



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi LCA di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase

Giuseppe Di Florio, Maria Laura Parisi



DEPARTMENT OF
BIOTECHNOLOGY CHEMISTRY
AND PHARMACY
Department of Excellence
2018-2022

ANALISI LCA DI SISTEMI DI ACCUMULO DEL FREDDO BASATI SULL'UTILIZZO DI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

Giuseppe Di Florio, Maria Laura Parisi (Dipartimento Biotecnologie, Chimica e Farmacia - Università di Siena)

Con il contributo di: A.M. Atrei, C. Coppola, A. Sinicropi

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *4 - Reti energetiche integrate*

Linea di attività: *LA4.32 - Analisi LCA di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package (LA4.16-LA4.33): Luigi Mongibello, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi del ciclo di vita economico-ambientale di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Luigi Mongibello

Responsabile scientifico DBCF - UNISI: Prof. Maria Laura Parisi

Gli autori ringraziano i Proff. Adalgisa Sinicropi, Andrea Massimo Atrei e Riccardo Basosi per le utili discussioni sulle analisi effettuate per la costruzione degli inventari del ciclo di vita. Si ringrazia inoltre il DBCF - Dipartimento di Eccellenza MIUR 2018-2022.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-FISICA DEI CAMPIONI DI PCM PURETEMP15 E RUBITHERM RT15	5
2.2 COSTRUZIONE LCI PER PURETEMP15.....	7
2.3 IMPRONTA AMBIENTALE DEL PCM PURETEMP15	9
2.4 COSTRUZIONE LCI PER RUBITHERMRT15	12
2.5 IMPRONTA AMBIENTALE DEL PCM RUBITHERMRT15	12
2.6 CONFRONTO PERFORMANCE AMBIENTALI DEI PCM: RUBITHERM RT15 VS PURETEMP15.....	14
2.7 MODELLING DEL SISTEMA DI ACCUMULO DEL FREDDO.....	15
2.8 ANALISI DELLA CARBON FOOTPRINT DEL TANK PER ACQUA E PER PCM	17
2.9 ANALISI LCA DELL'IMPIANTO PER ACCUMULO DEL FREDDO	18
3 CONCLUSIONI.....	20
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21
5 APPENDICE: BREVE CV DEL GRUPPO DI RICERCA	22

Sommario

L'attività svolta nella prima annualità si è focalizzata sul calcolo delle performance ambientali ed energetiche attraverso la metodologia dell'analisi del ciclo di vita di sistemi di accumulo del freddo basati sull'impiego di materiali a cambiamento di fase a confronto con sistemi per l'accumulo del freddo convenzionali ad acqua. Per la costruzione degli inventari del ciclo di vita dei materiali a cambiamento di fase è stato condotto un lavoro dettagliato di analisi della letteratura scientifica di riferimento al fine di costruire dei modelli affidabili e quanto più rappresentativi dei sistemi indagati. In parallelo è stata sviluppata un'analisi di caratterizzazione chimico-fisica su due differenti tipologie di materiali a cambiamento di fase (paraffinico e bio-based), al fine di ottenere il maggior numero di informazioni riguardo la composizione chimica e le proprietà di questi materiali.

I risultati dell'analisi hanno permesso di identificare le principali fonti di impatto per tutte le configurazioni di impianto modellate, discriminando i diversi contributi su tutte le categorie analizzate. Inizialmente l'analisi LCA è servita per stabilire le caratteristiche peculiari dei diversi materiali a cambiamento di fase, in termini di profili ambientali. Ciò è stato propedeutico alla valutazione complessiva del sistema di refrigerazione, dotato di accumulo del freddo basato sui materiali a cambiamento di fase, e ne ha permesso il confronto con un sistema di refrigerazione con accumulo convenzionale (acqua) del freddo. In generale, l'eco-profilo del sistema di accumulo del freddo basato sul prodotto paraffinico RubithermRT15 è risultato essere il migliore per la gran parte degli indicatori analizzati, con qualche penalizzazione relativamente alle categorie di sfruttamento delle risorse fossili. Inoltre, con riferimento al sistema di refrigerazione convenzionale, l'analisi comparativa ha rivelato che l'utilizzo del materiale bio-based PureTemp15 aumenta l'impatto ambientale in diverse categorie, mentre l'utilizzo del RubithermRT15 determina un leggero miglioramento delle performance ambientali del sistema complessivo.

1 Introduzione

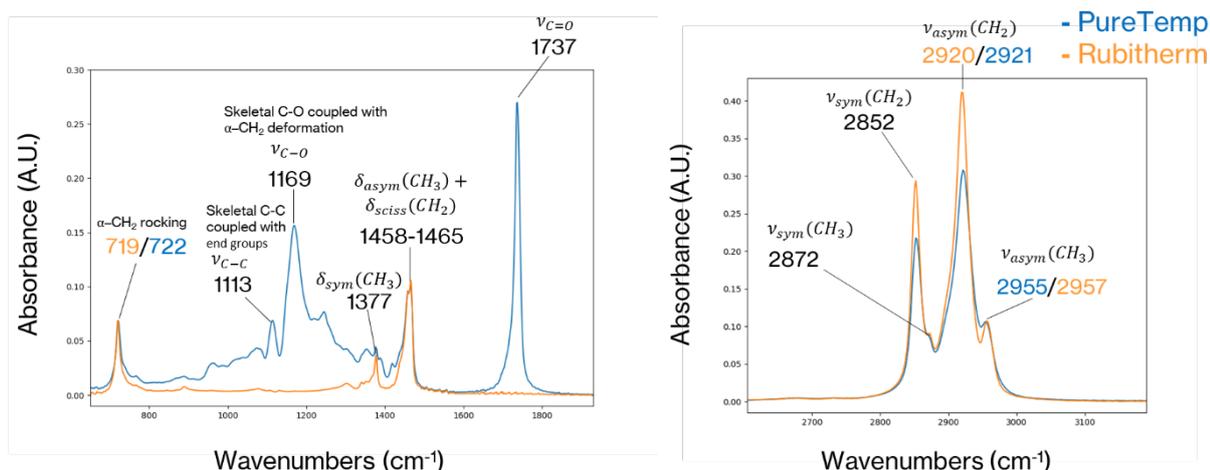
L'obiettivo della LA 4.32 è stato lo sviluppo di un'analisi del ciclo di vita (LCA) per il calcolo delle performance ambientali ed energetiche di sistemi di accumulo del freddo basati sull'impiego di materiali a cambiamento di fase (phase change material, PCM) a confronto con lo stesso sistema nella configurazione convenzionale ad acqua e l'identificazione delle criticità e dei carichi ambientali lungo le product chain individuate. Questa valutazione consentirà di fornire riscontri utili per la definizione delle caratteristiche finali di questi sistemi in una prospettiva di sostenibilità. I risultati LCA consentiranno inoltre di effettuare confronti chiari con le tecnologie concorrenti disponibili sul mercato.

L'LCA è un metodo analitico quantitativo che ha come scopo quello di comparare e analizzare gli impatti ambientali di prodotti, processi o servizi in accordo con i principi fondamentali definiti dall'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione nella famiglia di norme ISO 14040 [1,2]. Attraverso un'analisi LCA è dunque possibile valutare e quantificare gli impatti e i carichi energetici associati a tutte le fasi di un processo produttivo costruendo il cosiddetto inventario dei dati del ciclo di vita (LCI), che racchiude informazioni di tipo primario (dati specifici del sistema) o secondario (dati di letteratura o database) a partire dall'estrazione e lavorazione delle materie prime, passando per la fabbricazione del prodotto, trasporto, utilizzo, riuso, stoccaggio, riciclaggio, fino alla dismissione. Nell'ambito delle iniziative promosse dalla Unione Europea in campo LCA [3], l'analisi è stata svolta in ottemperanza ai requisiti definiti dalla famiglia delle norme ISO 14040 e delle più dettagliate ILCD Handbook Guidelines [4]. Per la caratterizzazione degli impatti ambientali (effetti Midpoint), si è scelto di utilizzare il metodo *Recipe 2016 (H)* nella versione 1.03 [5]. Poiché il metodo *Recipe 2016 (H)* consente di estendere la valutazione ad effetti di tipo secondario, l'analisi è stata estesa anche a livello di valutazione del danno (effetti Endpoint) in base alle categorie Human Health, Ecosystems and Resources, utilizzando fattori di normalizzazione e pesatura per produrre un risultato aggregato di tipo *Single Score*, misurato in termini della grandezza adimensionale Point (Pt). Per valutare il profilo energetico dei processi di produzione è stato utilizzato anche il metodo *single-issue* Cumulative Energy Demand (CED) [6], che considera sia gli usi diretti di energia che quelli indiretti (energia immagazzinata nei materiali) e permette di caratterizzare le diverse fonti energetiche (rinnovabili e non-rinnovabili), che contribuiscono all'impronta ambientale. Inoltre, per il calcolo della carbon footprint è stato utilizzato il metodo *single-issue* IPCC 2013 GWP [6] con una finestra temporale di 100 anni.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Caratterizzazione chimico-fisica dei campioni di PCM PureTemp15 e Rubitherm RT15

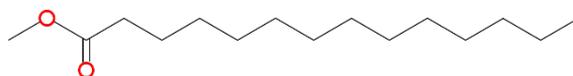
Al fine di costruire gli LCI per i due PCM utilizzati per la modellazione del sistema di accumulo del freddo, e quindi di reperire dati che consentissero di discriminare ulteriormente la loro struttura rispetto alle sole informazioni commerciali, si è proceduto con l'analisi strumentale per la caratterizzazione chimico-fisica dei campioni di PCM della Rubitherm®, il RubithermRT15, e della PureTemp®, PureTemp15.



Nei diagrammi riportati in Figura 1, vengono mostrati gli spettri FTIR-ATR dei due campioni PureTemp15 e Rubitherm RT15.

