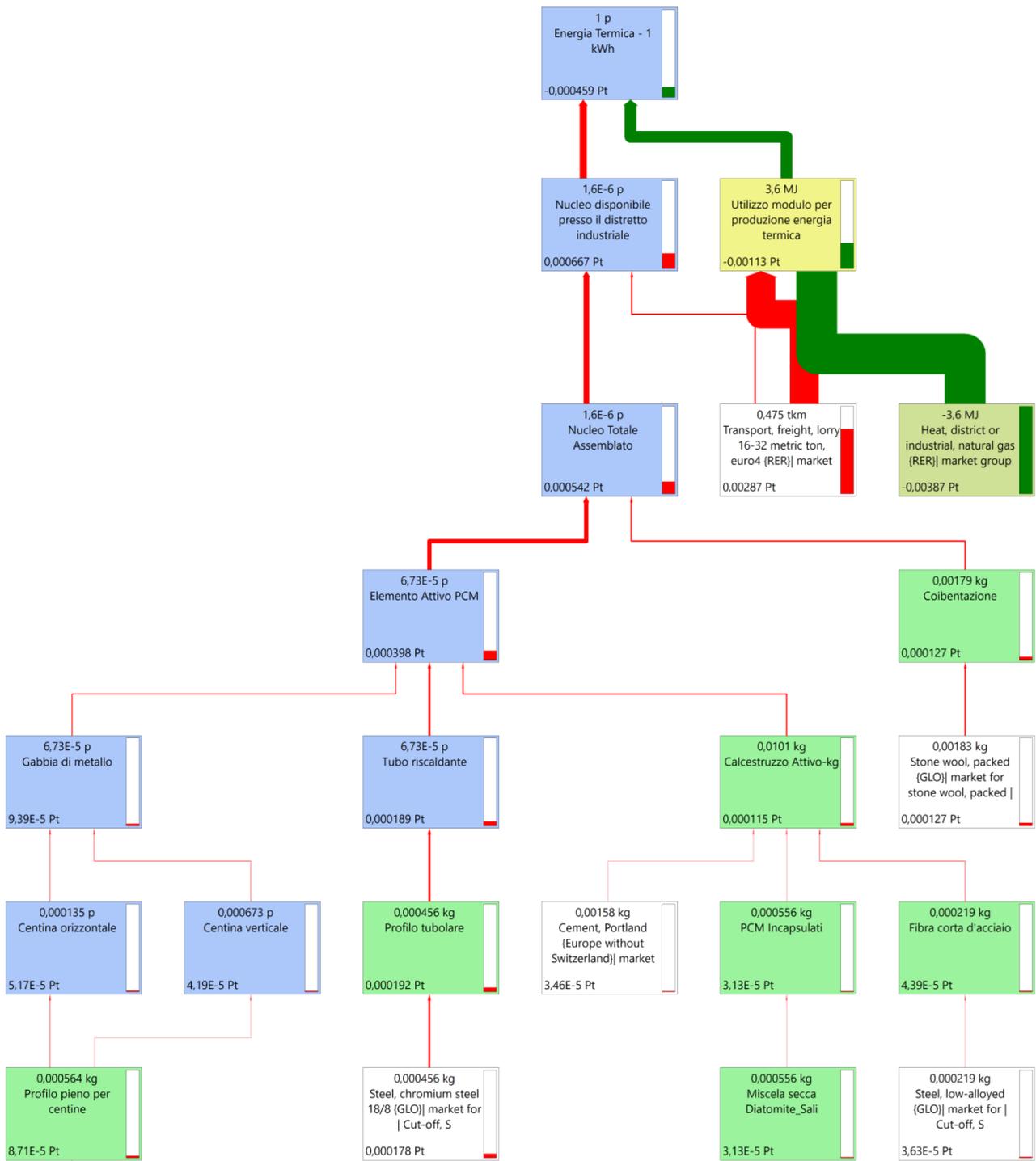


Figura 42: Albero di processo (LCI) inerente all'uso del modulo per la produzione di 1 kWh termico.

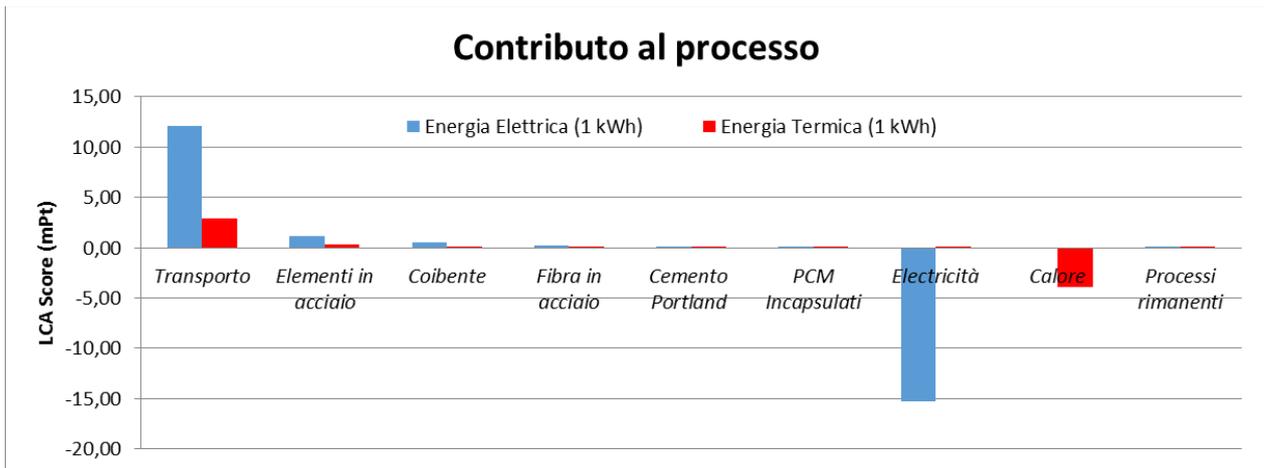


Figura 43: Contributo al processo dei flussi singoli per il sistema di accumulo nell'esercizio delle relative funzioni.

