



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



Ministero della Transizione Ecologica



## Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi LCA e LCC di soluzioni tecnologiche per l'ottimizzazione delle performance di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase

Giuseppe Di Florio e Maria Laura Parisi



Department of  
Biotechnology Chemistry  
and Pharmacy  
**Department of Excellence**  
2018-2022

Report RdS/PTR2021/160

## ANALISI LCA E LCC DI SOLUZIONI TECNOLOGICHE PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE PERFORMANCE DI SISTEMI DI ACCUMULO DEL FREDDO BASATI SULL'UTILIZZO DI PCM

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

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

Dicembre 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 - III 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: *LA4.33 - Analisi LCA e LCC di soluzioni tecnologiche per l'ottimizzazione delle performance di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di PCM*

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.ssa Maria Laura Parisi

Gli autori ringraziano i Proff. Adalgisa Sinicropi, Andrea Massimo Atrei, Elena Petricci 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.....	6
2.1 COSTRUZIONE LCI MIKROCAPSPCM15 .....	6
2.2 IMPRONTA AMBIENTALE MIKROCAPSPCM15 .....	7
2.3 CONFRONTO PERFORMANCE AMBIENTALI: RUBITHERMRT15, PURETEMP15 E MIKROCAPSPCM15 .....	10
2.4 CONFRONTO IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO CON ACCUMULO DEL FREDDO (CON PCM E CONVENZIONALE) E SENZA ACCUMULO 12	
2.5 MIX ELETTRICO NAZIONALE SU BASE ORARIA E CONSUMI DEL SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO.....	13
2.6 IMPRONTA AMBIENTALE DEI CONSUMI PER DOMANDA TERMICA (FASE D'USO).....	16
2.7 CONFRONTO DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DEI CICLI DI VITA DEI SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO CON E SENZA ACCUMULO DEL FREDDO 18	
2.8 ANALISI ECONOMICA SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO.....	18
3 CONCLUSIONI.....	19
4 ADDENDUM .....	20
4.1 AFFINAMENTO LCI E PERFORMANCE AMBIENTALI DEI PCMs RUBITHERMRT15 E PURETEMP15 .....	20
4.2 INFORMAZIONI SUPPLEMENTARI .....	25
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	26
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	27
7 APPENDICE: BREVE CV DEL GRUPPO DI RICERCA .....	27

## Sommario

L'attività svolta in LA 4.33 ha avuto due temi centrali: l'analisi di un materiale a cambiamento di fase (PCM) micro-incapsulato e una dettagliata valutazione della fase d'uso per il sistema di condizionamento ambientale con e senza accumulo del freddo. Lo studio del PCM micro-incapsulato è stato il termine di un lavoro iniziato nelle precedenti annualità, che ha consentito di valutare diversi aspetti legati all'utilizzo dei PCM, quali materiali per accumulo del freddo in impianti di raffrescamento. I temi affrontati riguardano, tra gli altri, la filiera di produzione del PCM (di origine vegetale o fossile), il processo di incapsulamento (con o senza espandente) e l'utilizzo ibrido del PCM micro-incapsulato. Questa dettagliata analisi ha permesso una precisa valutazione ambientale sia dei punti di forza, che degli aspetti critici di questi materiali. Il secondo aspetto, che ha avuto una grande rilevanza nel lavoro svolto, ha riguardato la strategia di gestione della domanda termica del sistema di condizionamento ambientale, nelle due possibili configurazioni – con accumulo del freddo e senza -, e l'esame delle relative ricadute sull'ambiente. L'analisi ha messo in evidenza come la gestione della domanda termica, che si ottiene con l'utilizzo dell'accumulo, ha un benefico effetto sulle prestazioni ambientali del sistema, riducendo sia le emissioni di gas serra, che lo sfruttamento delle risorse naturali. Inoltre, la granulare analisi del mix elettrico nazionale, necessaria per una corretta valutazione della fase d'uso, suggerisce altre strategie di gestione ed accumulo del freddo, che potrebbero portare ulteriori benefici. I risultati di entrambi gli aspetti menzionati sono stati, infine, integrati sul ciclo di vita del sistema. L'analisi del ciclo di vita conferma che la strategia di accumulo del freddo risulta vantaggiosa rispetto ad un sistema di raffrescamento senza accumulo. Lo studio è stato da ultimo corredato da un'analisi dei costi del ciclo di vita, i quali hanno rilevato la non profittabilità economica del sistema con accumulo, alla luce dei prezzi attuali e delle tariffe energetiche biorarie. Dal punto di vista economico, si suggerisce di riconsiderare l'accumulo del freddo come sistema di storage di fonti rinnovabili, per massimizzare l'autoconsumo energetico.

## 1 Introduzione

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. Coerentemente con gli obiettivi dell’attività LA 4.33, il lavoro svolto ha riguardato l’analisi del ciclo di vita, e dei conseguenti impatti ambientali, di un sistema di condizionamento estivo provvisto di accumulo del freddo tramite sistema ibrido acqua e PCM micro-incapsulato. Tale soluzione ha previsto un’approfondita analisi dei metodi di produzione dei PCM micro-incapsulati: materiali costituenti lo *shell* delle microcapsule, metodo di polimerizzazione, etc. A valle dello studio sul PCM micro-incapsulato, l’analisi si è concentrata sul confronto tra il sistema, contenente PCM micro-incapsulato, ed il sistema di accumulo con l’impiego di PCM puro. Avendo i sistemi caratteristiche chimico-fisiche diverse, ne risultano impianti di condizionamento ed accumulo con specifiche differenze: sistema dotato di serbatoio “shell and tube” per i PCM puri e sistema con serbatoio commerciale per PCM micro-incapsulato. L’analisi è stata, perciò, estesa dallo studio dei semplici materiali a quello degli impianti di raffrescamento. Il confronto è stato eseguito tra il sistema a PCM micro-incapsulato ed il sistema a PCM puro, considerando entrambe le tipologie di PCM analizzate nella precedente attività LA 4.32 – ovvero il RubithermRT15 e PureTemp15. Inoltre, il confronto delle performance ambientali è stato esteso al sistema di accumulo convenzionale ad acqua ed al sistema di condizionamento ambientale estivo, sprovvisto di accumulo del freddo. L’analisi del ciclo di vita ha interessato anche la fase d’uso, ovvero la valutazione degli impatti ambientali derivanti dal funzionamento del sistema di raffrescamento. Le differenze tecniche, nel soddisfare la domanda termica dell’utenza residenziale da parte del sistema con o senza accumulo del freddo, portano a profili di consumo elettrico diverso. Il lavoro di analisi si è perciò concentrato nella valutazione dei profili temporali degli impatti ambientali. Tale aspetto, che si è rivelato critico per una corretta valutazione complessiva delle performance ambientali, ha richiesto l’analisi approfondita della produzione e della domanda elettrica in Italia. Come risultato, sono stati costruiti dei dataset, relativi al mix energetico nazionale, dipendenti dal tempo e, specificatamente, su base oraria giornaliera. Questo approfondimento, oltre ad estendere lo studio del ciclo di vita dei sistemi, si allinea integralmente alle attività ed agli obiettivi più generali del work package “WP4 – Reti energetiche integrate” e del 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”. Rispetto agli strumenti metodologici utilizzati, conforme alle 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. 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, che permette di valutare il potenziale effetto sul riscaldamento globale di prodotti e/o processi. Nelle analisi successive saranno utilizzate due unità funzionali (FU), ovvero la grandezza rispetto alla quale tutti gli input e output vengono rapportati:

- 1) nell’analisi dei vari PCM, la FU è 1 MJ di energia immagazzinata; in altre parole, la FU è la quantità di PCM necessaria ad immagazzinare 1 MJ, tramite calore latente, alla temperatura di fusione.
- 2) nell’analisi dei sistemi di raffrescamento, la FU è 1 kWh di carico termico; in altre parole, rispetto alla domanda termica e alla vita utile del sistema, tutti gli impatti ambientali sono riferiti alla fornitura da parte del sistema di 1 kWh di energia termica.

L'incertezza statistica dei risultati ottenuti è stata valutata con una routine interna al software SimaPro per l'analisi di incertezza tramite metodo Monte Carlo.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Costruzione LCI MikroCapsPCM15

La tecnica del micro-incapsulamento di materiali PCM è volta a rimediare uno svantaggio intrinseco, appartenente alla maggior parte dei materiali a cambiamento di fase, ovvero la bassa conducibilità termica. Questo aspetto limita la possibilità del PCM di controllare la temperatura, quando questo è impiegato in un sistema di accumulo. Il principale obiettivo, quindi, del micro-incapsulamento dei PCM è di aumentare la superficie di scambio termico tra PCM e fluido, compensando la scarsa conducibilità termica. Il micro-incapsulamento è un metodo per creare goccioline di PCM avvolte da un guscio di materiale polimerico o inorganico. Le microcapsule hanno dimensioni che vanno dai pochi micron al millimetro. Tra i materiali più utilizzati per il guscio (*shell*) c'è la resina melammina-formaldeide. Altri materiali utilizzati per la realizzazione dello *shell* sono il polivinilacetato, il polistirene, il polimetilmetacrilato, il poliuretano, etc. Le tecniche di micro-incapsulamento sono diverse, con metodi sia fisici che chimici. Per alcuni metodi di incapsulamento è difficile definire se si tratti di un metodo puramente fisico o chimico, per cui un altro modo di classificare le tecniche di incapsulamento si basa sulla modalità con cui viene eseguito, cioè se questo avviene completamente in fase liquida (Tipo A), oppure per deposizione (Tipo B) [7]. Nei processi di Tipo A la formazione delle microcapsule avviene mettendo a contatto il PCM con il materiale del guscio, entrambi dispersi in una fase liquida. In un processo di Tipo B, invece, il materiale del guscio viene depositato, via spray o altro, sulla superficie del PCM, che è stato previamente disperso in fase gas [7]. Nel presente studio, è stato analizzato un materiale a cambiamento di fase ottenuto con un metodo di incapsulamento di tipo A, con un processo di polimerizzazione del materiale dello *shell*. Per la precisione, un processo di incapsulamento *in-situ* per formazione di un guscio di melammina-formaldeide attorno ad un *core* di PCM paraffinico. In questo processo, il primo step è disperdere un liquido (o solido) immiscibile in acqua, che rappresenta il *core*, in una fase acquosa. In genere la fase acquosa contiene anche un polimero o copolimero anionico, che svolge il ruolo di emulsionante. Una soluzione acquosa di melammina e formaldeide viene aggiunta all'emulsione e la formazione dello *shell* comincia modificando il pH della soluzione [7]. La presenza di una fase immiscibile porta il polimero a condensare e depositarsi attorno alle gocce, con la conseguente formazione della microcapsula. Il materiale finale dello *shell* è un polimero con un elevato grado di crosslinks ed insolubile in acqua [7]. La semplicità dei processi di tipo A, e particolarmente del processo di polimerizzazione *in-situ*, porta vantaggi ambientali in fase di produzione del PCM micro-incapsulato. Infatti, per i processi di tipo B la fase di evaporazione del solvente è cruciale. Per i processi di incapsulamento *in-situ*, invece, l'evaporazione del solvente non è strettamente necessaria; ciò comporta meno emissioni e processi meno energivori e complessi.

Il PCM micro-incapsulato qui analizzato è prodotto dall'azienda MikroCaps d.o.o., con sede a Lubiana in Slovenia. Il PCM micro-incapsulato – MikroCapsPCM15 – consiste di una dispersione di microcapsule (*slurry*), in cui il *core* contiene il materiale a cambiamento di fase, che è stato individuato essere una cera paraffina uguale o in tutto simile al RubithermRT15, ed uno *shell* fatto di melammina-formaldeide. La composizione dello *slurry* (contenuto di microcapsule nella dispersione) e delle microcapsule (contenuto di PCM nelle microcapsule) è stata ricavata dalla scheda tecnica del costruttore. Per modellare il processo di incapsulamento, si è fatto riferimento al lavoro Zhang et al. "Expansion Space and Thermal Stability of Microencapsulated *n*-Octadecane" [8]. Nel riferimento bibliografico [8] sono descritte varie formulazioni. Nella costruzione dell'inventario per il MikroCapsPCM15 si è fatto riferimento alla formulazione base, ovvero quella priva di espandente (cicloesano). Bisogna precisare che nella letteratura scientifica, rispetto al processo di incapsulamento, si trovano molte formulazioni diverse, in termini di contenuto di prepolymer,

agente emulsionante, surfattante, etc. In assenza di ulteriori dettagli, si è ritenuto il processo descritto in [8] essere il più appropriato per il materiale in esame. Tale scelta essendo motivata dalla grandissima somiglianza dei materiali utilizzati e dall'applicazione delle microcapsule di *n*-Octadene come materiale a cambiamento di fase. D'altronde, come esposto nella successiva sezione, gli effetti dovuti al surfattante e all'agente emulsionante sono generalmente marginali, rispetto all'impatto complessivo della fase di incapsulamento. Il PCM utilizzato nel *core* ed il prepolymer hanno, invece, un'influenza molto maggiore, per cui la scelta del PCM da inglobare e dei componenti dello *shell* della microcapsula determinano maggiormente l'impatto ambientale del materiale finale. Nel seguito, si descrivono le fasi considerate nel modello LCA e schematizzate in Figura 1. Dapprincipio viene preparata un'emulsione, aggiungendo il materiale a cambiamento di fase e il disperdente (emulsionante) ad acqua distillata. L'agente emulsionante è stato modellato come una dispersione al 19% di resina stirene-anidride maleica. L'emulsione viene agitata per 90 minuti a giri elevati ed il pH portato a 5. Successivamente, all'emulsione viene aggiunta la soluzione di prepolymer, che è tenuta in agitazione ed i monomeri fatti reagire. Il prepolymer è una soluzione di melammina-formaldeide, la cui formulazione è stata ottenuta dal riferimento di letteratura [8]. Il prepolymer è in questo caso composto al 32% da melammina. Una volta dispersi nell'emulsione, i monomeri formano lo *shell* delle microcapsule e polimerizzano. Si assume che la reazione di polimerizzazione procede fino a completamento. In questa fase il pH è portato a 9 con trietanolammina. A processo completato, la soluzione viene raffreddata, filtrata e lavata con acqua distillata per portare il pH a 7.