A destra nella figura appaiono le vibrazioni collegate allo “stiramento” (stretching) dei legami CH. Si notano quattro bande: due molto intense, riconducibili allo stretching simmetrico ed anti-simmetrico di gruppi metilenici CH₂, e due bande più deboli, riconducibili alle stesse vibrazioni, ma relativamente a gruppi metilici CH₃. Inoltre, non si nota nessuna evidenza di vibrazioni relative a gruppi idrossilici OH. Ciò è valido tanto per il PCM della Rubitherm® RubithermRT15 quanto per il PCM della PureTemp® PureTemp15. La conclusione che se ne può trarre è che entrambi i materiali sono costituiti da catene di CH₂, con gruppi CH₃ come gruppi terminali di catena. La regione della fingerprint, a sinistra nella figura, restituisce ulteriori informazioni rispetto alla struttura chimica. In questa regione dello spettro i due materiali si distinguono, pur condividendo alcune bande. Il PureTemp15 presenta un picco molto intenso a 1737 cm⁻¹, che denota la presenza di un gruppo carbonile (C=O) in catena. La posizione differisce da quella che si ha in un acido grasso, che generalmente si osserva a numeri d’onda più bassi, intorno a 1705 cm⁻¹. A 1169 cm⁻¹ si nota un picco attribuibile ad una vibrazione del gruppo C-O-C. Questi tre elementi (C=O a 1737 cm⁻¹, C-O-C a 1169 cm⁻¹ e assenza di bande attribuibili a gruppi OH) provano che il biobased PCM PureTemp15 non è costituito da un acido grasso, ma piuttosto da un estere di un acido grasso, la cui formula generale è $CH_3 - (CH_2)_n - COO - (CH_2)_m - CH_3$

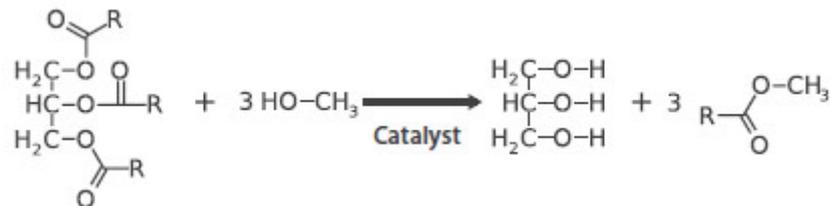
Dall’ulteriore analisi dello spettro infrarosso e delle proprietà termiche del materiale [7,8], si può avanzare l’ipotesi che al PureTemp15 corrispondano i valori n=12 ed m=0; in altre parole che si tratti di un metil-estere di un acido grasso, per la precisione dell’acido miristico (MyrAME).



La restante parte dello spettro del PureTemp15, così come avviene nella regione degli stretching CH, è del tutto simile per i due PCM. Questi picchi, infatti, sono tutti riconducibili a vibrazioni di catene di alcani (o idrocarburi). Intorno a 1460 e 1377 cm⁻¹ si trovano vibrazioni dell’angolo dei gruppi CH₂ e CH₃ ed a 720 cm⁻¹ la banda nota come rocking di catena. Il PCM Rubitherm® RT15, presentando unicamente le bande di una catena composta da gruppi CH₂ e CH₃ (probabilmente in posizione terminale), si rivela essere una cera paraffinica, co-prodotto dell’industria petrolchimica. Attualmente è in fase di valutazione la determinazione della lunghezza di catena (o in maniera equivalente il peso molecolare), per verificare la presenza di diverse frazioni (PCM miscela paraffinica) o di un’unica frazione (PCM di composizione omogenea).

2.2 Costruzione LCI per PureTemp15

Gli oli vegetali, così come i grassi e oli naturali di altra origine, possono essere idrolizzati o trasformati nei corrispondenti acidi grassi e glicerina. La reazione generale è presentata nello schema riportato in Figura 3:



Nella Tabella 1 sono riportate le percentuali delle due principali fonti per la produzione di acidi grassi [9], l'olio di cocco e l'olio di semi di palma. Per quanto riguarda l'acido miristico, gli intervalli sono 17-19% da olio di cocco e 15-17% da olio di semi di palma.

Tabella 1. Struttura del MyrAME con formula bruta C₁₅H₃₀O₂

Acido Grasso	Formula	Olio di Cocco (%)	Olio di Semi di Palma (%)
Caproico	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.2-0.8	0-1
Caprilico	C ₈ H ₁₆ O ₂	6-9	3-5
Caprico	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	6-10	3-5
Laurico	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	46-50	44-51
Miristico	C₁₄H₂₈O₂	17-19	15-17
Palmitico	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	8-10	7-10
Stearico	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2-3	2-3
Oleico	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	5-7	12-19
Linoleico	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	1-2.5	1-2

Non conoscendo l'origine del prodotto venduto dall'azienda PureTemp, l'LCI del MyrAME è stato costruito creando un modello che tenesse conto del volume di produzione su scala mondiale dell'olio di semi di palma e dell'olio di cocco.

Sintesi da olio di semi di palma:

Dall'analisi della letteratura [10] emerge che i due più grandi produttori (che coprono oltre l'80% della produzione totale) sono l'Indonesia e la Malesia con percentuali di produzioni rispettivamente pari al 68.7% e 31.3%. Sulla base di queste informazioni, si è assunto che il processo di produzione di 1 Kg di MyrAME contenga 0.687 Kg di prodotto derivante da olio di semi di palma indonesiano e 0.313 Kg di prodotto da olio di semi di palma malesiano.

Considerando la composizione dell'olio di semi di palma, il multi-output del processo oleochimico è rappresentato dai seguenti componenti:

- MyrAME - 14.17%
- Altri metil esteri (FAME) con numero di carboni variabile (C6, C8, C10, C12, C16 e C18) – 74.4%
- Glicerina – 11.43%

L'allocazione degli impatti è stata effettuata in termini di massa. I trasporti sono stati modellati come riportato di seguito:

- Dall'Indonesia (Giacarta) agli USA (San Francisco) in nave e da San Francisco a Minneapolis (sede della PureTemp) 50% in treno, 50% su gomma
- Dalla Malesia (Kuala Lumpur) agli USA (San Francisco) in nave e da San Francisco a Minneapolis (sede della PureTemp) 50% in treno, 50% su gomma

Sintesi da olio di cocco:

Dall'analisi della letteratura [11] emerge che i tre più grandi produttori (che coprono oltre l'80% della produzione totale) sono le Filippine, l'Indonesia e l'India con percentuali di produzioni rispettivamente pari al 52.4%, 31.8% e 15.8%. Sulla base di queste informazioni, si è assunto che il processo di produzione di 1 Kg di MyrAME contenga 0.524 Kg di prodotto derivante da olio di cocco filippino, 0.318 g da olio di cocco indonesiano e 0.158 Kg da olio di cocco indiano.

La produzione dell'olio di cocco nei tre Paesi è stata differenziata rispetto alla produzione del frutto, del mix energetico e dell'utilizzo dell'acqua che sono parametri geografici/locali specifici per i diversi Paesi. Il resto degli input, delle emissioni e la resa sono stati assunti uguali nei diversi Paesi, in quanto per lo più specifici del processo di produzione stesso. Inoltre, si è ipotizzato che il processo di transesterificazione con olio di cocco richieda gli stessi quantitativi di input di energia, di catalizzatore di reazione ed altri input secondari (e.g. impianto produzione) del processo con olio di semi di palma. Naturalmente sono stati modificati gli input (olio e metanolo) e gli output (MyrAME, glicerina ed altri FAME), coerentemente con la composizione dell'olio di cocco.

Considerando la composizione dell'olio di semi di palma, il multi-output del processo oleochimico è rappresentato dai seguenti componenti:

- MyrAME - 15.83%
- Altri FAME con numero di carboni variabile (C6, C8, C10, C12, C16 e C18) – 72.12%
- Glicerina – 12.05%

L'allocazione degli impatti è stata effettuata in termini di massa. I trasporti sono stati modellati come riportato di seguito:

- Dall'Indonesia (Giacarta) agli USA (San Francisco) in nave e da San Francisco a Minneapolis (sede PureTemp) 50% in treno, 50% su gomma
- Dalle Filippine (Manila) agli USA (San Francisco) in nave e da San Francisco a Minneapolis (sede PureTemp) 50% in treno, 50% su gomma
- Dall'India (Calcutta) agli USA (San Francisco) in nave e da San Francisco a Minneapolis (sede PureTemp) 50% in treno, 50% su gomma

2.3 Impronta Ambientale del PCM PureTemp15

L'implementazione della fase di calcolo degli impatti ambientali ha permesso di ottenere l'impronta ambientale del PureTemp15. Nel seguito sono presentati i risultati relativi alla produzione di 1 Kg di PureTemp15, seguendo i due scenari alternativi:

- 1) MyrAME è ottenuto da olio di semi di palma
- 2) MyrAME estere di acido miristico è ottenuto a partire da olio di cocco

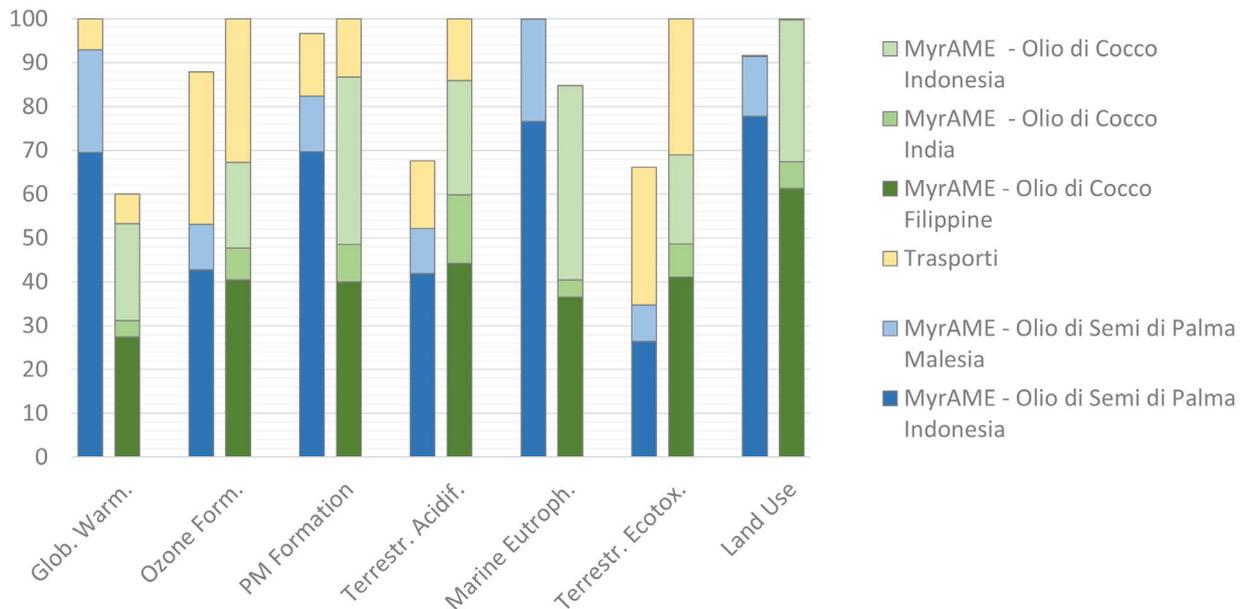


Figura 4. Confronto con metodo il ReCiPe 2016 Midpoint (H) v 1.03 dei due scenari per la produzione di PureTemp15