Mentre nel caso della produzione di elettricità al posto della controparte di rete si ha un elevato beneficio per quasi tutte le categorie di impatto (sono escluse Formazione di Ozono, Terrestrial Ecotoxicity, Land Use, Scarsità di risorse fossili e minerarie), nel caso dell'uso come fonte di energia termica, ne beneficerebbero solo le categorie legate al riscaldamento globale, al consumo di risorse idriche e all'emissione di radiazioni ionizzanti.

L'utilizzo del modulo come fonte di erogazione energetica, come sostituito della controparte "verGINE" (di rete o ottenuta mediante appositi impianti), fotografando la situazione al quindicesimo anno di permanenza presso un determinato distretto industriale e nelle condizioni di utilizzo espresse, comporta principalmente un importante beneficio in termini contributi legati ad emissioni di gas serra, come si può notare dal grafico di Figura 44. Si ottengono piccoli benefici anche in termini di contributi al consumo di risorse fossili ed idriche. Per le altre categorie di impatto eventuali benefici sono controbalanciati, come anticipato, dal contributo dei trasporti interni del nucleo, che ha una massa molto elevata di per se stesso.

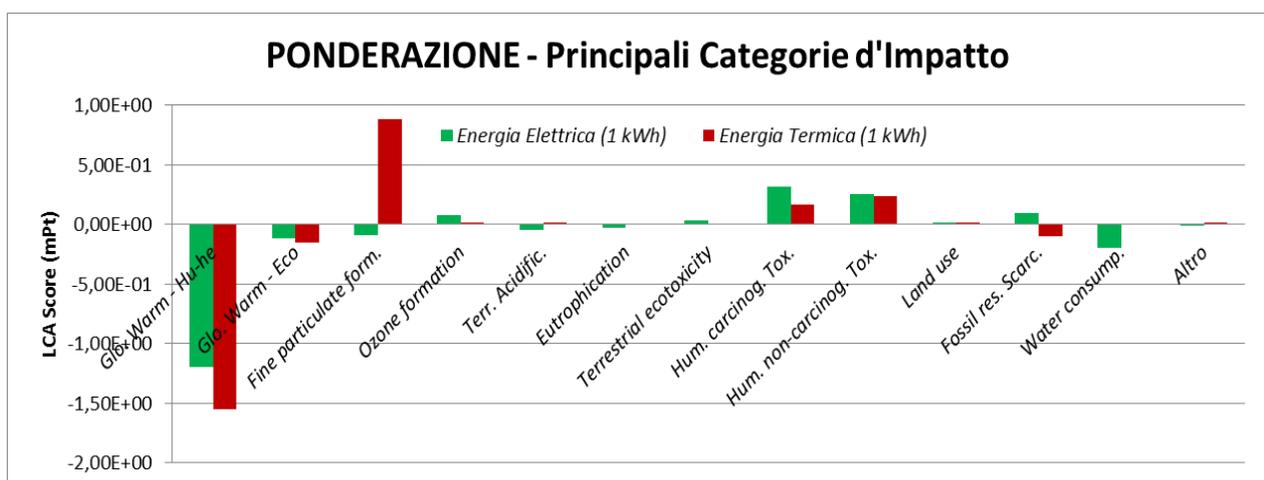


Figura 44: Principali categorie d'Impatto relative alla produzione di un kWh di energia da parte del modulo, nelle condizioni considerate.

L'uso del modulo, come si vede anche nel grafico di Figura 45, facendo risparmiare energia di rete, determina principalmente un abbattimento degli effetti negativi sulla salute umana e di quelli legati al peggioramento della qualità dell'ecosistema. Nel caso della produzione di energia elettrica sembra che il quadro sia migliore per questi due tipi di effetti, rispetto alla produzione di energia termica.

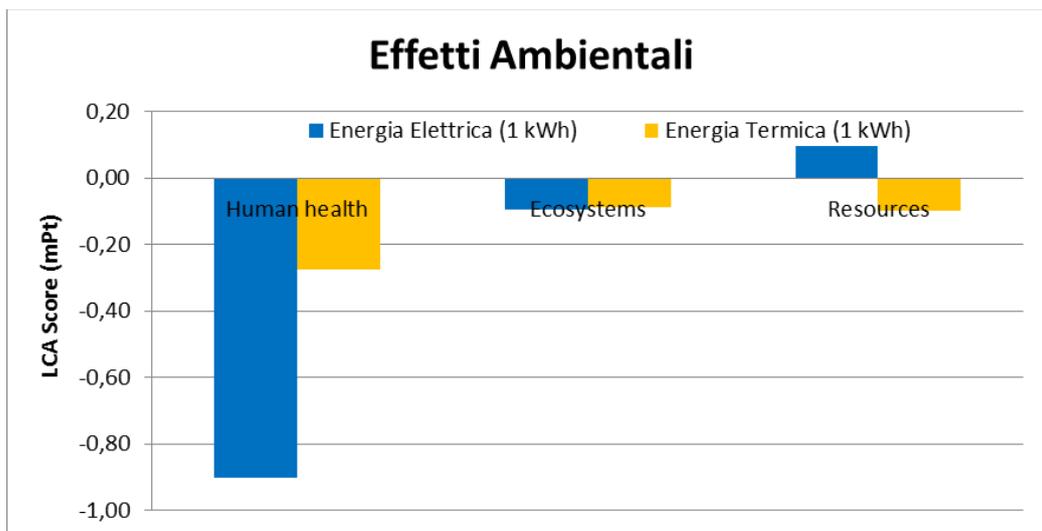


Figura 45: Principali effetti ambientali relativi alla produzione di un kWh di energia da parte del modulo, nelle condizioni considerate.