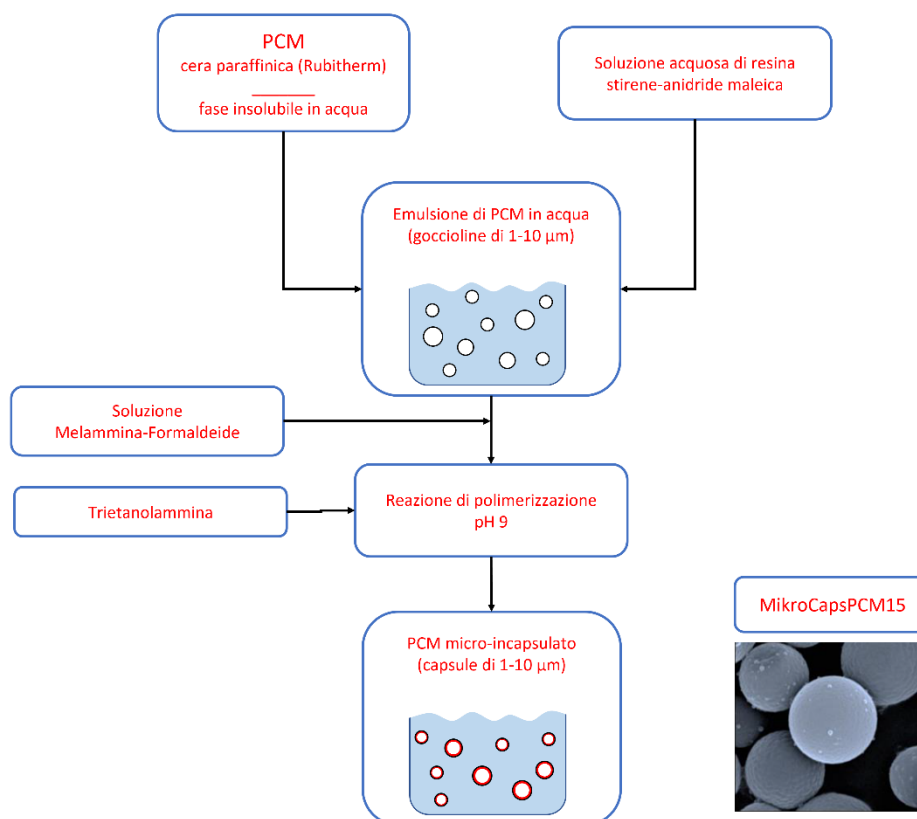


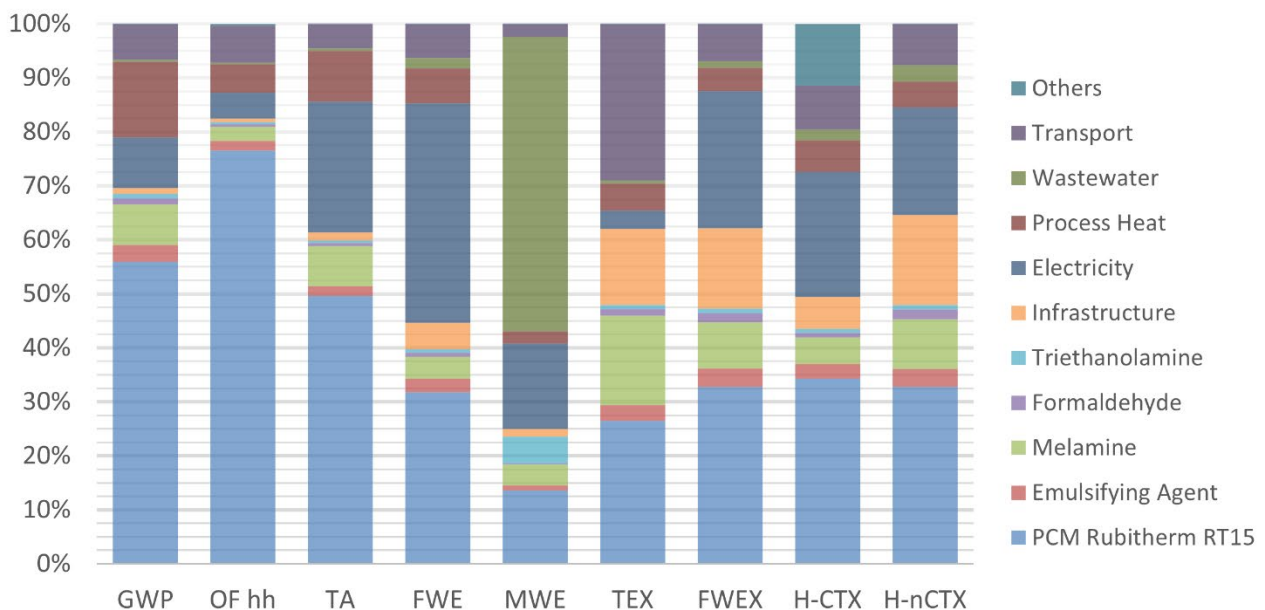
Figura 1. Flow-chart processo di incapsulamento *via* polimerizzazione *in-situ* del MikroCapsPCM15

## 2.2 Impronta ambientale MikroCapsPCM15

La caratterizzazione degli impatti ambientali, ottenuta con il metodo ReCiPe 2016 Midpoint, è presentata in Figura 2. L'*Heat Storage Capacity* della soluzione di microcapsule è di circa 46 KJ/Kg, mentre per le microcapsule secche è di 120 KJ/Kg circa. Da ciò ne consegue, che per immagazzinare 1 MJ è necessario un

quantitativo di 21.74 Kg di soluzione di microcapsule MikroCapsPCM15 oppure, alternativamente, 8.33 Kg di microcapsule secche. Al fine di valutare l'intero processo di produzione, l'analisi del MikroCapsPCM15 è stata eseguita sulla soluzione di microcapsule, sebbene si possa già anticipare, che gli impatti ambientali siano imputabili in larghissima parte alla produzione delle microcapsule. Tuttavia, si vedrà nel paragrafo 2.4 che, rispetto all'impianto di condizionamento ambientale, la soluzione di PCM micro-incapsulato permette lo sfruttamento sia del calore di fusione delle microcapsule, sia del calore sensibile dell'acqua, ottenendo, quindi, un sistema di storage ibrido (*latent + sensible heat*), che necessita di un quantitativo ridotto di materiale a cambiamento di fase.

Il metodo ReCiPe Midpoint considera 18 categorie di impatto; nel seguito verranno presentate e discusse le più informative per il materiale in esame. Inoltre, nei casi in cui più categorie restituiscono informazioni ed interpretazioni molto simili, per ragioni di sintesi, ne viene presentata solo una. A questo proposito, i risultati per la categoria PMF sono pressoché identici alla acidificazione terrestre (TA), per cui in Figura 2 viene presentata solo TA. Analogo discorso per le categorie di ecotossicità acquatica (FWEX e MWEX), di cui è mostrata in figura solo la FWEX, e per le categorie legate all'ozono (SOD e OF), per cui viene presentato in Figura 2 solo la categoria OF. Tra i materiali ed i processi coinvolti nella manifattura del PCM MikroCaps, un contributo importante è dato dal RubithermRT15, di cui è composto il core delle microcapsule, che è presente con un impatto superiore al 30% in quasi tutte le categorie, mostrando un massimo del 76% per la OF hh – per una trattazione approfondita del PCM RubithermRT15 si consulti l'Addendum al paragrafo 4. L'unica categoria dove il RubithermRT15 dà un contributo notevolmente inferiore (13%) è la MWE; in questo caso, sono le emissioni di azoto contenute nei reflui del processo a rappresentare l'impatto maggiore (54%).

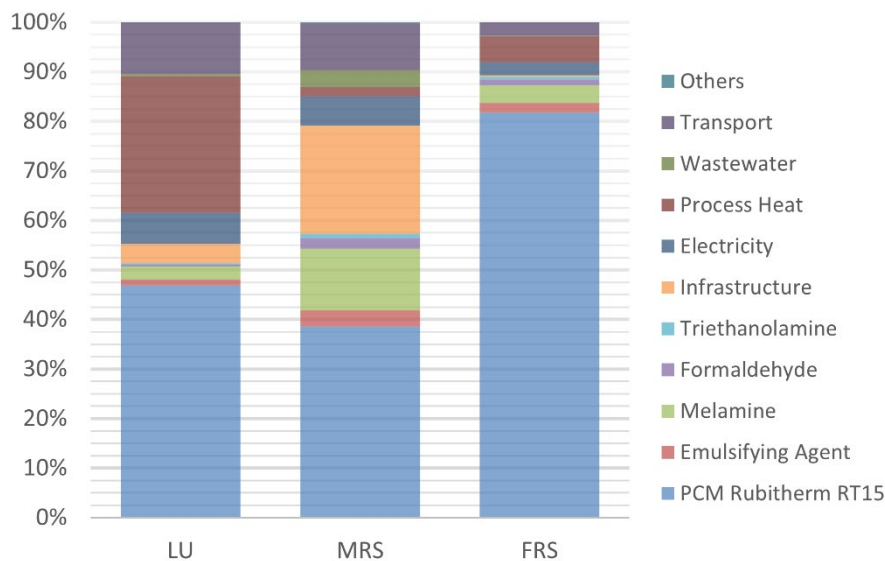


**Figura 2. Caratterizzazione degli impatti ambientali della produzione del PCM MikroCapsPCM15. Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Midpoint (H)**

L'energia di processo ha impatti importanti, specialmente l'elettricità utilizzata, in diverse categorie: TA (24% elettricità e 9% calore), FWE (41% elettricità e 6% calore) e nelle categorie di tossicità (per l'elettricità, tra il 20% ed il 25% nella tossicità umana). Di questa energia, e conseguentemente degli impatti che ne derivano, oltre il 90% è utilizzata nel processo di incapsulamento; per la precisione, nel processo di emulsione del PCM e nel processo di polimerizzazione della melammina-formaldeide e conseguente incapsulamento del PCM. Relativamente alla fase di incapsulamento, anche i materiali utilizzati mostrano una discreta rilevanza nell'analisi ambientale; in particolar modo, la melammina presenta un impatto del 16% in TEX, del 9% in H-



nCTX e 8% in FWEX. L'elevato contributo osservato nella categoria di ecotossicità terrestre (TEX) è un'eredità del processo di produzione della melammina, a partire dall'urea e dall'ammoniaca. Accorpendo i contributi degli input di materiali (melammina, formaldeide, emulsionante, etc.) ed energia, si può attribuire ai processi di micro-incapsulamento un'incidenza pari al 51% in FWE, 41% in TA, 41% in FWEX, 45% in H-CTX, etc. Da ultimo, si rileva che l'impatto nella categoria H-CTX per il processo di micro-incapsulamento è in parte determinato da emissioni in ambiente di formaldeide (incluse nella voce Others di Figura 2) durante la fase di preparazione del prepolymer. Tuttavia, le categorie di tossicità umana sono affette da una notevole incertezza - si veda il grafico presentato nel paragrafo 4.2 Informazioni Supplementari, che mostra l'analisi di incertezza per tutte le categorie prese in esame - condizione che impone di prendere i risultati ottenuti in queste categorie con una certa cautela.



**Figura 3. Caratterizzazione degli impatti ambientali nelle categorie di sfruttamento delle risorse naturali per PCM MikroCapsPCM15. Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Midpoint (H)**

Rispetto alle categorie di sfruttamento delle risorse naturali (Figura 3), il contributo del PCM della Rubitherm è principalmente rilevante, oltre 80%, rispetto alle risorse fossili (FRS) – in Addendum viene presentata una discussione sull'origine di tale danno ambientale. L'energia di processo non risulta molto rilevante, eccezion fatta per il calore nella categoria di sfruttamento del suolo (LU). Relativamente ai materiali utilizzati per lo *shell* delle capsule, si osserva un'incidenza significativa solo per la melammina in MRS (12%), dovuta agli impianti chimici per la produzione di urea ed ammoniaca. Del resto, in questa categoria le infrastrutture e i trasporti, anche per la produzione delle microcapsule, hanno un ruolo significativo. Infine, è stata effettuata un'analisi di sensitività, per valutare l'impatto ambientale relativo all'aggiunta di un espandente (cicloesano) durante il processo di incapsulamento. La presenza di un espandente, che viene successivamente rimosso secondo le microcapsule in forno, induce una porosità allo *shell* delle capsule ed impartisce una maggiore stabilità termica [8]. Zhang et al [8] riportano che con una percentuale di cicloesano tra il 30% e 40% in volume, rispetto al materiale a cambiamento di fase, il PCM micro-incapsulato raggiunge la massima stabilità termica, con temperature che arrivano a 230 °C in aria e 289 °C in atmosfera di azoto. Tuttavia, le performance ambientali del PCM diminuiscono all'aumentare della percentuale di cicloesano. In Tabella 1 e 2 viene riportata, per le categorie di impatto analizzate, la variazione percentuale rispetto alla formulazione base del MikroCapsPCM15 per diverse concentrazioni di cicloesano. Si osserva come in tutte le categorie, e per ogni concentrazione di espandente, l'impatto ambientale aumenti. In alcune categorie, quali FWE, FWEX, TA e H-CTX, l'aumento sia particolarmente significativo; arrivando ad oltre il 20% per una composizione tra il 30% ed il 40% di cicloesano.