Si nota che in alcune categorie (Global Warming, Marine Eutrophication) la filiera di produzione più impattante è quella ottenuta a partire dall'olio di semi di palma. In altre categorie (Terrestrial acidification, Terrestrial ecotoxicity, Ozone Formation), invece, il processo ambientalmente più gravoso è quello basato sulla produzione da olio di cocco. Nelle restanti categorie mostrate in Figura 4 (PM formation, Land use), l'impatto è sostanzialmente molto simile per i due scenari. Sebbene il contributo dei trasporti sia tutt'altro che trascurabile, specialmente in alcune categorie (Ozone formation, Terrestrial ecotoxicity), le differenze tra i due scenari sono molto ridotte. Le differenze, anche importanti, che si stabiliscono in alcune categorie di impatto sono da imputare quasi totalmente alle diverse fasi e processi coinvolti nelle due coltivazioni, nell'estrazione del relativo olio, nella composizione dell'olio in termini di acidi grassi, etc.

Nel dettaglio delle diverse categorie di impatto, osserviamo i seguenti contributi percentuali per ciascuno scenario:

Global Warming

Olio di Semi di Palma: trasporti 7%; metanolo utilizzato per la transesterificazione 1%; le emissioni dirette dovute alla coltivazione della palma e ai processi di cambiamento di utilizzo del suolo (67% palma Indonesia e 22.3% palma Malesia)

Olio di Cocco: trasporti 11.2%, in effetti in valore assoluto solo leggermente inferiori allo scenario di produzione da olio di semi di palma e quindi percentualmente incidente in misura maggiore. Il contributo maggiore viene anche in questo caso, a cascata, dalle emissioni correlate alla coltivazione delle piantagioni di cocco (39.9% cocco Filippine, 32.7% cocco Indonesia e 3.8% cocco India), alla produzione dell'olio e alla successiva produzione del MyrAME, che ammonta complessivamente a 45.7% MyrAME (Filippine), 37% MyrAME (Indonesia) e 6.1% MyrAME (India). Il metanolo utilizzato per la transesterificazione conta per il 2.5%.

Ozone Formation

Olio di Semi di Palma: Il profilo ambientale per questa categoria risulta piuttosto complesso. Ad esso contribuiscono sia i trasporti (39.6%) sia la produzione del metil-estere (48.6% da olio indonesiano e 11.8% da olio malese). Per il materiale di origine biologica, sono le piantagioni con emissioni dirette, uso di diesel nelle macchine agricole e l'uso di fertilizzante a dare origine all'impatto ambientale.

Olio di Cocco: come nel caso dello scenario di produzione da olio di semi di palma, il profilo ambientale è caratterizzato da più contributi: quello dei trasporti (32.7%) e quello della produzione del metil-estere (40.5% da olio filippino, 7.3% da olio indiano e 19.5% da olio indonesiano). L'interpretazione del dato, come nel caso di olio di semi di palma, attribuisce alle emissioni delle piantagioni, all'uso di diesel nelle macchine agricole e all'uso di fertilizzanti l'origine del danno ambientale.

Fine Particulate Matter Formation

Olio di Semi di Palma: Il 72% deriva dalla produzione di MyrAME con olio indonesiano. Per questo scenario, su questa categoria pesano i processi legati alla coltivazione delle piantagioni, ma anche il mix energetico utilizzato in Indonesia. Nel processo di transesterificazione l'uso dell'elettricità contribuisce per il 6%. Un ulteriore contributo viene dallo smaltimento del legno. I trasporti influiscono per il 14.8%.

Olio di Cocco: Anche in questo caso, è rilevante il ruolo dell'elettricità, che è di circa 7.3% nei processi che avvengono nelle Filippine, principalmente per l'irrigazione dei campi e la produzione dell'olio, e circa 14.7% nei processi che avvengono in Indonesia (qui il mix energetico si rivela molto oneroso per le emissioni di polveri sottili), quali la produzione dell'olio e secondariamente l'energia per il processo di transesterificazione dell'olio stesso.

Terrestrial Acidification

Olio di Semi di Palma: Nella voce trasporti (22.7%) quelli marittimi incidono particolarmente (principalmente per le emissioni di anidride solforosa). Per quanto riguarda la parte vegetale, sono le emissioni di ammoniaca delle piantagioni di palme ad originare l'impatto in questa categoria.

Olio di Cocco: Tanto per i trasporti (14.1%), quanto per la produzione del metil-estere (85.9%), valgono le considerazioni fatte per lo scenario precedente.

Marine Eutrophication

Olio di Semi di Palma ed Olio di Cocco: L'impatto è per la quasi totalità a carico delle emissioni in acqua di nitrati dovuti alle coltivazioni. Si fa presente che nel caso della categoria Freshwater Eutrophication (non mostrata in Figura 4), che dà conto delle emissioni di fosfati, è lo scenario da olio di cocco a presentare gli impatti maggiori (in questo caso sono molteplici i fattori che contribuiscono).

Terrestrial Ecotoxicity

Olio di Semi di Palma: In questa categoria i trasporti sono particolarmente impattanti (47.5%), in larghissima misura per il trasporto su gomma. Per ciò che riguarda la produzione del PCM, le emissioni si concentrano nel processo di produzione dell'olio ed in diversi processi connessi con le colture (uso di fertilizzanti, diesel per le macchine agricole, fasi di aratura).

Olio di Cocco: le fasi che contribuiscono maggiormente sono le stesse che per lo scenario da olio di semi di palma. Processi di maggiore entità connessi alle coltivazioni determinano la prevalenza di questo scenario.

Nelle altre categorie di tossicità (non mostrate in Figura 4) il contributo dei trasporti diminuisce e gli impatti maggiori sono associati allo scenario di produzione da olio di cocco. I contributi sono diversificati lungo tutta la catena che porta dalle coltivazioni, con le sue diverse fasi, alla produzione dell'olio. Minore risulta l'impatto del processo di transesterificazione. Fa eccezione il metanolo (circa 5%) nella categoria di tossicità umana non cancerogena per lo scenario di produzione da olio di semi di palma. In questa stessa categoria, le ceneri di legno hanno un contributo elevato (scenario da olio di semi di palma).

Land Use

Olio di Semi di Palma e Olio di Cocco: In questa categoria l'impatto è chiaramente tutto a carico dell'occupazione e del cambio di destinazione del suolo, da parte delle piantagioni.

In relazione esclusivamente al processo oleochimico di produzione del MyrAME, un'analisi con il metodo ReCiPe 2016 (H) rivela che il contributo più significativo, e spesso del tutto predominante, è l'olio in

ingresso al processo. L'unica categoria che presenta una maggiore diversificazione nei contributi, mettendo in luce l'apporto di altri elementi del processo di transesterificazione, è la Fossil resource scarcity.

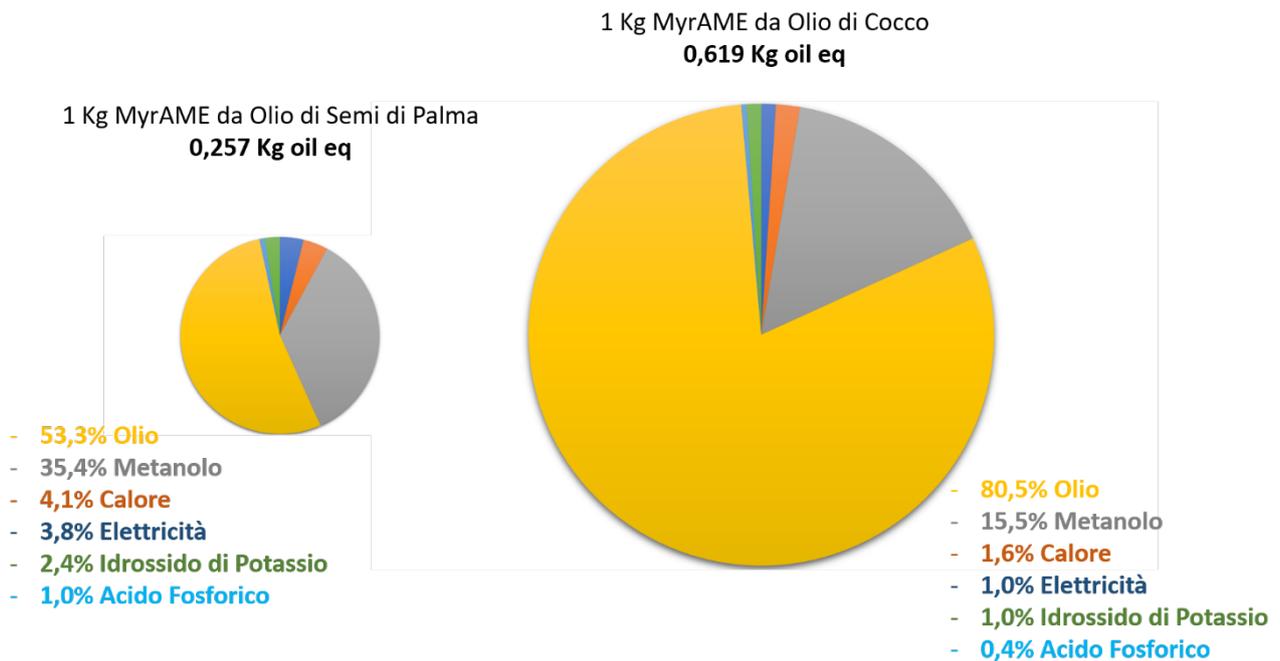


Figura 5. Analisi dei contributi all'impatto sulla categoria Fossil resource scarcity dei due scenari analizzati. Metodo di calcolo utilizzato ReciPe 2016 Midpoint (H)

Nel seguito viene discusso la domanda energetica complessiva coinvolta nel processo di produzione di 1 Kg di PureTemp15, calcolata con il metodo CED.