Quanto detto in precedenza è stato anche quantificato in termini di indicatori di impatto, come riportato in Tabella 15, ed anche in termini di danni ambientali (Tabella 16). Si nota come i valori riscontrati in tutte le due tabelle siano negativi, la qual cosa indica un risparmio in emissioni nocive per la salute umana e per la qualità dell’ecosistema. Oltre a questo si evidenzia anche un risparmio di risorse.

Come detto in precedenza il quadro ottenuto può essere sensibilmente migliorato riducendo almeno il percorso interno da parte del modulo. Prolungando i tempi di utilizzo del modulo si ottengono anche dei modesti miglioramenti in termini di performance ambientale globale.

Tabella 15: Indicatori di impatto valutate con il metodo ReCiPe 2016 mid-point (H/A) per la produzione energetica ottenuta dall’uso del modulo. Stato dell’arte al quindicesimo anno.

Indicatore	Unità	Energia Elettrica (1 kWh)	Energia Termica (1 kWh)
Global Warming	kgCO ₂ _eq.	-0,428	-0,183
Fine particulate	kgPM<2.5_eq.	-4,73*10 ⁻⁴	-2,71*10 ⁻⁵
Human Toxicity	kg1,4-DCB_eq.	-0,210	-2,74*10 ⁻³

Tabella 16: Danni ambientali valutati con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per la produzione energetica ottenuta dall’uso del modulo. Stato dell’arte al quindicesimo anno.

Categoria di danno	Unità	Energia Elettrica (1 kWh)	Energia Termica (1 kWh)
Salute Umana	DALY	-7,76*10 ⁻⁷	-1,87*10 ⁻⁷
Ecosistema	Species*yr	-1,83*10 ⁻⁹	-5,48*10 ⁻¹⁰
Risorse	USD2013	-3,72*10 ⁻²	-2,57*10 ⁻²

5 Conclusioni

In questo lavoro è stato analizzato l'impatto ambientale potenziale inerente alla produzione del calcestruzzo attivo, con il quale realizzare il modulo per l'accumulo di energia. Come in tutti gli altri casi affrontati, i quali saranno descritti nelle righe successive, è stato utilizzato un approccio di tipo "cradle to gate". I modelli sviluppati sono stati implementati con il software SimaPrò v. 9.1.1 e con lo strumento ReCiPe2016(H/A) (sia nella versione End-point che Mid-Point). Il database utilizzato nella fase di modellazione è Ecoinvent 3.6.

Per quanto riguarda il calcestruzzo attivo è stato notato come la maggior parte dell'impatto può essere attribuito all'utilizzo del cemento e delle fibre di acciaio, anche se i PCM incapsulati determinano un contributo abbastanza importante. In senso assoluto si può affermare che la produzione di un singolo kg di tale materiale determina un impatto potenziale molto basso.

Gli impatti di maggiore importanza risultano quelli collegati al riscaldamento globale, all'emissione di particolato fine e alla tossicità per l'essere umano. Da ciò i maggiori danni sono legati proprio alla salute umana, molto più che alla perdita di biodiversità o al consumo di risorse.

Oltre a ciò, è stato sviluppato lo studio LCA anche sul modulo attivo completo, corredato di coibentazione, di pavimentazione isolante e pronto ad essere spedito presso un utilizzatore finale (quindi senza considerare ancora il trasporto). E' stato notato come l'impatto ambientale potenziale, legato la produzione di suddetto modulo, sia principalmente dovuto all'utilizzo del tubo contenente il fluido riscaldante, il quale è basato su acciaio inox e determina quasi il 35% del contributo totale al punteggio LCA ottenuto.

Il secondo contributo in ordine di importanza è legato all'uso della coibentazione (principalmente al materiale coibente), che determina circa un altro 23,40% del punteggio suddetto, mentre il calcestruzzo attivo contribuisce per il 21,30%. Anche la gabbia di metallo, che è un elemento di rinforzo strutturale, offre un contributo importante, in quanto responsabile del 17% del punteggio LCA totale.

Il peso del modulo è molto elevato, così come elevata è la quantità di materiale necessario per ogni componente. Ciò spiega l'entità del punteggio LCA ottenuto (238 Pt), che senza la suddetta considerazione potrebbe apparire molto elevato e rappresentativo di una scarsa performance ambientale.

Oltre a quanto detto è stato studiato anche il potenziale impatto ambientale del modulo in questione nella fase di utilizzo. A questo proposito, è stato sviluppato un LCA parametrico basato sul tempo di utilizzo del modulo, la distanza percorsa dallo stesso per giungere a destinazione presso un determinato distretto industriale, ma soprattutto in funzione del tragitto giornaliero che il modulo deve compiere internamente al distretto stesso: operazioni di carica (accumulo di energia) e di utilizzo (erogazione).

E' stata scelta come unità funzionale il singolo kWh erogato sotto forma di energia elettrica o termica, ipotizzando che questo consenta di risparmiare la controparte elettrica, ottenuta dalla rete nazionale italiana (energia vergine), o termica, ottenuta mediante impianti basati sull'utilizzo di gas naturale.

E' stato notato come la performance ambientale di tale produzione cresce all'aumentare del tempo di utilizzo, tanto che, dopo un certo intervallo (Pay-Back time), si arriva ad potenzialmente ad ottenere dei meri crediti ambientali: il punteggio LCA inerente alla produzione di energia dal modulo al posto di quella "verGINE" assume valori negativi.

E' stato visto che il Pay-Back time è fortemente influenzato dal trasporto del modulo, sia quello iniziale dal produttore al consumatore, che e soprattutto da quello quotidiano. Le leggi matematiche ottenute evidenziano che tale tempo aumenta in modo esponenziale all'aumentare dei due tipi di trasporto (equazione 15).

A questo proposito, inizialmente è stato dimostrato come nel caso di trasporti interni superiori a 5,5 km l'utilizzo del modulo come fonte di recupero di energia diventa potenzialmente inutile dal punto di vista ambientale, perché i benefici ottenuti dal risparmio di energia sono completamente controbilanciati/vanificati dal contributo dei trasporti.