**Tabella 1. Risultati dell'analisi di sensitività relativa all'aggiunta percentuale di espandente al processo di incapsulamento: variazioni degli indicatori ambientali rispetto ai valori dell'eco-profilo del MikroCapsPCM15.**

Variazione (%) su categoria impatto	10 vt% Cicloesano	20 vt% Cicloesano	30 vt% Cicloesano	35 vt% Cicloesano	40 vt% Cicloesano
GWP	6.36	9.68	13.96	16.59	19.65
OF hh	3.34	5.19	7.56	9.02	10.73
TA	11.17	13.26	15.96	17.62	19.56
FWE	18.48	21.60	25.61	28.08	30.97
MWE	7.11	8.26	9.75	10.67	11.73
TEX	2.95	4.97	7.57	9.17	11.04
FWEX	12.30	15.21	18.96	21.27	23.96
H-CTX	11.70	14.93	19.09	21.66	24.64
H-nCTX	10.21	13.18	16.98	19.33	22.07

Come mostrato in Tabella 2, gli aumenti sono più contenuti nelle categorie di sfruttamento delle risorse naturali, sebbene tocchino percentuali di oltre il 10% nelle formulazioni a più alto contenuto di cicloesano. La causa degli impatti superiori osservati è da imputare in parte all'utilizzo del cicloesano – con la sua eredità ambientale, derivante dai processi di produzione, distribuzione, etc. – ed in parte all'incremento di energia, utilizzata per seccare le microcapsule e rimuovere l'espandente dallo *shell*. Inoltre, bisogna aggiungere che la superiore stabilità termica acquisita dalle particelle paga il prezzo di una ridotta capacità di immagazzinamento dell'energia [8], seppur in misura limitata. Nell'applicazione analizzata nei successivi paragrafi, tale circostanza risulta un ulteriore svantaggio rispetto alla formulazione base senza espandente; mentre la più alta stabilità termica non impartisce un vero vantaggio nel presente caso studio, essendo le temperature in gioco di gran lunga inferiori. La presente analisi di sensitività è esemplificativa di analoghi processi di incapsulamento, che prevedono la rimozione del solvente, l'utilizzo di ulteriori agenti chimici o l'impiego di ulteriore energia per la dispersione e il ricoprimento delle capsule.

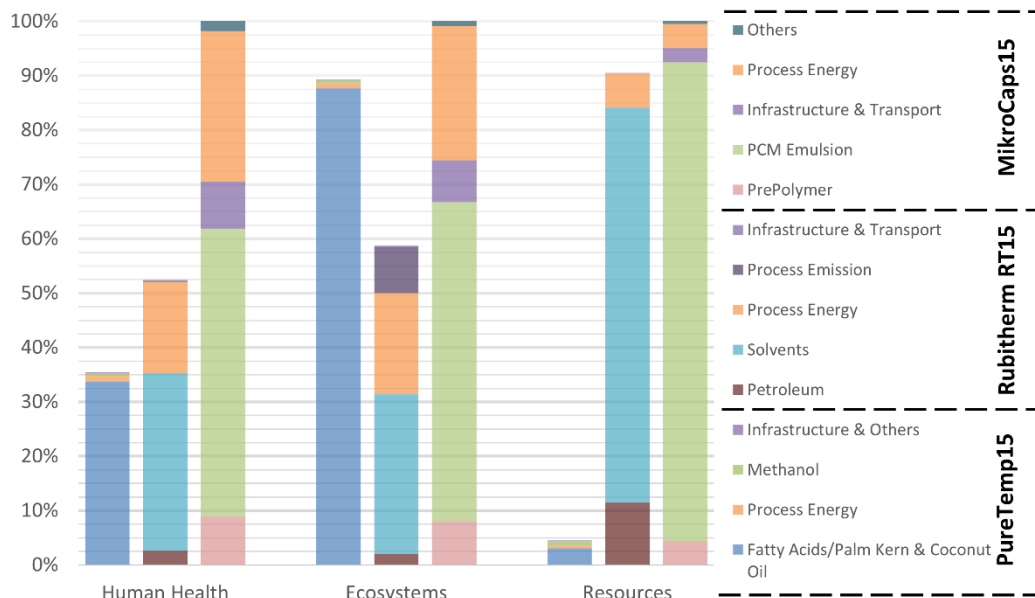
**Tabella 2. Risultati dell'analisi di sensitività relativa all'aggiunta percentuale di espandente al processo di incapsulamento: variazioni degli indicatori ambientali delle risorse naturali rispetto ai valori dell'eco-profilo del MikroCapsPCM15.**

Variazione (%) su categoria impatto	10 vt% Cicloesano	20 vt% Cicloesano	30 vt% Cicloesano	35 vt% Cicloesano	40 vt% Cicloesano
LU	3.66	5.17	7.12	8.31	9.71
MRS	4.07	6.25	9.05	10.78	12.79
FRS	3.21	5.94	9.44	11.60	14.11

### 2.3 Confronto performance ambientali: RubithermRT15, PureTemp15 e MikroCapsPCM15

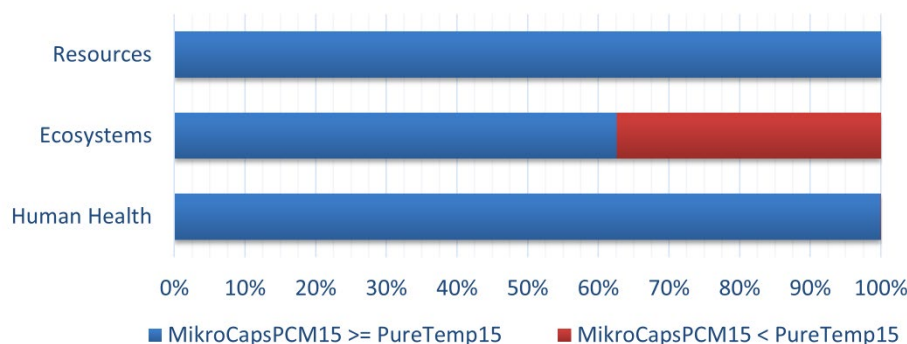
Nella Figura 4 vengono messi a confronto gli eco-profilo dei tre PCM analizzati. Il confronto è presentato valutando il quantitativo di PCM necessario ad immagazzinare *via* calore latente 1 MJ di energia. Al fine di una maggiore sinteticità e chiarezza, in Figura 4 vengono mostrati i risultati ottenuti con il metodo ReCiPe 2016 Endpoint (H). L'Endpoint del ReCiPe valuta tre categorie di danno: *Human Health*, che analizza gli effetti sulla salute umana, *Ecosystems*, che valuta gli impatti sugli ecosistemi, e *Resources*, che valuta lo sfruttamento delle risorse naturali. Per un'analisi approfondita dei PCM PureTemp15 e RubithermRT15 si veda l'Addendum in appendice. Dalla Figura 4 si evince che al PCM micro-incapsulato MikroCaps corrisponde l'impatto maggiore, sebbene con delle differenze nelle tre categorie di impatto. Nella categoria *Human Health*, il MikroCapsPCM15 presenta un valore circa doppio rispetto al RubithermRT15, e circa triplo rispetto

al PureTemp15. Ciò è causato da una maggiore energia di processo (28%), dai materiali per l'incapsulamento (Prepolymer 9%) e dall'impatto del materiale del *core* delle capsule (PCM Emulsion 53%). Nella categoria *Ecosystems*, invece, il MikroCapsPCM15 risulta maggiore del PureTemp15 solo del 10% circa. Per quanto riguarda l'impatto sugli ecosistemi, le coltivazioni e la produzione dell'olio vegetale, alla base del PCM della PureTemp, sono i processi di gran lunga più onerosi (Fatty Acids/Oils 88%).



**Figura 4. Confronto tra gli eco-profilo dei PCM PureTemp15 (barre a sx), Rubitherm RT15 (barre al centro) e MikroCapsPCM15 (barre a dx). Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Endpoint (H)**

Inoltre, il superiore contributo nella categoria *Ecosystems* del MikroCapsPCM15 risulta non essere statisticamente significativa, come dimostrato dall'analisi dell'incertezza riportata in Figura 5. Infatti, la percentuale di *trials* del metodo Monte Carlo, in cui PureTemp15 è risultato maggiore del PCM micro-incapsulato, è pari al 37% circa. Questo risultato conferma non solo l'elevata incertezza collegata alla categoria *Ecosystems*, ma anche l'impatto specifico del PCM di origine vegetale sugli ecosistemi. Completamente diverso, invece, è il risultato ottenuto nelle altre due categorie, dove è risultato MikroCapsPCM15  $\geq$  PureTemp15 con una percentuale praticamente del 100%.



**Figura 5. Analisi di incertezza con metodo Monte Carlo. Percentuale di *trials* corrispondenti ad un Endpoint MikroCapsPCM15  $\geq$  PureTemp15 (in blu) per le tre categorie del ReCiPe 2016 Endpoint (H)**

Questo risultato non sorprende alla luce della rilevante differenza osservata nelle categorie *Human Health* e *Resources*; in quest'ultima categoria il PureTemp15 ha un contributo solo pari a 4.5%. Gli altri due PCM,

entrambi basati su un materiale di origine fossile, presentano contributi molto simili. Ciò a dimostrazione che per la categoria *Resources* il contributo maggioritario è dovuto alla cera paraffinica e che il processo di micro-incapsulamento è poco importante; in questo contesto la differenza tra i due materiali è da attribuire, in buona parte, all'aggiuntiva energia di processo utilizzata nella produzione del PCM micro-incapsulato.

È necessario precisare che, essendo il PCM micro-incapsulato una dispersione acquosa, questo può essere utilizzato per l'accumulo in modalità ibrida, ovvero sfruttando sia il calore latente del PCM, sia il calore sensibile dell'acqua nella finestra di temperature di esercizio dell'impianto di condizionamento ambientale. Come viene mostrato nella sezione 2.4, questo duplice meccanismo di storage consente di utilizzare un quantitativo di MikroCapsPCM15 minore, rispetto alle proporzioni utilizzate per il confronto di Figura 4. Come conseguenza di ciò, il ridotto quantitativo di PCM micro-incapsulato necessario compensa gli impatti più elevati correlati al processo di micro-incapsulamento.

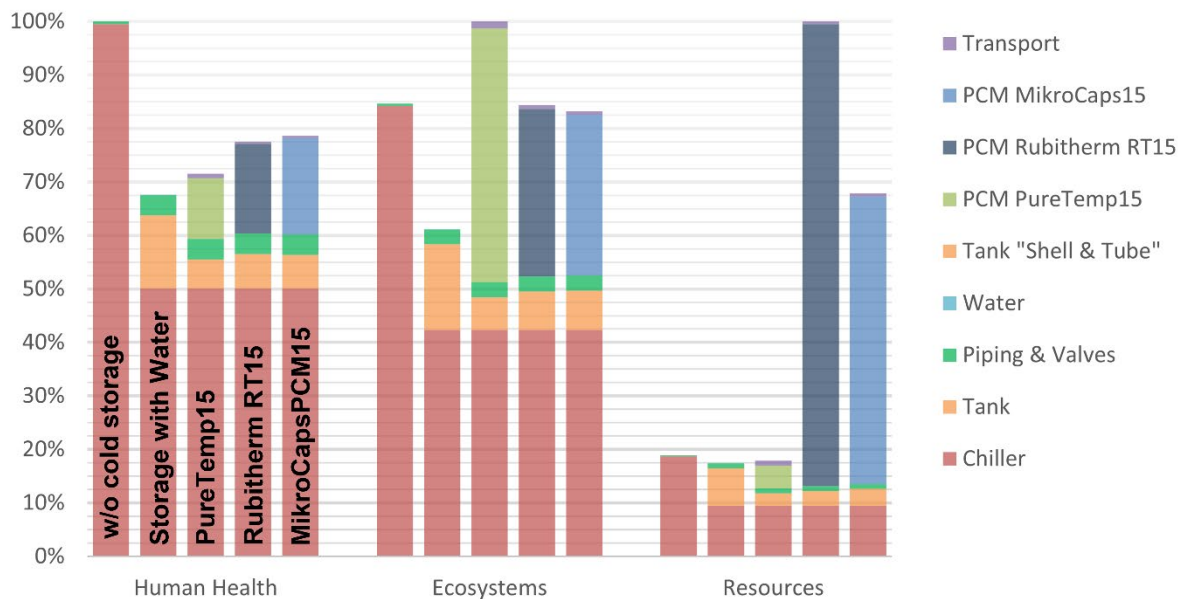
## 2.4 Confronto impianto di raffrescamento con accumulo del freddo (con PCM e convenzionale) e senza accumulo

Il sistema di condizionamento ambientale è stato costruito secondo il layout descritto nella pubblicazione scientifica [9]. In sintesi, questo è composto da i) un chiller, di potenza 1.27 kW per il sistema con accumulo del freddo e 2.57 kW per il sistema sprovvisto di accumulo; ii) un serbatoio per l'acqua nell'accumulo convenzionale (di dimensioni ridotte per il MikroCapsPCM15), alternativamente un serbatoio *ad hoc* per i PCM PureTemp 15 e RubithermRT15; iii) un sistema di tubature e iv) un sistema di valvole con attuatori per l'impianto con accumulo del freddo. Per maggiori dettagli sulla compilazione dell'inventario per il sistema di condizionamento ambientale, si può consultare il report LA 4.32 "Analisi LCA di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase".