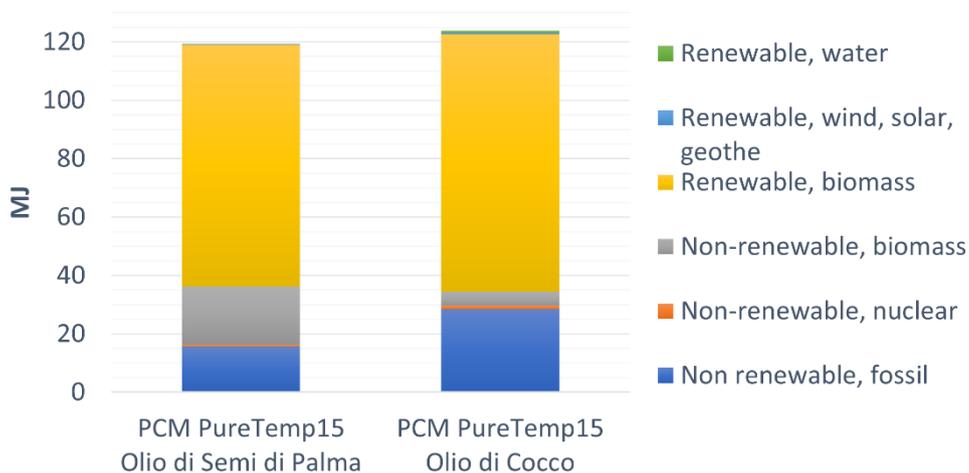


Figura 6. Confronto CED (LHV) v. 1.00 tra i due scenari per 1 Kg PCM PureTemp15, con la produzione di MyrAME dalle due fonti vegetali analizzate.

Come mostra la Figura 6, in termini assoluti, il CED relativo alla produzione di PureTemp15, nello scenario di produzione da olio di cocco, è di 123.8 MJ/Kg, mentre se l'olio vegetale di partenza è olio di semi di palma questo valore scende a 119.4 MJ/Kg. La differenza è principalmente dovuta ad una maggiore quantità di energia non rinnovabile da fonti fossili nello scenario di produzione da olio di cocco. In termini percentuali, la quota di fossile è del 23% nello scenario di produzione da olio di cocco e 13% nello scenario di

produzione da olio di semi di palma. Questa differenza si riscontra nell'uso di diesel per i macchinari utilizzati nel processo di coltivazione (irrigazione e sistemi per le colture) nelle piantagioni di cocco, specialmente per la quota spettante alle Filippine. Per entrambi gli scenari analizzati la quota CED da fonti rinnovabili è molto elevata – 69.6% per lo scenario di produzione olio di semi di palma e 72.2% per quello da olio di cocco – ed attribuibile per la quasi totalità a energia rinnovabile da biomassa. In altri termini, questo contributo è dovuto all'energia di feedstock contenuta nei frutti di partenza. Unitamente all'energia rinnovabile da biomassa, si ha un contributo di non-rinnovabile da biomassa che, in questo caso, risulta maggiore per lo scenario di produzione da olio di semi di palma (16.9%). Diversamente, il contributo al CED da biomassa non-rinnovabile per lo scenario di produzione da olio di cocco è piuttosto esiguo e pari a 3.9%. L'origine risiede nel cambio di destinazione del suolo da coltivazioni per il raccolto a coltivazioni per altri usi; questa voce e le conseguenti differenze potrebbero dipendere dalla composizione specifica dei processi presenti nel database Ecoinvent [12]. Per quanto riguarda i trasporti, il contributo al CED è compreso tra il 5% ed il 6% in entrambi gli scenari, di cui in larghissima parte di origine fossile. Da ultimo si riporta che, rispetto al processo di transesterificazione, la percentuale relativa al metanolo risulta piuttosto bassa, intorno al 2.9% per lo scenario di produzione da olio di semi di palma e 3.2% per lo quello da olio di cocco, in larga misura non-rinnovabile da fonti fossili, e per gli altri materiali e processi ancor meno.

2.4 Costruzione LCI per RubithermRT15

La caratterizzazione chimico-fisica ha permesso di identificare il PCM della Rubitherm® RT15 come una n-paraffina, ovvero un alcano di formula generica C_nH_{2n+2} . Le cere paraffiniche sono un derivato dell'industria petrolchimica, composte da una miscela di idrocarburi – generalmente con un numero di carboni in catena compreso tra 20 e 40 – e con un punto di fusione che varia in una finestra tra i 40 ed i 70°C circa. Il punto di fusione del Rubitherm® RT15, come da scheda tecnica, è compreso tra i 10 ed i 17°C (centro del picco a 14°C). Ciò fa propendere per una composizione del PCM fatta soprattutto di alcani a catena corta (n-pentadecano $C_{15}H_{32}$, n-esadecano $C_{16}H_{34}$, n-eptadecano $C_{17}H_{36}$, etc.). Come già specificato, sono ancora in corso analisi per determinare l'effettiva composizione del PCM, in termini specialmente di lunghezza delle catene alchiliche presenti e dell'omogeneità del campione (presenza di uno o più pesi molecolari, in quali proporzioni, etc.)

Nel database Ecoinvent v3.6 è presente il record “*paraffin*” che include gli input, sia di materia che di energia, e le emissioni del processo di derivazione delle n-paraffine dal petrolio. Questa voce non include alcun riferimento alla composizione precisa della paraffina, né tantomeno un ulteriore processo di raffinamento per la separazione di frazioni di n-alcani con un preciso peso molecolare. Tale voce del database è stata quindi utilizzata come una prima approssimazione del processo di produzione del Rubitherm® RT15, che sarà affinata nel proseguimento del progetto, una volta ottenute le informazioni chimico-fisiche necessarie a definirne più precisamente la composizione.

Ulteriori assunzioni effettuate per la costruzione del modello LCA sono:

- Si è ipotizzato che il processo di derivazione della paraffina avvenga in Germania, dove ha sede la Rubitherm (Berlino); quindi il mix energetico, l'acqua di processo ed il trattamento dei rifiuti hanno collocazione DE
- I trasporti delle materie prime sono stati modellati secondo le statistiche Eurostat sui trasporti e suddivisi tra trasporti su rotaia, su gomma e su acque interne. Le tonnellate-kilometro (tkm) sono una media ponderata tra la distanza media che le merci percorrono in Europa, e la quantità di merce che viaggia su un determinato trasporto. Il settore industriale di riferimento è quello riguardante i prodotti chimici, plastiche, etc.

2.5 Impronta Ambientale del PCM RubithermRT15

L'implementazione della fase di calcolo degli impatti ambientali ha permesso di ottenere l'impronta ambientale del RubithermRT15. Nel seguito sono presentati i risultati relativi alla produzione di 1 Kg di

RubithermRT15, calcolati con il metodo ReCiPe 2016 Midpoint (H). Sette categorie sono state scelte come rappresentative dei diversi impatti e analizzate in dettaglio.

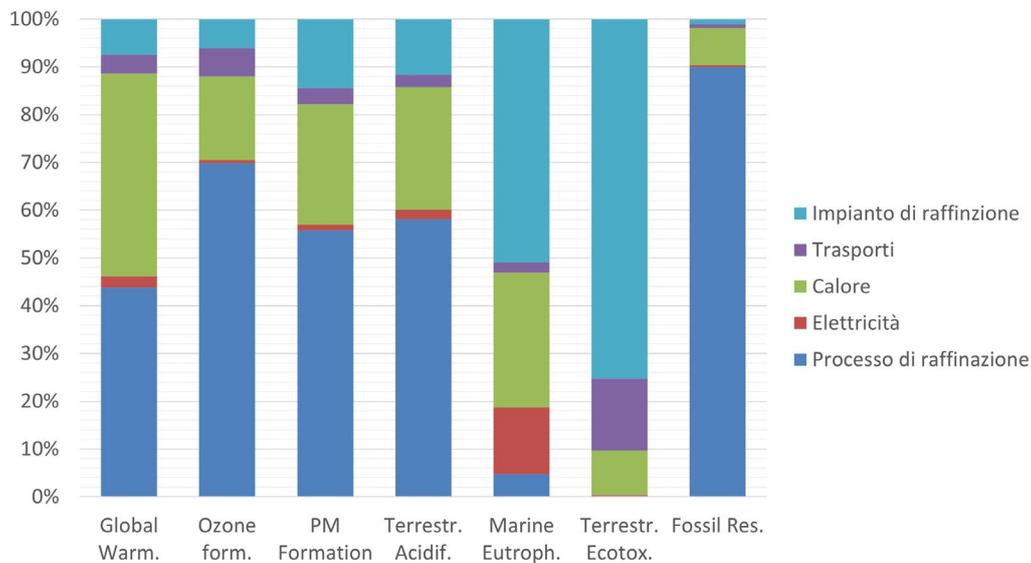


Figura 7. Analisi con metodo ReCiPe 2016 Midpoint (H) del processo di produzioni di 1 Kg di Rubitherm RT15

Di seguito si discutono i contributi percentuali dei differenti input e delle fasi di produzione per ciascuna categoria di impatto:

Global Warming

I contributi maggiori vengono dall'emissioni nel processo di raffinazione (43.6%) e dalla produzione di calore via gas naturale (42.3%). Oltre il 95% di queste sono emissioni dirette di anidride carbonica in atmosfera. Il restante 5% sono emissioni di metano. Trasporti (3.8%), impianto di raffinazione (7.5%) e produzione di elettricità (2.3%) incidono in misura molto minore.

Ozone Formation

In questa categoria si nota un contributo particolarmente elevato del processo stesso di produzione di paraffina (69.8%). L'elevato valore è collegato a due tipi di emissioni: NMVOC (composti organici volatili diversi dal metano), quasi totalmente a carico del processo di raffinazione, e ossidi di azoto, di cui il 69% emessi dal processo di produzione e la restante parte dovuta alla produzione del calore, dall'impianto e dai trasporti.

PM Formation

Nella formazione di polveri sottili, le fasi più impattanti danno un apporto così suddiviso: raffinazione (55.8%), calore (25.2%) ed impianto (14.5%). Le sostanze responsabili dell'impatto sono l'anidride solforosa con il 64.2%, gli ossidi di azoto con il 22.1% ed il particolato con il 13.0%. Queste sostanze sono emesse in atmosfera dalle diverse fasi in maniera circa proporzionale all'impatto complessivo.