La modellazione in questione è stata fatta anche nel caso degli indicatori di impatto più importanti (Global Warming Potential, Fine Particulate Matter e Human Toxicity), ma anche nel caso dei danni ambientali (Human Health, Ecosystem e Resources). Il valore delle suddette categorie di impatto (parametri Mid-Term)

e dei danni in questione (Parametri End-Term) tende a diminuire all'aumentare del tempo di utilizzo del modulo (legge di tipo iperbolico).

In alcuni i parametri analizzati, assumono anche un valore negativo dopo un certo tempo di utilizzo, soprattutto se i trasporti considerati non assumono un'entità troppo elevata. A tal proposito (equazione 19), il valore dei parametri menzionati è direttamente proporzionale proprio all'entità dei trasporti stessi.

E' stato dimostrato come i risultati ottenuti in termini di performance ambientale, relativamente alla fase di utilizzo del modulo attivo, sono fortemente dipendenti, non solo dai trasporti, ma anche dalle tecnologie con cui è prodotta l'energia termica e dalla tipologia di rete elettrica considerata (Country dependance).

Questo aspetto è stato verificato grazie alla realizzazione di un mero case study, per il quale è stato considerato un trasporto iniziale di 750 km ed uno quotidiano pari a 5 km. E' stato sviluppato lo studio LCA relativo alla produzione di energia elettrica (1 kWh), conseguita mediante l'utilizzo del modulo, rispetto alla controparte di rete prodotta in differenti nazioni campione, nel caso in cui suddetto sistema di erogazione si trovi al quindicesimo anno di attività.

Nelle condizioni di utilizzo sopra citate produrre energia elettrica con il modulo è conveniente negli stati dove la produzione e l'erogazione dell'energia elettrica comporta un elevato impatto ambientale, come in Italia ed in Giappone. Lo è meno in nazioni come Svezia, Francia e Germania, caratterizzate da una rete elettrica molto efficiente da un punto di vista ambientale. Naturalmente il quadro è sensibilmente migliorabile nella misura in cui il trasporto interno possa essere minimizzato o addirittura eliminato.

Nel caso della produzione di energia termica, il confronto è stato fatto con i sistemi basati sull'utilizzo di gas naturale, vapore o mezzi diversi dal gas naturale stesso. La produzione mediante il modulo è risultata sempre estremamente conveniente dal punto di vista ambientale.

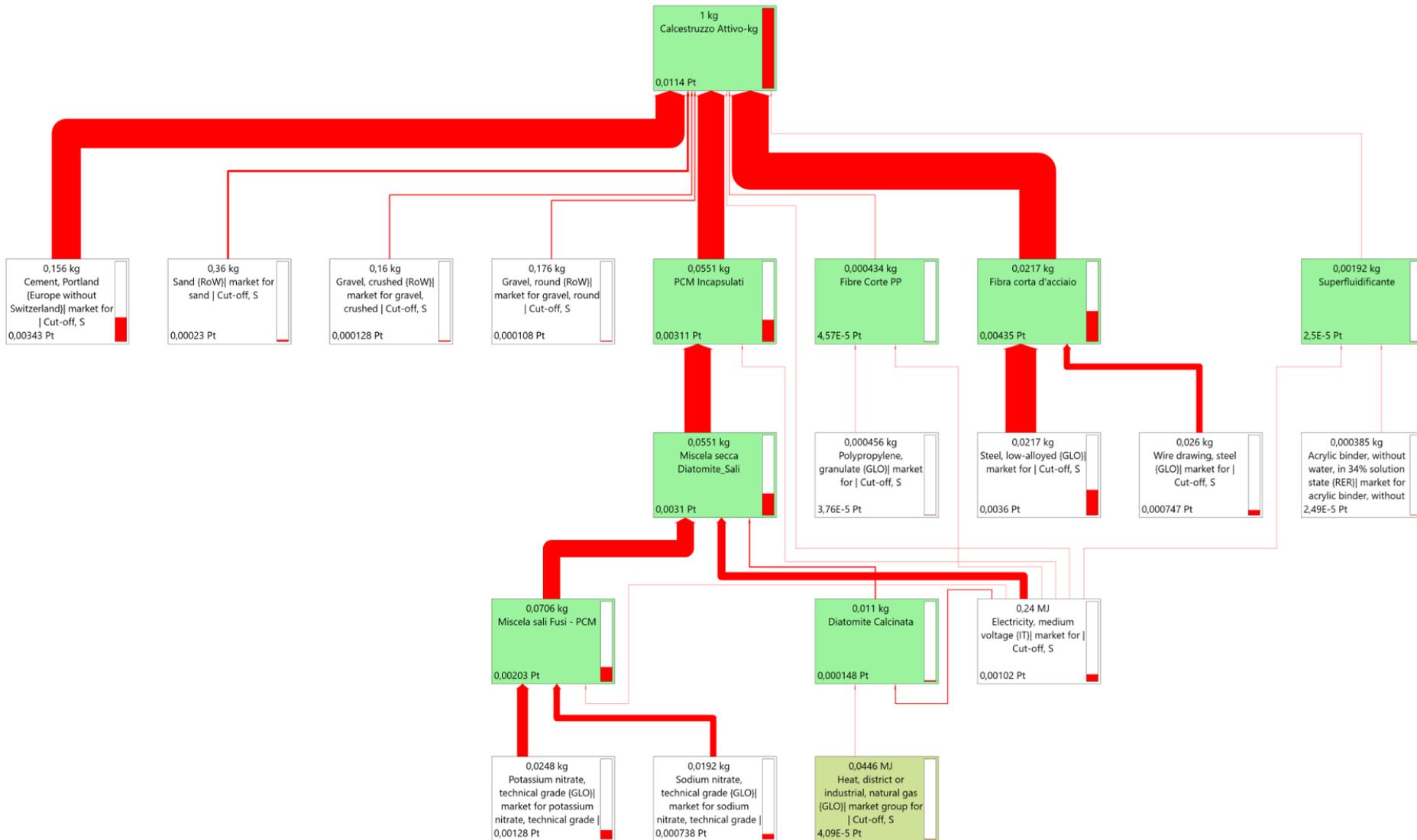
Infine, è stato sviluppato anche un LCA di suddetto caso studio, per comprendere i punti deboli delle varie fasi del ciclo di vita del modulo completo (soprattutto la fase di utilizzo), le categorie di impatto ed i danni ambientali di maggiore rilievo.