Sono stati analizzati e comparati i seguenti sistemi:

- Sistema di condizionamento ambientale senza accumulo del freddo
- Sistema di condizionamento ambientale con accumulo convenzionale del freddo: 880 litri di acqua
- Sistema di condizionamento ambientale con accumulo del freddo: 170 Kg di PCM PureTemp15
- Sistema di condizionamento ambientale con accumulo del freddo: 200 Kg di PCM RubithermRT15
- Sistema di condizionamento ambientale con accumulo del freddo: 380 Kg di MikroCapsPCM15

Gli impatti ambientali sono stati calcolati rispetto ad 1 kWh termico servito dall'impianto. Per quanto concerne la domanda termica ed i consumi dell'impianto di raffrescamento, questi sono stati ricavati da [9], sia per il sistema con accumulo, sia per il sistema sprovvisto di accumulo del freddo. La vita utile dell'impianto è stimata in venti anni. In Figura 6 vengono presentati i risultati ottenuti per i vari sistemi e messi a confronto. Il metodo di calcolo utilizzato e mostrato in figura è il ReCiPe 2016 Endpoint (H). Si nota che il chiller ha un impatto molto elevato nelle categorie *Human Health* ed *Ecosystems*, specialmente per il sistema senza accumulo in cui il chiller ha una taglia all'incirca doppia rispetto ai sistemi con l'accumulo. Infatti, nella categoria *Human Health* il sistema di refrigerazione senza accumulo mostra le performance ambientali peggiori, quasi esclusivamente da attribuire al chiller. I PCM invece non presentano contributi molto rilevanti: 11% per il PureTemp15, 17% per il RubithermRT15 e 18% per il MikroCapsPCM15. Una differenza si nota anche nel contributo dei serbatoi, con il serbatoio per l'acqua, a cui corrisponde un impatto del 13.7% del totale, doppio rispetto al serbatoio per PCM. La differenza è dovuta al maggiore quantitativo di acciaio impiegato nella costruzione del serbatoio da quasi 900 litri per l'acqua. Questa differenza, comunque, non è abbastanza grande da compensare l'impatto dei vari PCM, rendendo il sistema con accumulo convenzionale il più vantaggioso.



**Figura 6. Confronto sistema di raffrescamento con e senza accumulo del freddo – accumulo convenzionale (Water) oppure con PCM. Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Endpoint (H)**

Nella categoria *Ecosystems*, invece, il sistema provvisto di accumulo con PCM PureTemp si dimostra quello dall'impatto più elevato. Come già messo in evidenza nella sezione precedente, per questa categoria di impatto, il PCM di origine vegetale mostra un gravoso riscontro, con una percentuale di 47.5%. In questo caso, l'immagazzinamento combinato di calore latente e sensibile nel PCM micro-incapsulato mostra i suoi effetti vantaggiosi; infatti, a differenza della figura 4, il ridotto quantitativo di MikroCapsPCM15 aumenta le performance ambientali, rendendo l'impatto in *Ecosystems* minore del sistema con PureTemp15. Tuttavia, anche in questa categoria il sistema con accumulo convenzionale del freddo risulta quello ambientalmente più sostenibile. Da ultimo, rispetto alla categoria *Resources*, i sistemi che implementano PCM basati su cere paraffiniche mostrano un impatto di gran lunga superiore. Al sistema con PCM RubithermRT15 corrisponde l'impatto maggiore, mentre al sistema senza accumulo il 19%, al sistema con accumulo convenzionale il 17% e al sistema con PureTemp15 il 18%. In conclusione, l'analisi ha evidenziato che dotare l'impianto di condizionamento ambientale di un sistema di accumulo del freddo, per quanto riguarda la fase di costruzione e messa in opera, ne migliora le prestazioni ambientali con alcune precisazioni:

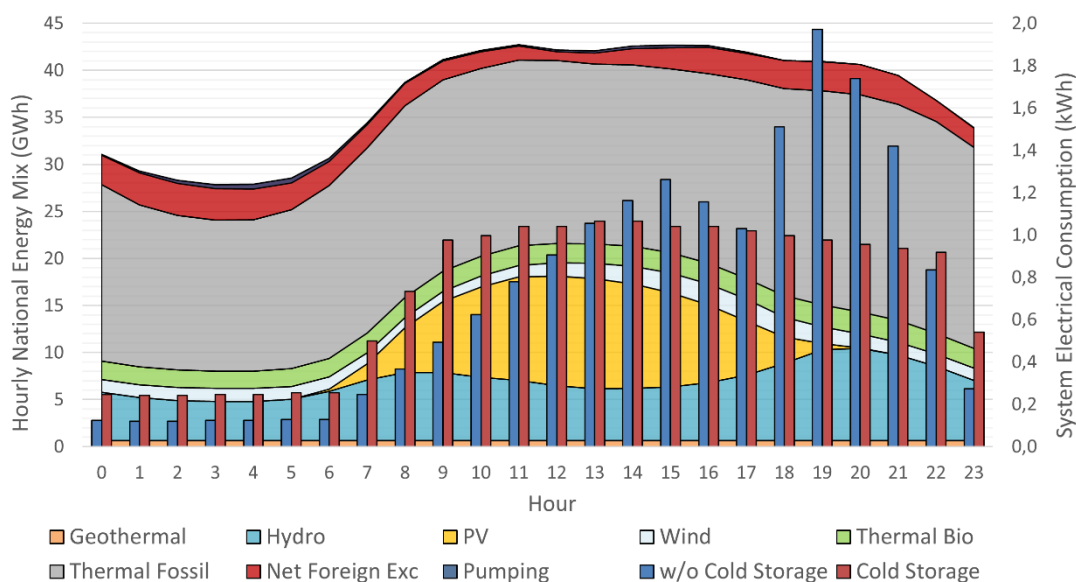
- Un sistema di accumulo del freddo convenzionale è migliorativo in tutte le categorie di impatto analizzate
- Rispetto ai danni agli ecosistemi, solo il sistema con PureTemp15 presenta impatti maggiori
- Rispetto allo sfruttamento delle risorse naturali, solo i sistemi che adottano PCM di origine fossile hanno impatti superiori

## 2.5 Mix elettrico nazionale su base oraria e consumi del sistema di raffrescamento

Per una corretta analisi del ciclo di vita dei sistemi studiati, la valutazione degli impatti ambientali collegati al funzionamento del sistema (fase d'uso) svolge spesso un ruolo centrale. In tale fase bisogna individuare gli scambi (input ed output) che il sistema ha durante tutta la sua vita utile. Come descritto in [9], il sistema di condizionamento ambientale è atto a soddisfare una domanda termica per il raffrescamento di un'utenza domestica. Nell'occorrenza che il sistema sia dotato o meno di accumulo del freddo, questa domanda termica viene soddisfatta con un consumo elettrico differenziato, che determina profili temporali di prelievo di energia elettrica dalla rete specifici per ogni sistema. Per i dettagli si consulti il riferimento di letteratura [9].

In breve, nel sistema senza accumulo il consumo elettrico segue l'andamento della domanda termica e presenta due picchi durante la giornata (Figura 7); invece, nel sistema provvisto di accumulo, si verifica un "peak levelling", ovvero il consumo elettrico non presenta più dei picchi ma una distribuzione piatta durante le ore diurne ed un'altra, seppure più bassa, durante le ore notturne (Figura 7). Si precisa, che i profili di consumo elettrico per il sistema con accumulo del freddo sono identici per i vari sistemi, indipendentemente dai materiali utilizzati per l'accumulo, cioè convenzionale o con PCM. La fase d'uso è stata, quindi, modellata differenziando il consumo elettrico per il sistema senza accumulo e per i sistemi con accumulo. Il modello LCA della fase d'uso ha preso in considerazione il profilo giornaliero di consumo elettrico per entrambi i sistemi, come simulato in [9], replicando questo profilo per i 92 giorni della stagione estiva (16 giugno – 15 settembre) e per i venti anni di vita utile dell'impianto.

Le fonti di produzione di energia elettrica in Italia hanno, chiaramente, una stagionalità ed una ciclicità rispetto alle 24 ore giornaliere. La peculiarità di funzionamento dei sistemi con e senza accumulo del freddo ha imposto di condurre un'approfondita analisi della produzione di energia elettrica in Italia (anno di riferimento 2020), al fine di costruire dei dataset *ad hoc*, differenziati nelle 24 ore giornaliere, del mix elettrico nazionale. Questo sforzo aveva lo scopo di stabilire quale sistema presentasse una gestione della domanda termica dell'utenza ambientalmente più sostenibile.



**Figura 7. Distribuzione dei consumi elettrici del sistema di condizionamento ambientale, rispetto alla produzione di energia elettrica in Italia. Sull'asse sinistro, mix elettrico nazionale su base oraria. Sull'asse destro, i consumi elettrici del sistema di condizionamento ambientale con e senza accumulo del freddo**

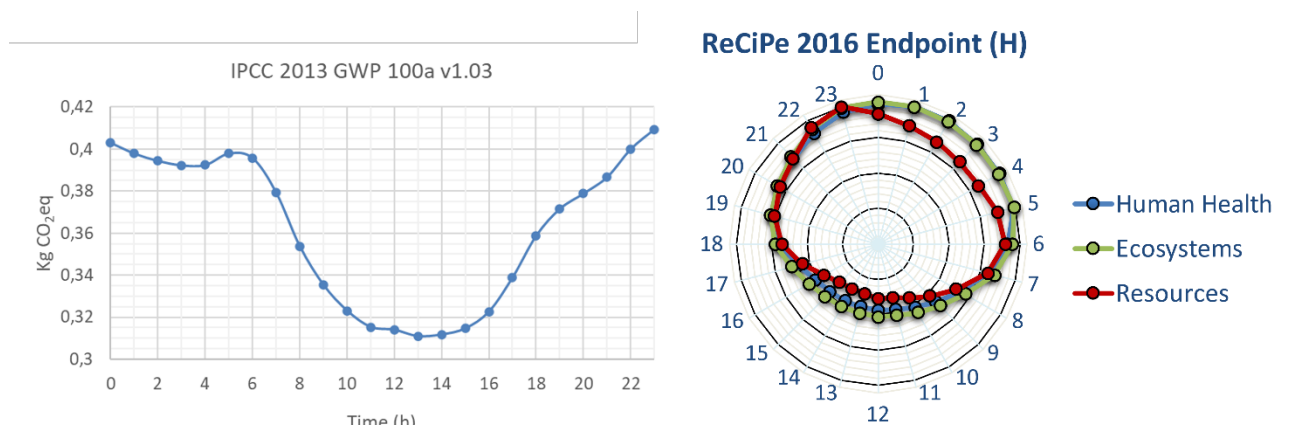
In Figura 7 viene presentato il profilo giornaliero del mix elettrico, segmentato rispetto alle diverse fonti, a cui sono sovrapposti i consumi elettrici dei sistemi con e senza accumulo del freddo. La dipendenza oraria del mix elettrico nazionale di Figura 7 si riferisce alla media rispetto al periodo 16 giugno 2020 – 15 settembre 2020. I dati per la produzione elettrica sono organizzati in Figura 7 in modo da avere tutte le fonti rinnovabili a partire dal basso, a seguire il termico fossile (sezione in grigio in figura) e da ultimo l'import netto dall'estero. Si nota in Figura 7 che il consumo elettrico per il sistema senza accumulo ha un picco di assorbimento dalla rete nazionale tra le ore 18:00 e le 21:00. In questo arco di tempo, la quota di fotovoltaico si riduce fortemente, fino ad azzerarsi, e la percentuale di rinnovabili decresce rapidamente, sebbene la produzione di idroelettrico aumenti rispetto alle ore centrali del giorno. Nel resto delle 24 ore, il sistema senza accumulo assorbe pochissima energia elettrica nelle ore notturne, mentre il consumo aumenta nelle ore del giorno fino ad un massimo intorno alle 15:00. Nelle stesse ore centrali del giorno, quando la percentuale di rinnovabili è massima, il consumo di elettricità da parte del sistema con accumulo è costante

e superiore al sistema senza accumulo tra le 08:00 e le 13:00. Nelle ore serali, l'assorbimento di energia elettrica da parte del sistema con accumulo è inferiore al sistema senza accumulo, mentre di notte per entrambi i sistemi si osserva un consumo elettrico costante e limitato, con il sistema con accumulo che preleva un quantitativo maggiore.