Terrestrial Acidification

Le percentuali in questa categoria di impatto sono molto simili a quelle della categoria PM Formation. Nello specifico, per il processo di raffinazione si ha un contributo del 58.1%, per la produzione di calore del 25.6% e per l'impianto del 11.6%. In questa categoria, come nella precedente, le emissioni provengono principalmente dal processo di raffinazione della paraffina, più quelle derivanti dal processo di produzione di rame, utilizzato nell'impianto, e di una quota di calore ottenuta da carbone. Anche in questo caso, anidride solforosa ed ossidi di azoto sono responsabili dell'effetto di acidificazione.

Marine Eutrophication

In questa categoria, come nella categoria Terrestrial Ecotoxicity, si nota un elevato contributo dell'impianto di raffinazione (50.6%). A nostro avviso, questo può essere indice di un limite nel record del database utilizzato. Sebbene in altre categorie di impatto si osservino percentuali inferiori, la forte prevalenza di un input con un valore dell'ordine di 10^{-10} – rispetto alla produzione totale di un intero impianto durante il suo ciclo di vita, la produzione di 1 Kg di paraffina è considerato equivalente ad un fattore di 10^{-10} - potrebbe

dipendere dalla sottostima di altre voci di processo. Fornitura di calore ed elettricità per il processo contribuiscono rispettivamente per il 28.0% e 13.9%.

Terrestrial Ecotoxicity

Anche per la Terrestrial Ecotoxicity il contributo dell’impianto di raffinazione è molto pronunciato (75.2%). A seguire ci sono i trasporti con il 15.0% e la fornitura di calore con il 9.3%. L’impatto in questa categoria è da attribuire, quasi totalmente, alla produzione di rame e le emissioni nell’ambiente associate ad esso.

Fossil Resources

L’ultima categoria analizzata è quella relativa allo sfruttamento delle risorse fossili. Data l’importanza di questa categoria, relativamente al materiale di cui è composto il PCM della Rubitherm®, si è preferito analizzare questa categoria, piuttosto che la meno informativa, nel caso specifico, Land Use. Lo sfruttamento di petrolio grezzo nella produzione di paraffina incide per il 90% rispetto al totale della categoria d’impatto. In misura molto minore si osserva l’incidenza nello sfruttamento di gas naturale e del carbone.

Relativamente dell’analisi dell’indicatore CED per la produzione di 1 Kg di RubithermRT15, questo si presenta particolarmente poco articolato, con il 98% derivante da energia non rinnovabile di origine fossile, di cui 88% dal petrolio, dal quale si ottiene la paraffina, ed il restante 10% suddiviso tra elettricità, calore e trasporti.

2.6 Confronto performance ambientali dei PCM: Rubitherm RT15 vs PureTemp15

Successivamente all’analisi degli eco-profilo dei processi di produzione, le performance ambientali dei due PCM sono state messi a confronto per evidenziarne le differenze di sostenibilità ambientale, i punti di forza e quelli di debolezza, nelle diverse categorie di impatto. Al fine di rendere il paragone più congruo, relativamente ad un’applicazione di storage energetico, il confronto è stato effettuato utilizzando come unità funzionale l’energia immagazzinabile (1 MJ). In considerazione dei diversi valori di *Heat Storage Capacity* associati ai due PCM, per la precisione 0.182 MJ/Kg per il PureTemp15 e 0.155 MJ/Kg per il RubithermRT15, all’energia di 1 MJ corrispondono quindi:

- 5.49 Kg di PureTemp15
- 6.45 Kg di RubithermRT15

Per il PCM della PureTemp® sono stati presi in considerazione entrambi gli scenari di produzione del PCM, come descritto precedentemente.

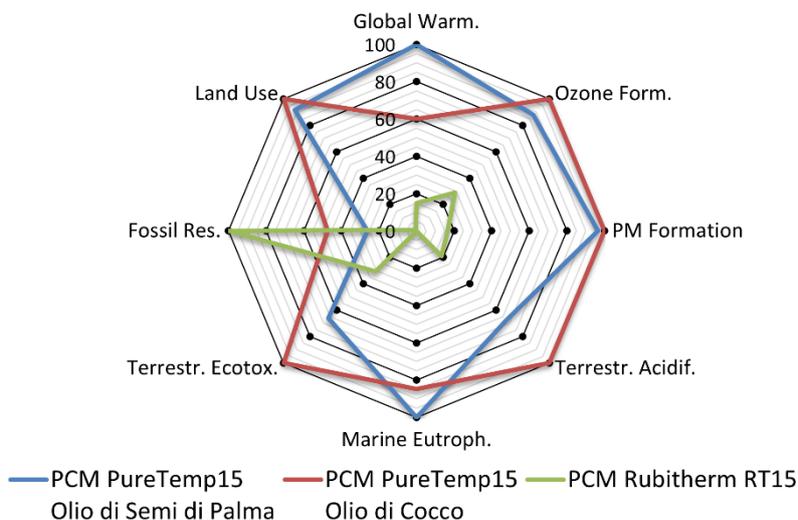


Figura 8. Confronto con metodo ReCiPE 2016 Midpoint (H) dei due PCM analizzati. L’analisi si riferisce al quantitativo di PCM necessario ad immagazzinare 1MJ di energia. Per il PCM biobased sono stati messi a confronto entrambi gli scenari di produzione

Nel grafico radiale, che mette a confronto il PCM PureTemp® prodotto da oli vegetali con il PCM Rubitherm® da fonti fossili, si notano delle importanti differenze tra i due materiali. In categorie come Fossil Resource Scarcity e Land Use, l'origine del materiale diventa determinante: nella categoria Land Use il PCM Rubitherm® ha un impatto minimo, inferiore all'1% rispetto al PCM della PureTemp®. Al contrario, nella Fossil Resource Scarcity il PCM Rubitherm® presenta l'impatto maggiore, mentre al PureTemp15 prodotto da olio di semi di palma corrisponde un valore pari ad un quinto. La Fossil Resource Scarcity è l'unica categoria di impatto dove il Rubitherm® RT15 mostra il contributo più elevato, per tutte le altre categorie è il PureTemp15 (nelle categorie Global Warming e Marine Eutrophication con lo scenario di produzione da olio di semi di palma come olio vegetale di partenza) a presentare i valori più grandi. In maniera alquanto inaspettata, l'impatto associato al Rubitherm RT15 è sempre al di sotto del 20%, fatta eccezione per Fossil Resource Scarcity (100%), Ozone Formation (29%) e Terrestrial Ecotoxicity (31%). Si ritiene che la forte differenza tra i due materiali in alcune categorie di impatto sia dovuta alla diversa complessità e grado d'approfondimento degli inventari utilizzati. Successive fasi di integrazione degli LCI, in special modo per quanto concerne l'estrazione e la raffinazione della paraffina, potrebbero sia limare le notevoli differenze osservate sinora che confermare le diverse performance ambientali dei due PCMs.

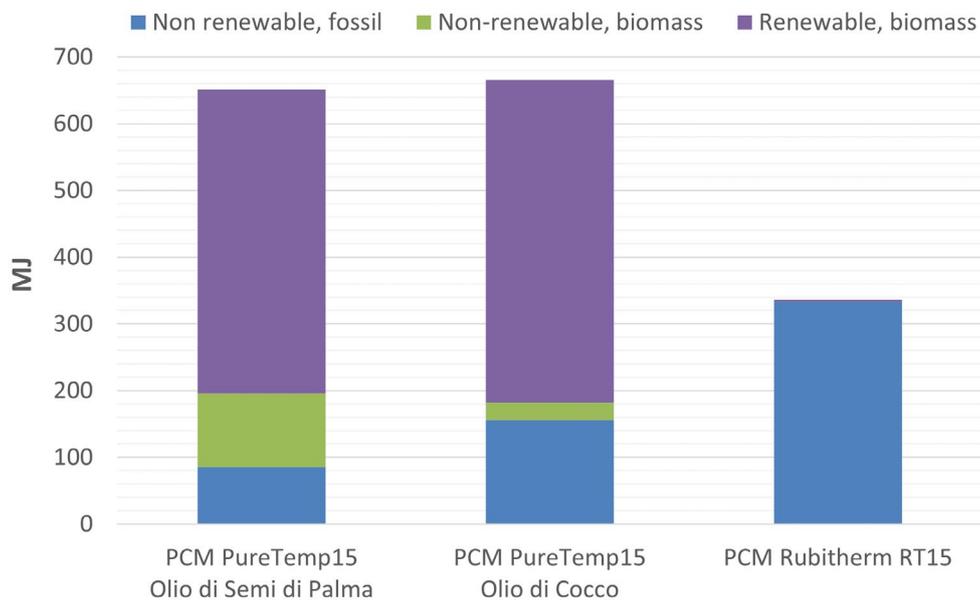


Figura 9. Confronto con il metodo CED per i due PCM

La domanda energetica complessiva per i singoli materiali è stata già discussa nei precedenti paragrafi. Come mostrato nella Figura 9, si fa qui notare che per entrambi gli scenari di produzione del PureTemp15 il CED (655.6 MJ per lo scenario di produzione da olio di semi di palma e 679.7 MJ per quello da olio di cocco) è maggiore che nel Rubitherm® RT15 (339.2 MJ). Ciononostante, la componente di non-rinnovabili risulta maggiore per il PCM paraffinico, essendo pari a 335.3 MJ e determinato per il 99% da fonti fossili, mentre per il PureTemp15 questa si attesta a 198.9 MJ, per lo scenario di produzione da olio di semi di palma, e 189.0 MJ, per lo scenario da olio di cocco. Inoltre, la componente fossile risulta essere di 85.5 MJ nel caso di uso di olio di semi di palma e 155.6 MJ nel caso di olio di cocco.

2.7 Modelling del sistema di accumulo del freddo

Il sistema di accumulo del freddo è stato modellato sulla base delle informazioni e seguendo il layout descritto nel lavoro di L. Mongibello e G. Graditi del 2016 [13], riportato nello schema sottostante.