E' stata ottenuta una conferma dei vari quadri rappresentati precedentemente, ossia che l'aspetto fondamentale per migliorare la performance ambientale di suddetto componente è legato ad una minimizzazione dei trasporti interni quotidiani.

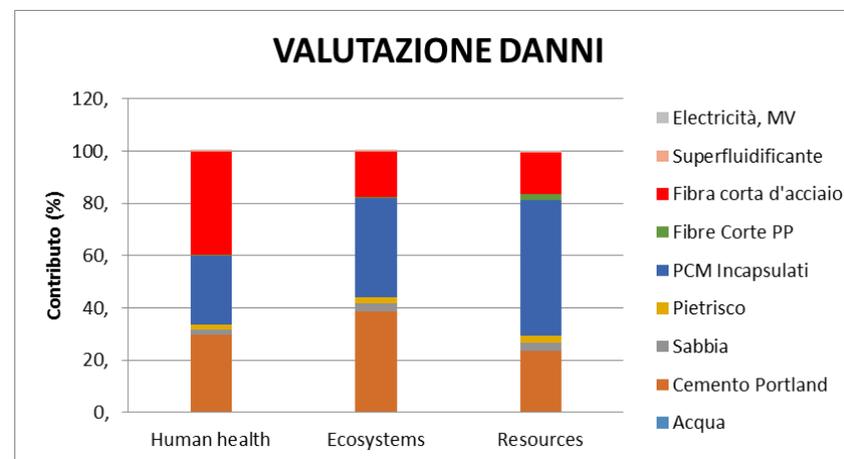
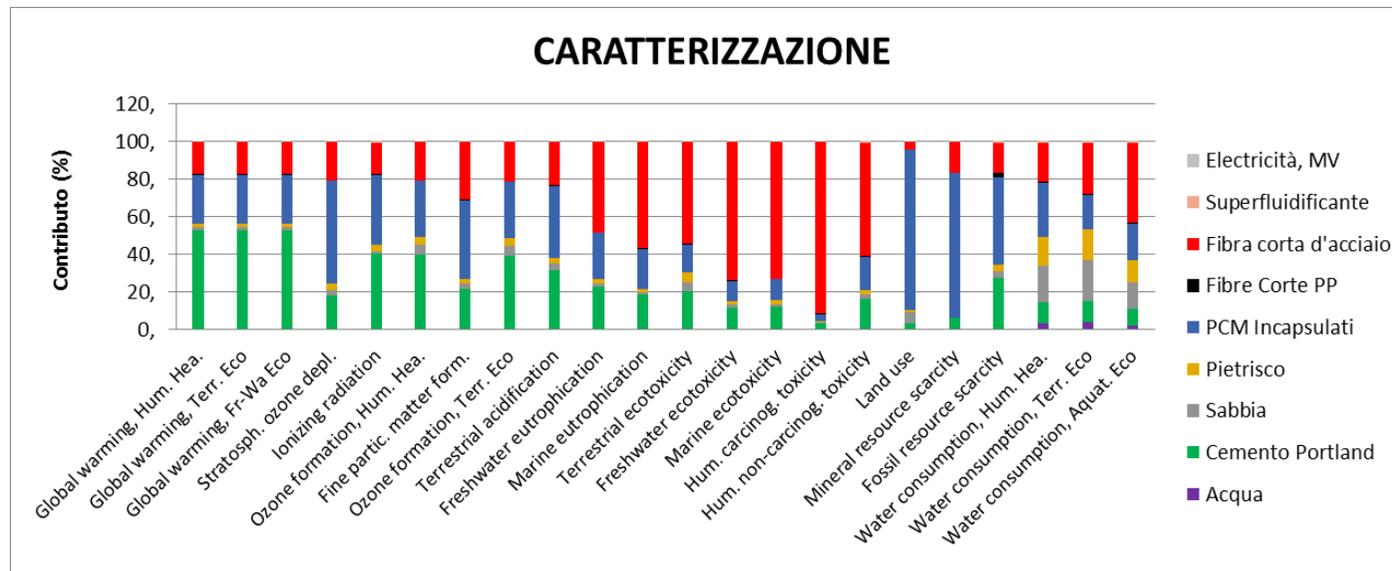
6 Riferimenti bibliografici

- [1] R. Petrucci, F. Dominici, M. Rallini, L. Torre, Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi. Report RdS/PTR2021/268
- [2] S. De Meester, J. Dewulf, L. Roes, M. Patel, S. Hellweg, "Prospective Sustainability Assessment of Technologies: Development of Basic Engineering modules for prospective estimations of the material flows and energy requirements". Ghent, 10 June 2013;
- [3] AITEC - Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento – V. Pacenti, "Lavorazione del Calcestruzzo";
- [4] R. H. Sadok, M. Tahlaiti, N. Belas, R. Mazouzi, "Environmental life cycle assessment of industrialization process of calcined dredged sediments". Journal of Materials and Engineering Structures 6 (2019) 25–37;
- [5] S. Pushkar, Y. Ribakov, "Life-Cycle Assessment of Strengthening Pre-Stressed Normal-Strength Concrete Beams with Different Steel-Fibered Concrete Layers". Sustainability 2020, 12, 7958;
- [6] Death and DALY estimates for 2004 by cause for WHO Member States: Persons, all ages". World Health Organization (2002);
- [7] K. Chant, "The Health of the People of New South Wales (summary report)", Chief Health Officer, Government of New South Wales, Novembre (2008);