Per la costruzione dei profili orari di produzione elettrica, sono stati utilizzati i dati messi a disposizione da Terna [10] ed i report statistici pubblicati sempre da Terna [11]. Le componenti del mix energetico di Figura 7 si riferiscono alla richiesta sulla rete elettrica, ovvero alla somma della produzione netta – cioè la produzione lorda meno l'autoconsumo e le perdite -, del saldo degli scambi con i Paesi confinanti e dei pompaggi. La richiesta elettrica non comprende le perdite sulla rete elettrica, che avvengono sulla linea di trasmissione, di distribuzione e nelle cabine di trasformazione. Tuttavia, tali perdite sono state incluse nella costruzione dei database per il modello LCA.

La compilazione degli inventari per il mix elettrico nazionale su base oraria ha preso in considerazione sia le diverse fonti di produzione, sia la grande maggioranza delle tecnologie in essere per la produzione di elettricità [10, 11, 12], mantenendo le proporzioni rispetto alla produzione totale, oltre a considerare gli autoconsumi. A grandi linee, i dataset per il mix orario prevedono:

- Fotovoltaico (impianti a bassa tensione ed impianti a media-alta tensione)
- Geotermia
- Eolico (impianti onshore con  $P < 1$  MW,  $1$  MW  $< P < 3$  MW,  $P > 3$  MW)
- Idroelettrico (ad acqua fluente, da bacini alpini, da pompaggi)
- Termico da biomasse (biogas, bio-solidi, rifiuti solidi urbani)
- Termico fossile (gas naturale - ciclo combinato, impianti convenzionali, impianti di cogenerazione -, carbone, petrolio, gas derivati)
- Import & Export (da Francia, Svizzera, Austria, Slovenia, Montenegro, Grecia, Malta)



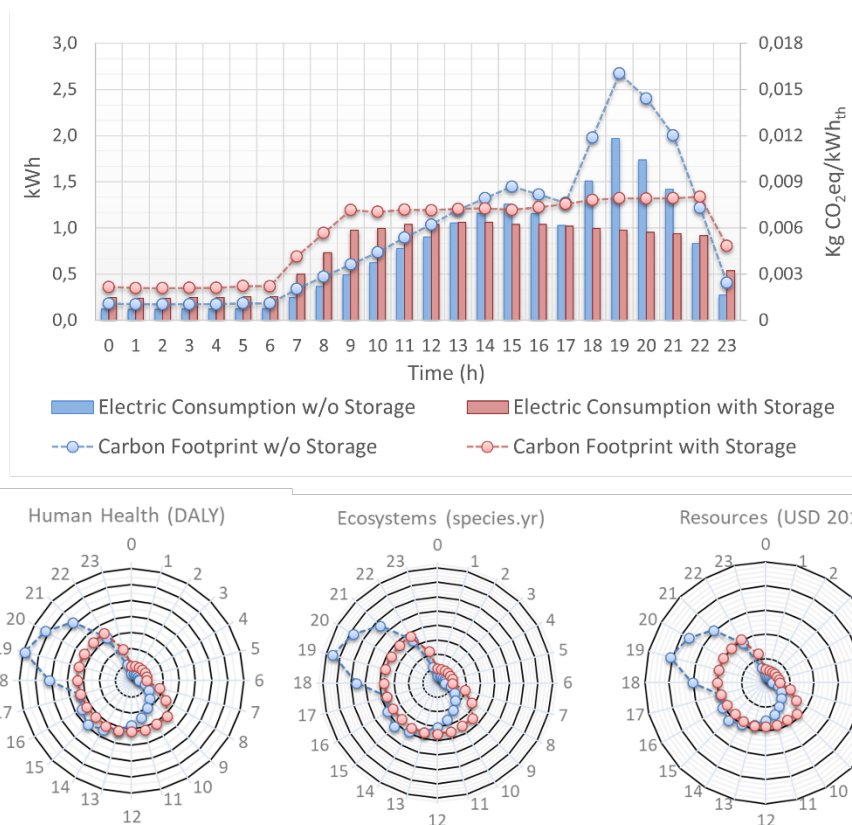
**Figura 8. A sinistra, dipendenza oraria della Carbon Footprint per 1 kWh da mix elettrico nazionale. A destra, valutazione su base oraria delle categorie Endpoint del metodo ReCiPe 2016 H per 1 kWh da mix elettrico nazionale; i dati sono normalizzati su un grafico radiale**

In Figura 8 viene presentata l'analisi effettuata per 1 kWh, prelevato dalla rete nazionale, in dipendenza dell'ora. I metodi di calcolo sono IPCC 2013 (a sinistra in Figura 8), per il calcolo della Carbon Footprint e il ReCiPe 2016 Endpoint (H) per il calcolo dell'impronta ambientale (a destra in Figura 8). Il grafico a sinistra di Figura 8 mostra le emissioni di gas climalteranti, correlate al consumo di 1 kWh. Le emissioni, espresse in Kg di CO<sub>2</sub>eq, sono al massimo durante le ore notturne e le prime ore mattutine, per poi diminuire rapidamente e raggiungere un minimo tra le 13:00 e le 14:00. In termini percentuali, tale decrescita corrisponde ad una

diminuzione del 25% circa – tra il massimo di 0.41 ed il minimo di 0.31 Kg CO<sub>2</sub>eq. Nelle ore del tardo pomeriggio e della serata le emissioni risalgono, anche se con un andamento meno rapido. Questo è dovuto, almeno parzialmente, all’effetto dell’aumento di produzione di idroelettrico, usato per sopperire alla mancanza di fotovoltaico, in un momento della giornata in cui la richiesta elettrica sulla rete resta ancora alta. In Figura 8 sono mostrati anche i risultati del ReCiPe 2016 Endpoint. I dati sono presentati su un grafico orario. In maniera analoga alla Carbon Footprint, le categorie del ReCiPe Endpoint presentano un andamento alternato rispetto alle ore del giorno e della notte. Ciò determina un’asimmetria delle risultanti curve orarie. Tale asimmetria non solo è evidente sull’asse giorno-notte (asse 00:00 – 12:00), ma anche rispetto all’asse alba-tramonto (asse 06:00 – 18:00). Infatti, si può osservare che, mentre l’impatto è massimo nelle ore notturne, rimanendo pressoché costante fino alle 06:00 per poi raggiungere il minimo intorno a metà giornata molto rapidamente, durante le ore serali gli impatti degradano verso valori superiori più lentamente, presentando inoltre due diverse pendenze fino alle 18:00 e tra le 18:00 e le 23:00. Rispetto a queste osservazioni, solo la categoria *Resources* presenta delle leggere differenze, mostrando una curva più “schiacciata” già durante le prime ore del giorno.

### 2.6 Impronta ambientale dei consumi per domanda termica (fase d’uso)

In Figura 9 sono mostrati i risultati per le analisi con metodo IPCC 2013 e ReCiPe 2016 Endpoint, per la fase d’uso dei sistemi di condizionamento ambientale studiati.

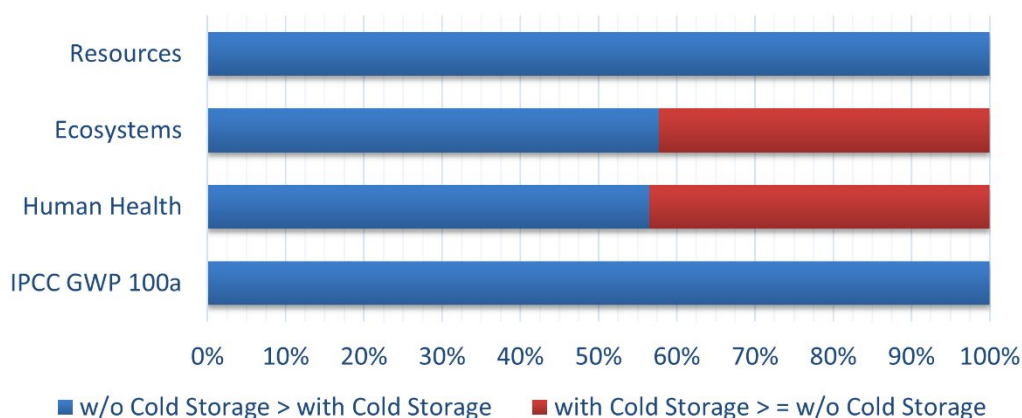


**Figura 9. In alto, Carbon Footprint con metodo IPCC e consumi elettrici per il sistema di condizionamento ambientale con e senza accumulo del freddo durante l’arco della giornata. In basso, valutazione su base oraria delle categorie Endpoint del metodo ReCiPe 2016 H per sistema con e senza accumulo del freddo**

L’analisi riportata nel precedente paragrafo ha permesso di valutare l’impatto dello specifico funzionamento per le due tipologie di sistemi, sia ad ogni ora che nel complesso della giornata. Relativamente alla Carbon Footprint, al sistema senza accumulo sono collegate delle importanti emissioni tra le 17:00 e le 22:00. Ciò è



dovuto all'effetto combinato dell'elevato consumo elettrico del sistema ed al sostenuto valore di emissioni specifiche (Kg di CO<sub>2</sub>eq emessi per kWh consumato) in quell'arco della giornata. Inoltre, le emissioni risultano particolarmente contenute durante la notte, per poi salire quasi linearmente durante il resto della giornata. Il sistema con accumulo, invece, presenta due profili di emissioni, per lo più costanti. Il primo, durante le ore notturne più contenute, sebbene con un valore maggiore del corrispettivo senza accumulo. Il secondo, che copre all'incirca il resto della giornata, con valori di emissioni più sostenuti e caratterizzato da una leggera crescita che si osserva nelle ore serali. Si fa notare che in questo caso il valore massimo di emissioni raggiunto, pari a 0.008 KgCO<sub>2</sub>eq/kWh<sub>th</sub>, è ben al di sotto, per la precisione circa la metà, del valore massimo osservato per il sistema senza accumulo (0.016 KgCO<sub>2</sub>eq/kWh<sub>th</sub>). Nel complesso, le emissioni cumulate durante le 24 ore differiscono per i due profili di un valore intorno a 1%. Le maggiori emissioni che accompagnano il sistema senza accumulo durante la notte vanificano in parte i benefici derivanti dall'assenza di un picco di consumo elettrico nelle ore serali. In un'ottica di eco-design, i risultati qui messi in evidenza suggerirebbero che uno shift del picco d'assorbimento elettrico in ore a più basse emissioni specifiche potrebbe essere da preferire ad un sistema di "levelling" del picco, come implementato nel caso studio. Da ultimo, si osserva che la piccola differenza complessiva nelle fasi d'uso è tuttavia statisticamente significativa, come evidenziato in Figura 10. Qui viene presentato il risultato dell'analisi d'incertezza per il metodo IPCC 2013 (insieme all'incertezza sui risultati ReCiPe 2016 Endpoint), che evidenzia una percentuale del 100% di *trials* in cui è risultato un impatto maggiore per la fase d'uso del sistema senza accumulo, rispetto alla fase d'uso del sistema con accumulo.



**Figura 10. Analisi di incertezza con metodo Monte Carlo per le categorie di IPCC e ReCiPe Endpoint. Percentuale di *trials* corrispondenti ad un impatto Sistema senza accumulo del freddo > Sistema con accumulo del freddo (in blu)**

In Figura 9 sono presentati anche i risultati del metodo ReCiPe 2016 Endpoint. Per tutte e tre le categorie di danno si osserva un andamento simile, in cui il sistema senza accumulo presenta un forte impatto nelle ore serali, mentre il sistema con accumulo mostra un valore degli impatti circa costante tra le 09:00 e le 22:00, che determina una forma del profilo semicircolare sui diagrammi radiali. L'analisi d'incertezza sugli impatti cumulati nelle 24 ore restituisce, però, una informazione diversa a seconda della categoria: per la categoria *Resources* i minori impatti osservati nel sistema con accumulo corrispondono al 100% dei casi, mentre in *Ecosystems* e *Human Health* le migliori performance del sistema con accumulo soffrono di un'incertezza ben maggiore. In conclusione, si può affermare che il profilo di consumo elettrico, implementato nel sistema con accumulo del freddo, porta un leggero ma statisticamente robusto beneficio ambientale per quanto riguarda le emissioni di gas serra e lo sfruttamento delle risorse naturali. Relativamente agli effetti sulla salute umana e sugli ecosistemi, invece, il contenuto beneficio ambientale portato dal sistema con accumulo è affetto da un'incertezza troppo grande per essere corroborato. Nel prossimo paragrafo, i risultati ottenuti per la fase d'uso saranno integrati alla precedente analisi sui materiali e sull'impianto di condizionamento ambientale.