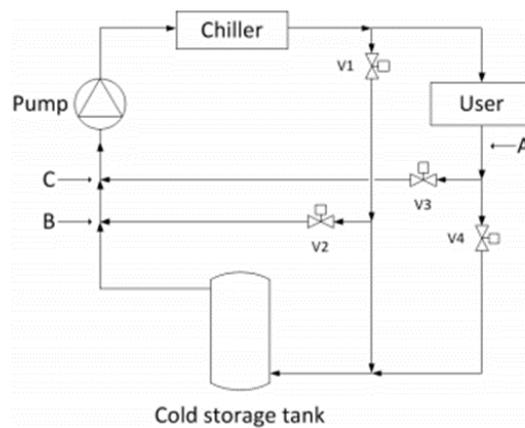


Figura 10. Layout del sistema di accumulo del freddo (adattato da [6]).

E' stato quindi effettuato il modelling delle seguenti componenti:

- Un chiller della capacità nominale di 4 kW e potenza assorbita 1.27 kW. Il modello del chiller è stato costruito a partire da una voce già esistente nel database Ecoinvent v3.6 "Absorption chiller, 100 kW". Tale entry è stata dimensionata in modo da accordarsi con le specifiche dell'impianto. Inoltre, rispetto al layout mostrato, corrisponde ad una configurazione pump+chiller.
- Quattro valvole a sfera, munite di attuatore elettromeccanico. Il corpo valvola è di ottone nichelato, su cui è stato stimato il processo di coating per la nichelatura. La sfera è in acciaio inossidabile, gli o-ring in gomma EPDM (Ethylene-Propylene Diene Monomer) approssimati con gomma sintetica e l'alloggiamento in Teflon (PTFE). L'attuatore elettromeccanico, dal peso di 950 g, è stato modellato con un case in polipropilene (PP), una parte in acciaio non legato, una elettronica, che simula un generico elemento passivo, e cavi rivestiti in polivinilcloruro (PVC).
- 25 metri di tubi corrugati in acciaio inox AISI 304, con rivestimento isolante in polietilene espanso. Il modello per il rivestimento di 6 mm in polietilene (PE) espanso è stato costruito considerando un processo di estrusione con un espandente. Sono stati considerati quattro espandenti (Butano, CO₂, HFC-134a e HFC-152a) e si è effettuata una stima delle proporzioni rispetto ai volumi di produzione: 40% CO₂, 40% Butano, 10% HFC-134a e 10% HFC-152a.
- Il cold storage tank è stato modellato secondo due tipologie costruttive differenti: (i) un serbatoio commerciale da 888 litri, nel caso che l'impianto di refrigerazione preveda acqua come mezzo di storage del freddo e (ii) un serbatoio commerciale da 212 litri modificato, nel caso l'impianto preveda l'utilizzo di PCM come mezzo di storage del freddo. Il serbatoio da 888 litri, commercializzato dalla azienda Boilernova, è in acciaio ricoperto da uno strato isolante in poliuretano rigido dallo spessore di 100 mm. I dati sono in parte ricavati dalle schede tecniche della casa madre ed in parte ricevuti direttamente dal costruttore. Per quanto riguarda il serbatoio da 212 litri, questo è un serbatoio in acciaio rivestito con poliuretano (PU), modello di più piccole dimensioni prodotto dalla stessa azienda, e modificato con l'aggiunta di 68 tubi di acciaio da ¼" e due piastre, anch'esse in acciaio. I tubi sono saldati all'interno del serbatoio e le piastre fungono da plenum, così da ottenere un serbatoio tipo "shell and tube". Da ultimo, è stata considerata la possibilità di utilizzo di due materiali costruttivi, acciaio inossidabile AISI 316L ed acciaio al carbonio smaltato. Il processo di smaltatura è stato modellato modificando un processo analogo esistente nel database Ecoinvent v3.6. I due materiali sono stati usati alternativamente in due scenari, al fine di valutare l'impatto ambientale delle due scelte costruttive.

2.8 Analisi della carbon footprint del tank per acqua e per PCM

L'obiettivo generale dell'attività della prima annualità è stato quello di sviluppare una valutazione del profilo ambientale del sistema per accumulo del freddo, come descritto in Figura 10. Una volta costruito l'inventario del ciclo di vita completo per il sistema, è stata condotta un'analisi comparativa della carbon footprint con il metodo IPCC 2013 GWP 100a v1.03 delle due tipologie costruttive, con un focus sul confronto tra serbatoio per acqua ed il serbatoio per PCM. La scelta del metodo single issue dell'IPCC per il calcolo degli impatti sulla categoria del global warming è stata fatta in quanto sufficientemente rappresentativo del profilo dei sistemi analizzati; in altre parole, gli impatti in altre categorie, come quelle ottenibili con il metodo ReCiPe, restituiscono risultati molto simili al GWP.

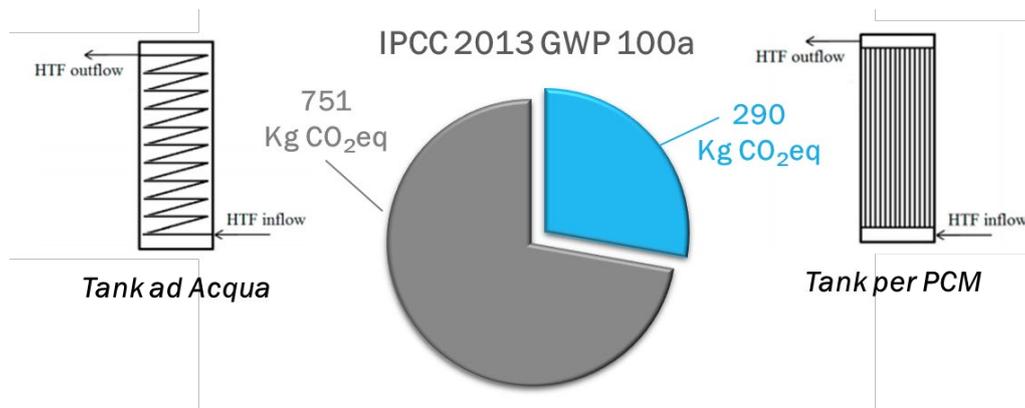


Figura 11. Confronto tra serbatoi per accumulo del freddo con acqua e con PCM. Entrambi i serbatoi sono del tipo all'acciaio al carbonio smaltato. Metodo di calcolo utilizzato IPCC 2013 GWP 100°

Dal confronto della carbon footprint due serbatoi, come mostrato in Figura 11, si evince che il tank per accumulo del freddo con acqua è molto più impattante rispetto al serbatoio "shell and tube", costruito *ad hoc* per l'accumulo del freddo con PCM. In termini di CO₂ equivalente, la costruzione di un serbatoio per acqua origina un valore di emissioni 2.6 volte maggiore: 751 CO₂eq rispetto a 290 CO₂eq. Sebbene al serbatoio "shell and tube" siano associate una serie ulteriore di lavorazioni meccaniche, il peso ridotto, e quindi l'utilizzo di un quantitativo minore di materiali molto impattanti come l'acciaio, determina un impatto complessivo minore rispetto al più voluminoso serbatoio per acqua.

È stata successivamente eseguita un'analisi di sensitività sul materiale di costruzione dei serbatoi. La Figura 12 sottostante mostra i risultati dell'analisi, ottenuti con il metodo IPCC 2013 GWP 100a, per un serbatoio "shell and tube" per PCM, costruito alternativamente in acciaio al carbonio smaltato oppure in acciaio AISI 316. All'acciaio inossidabile è associato un quantitativo di emissioni di gas climalteranti molto superiore (2.5 volte) al materiale alternativo. L'acciaio al carbonio subisce un processo di smaltatura per preservarlo da fenomeni di corrosione e con tale tecnica si evita l'utilizzo di acciai inossidabili.

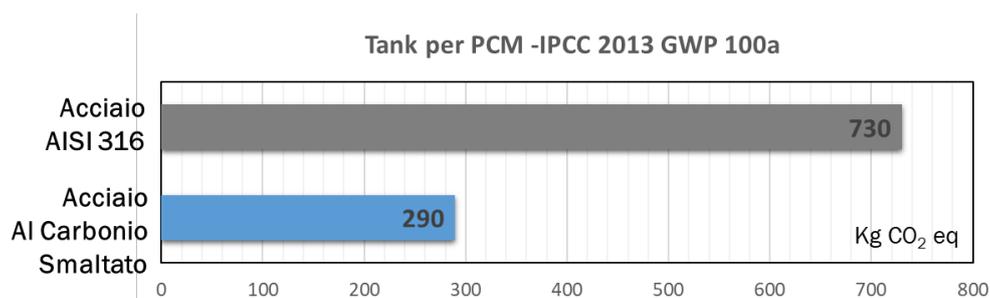


Figura 12. Confronto con metodo IPCC 2013 GWP 100a tra un serbatoio "shell and tube" costruito in AISI316 ed uno costruito in acciaio al carbonio smaltato

Sebbene il processo di smaltatura presupponga l'utilizzo di vernici, l'impatto della relativa lavorazione di verniciatura, risulta minore in termini ambientali rispetto all'utilizzo di acciai speciali, perlomeno nell'applicazione in esame. Ciò che rende particolarmente gravoso il profilo ambientale di un acciaio quale l'AISI 316 è l'utilizzo dei leganti per la composizione dell'acciaio stesso. La produzione e l'incorporamento nella lega metallica di materiali come il ferrocromo, il ferromolibdeno ed altri simili, sono all'origine dell'aumentato impatto degli acciai speciali rispetto ad acciai basso- o non-legati.

Nella Figura 13 vengono riportati i contributi alla carbon footprint dei diversi componenti che costituiscono il sistema per accumulo del freddo. Il focus è sul sistema dotato di serbatoio "shell and tube" costruito in acciaio al carbonio smaltato. Si fa notare che in questa prima analisi del sistema complessivo sia stato omesso il PCM al fine di valutare meglio il contributo dei componenti di impianto.