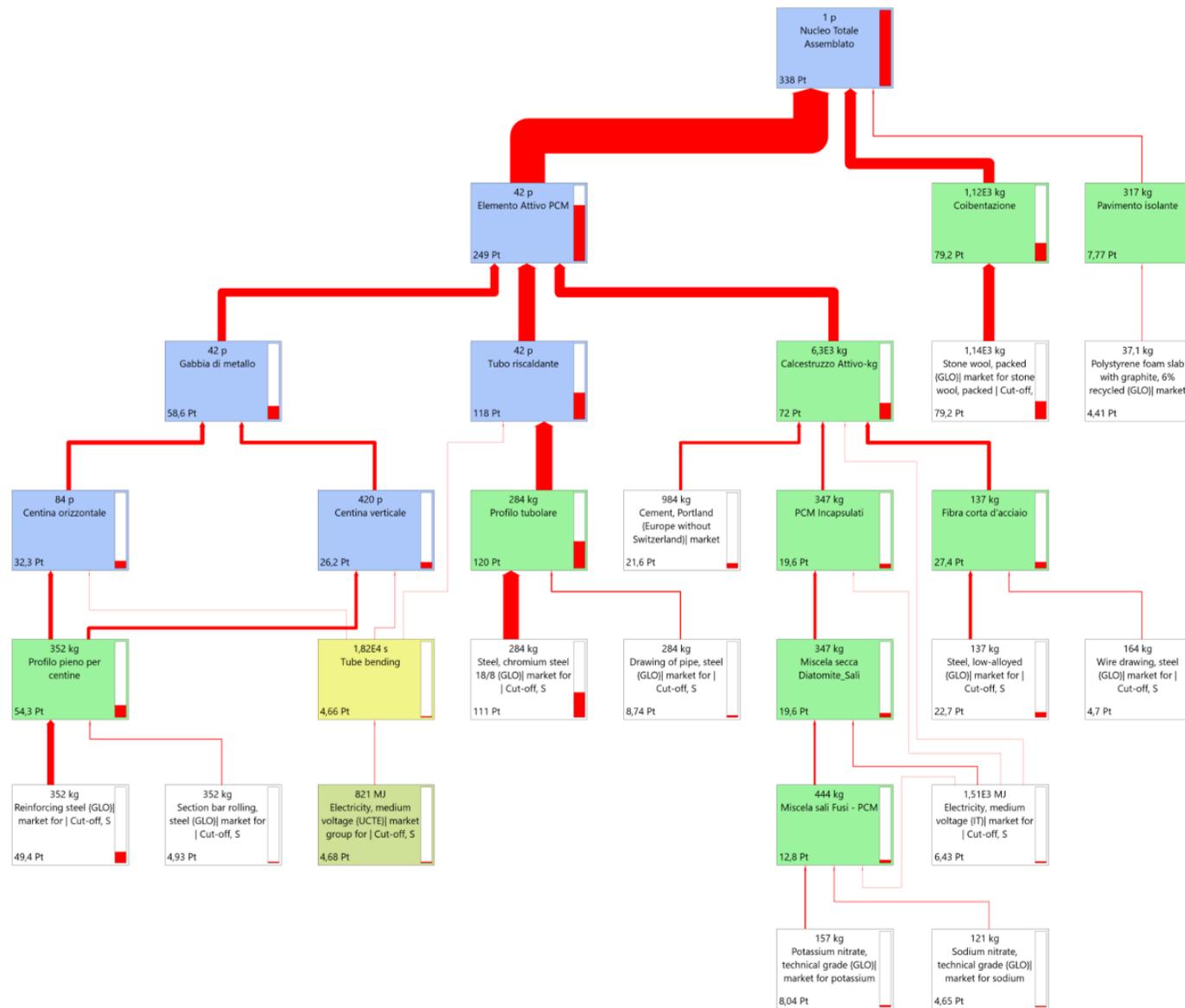
APPENDICE A – Albero di processo del Calcestruzzo Attivo



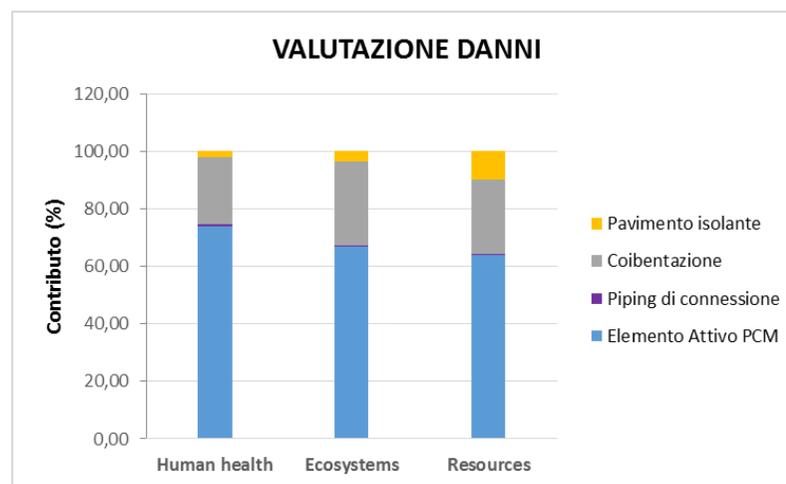
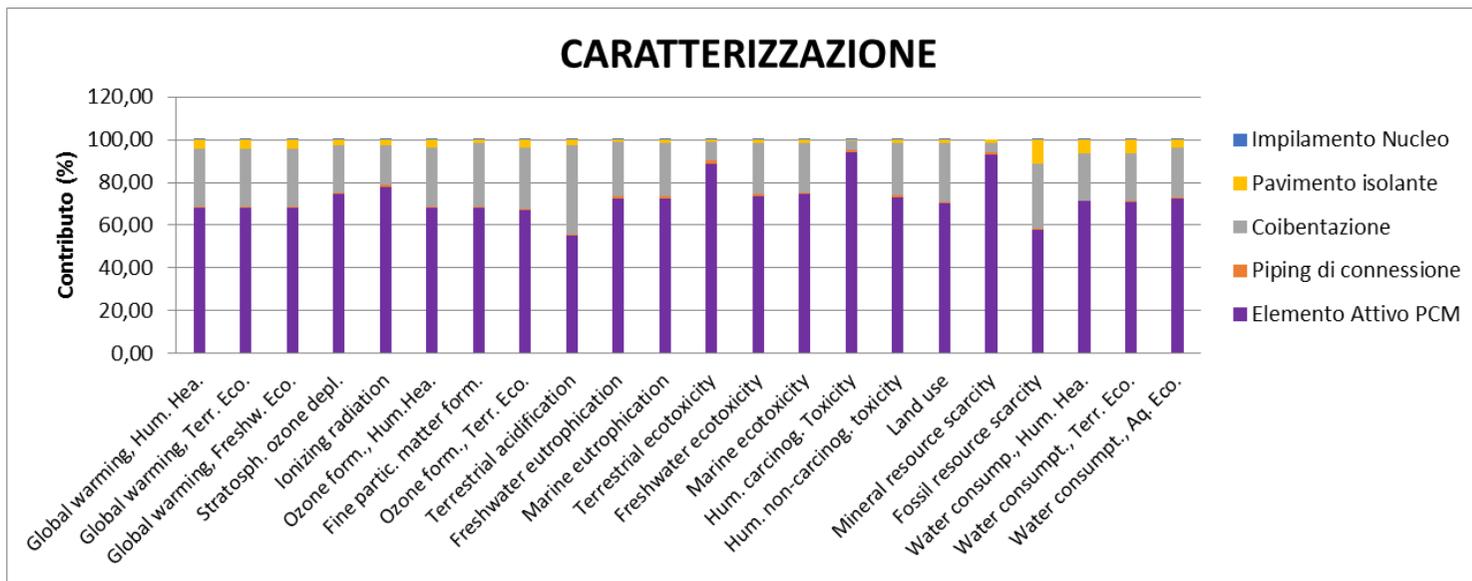
APPENDICE B – Caratterizzazione e Valutazione danni per il Calcestruzzo Attivo