## 2.7 Confronto degli impatti ambientali dei cicli di vita dei sistemi di raffrescamento con e senza accumulo del freddo

In Figura 11 sono mostrati i risultati LCA per il ciclo di vita dei sistemi con e senza accumulo del freddo calcolati con il metodo ReCiPe 2016 Endpoint, e i risultati della Carbon Footprint calcolati con il metodo IPCC 2013. Si osserva che la fase d'uso contribuisce in maniera decisiva in tutte le categorie d'impatto, con valori che vanno da 61% circa nella *Human Health* a 80% circa per le emissioni di CO<sub>2</sub>eq. L'analisi sul ciclo di vita conferma le osservazioni fatte nel paragrafo 2.4 rispetto ai singoli sistemi di condizionamento con e senza accumulo. Infatti, anche considerando la fase d'uso, il sistema con accumulo rappresenta una valida alternativa a cui corrispondono migliori performance ambientali, in particolar modo per l'accumulo convenzionale. Questo risulta essere il sistema meno impattante in tutte le categorie analizzate. Per quanto concerne la categoria *Human Health*, anche i sistemi di accumulo con PCM presentano dei vantaggi ambientali. Nelle altre categorie di danno la situazione è più complessa: per le *Resources* l'utilizzo di PCM a base di cere paraffiniche restituisce un impatto molto superiore, mentre in *Ecosystems* è il sistema con PCM a base vegetale ad avere, seppur di poco, i valori più elevati. Del resto, va ricordato che in questa categoria d'impatto l'incertezza risulta piuttosto elevata (Figura 5 e 10). Rispetto alla Carbon Footprint, il sistema con accumulo è più sostenibile nella configurazione convenzionale o con PCM PureTemp, mentre è di poco superiore per la configurazione con PCM RubithermRT15 o MikroCaps. In questo caso, le differenze sono piuttosto ridotte, ma l'incertezza associata ai dati del modello e al metodo è limitata (Figura 10). Ciò permette di affermare che il modesto vantaggio ambientale è sì contenuto, ma altamente affidabile.

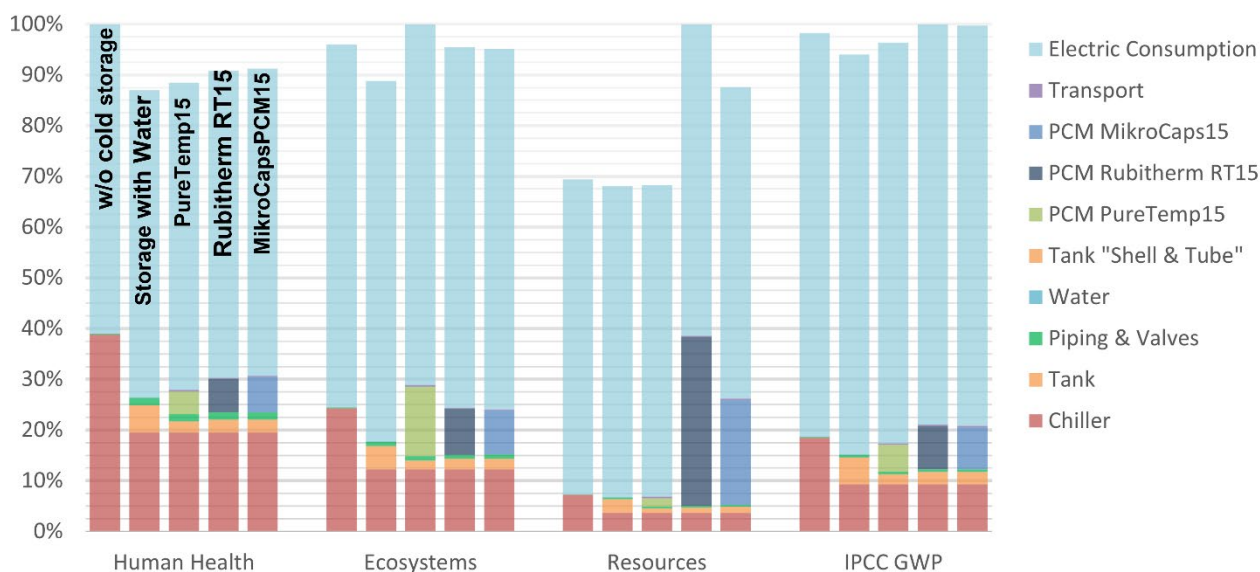
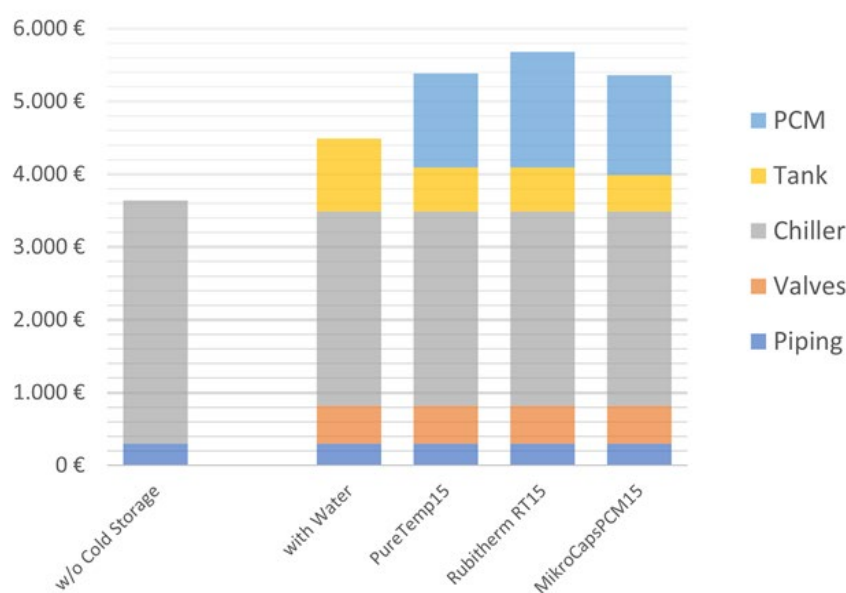


Figura 11. Confronto degli eco-profili delle fasi di fabbricazione e operativa per il sistema di raffrescamento con e senza accumulo del freddo – accumulo convenzionale (Water) oppure a PCM. Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Endpoint (H) e IPCC 2013

## 2.8 Analisi economica sistemi di raffrescamento

L'analisi economica ha evidenziato l'inconvenienza del sistema di raffrescamento dotato di accumulo del freddo rispetto al sistema di raffrescamento senza accumulo. Sono stati valutati i due investimenti, dividendo le voci di spesa in 1) *capital cost* e 2) *operating cost*. Nei costi di capitale sono state comprese tutte le spese legate all'acquisto dei componenti dell'impianto. I *capital cost* risultano essere più bassi per il sistema senza accumulo, sebbene questo preveda un chiller di potenza e costo più elevato. Tuttavia, l'impianto per accumulo del freddo con acqua prevede l'acquisizione di un boiler ed un sistema di valvole, che rende il costo

capitale totale maggiore del 23%. Per quanto riguarda i sistemi di accumulo con PCM, a questi costi va aggiunto il costo del PCM stesso, col risultato netto di aumentare i costi capitali del 48%, nel caso dei PCM PureTemp15 e MikroCapsPCM15, e del 56% nel caso del PCM RubithermRT15. I costi operativi sono stati valutati considerando le tariffe biorarie (fascia F1 e fascia F23) per il primo trimestre 2022 (dati ARERA [13]). Sebbene i due sistemi abbiano un consumo energetico con una distinta distribuzione durante l'arco della giornata, il costo per il raffrescamento è pressoché identico: 477 €/anno (calcolato sui soli mesi estivi) per il sistema senza accumulo e 475 €/anno per il sistema con accumulo (per i costi operativi non c'è differenza rispetto al materiale di storage). La minima differenza calcolata è dovuta al fatto che il picco di domanda energetica, intrinseco del profilo di consumi del sistema senza accumulo, viene a trovarsi a cavallo del passaggio tra le due tariffe. Ciò determina una spesa giornaliera simile a quella del sistema con accumulo, che invece prevede un profilo di consumi molto più costante.



**Figura 12. Costi d'investimento (capital costs) per il sistema di condizionamento ambientale con e senza accumulo del freddo**

La strategia di accumulo energetico potrebbe risultare più redditizia alla luce dei nuovi incentivi per le comunità energetiche e di autoconsumo collettivo [14]. Il nuovo quadro normativo, configurato dal Ministero dello Sviluppo Economico [14], inizia la sperimentazione di un sistema incentivante atto a massimizzare l'autoconsumo e la condivisione di energia prodotta localmente da piccoli produttori da fonti rinnovabili. In una comunità energetica (o di autoconsumo collettivo) un utente domestico è un produttore di energia da fonti rinnovabili, che soddisfa la propria richiesta energetica e immagazzina il surplus energetico (o lo vende ad un altro autoconsumatore della comunità). In questo scenario, un sistema di accumulo di energia termica (o accumulo del freddo) aumenterebbe la quota di energia autoconsumata dall'utenza domestica che partecipi ad una comunità di autoconsumo collettivo. In tal caso il sistema di incentivi sarebbe largamente premiante rispetto alla vendita sul mercato dell'energia prodotta.

### 3 Conclusioni

L'attività LA 4.33 ha esaminato le prestazioni ambientali di un sistema di accumulo del freddo per un impianto di condizionamento ambientale. I risultati ottenuti hanno evidenziato la maggiore sostenibilità ambientale dell'accumulo rispetto ad un sistema sprovvisto di accumulo del freddo. D'altro canto, una parallela analisi

economica ha rivelato che i maggiori costi d'investimento del sistema di accumulo non sono compensati dalla gestione dei consumi elettrici, che in uno schema tariffario biorario non risulta più redditizia. Le prestazioni ambientali sono state valutate in termini di emissioni di gas climalteranti (Carbon Footprint) e di danno Endpoint, con il metodo ReCiPe 2016. Il sistema con accumulo del freddo presenta vantaggi in diverse fasi del ciclo di vita, sia nella produzione dei materiali e dei componenti dell'impianto, sia nell'intrinseco funzionamento del sistema (fase d'uso). Per l'accumulo convenzionale ad acqua, ciò risulta essere vero in tutte le categorie di danno analizzate. Differentemente, i materiali a cambiamento di fase mostrano impatti fortemente dipendenti dalla categoria presa in esame; per cui si osserva un impatto ridotto per tutti i PCM nella categoria di danno alla salute umana, mentre nelle categorie di danno agli ecosistemi e di sfruttamento delle risorse naturali, gli impatti specifici rispettivamente del PCM di origine vegetale e del PCM di origine fossile rendono il sistema con accumulo più gravoso. Relativamente alla fase d'uso, l'accumulo del freddo previene un picco di consumi elettrici, concentrati nelle ore serali, che determinano un elevato tasso di emissioni. Al profilo piatto di consumi elettrici del sistema con accumulo corrisponde, quindi, un quantitativo di emissioni ridotto. Questo miglioramento nelle prestazioni ambientali del sistema è tuttavia ridimensionato dal consumo di energia elettrica, che si verifica durante le ore notturne. I risultati ottenuti possono essere di stimolo per l'implementazione di altre strategie di gestione della domanda termica, come, ad esempio, concentrare l'assorbimento di energia dalla rete elettrica nazionale nelle ore centrali del giorno, a minore intensità di emissioni. Inoltre, da un punto di vista economico, nel caso in cui il sistema di condizionamento con accumulo del freddo fosse in dotazione di un'utenza facente parte di una comunità energetica o di autoconsumo collettivo, questo corrisponderebbe a un risparmio della spesa energetica. Infatti, a queste comunità viene riconosciuto un premio economico aggiuntivo, in un quadro regolatorio ancora in fase sperimentale, per l'energia autoconsumata o condivisa.

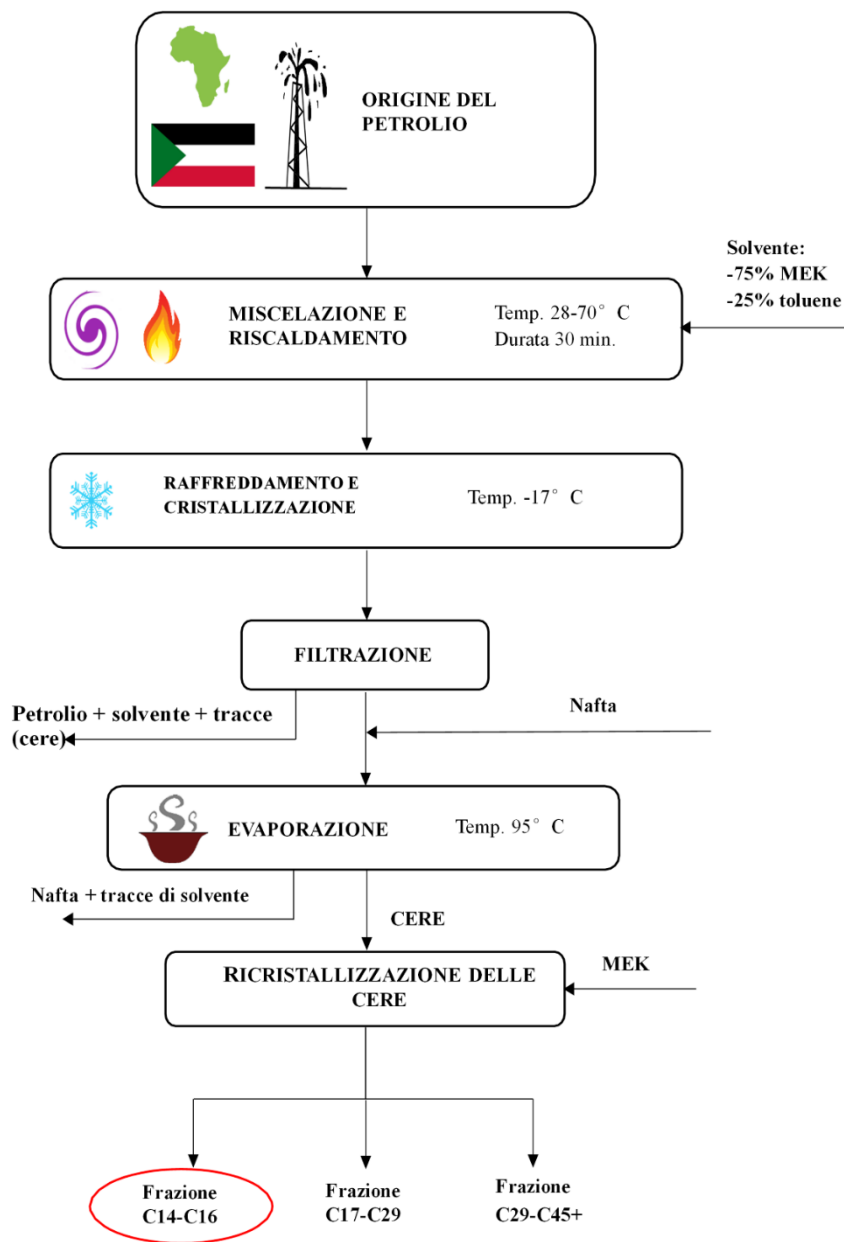
## 4 Addendum

### 4.1 Affinamento LCI e performance ambientali dei PCM RubithermRT15 e PureTemp15

Nell'ultima annualità gli inventari per i PCM RubithermRT15 e PureTemp15 sono stati affinati come conseguenza di un'ulteriore, approfondita analisi dei processi di produzione. Questo approfondimento ha permesso, specialmente per il PCM di origine fossile, di ottenere risultati più accurati rispetto all'impatto ambientale di tali materiali. Nel seguito sono presentati gli avanzamenti più consistenti eseguiti su entrambi gli inventari, insieme con i relativi risultati di valutazione ambientale.