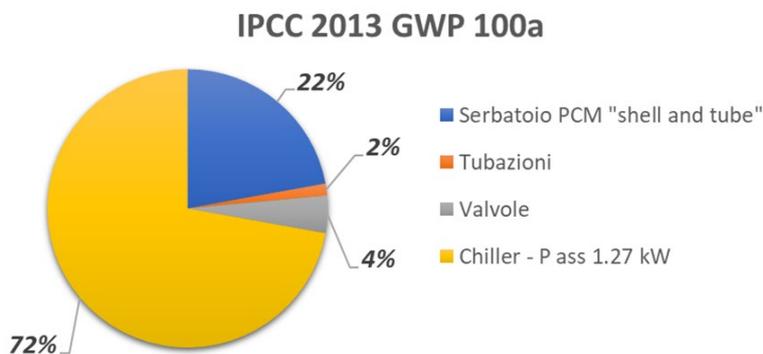


Figura 13. Caratterizzazione con IPCC 2013 GWP 100a dei componenti l'impianto di refrigerazione

Come si vede dall'ispezione dei contributi della Figura 13, il chiller è responsabile di quasi i tre quarti delle emissioni di CO₂eq. Del resto, l'impatto del serbatoio, che per la configurazione "shell and tube" si attesta intorno al 22%, cresce quando l'impianto è dotato del serbatoio per acqua, portando le emissioni totali da 1310 a 1770 Kg CO₂eq. Contributi decisamente minori vengono dalle valvole (4%) e dalle tubazioni (2%). L'analisi dell'impronta ambientale eseguita il metodo ReCiPe mostra che i contributi relativi ai vari componenti di impianto nelle altre categorie di impatto non variano molto rispetto al GWP. Si fa solo notare che nelle categorie di tossicità il peso specifico del chiller aumenta fino all' 80%-94%. Questo incremento è dovuto alla presenza di diversi metalli, tra cui rame e metalli preziosi, nei cavi e nell'elettronica di controllo del chiller. A questi metalli corrisponde un elevato impatto specifico nelle categorie di tossicità umana ed ecotossicità.

2.9 Analisi LCA dell'impianto per accumulo del freddo

In questo paragrafo vengono presentati i risultati dell'analisi LCA sviluppata sul sistema di storage completo, quindi considerando l'aggiunta del mezzo per l'accumulo del freddo che è stata modellata sulla base dei volumi necessari per il riempimento del serbatoio. Gli scenari analizzati e comparati sono:

- Sistema di refrigerazione con 170 Kg di PCM PureTemp15, ottenuto a partire da olio di semi di palma
- Sistema di refrigerazione con 170 Kg di PCM PureTemp15, ottenuto a partire da olio di cocco
- Sistema di refrigerazione con 200 Kg di PCM Rubitherm RT15
- Sistema di refrigerazione con 880 litri di acqua

I quantitativi di PCM differiscono in quanto legate a diverse capacità di storage: L'unità di riferimento in questo caso è stata riferita alla stessa energia accumulata nei PCM (31 MJ). Inoltre, considerando la densità

in fase liquida del RubithermRT15, il serbatoio “shell and tube” è stato portato ad una capienza di 250 litri, in modo da poter contenere 200 Kg di questo PCM.

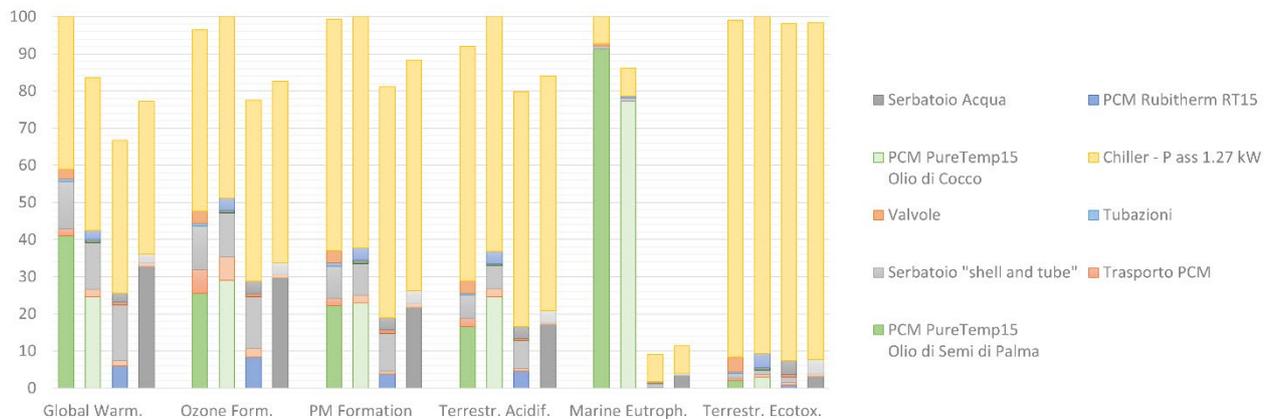


Figura 14. Confronto tra i quattro scenari analizzati per il sistema di accumulo del freddo. Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Midpoint (H). Categorie di danno dell'ambiente e degli ecosistemi.

In Figura 14 sono riportate le impronte ambientali del sistema di accumulo del freddo nei quattro scenari modellati per questo studio. Di seguito si discutono i contributi percentuali dei differenti input per ciascuna categoria di impatto:

Global Warming

Si nota il contributo del PCM PureTemp15 che rende la configurazione con scenario di produzione da olio di semi di palma il più gravoso. Nel sistema ad acqua, l'impatto del serbatoio risulta essere rilevante. La soluzione con PCM Rubitherm RT15 è quella con potenziale di riscaldamento globale più basso. In questa, come in quasi tutte le categorie, il chiller influisce per almeno il 40%.

Ozone Formation

Questa categoria mostra un profilo ambientale molto simile alla categoria Global Warming. Si nota comunque il ridotto contributo del PCM PureTemp15 da olio di semi di palma. La configurazione con l'impatto più elevato su questo tema ambientale risulta essere il sistema di accumulo del freddo con PureTemp15 prodotto a partire da olio di cocco.

PM Formation

Gli scenari maggiormente gravosi sono quelli relativi al PureTemp15, con minime differenze tra i due scenari di produzione. Rispetto all'utilizzo di PCM di origine vegetale, al sistema di refrigerazione ad acqua corrisponde un impatto pari al 90%.

Terrestrial Acidification

I sistemi di refrigerazione ad acqua e con PCM RubithermRT15 hanno impatti molto simili. La configurazione con PCM PureTemp15 prodotto a partire da olio di cocco ha un impatto maggiore del 20% rispetto alla configurazione con RubithermRT15 che risulta la soluzione più ambientalmente compatibile per questo indicatore.

Marine Eutrophication

Questa categoria è dominata dalle emissioni associate al PCM PureTemp15 (in entrambi gli scenari), eredità dei processi di coltivazione e produzione degli oli da cui si ottiene il materiale.

Terrestrial Ecotoxicity

In questa categoria tutti gli scenari analizzati hanno un impatto sostanzialmente uguale. Il danno ambientale nelle categorie di tossicità (non limitate a quella terrestre) è determinato per oltre il 90% dal chiller che è identico in tutti gli scenari.

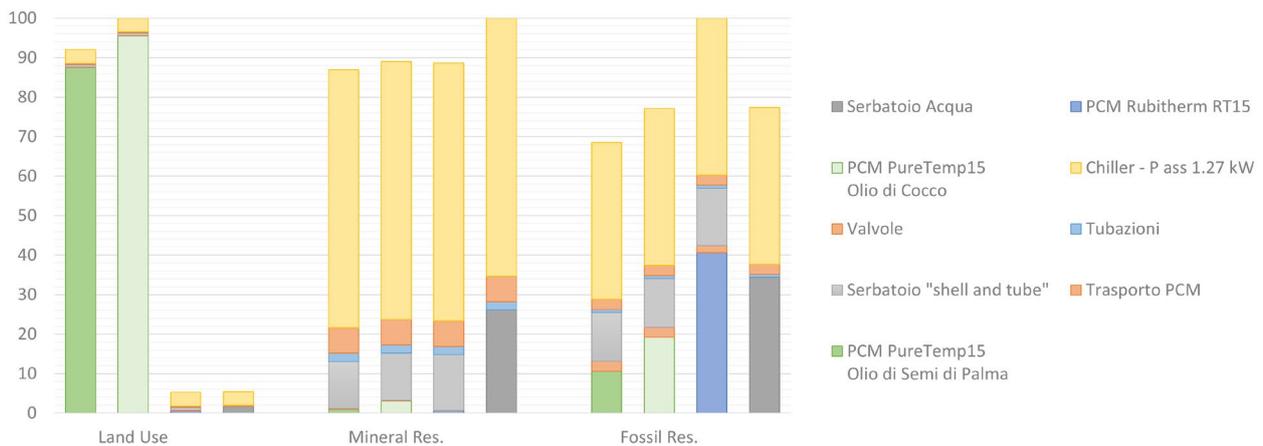


Figura 15. Confronto tra i quattro scenari analizzati per il sistema di refrigerazione provvisto di accumulo del freddo. Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Midpoint (H). Categorie di sfruttamento delle risorse naturali.

La Figura 15 fornisce un focus sui risultati ottenuti il calcolo degli impatti sulle categorie di sfruttamento delle risorse. I profili ambientali mettono in luce le caratteristiche peculiari dei quattro scenari analizzati: nella categoria Land Use, infatti, sono le soluzioni che adottano i PCM di origine vegetale a mostrare gli impatti di gran lunga maggiori. Nella categoria Mineral Resource il grosso quantitativo di acciaio del serbatoio ad acqua rende tale soluzione la più impattante. Da ultimo, per la categoria Fossil Resource, l'origine fossile della paraffina nel Rubitherm RT15 ne determina l'elevato contributo (40% circa) ed il complessivo impatto del sistema di refrigerazione basato su questo PCM.