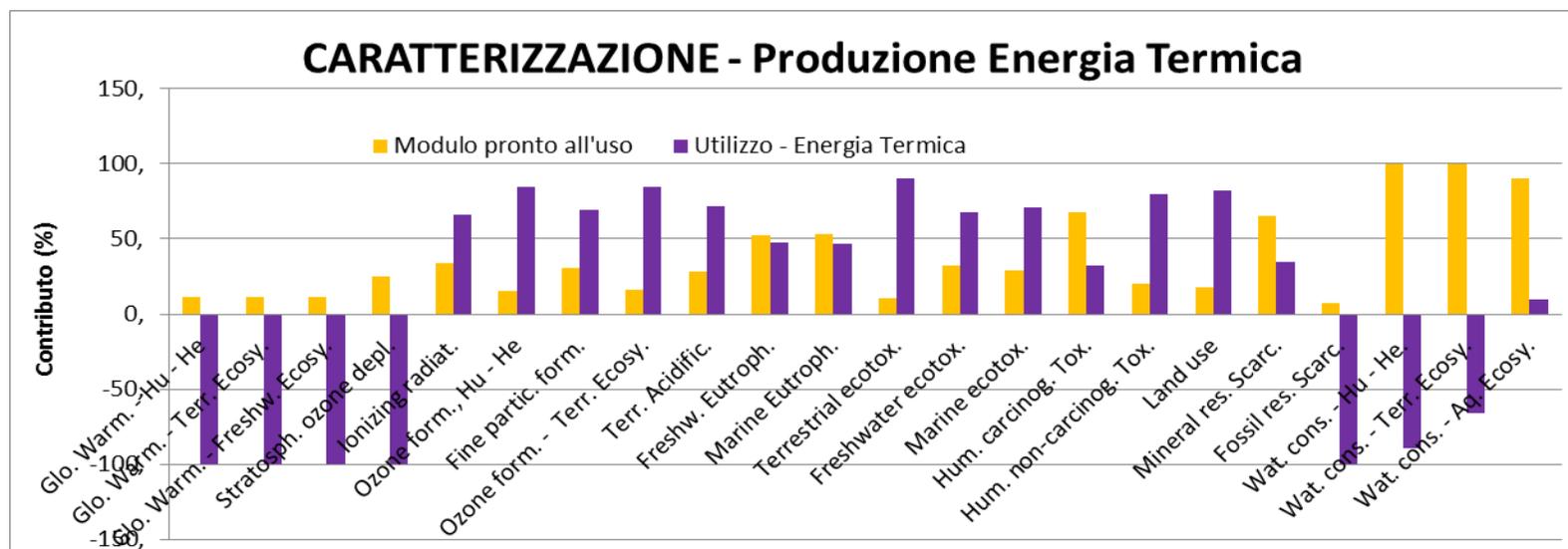
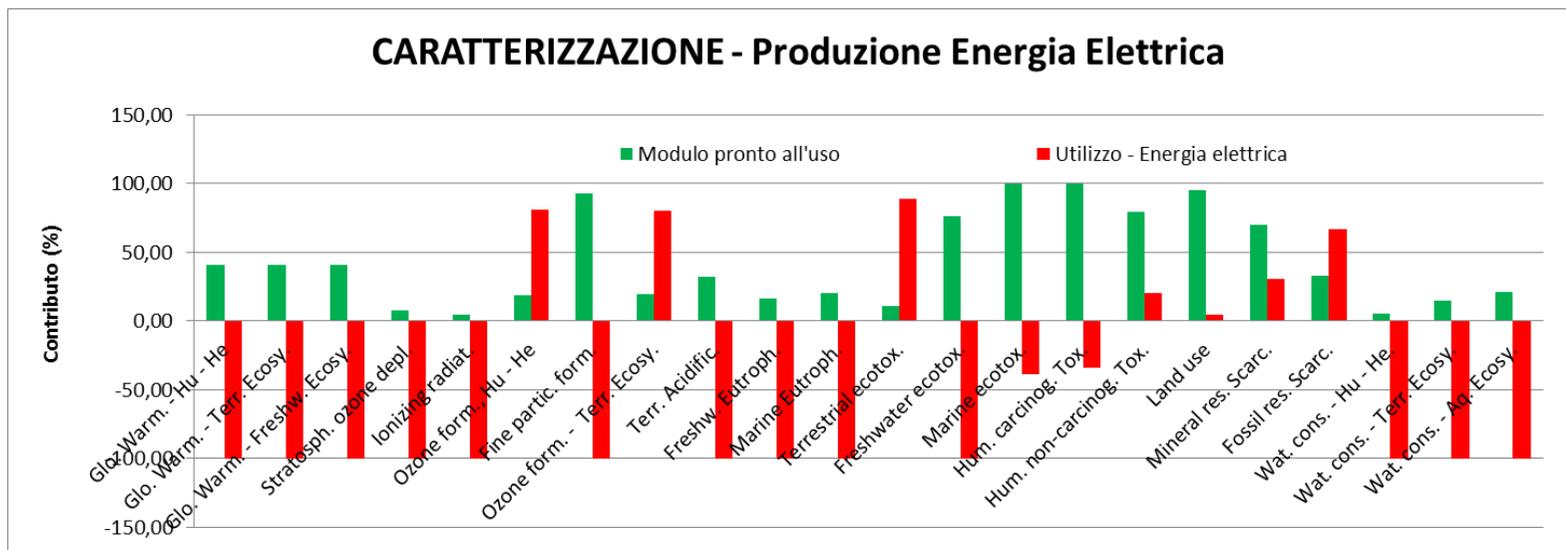
APPENDICE C – Albero di processo del Modulo Completo