Relativamente al PCM RubithermRT15, questo consiste di cera paraffina, con una ristretta distribuzione di pesi molecolari, comprendente catene alifatiche un numero di atomi di carbonio tra 14 e 16. Le cere paraffiniche sono ricavate tramite un processo di deceratura del petrolio grezzo. La deceratura consiste in una cristallizzazione delle cere, ottenuta aggiungendo al petrolio uno specifico solvente. Industrialmente il processo più utilizzato è conosciuto come processo Texaco, schematizzato in Figura A1. In questo caso, il solvente impiegato è una miscela di metiletilchetone (MEK) e toluene. Il MEK ha la funzione di far precipitare la cera, mentre il toluene garantisce la fluidità del greggio a basse temperature [15]. Dopo la miscelazione con solvente, il petrolio viene riscaldato e successivamente raffreddato. Il ciclo termico è necessario alla precipitazione delle cere. Successivamente, viene eseguita una filtrazione per rimuovere il petrolio e il solvente utilizzato [16]. Al fine di eliminare il solvente residuo, la cera è riscaldata nuovamente. Il contenuto di cera nel greggio è dipendente dal prodotto di partenza. Nella presente analisi il quantitativo di cera è pari al 25,8% in peso [17]. Altri studi hanno dimostrato una quantità di cera pari al 27-28% in peso, su campioni di petrolio provenienti dall'Australia; tuttavia, generalmente, il quantitativo delle cere totali nel petrolio non supera il 33%. La cera ottenuta in uscita dal processo Texaco è, in effetti, una miscela di catene alifatiche di differente lunghezza e peso molecolare. Al fine di ottenere un prodotto più omogeneo – quindi dalle caratteristiche chimico-fisiche e termiche maggiormente definite - la cera proveniente dalla fase di evaporazione viene frazionata utilizzando solvente. Anche in questa fase il solvente utilizzato è il MEK. La separazione delle diverse frazioni di cera avviene tramite successivi cicli di riscaldamento e raffreddamento. Ad ogni ciclo termico, una determinata frazione di cera, con punti di fusione molto vicini, precipita in cristalli.

Rimuovendo quest'ultimi tramite filtrazione, si ottiene una cera paraffinica con specifiche caratteristiche e composizione molto più omogenea.



**Figura A1. Flow-chart processo di separazione e frazionamento delle cere paraffiniche**

Rispetto al PCM RubithermRT15 le modifiche all'inventario del PCM PureTemp15, intervenute successivamente al report dell'attività LA 4.32, sono state meno rilevanti. Nel seguito si delineano le fasi principali del processo di separazione ed esterificazione degli acidi grassi dagli oli vegetali, che sono rappresentate nello schema di Figura A2. Come già rilevato nel report "Analisi LCA di Sistemi di Accumulo del Freddo Basati sull'Utilizzo di Materiali a Cambiamento di Fase" dell'attività LA 4.32, il PureTemp15 risulta essere composto da estere metilico dell'acido miristico. Per l'ottenimento dell'estere si sottopone l'olio di cocco (o olio da semi di palma) ad una serie di processi, partendo dal pretrattamento dell'olio, seguito dal processo di fat- splitting - reazione di idrolisi di oli e grassi, che separa gli acidi grassi e la glicerina dai trigliceridi -, per poi passare alla distillazione con frazionamento, finalizzata alla separazione dei diversi acidi grassi presenti nell'olio vegetale. Da ultimo, la frazione di acidi grassi desiderata (acido miristico) è fatta

reagire con un alcol (metanolo) in un processo di esterificazione, noto come reazione di Fischer, per ottenere l'estere corrispondente. La separazione dei vari acidi grassi dalla glicerina (processo fat-splitting) può avvenire secondo diversi processi. Il processo continuo, noto anche come processo Colgate-Emery, risulta essere quello più utilizzato, perché permette di ottenere un'alta resa in un tempo limitato (solitamente 2-3 ore), grazie alle elevate pressioni e temperature utilizzate (250-260°C) [18]. Tale processo utilizza un flusso di olio e acqua in controcorrente, che permette di ottenere alte rese di prodotto e senza l'utilizzo di catalizzatori. Il cuore di questo processo è rappresentato da una torre di splittaggio.

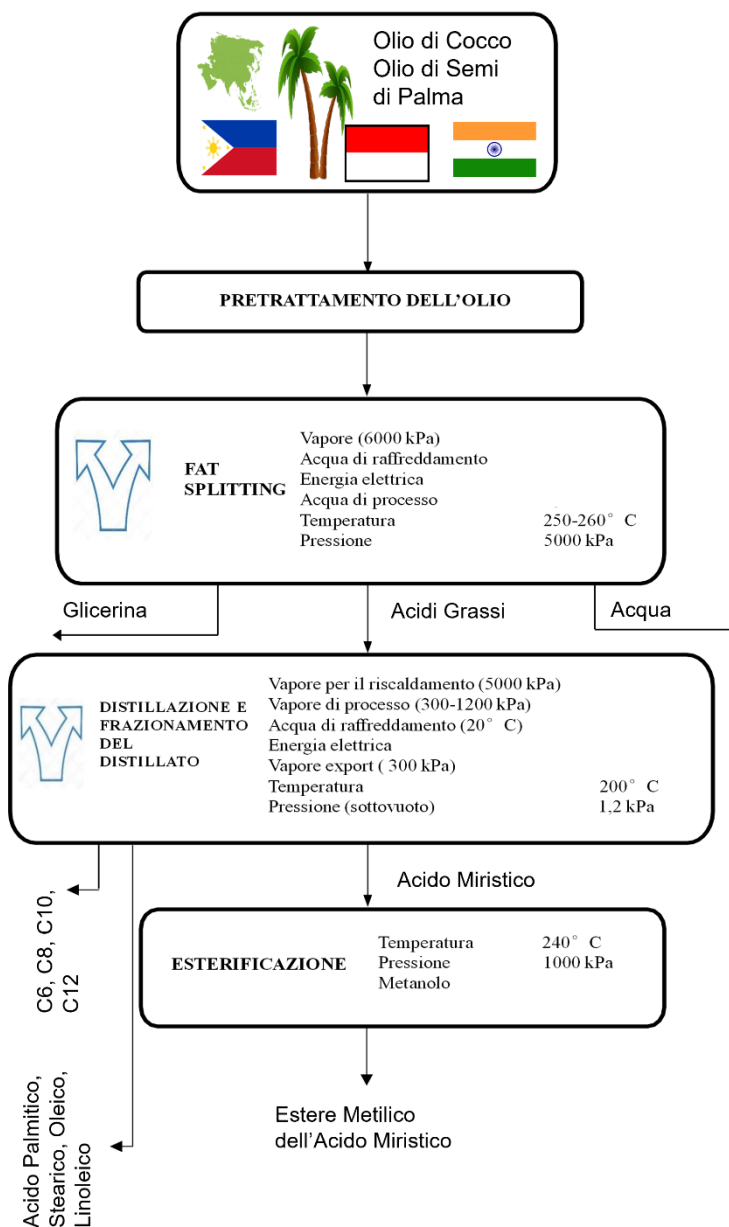


Figura A2. Flow-chart processo di fat-splitting, frazionamento ed esterificazione degli acidi grassi

La successiva fase prevede un impianto di distillazione. L'utilizzo di vapore permette di rimuovere le impurezze a basso punto di ebollizione, migliorando inoltre la circolazione degli acidi che evaporano velocemente. Il distillato in uscita può arrivare ad un grado di purezza pari al 99%. In seguito, una distillazione frazionata ad alta temperatura permette di separare gli acidi grassi a seconda della volatilità degli acidi; in altre parole, gli acidi grassi di differente peso molecolare vengono separati in successivi frazionamenti (processo multistage) nelle colonne dell'impianto di distillazione. L'ultimo passaggio consiste nel far reagire

l'acido di interesse – nel nostro caso l'acido miristico - con il metanolo in ambiente acido, al fine di ottenere l'estere corrispondente. La reazione, nota come esterificazione di Fischer, è presentata per un generico acido grasso ed un generico alcol in Figura A3.

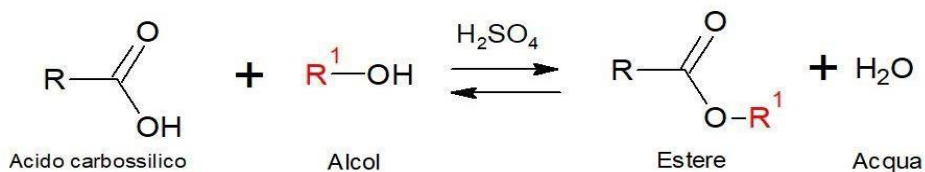
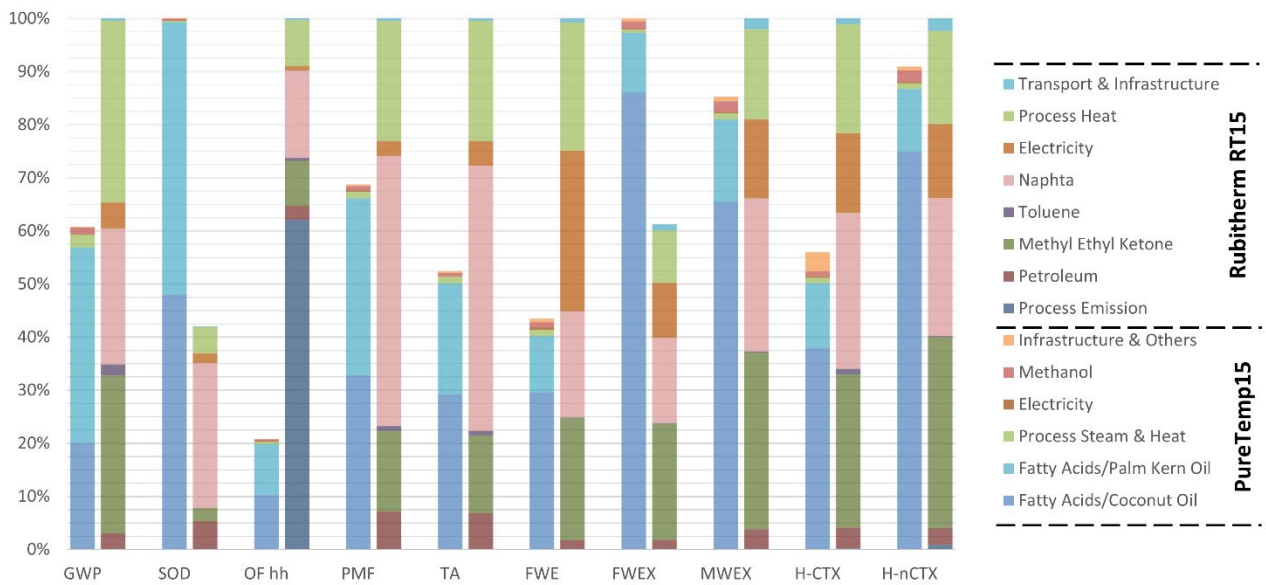


Figura A3. Reazione di esterificazione di Fischer

In Figura A4 e A5 vengono presentati e messi a confronto i risultati, ottenuti con il metodo ReCiPE 2016 Midpoint (H), per i due PCM PureTemp15 e Rubitherm RT15. Si sottolinea ancora, che il confronto è effettuato sulla base del quantitativo di materiale necessario ad immagazzinare 1 MJ di energia termica. 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:

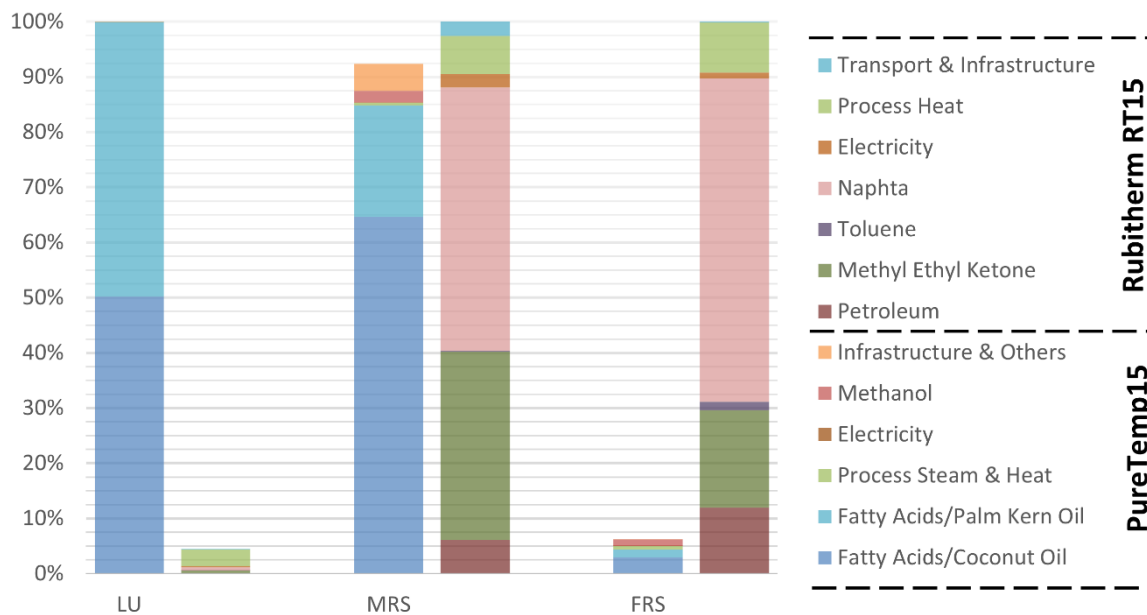
- 5.49 Kg di PureTemp15
- 6.45 Kg di Rubitherm RT15

In Figura A4 sono valutate le categorie di danno per l'ambiente e gli ecosistemi. Si nota come il profilo ambientale dipenda fortemente dal PCM considerato; in ultima analisi, ciò è conseguenza del processo di produzione e dei materiali impiegati per la manifattura dei PCM. Infatti, si osserva che il PCM di origine vegetale (PureTemp15) è particolarmente impattante nelle categorie di consumo dello strato di ozono stratosferico (SOD) e di ecotossicità acquatica (FWEX) – in misura più ridotta anche della tossicità umana non cancerogena (H-nCTX) – come risultato dell'uso di fertilizzanti e del cambiamento d'uso dei terreni, nella categoria SOD, e per l'uso di macchine agricole, dei sistemi di irrigazione ed emissioni dirette, coinvolte nelle coltivazioni (specialmente per l'olio di cocco), per le categorie FWEX e H-nCTX. Più in generale, la produzione degli oli vegetali, punto di partenza per la produzione del PureTemp15, è il processo che dà il maggiore contributo in tutte le categorie di impatto. Relativamente al Rubitherm RT15, in termini generali, si può osservare che un grosso contributo all'impatto ambientale è dato dal massivo utilizzo di solventi (MEK, toluene, nafta). Naturalmente, tali contributi vanno intesi come distribuiti su tutta l'eredità ambientale – produzione, supply chain, emissioni, etc. Inoltre, si nota che le emissioni dirette, generate durante il processo di deceratura del greggio e di frazionamento delle cere, interessano principalmente la categoria di formazione dell'ozono (OF hh) con il 62% dell'impatto totale. Si rileva inoltre il contributo dell'energia termica utilizzata nel processo di lavaggio delle cere, che influisce su tutte le categorie di impatto ed in quantità maggiore nel GWP (34%), FWE (24%), TA e PMF (23%). L'elettricità è un'altra risorsa che interessa diverse categorie, in particolar modo la categoria di eutrofizzazione delle acque dolci (FWE) con il 30% del totale.



**Figura A4. Confronto tra i PCMs PureTemp15 (barre a sx) e Rubitherm RT15 (barre a dx). Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Midpoint (H). Categorie di danno dell’ambiente e degli ecosistemi**

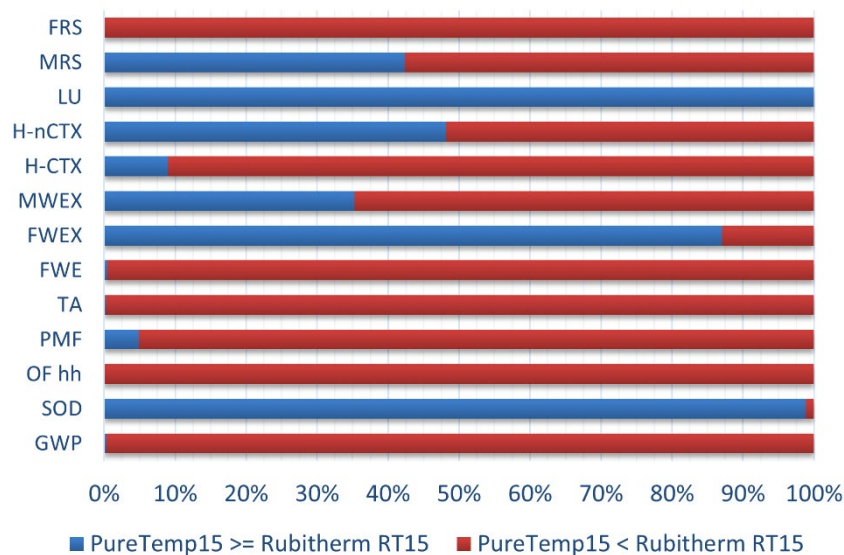
Rispetto alle categorie di sfruttamento delle risorse (Figura A5), si nota una chiara distinzione tra i due PCMs. Infatti, il PureTemp15 è altamente più impattante nella categoria di sfruttamento del suolo (LU), in conseguenza della superficie dedicata alle colture vegetali, mentre il Rubitherm RT15 necessita di un quantitativo ingente di risorse fossili. Dalla Figura A5 si evince come quest’ultimo risultato sia dovuto non solo al petrolio, materiale di partenza delle cere paraffiniche, ma anche ai solventi – MEK e nafta principalmente – ed al combustibile necessario alla produzione di calore. Fa eccezione la categoria MRS sulle risorse minerarie, in cui non c’è una chiara prevalenza di un materiale a cambiamento di fase rispetto all’altro – il PureTemp15 ha un impatto pari al 92% del Rubitherm RT15.



**Figura A5. Confronto tra i PCMs PureTemp15 (barre a sx) e Rubitherm RT15 (barre a dx). Metodo di calcolo ReCiPe 2016 Midpoint (H). Categorie di sfruttamento delle risorse naturali**



La valutazione ambientale è stata integrata con un’analisi dell’incertezza, al fine di valutare l’affidabilità statistica dei risultati ottenuti (e presentati nelle Figure A4 e A5). L’analisi è stata effettuata tramite metodo Monte Carlo, calcolando la differenza “**PureTemp15-Rubitherm RT15**” con 10000 *trials*. Considerando l’incertezza nei dati di input, il metodo di calcolo valuta la distribuzione del risultato e la frazione di *trials*, mostrata in Figura A6, per cui risulta “**PureTemp15 >= Rubitherm RT15**”. In Figura A6 si nota come le differenze osservate in alcune categorie di Figura A4 e A5 siano statisticamente significative, ad esempio GWP, SOD, LU, FRS, etc., dove la frazione di *trials* a favore di un PCM (o l’altro) approssima il 100%. In altre categorie, come MWEX, H-nCTX e MRS, invece, la distribuzione dei risultati del calcolo si avvicina ad uno splitting tra i due PCMs – con valori compresi tra 30% e 70%. Ciò rende le differenze osservate (Figure A4 e A5) nelle categorie in questione non sufficientemente significative. È da notare che questo accade anche per categorie, per cui il risultato dell’analisi porti a differenze di impatto addirittura del 15% circa, come nel caso della categoria MWEX (Figura A4). Da ultimo, si nota che per la categoria H-CTX la frazione di *trials* con “**PureTemp15 >= Rubitherm RT15**” è di circa il 10%, sebbene il PureTemp15 abbia un impatto, rispetto ai valori di input del modello, pari al 56% dell’impatto del Rubitherm RT15. Questo è effetto dell’incertezza sui dati di input e dell’incertezza intrinseca del metodo di calcolo per tale categoria. In ragione di ciò, specialmente per le categorie di tossicità ed ecotossicità, è estremamente importante valutare l’incertezza dei dati e del modello, che spesso ampliano considerevolmente l’intervallo di confidenza per i risultati ottenuti.



**Figura A6. Analisi di incertezza con metodo Monte Carlo. Percentuale di *trials* corrispondenti ad un impatto maggiore per il PCM PureTemp15 (PureTemp15 >= Rubitherm RT15) e ad un impatto minore (PureTemp15 < Rubitherm RT15) per le categorie di impatto analizzate**

## 4.2 Informazioni Supplementari

In Figura A7 i risultati dell’analisi di incertezza per il MikroCapsPCM15, ottenuta con metodo Monte Carlo su 10<sup>4</sup> *trials*.

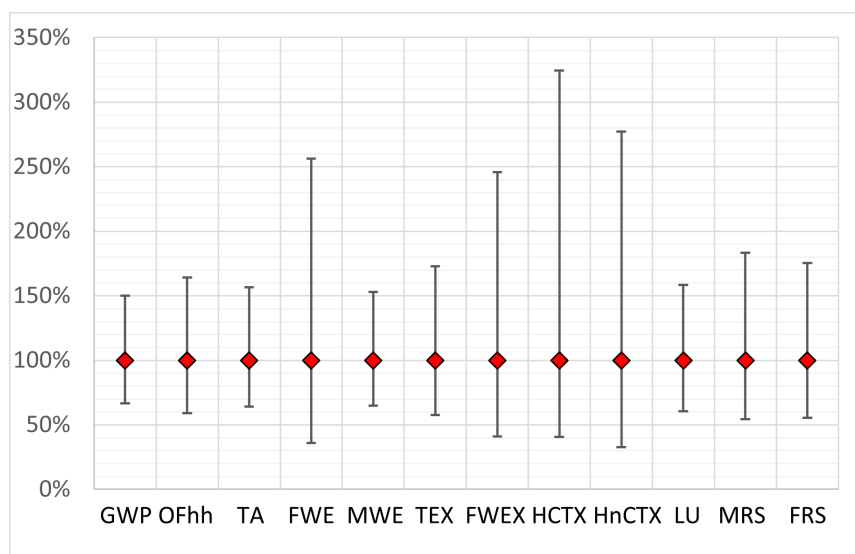


Figura A7. Analisi di incertezza con metodo Monte Carlo per il MikroCapsPCM15. Le barre di errore sono presentate in percentuale rispetto alla media dei  $10^4$  trials, posta come 100% dell'impatto.

## 5 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. T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e P. Midgley, “Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” IPCC, 2013, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York
7. C. Thies, “Microencapsulation”, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2005, pp. 438-463.
8. X. X. Zhang, X. M. Tao, K. L. Yick, Y. F. Fan, “Expansion Space and Thermal Stability of Microencapsulated *n*-Octadecane”, Journal of Applied Polymer Science, vol. 97 (2005), pp. 390-396.
9. L. Mongibello, G. Graditi, “Cold Storage for a Single-Family House in Italy”, Energies, 9 (2016), 1043
10. Terna. Disponibile al sito: <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/transparency-report/download-center>
11. Terna. Disponibile al sito: <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche>
12. Rapporto Statistico Solare Fotovoltaico 2020: [https://www.gse.it/documenti\\_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%20GSE%202020.pdf](https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%20GSE%202020.pdf)
13. ARERA. Condizioni Economiche per i Clienti del Mercato Tutelato. Disponibile e scaricabile al sito: <https://www.arera.it/it/dati/condec.htm>
14. D.LGS 30 December 2019; n. 162. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/02/29/20A01353/sg>

15. J. G. Speight, “Deasphalting and Dewaxing Processes”, The refinery of the Future, 2011, pp. 209-236, Gulf Professional Publishing.
16. J. G. Speight, “Hydrocarbons from crude oil”, Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes, 2020, pp. 95-142, Gulf Professional Publishing.
17. A. A. Nimer, A. A. Mohamed e A. A. Rabah, “Nile Blend Crude Oil: Wax Separation Using MEK-Toluene Mixtures”, The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 35 n. 2B (2009), pp. 17-24.
18. G. C. Gervajio, “Fatty Acids and Derivatives from Coconut Oil”, Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Sixth Edition, 2005, p. 56.

## 6 Abbreviazioni ed acronimi

PCM = Materiale a Cambiamento di Fase

FU = Unità Funzionale

CED = Cumulative Energy Demand

MEK = Metiletilchetone

GWP = Global Warming Potential

SOD = Stratospheric Ozone Depletion

OF hh = Ozone Formation – human health

PMF = Particulate Matter Formation

TA = Terrestrial Acidification

FWE = Freshwater Eutrophication

FWEX = Freshwater Ecotoxicity

MWEX = Marine Water Ecotoxicity

H-CTX = Human Carcinogenic Toxicity

H-nCTX = Human non Carcinogenic Toxicity

LU = Land Use

MRS = Mineral Resource Scarcity

FRS = Fossil Resource Scarcity

## 7 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 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 - 15 (fonte Scopus) e numero totale di citazioni - 638 (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 stata 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 del Dr. Ing. 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.