3 Conclusioni

I risultati dell'analisi hanno permesso di identificare le principali fonti di impatto per tutte le configurazioni di impianto modellate, discriminando i diversi contributi su tutte le categorie analizzate. Il profilo ambientale di due tipologie di PCM - uno coprodotto dell'industria oleochimica, l'altro coprodotto dell'industria petrolchimica - è stato valutato dopo una ricostruzione sia della composizione chimica dei materiali, per mezzo di analisi chimico-fisiche, sia dei processi e delle fasi di produzione di tali materiali. L'analisi LCA ha stabilito le caratteristiche peculiari dei diversi PCM, in termini di eco-profilo, ed ha permesso di quantificare e confrontare gli impatti ambientali in differenti categorie. Ciò è stato propedeutico alla valutazione complessiva del sistema di refrigerazione, dotato di accumulo del freddo tramite PCM, e ne ha permesso il confronto con un sistema di refrigerazione con accumulo convenzionale (acqua) del freddo. In generale, l'eco-profilo del sistema di accumulo del freddo basato sul PCM RubithermRT15 è risultato essere il migliore per la gran parte degli indicatori analizzati, con qualche penalizzazione relativamente alle categorie di sfruttamento delle risorse fossili. Inoltre, con riferimento al sistema di refrigerazione convenzionale, l'analisi comparativa ha rivelato che l'utilizzo del PCM PureTemp15 aumenta l'impatto ambientale in diverse categorie, ad esempio +29.4% (+8.2% per l'olio di cocco) per il Global Warming e +12.3% (+13.2% per l'olio di cocco) per il PM Formation, mentre l'utilizzo di Rubitherm RT15 determina un leggero miglioramento delle performance ambientali, a titolo di esempio, con -13.6% per il Global Warming e -8.2% per PM formation. Va tuttavia sottolineato che nell'avanzamento dell'attività di ricerca bisognerà corroborare i risultati raggiunti con ulteriori analisi ed approfondimenti, atti principalmente a:

- 1) determinare la lunghezza di catena (o in maniera equivalente il peso molecolare), per verificare la presenza di diverse frazioni (PCM miscela paraffinica) o di un'unica frazione (PCM di composizione omogenea) - ottimizzazione dell'inventario Rubitherm RT10.
- 2) effettuare analisi di sensibilità e di incertezza, per delucidare il conseguente impatto delle stime effettuate, rispetto ai dati primari mancanti.

3) valutare la fase d'uso dei sistemi di refrigerazione. Nel primo anno si è analizzato la produzione (approccio LCA *cradle-to-gate*) di sistemi non equivalenti in termini di componenti, materiali, peso, etc. L'analisi dell'intero ciclo di vita consentirà di determinare gli impatti complessivi dei sistemi di refrigerazione, nello svolgimento di una funzione comune, ovvero il raffrescamento di un'utenza familiare, con una determinata domanda termica, in un determinato arco di tempo.

4 Riferimenti bibliografici

1. ISO 14040:2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and guidelines. Geneva: 2006.
2. ISO 14044:2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines. Geneva: 2006.
3. European Union. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament — Integrated Product Policy, Building on Environmental Life-Cycle Thinking. Amtsblatt Der Eur Union 2003;C80/39:6.
4. European Commission e Joint Research Centre e Institute for Environment and Sustainability, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook e General Guide for Life Cycle Assessment e Detailed Guidance, first ed. Publications Office of the European Union, Luxembourg. March 2010. EUR 24708 EN.
5. <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
6. Althaus HJ, Bauer C, Doka G, Dones R, Frischknecht R, Hellweg S. et al., Ecoinvent reports no. 3. Implementation of life cycle impact assessment methods. (2010)
7. R. Norman Jones, "The effect of chain length on the infrared spectra of fatty acids and methyl esters" Canadian Journal of Chemistry, 40(2) (1962)
8. R. Ravotti, O. Fellmann, N. Lardon, L.J. Fisher, A. Stamatiou, J. Worlitschek, "Synthesis and Investigation of Thermal Properties of Highly Pure Carboxylic Fatty Esters to Be Used as PCM". Applied Science, 8 (2018), 1069; R. Ravotti O. Fellmann, N. Lardon, L.J. Fisher, A. Stamatiou, J. Worlitschek, "Analysis of Bio-Based Fatty Esters PCM's Thermal Properties and Investigation of Trends in Relation to Chemical Structures" Applied Science, 9 (2019), 225
9. Gregorio C. Gervajio "Fatty Acids and Derivatives from Coconut Oil" in *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (2005) Wiley
10. <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=palm-kernel-oil&graph=production>
11. <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=coconut-oil&graph=production>
12. Ecoinvent Centre, Database ecoinvent data v 3.6, SwissCentre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org/database>; 2017
13. L. Mongibello, G. Graditi, "Cold Storage for a Single-Family House in Italy", *Energies*, 9 (2016), 1043

5 Appendice: breve cv del gruppo di ricerca

Breve CV del responsabile scientifico del DBCF-SI: Prof. Maria Laura Parisi.

Maria Laura Parisi è Professore Associato di Chimica Fisica presso il Dipartimento di Biotecnologie, Chimica e Farmacia (DBCF) dell'Università degli Studi di Siena. Ha una laurea in Chimica summa cum laude e un



Dottorato di Ricerca in Scienze Chimiche conseguito per le sue ricerche sul modeling computazionale di una nuova classe di switch molecolari ispirati ai fotorecettori biologici. Durante il suo Dottorato ha lavorato a Bowling Green, OHIO, presso il laboratorio di fotochimica e fotobiologia computazionale LCPP della Bowling Green State University, svolgendo attività di ricerca su modelli di switch molecolari. Attualmente la sua ricerca, testimoniata da numerose pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali e ad alto impatto, si focalizza sulla caratterizzazione dei profili di sostenibilità ambientale di materiali avanzati e tecnologie innovative per lo sfruttamento delle fonti di energia rinnovabile e sistemi di accumulo energetico e sulla progettazione in silico e studio mediante metodi computazionali delle proprietà strutturali e fotochimiche di sistemi

molecolari. È tra i fondatori e coordina le attività del laboratorio R2ES (Research on Renewable Energy and Sustainability, <https://www.r2eslab.com/>) che vanta collaborazioni con gruppi di ricerca e aziende sia nazionali che internazionali. È titolare del corso di Chimica Fisica 2-Modulo 2 del Corso di Laurea in Scienze Chimiche, del corso di Sustainable & Efficient Energy del Corso di Laurea in Chemistry e del corso di Life Cycle Thinking del corso in Sustainable Industrial Pharmaceutical Biotechnology del Dipartimento di eccellenza di Biotecnologie, Chimica e Farmacia.

M.L. Parisi è autrice di varie pubblicazioni in riviste e libri nazionali ed internazionali oltre che su atti di convegni e di diverse relazioni a conferenze nazionali e internazionali. Parametri bibliometrici (Aprile, 2021): h-index - 13 (fonte Scopus) e numero totale di citazioni - 501 (fonte Scopus). Identificati univoci di M.L. Parisi: ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0273-8848>; Scopus Author ID: 55424879000; Google Scholar: <https://scholar.google.it/citations?user=BpoKNG8AAAAJ&hl=it&authuser=1&oi=ao>

M.L. Parisi è Coordinatore Scientifico dell'Unità CSGI-UNISI del Progetto H2020 GEOENVI "Tackling the Environmental Concerns for Deploying Geothermal Energy in Europe" e Coordinatore e Responsabile Scientifico dell'Unità UNISI del progetto SOLARGRID "Sistemi Solari Termodinamici e Fotovoltaici con Accumulo per co-Co-Generazione e Flessibilità di Rete".

M.L. Parisi è membro del Consorzio Interuniversitario di ricerca CSGI (Research Center for Colloids and Nanoscience) e Associato dell'Istituto di Chimica dei Composti Organo Metallici (ICCOM) del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Docente per il Master di II Livello "RIDEF 2.0 – Reinventare l'Energia" presso il Politecnico di Milano dal 2010 e Coordinatore nazionale del gruppo "Energia e Tecnologie Sostenibili" della Rete Italiana LCA dal 2017.

M.L. Parisi è referente dell'Università degli Studi di Siena per il Centro Interuniversitario di Ricerca per lo Sviluppo Sostenibile –CIRPS e per il Gruppo di Lavoro Energia per la Rete delle Università per lo Sviluppo Sostenibile – RSU

Breve CV di Giuseppe Di Florio

Laurea in Ingegneria dei Materiali, conseguita presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II" nel 2006, con una tesi dal titolo "Analisi dell'assorbimento d'acqua e rilascio di ioni in idrogeli polielettrolitici da reticolazione chimica di eteri della cellulosa". Successivamente, nel 2009, completa un Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Materiali, con una tesi dal titolo "Il processo di vulcanizzazione nelle gomme stirene-butadiene: meccanismi di reazione, coinvolgimento di additivi e loro processi di migrazione", sotto la supervisione del Prof. Mensitieri e del dott. Musto. Durante il periodo di dottorato acquista competenze nella caratterizzazione dei materiali – specialmente materiali a matrice polimerica – e nell'analisi sperimentale di fenomeni di trasporto, tramite tecniche di chimica fisica, quali spettroscopia e microscopia infrarossa, spettroscopia e microscopia Raman, analisi termo-meccaniche e termo-gravimetriche.

Completato il percorso di studi, si reca all'estero per proseguire un percorso di ricerca e di specializzazione in tecniche di spettroscopia vibrazionale, come mezzo di indagine delle proprietà dei materiali. All'Università della Ruhr, a Bochum, con la supervisione della Prof. Havenith e del Prof. Bründermann, conduce investigazioni su materiali photo-responsive e sullo stato di allineamento molecolare indotto, sia con tecniche di Raman polarizzato che di microscopia di campo vicino (Near-field), quali SNOM, AFM e SNIM. Sempre come post-doc è poi all'Università Heinrich Heine di Düsseldorf, dove utilizza tecniche di spettroscopia non-lineare (Femtosecond Stimulated Raman Microscopy) quali strumenti di indagine per fenomeni di interesse in scienza dei materiali; nello specifico, lo studio di fenomeni di diffusione di molecole a basso peso molecolare in matrici polimeriche.

Successivamente è impegnato in un progetto europeo FP7, presso l'azienda X2 Solutions di Mirandola (MO), come responsabile per lo sviluppo di un prototipo di macchina per il trattamento dei fanghi urbani, basato sul processo di elettrosmosi. Da questo lavoro, portato avanti con diversi partner nazionali ed internazionali e coordinato dal Politecnico di Milano, ne risulta un brevetto, di cui è coautore.

Dal 2019 è Assegnista di Ricerca, presso il Dipartimento di Biotecnologie, Chimica e Farmacia dell'Università degli studi di Siena, per il progetto PON ComESTo "Community Energy Storage: Gestione Aggregata di Sistemi d'Accumulo dell'Energia in Power Cloud", di cui è responsabile scientifico per l'unità di Siena la Dott.ssa Baratto. In questa esperienza acquisisce competenze in metodi di valutazione ambientale e conduce studi di Life Cycle Assessment su sistemi di accumulo dell'energia. In quest'ambito ha la possibilità di sviluppare nuove competenze ed integrare le conoscenze chimico-fisiche, precedentemente acquisite sui materiali, con valutazioni delle performance ambientali, relative alla produzione ed all'utilizzo di differenti materiali in applicazioni per l'energia.