APPENDICE D – Caratterizzazione e Valutazione danni per il Modulo Completo



APPENDICE E – Caratterizzazione – Produzione Energia Elettrica e Termica

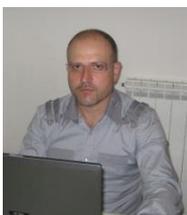


Curriculum scientifico del gruppo di lavoro



Prof. Luigi Torre

Luigi Torre è professore Ordinario di Tecnologia dei Materiali, Tecnologia dei Polimeri e dei Compositi, presso l'Università di Perugia. Laureatosi all'università Federico II di Napoli ha ottenuto il Ph. D presso l'Università di Washington (Seattle) USA. Attualmente il Professor Torre dirige il Laboratorio di Scienza e Tecnologia dei Materiali dell'Università di Perugia. Il prof. Torre è stato Presidente del SAMPE (Society of Advancement of Material and Process Engineering) Europe nel 2008 e nel 2009 e SAMPE Global President nel 2016 siede tuttora nel Consiglio di Amministrazione di SAMPE Global. Il prof Torre ha pubblicato più di 180 articoli scientifici su riviste internazionali.



Ing. Roberto Petrucci

Roberto Petrucci è Roberto Petrucci (Terni, Italia, 1973) si è laureato in ingegneria dei materiali a Febbraio 2002 ed ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale nel 2005 in entrambi i casi presso l'Università degli studi di Perugia (2005) discutendo la tesi sullo "Studio e l'ottimizzazione delle tecniche Liquid Moulding per la produzione dei materiali compositi basati su matrici termoindurenti". E' stato ricercatore post-doc presso l'Università di Perugia, dove ha rivestito anche il ruolo di responsabile del Laboratorio di Processo dei materiali polimerici, compositi e nanocompositi. Oltre a questo, si occupa dello sviluppo di studi LCA su processi e prodotti. Recentemente è stato anche dipendente part time presso il centro Europeo sui Polimeri Nanostrutturati (ECNP Scarl), per il quale ha seguito diversi progetti europei su specifiche tematiche (LCA e nanotecnologie).



Dr. Franco Dominici

Franco Dominici è assegnista di ricerca del Gruppo di Scienza e Tecnologia dei Materiali, presso l'Università di Perugia. Si è laureato in Ingegneria dei Materiali ed in Ingegneria Industriale all'Università di Perugia ed ha ottenuto il Ph.D. Internazionale in Ingegneria Civile ed Ambientale presso l'Università di Firenze. Il Dr. Dominici si occupa di processo e caratterizzazione dei materiali, di polimeri e compositi ad alte prestazioni e di nanotecnologie; ha partecipato alle attività tecniche in più di dieci progetti europei e molti altri progetti di ricerca e sviluppo con enti ed aziende nazionali ed internazionali. L'ing. Dominici ha pubblicato più di 60 articoli scientifici ed è membro dell'editorial board di riviste internazionali.



Dr. Marco Rallini

Marco Rallini si è laureato con lode in Ingegneria dei Materiali presso l'Università degli Studi di Perugia nel 2009. Ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Materiali Innovativi nel 2013. Nel 2008 ha conseguito il titolo di Specialista in Tecniche Metallurgiche dopo un periodo di lavoro presso ThyssenKrupp - Acciai Speciali Terni. Nel 2009 ha frequentato lo Steelmaster presso ICSIM Franco Momigliano. I suoi temi di ricerca riguardano principalmente lo sviluppo e la caratterizzazione di materiali compositi e nanocompositi resistenti alle alte temperature. Durante il periodo di dottorato ha acquisito le capacità e le competenze per lo sviluppo e la caratterizzazione di compositi e nanocompositi basati su matrici polimeriche; è principalmente specializzato nella produzione di compositi fibro-rinforzati a matrice termoindurente (tecniche di liquid molding, stampaggio, hand lay-up), compositi a matrice elastomerica (estrusione, calandratura) e nella caratterizzazione di compositi e nanocompositi in termini di: proprietà meccaniche (trazione, flessione, compressione, durezza), termogravimetria (TG), calorimetria a scansione differenziale (DSC), analisi termo-meccanica (TMA), microscopia elettronica a scansione (SEM).