



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Life Cycle Assessment e Life Cycle Costing dell'impiego dei materiali in cambiamento di fase per l'accumulo termico

Relatore: Giulia Righetti

Laureando: Daisy Sturaro

Matricola: 2012323

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

1. INTRODUZIONE	2
2. MATERIALI IN CAMBIAMENTO DI FASE	3
2.1 SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA.....	4
2.2 PCM PER L'ACCUMULO DI CALORE LATENTE.....	5
2.3 CARATTERISTICHE DEI PCM.....	6
2.4 CLASSIFICAZIONE DEI PCM.....	8
2.5 MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI DEI PCM.....	10
2.6 APPLICAZIONI DEI PCM.....	11
3. LIFE CYCLE ASSESSMENT	14
3.1 LCA.....	14
3.2 LE FASI DEL METODO LCA.....	15
4. LIFE CYCLE COSTING	19
4.1 LCC.....	19
4.2 LE FASI DEL METODO LCC.....	22
4.3 INTEGRAZIONE TRA LCA E LCC.....	23
5. ANALISI LCA E LCC DI APPLICAZIONI DEI PCM	24
5.1 APPLICAZIONE PCM PER CONTROLLO TEMPERATURA DI UNA SERRA.....	26
5.2 APPLICAZIONE DEI PCM NEI RIVESTIMENTI PER EDIFICI.....	29
5.3 APPLICAZIONE DEI PCM DISPERSI IN SCHIUMA DI RAME PER LO STOCCAGGIO DI ENERGIA TERMICA.....	31
5.4 APPLICAZIONE DEL PCM PER IL TRASPORTO DI ALIMENTI.....	34
5.5 APPLICAZIONE DI UN PCM ALL'INTERNO DI UN PANNELLO FOTOVOLTAICO.....	36
5.6 CONFORNTO APPLICAZIONE DI DUE PCM RICAVATI DA SOSTANZE BIOLOGICHE.....	37
6. CONCLUSIONI	38

1. INTRODUZIONE

L'energia è da sempre una componente fondamentale della vita dell'uomo.

Storicamente il combustibile fossile è stato la principale fonte di energia, ma quando la sua richiesta è aumentata a partire dal XX secolo ha iniziato ad attraversare una fase di transizione. Si è diffusa, infatti, sempre di più la consapevolezza che per uno sviluppo sostenibile è indispensabile spostarsi verso fonti di energia rinnovabili che devono essere potenziate in modo da riuscire a coprire la richiesta globale di energia. In questo studio verrà affrontato il tema dell'energia solare e come potenziarne lo stoccaggio termico tramite l'impiego di materiali in cambiamento di fase.

I PCM sono sostanze con un elevato calore latente di fusione, che fondono e si solidificano ad una certa temperatura riuscendo nel mentre ad accumulare un grande quantitativo di energia. La svolta nell'impiego di questi materiali, quindi, non sta solo nel grande quantitativo di energia che accumulano, ma anche nel fatto che mantengono pressoché una temperatura costante nel mentre.

Nonostante i PCM possano migliorare concretamente i sistemi di accumulo dell'energia termica, rendendone quindi l'impiego più efficiente, non bisogna commettere l'errore di considerare solo la fase di effettivo impiego di questi materiali.

In questo studio, infatti, le applicazioni dei PCM per l'accumulo di energia termica verranno analizzate lungo tutto il loro ciclo di vita, dal reperimento dei materiali al loro smaltimento, sia da un punto di vista ambientale che economico tramite due analisi: Life Cycle Assessment e Life Cycle Costing.

Queste sono indispensabili per constatare se poi nel concreto il loro impiego, che sicuramente comporta a minori impatti ambientali e ad una riduzione dei costi in quanto consente di diminuire il consumo di energia prodotta mediante combustibili fossili, non sia poi non più fattibile poiché le restanti fasi del loro ciclo di vita sono troppo dispendiose da un punto di vista ambientale e monetario, non rendendoli quindi più un'alternativa conveniente.

2. MATERIALI IN CAMBIAMENTO DI FASE

Negli ultimi anni si è assistito ad un drastico aumento della domanda globale di energia. Questo fenomeno è iniziato dopo la Rivoluzione industriale del 1970 che ha portato con sé un rapido aumento della popolazione e un mutamento nelle esigenze e negli stili di vita delle persone. Ad oggi secondo le indagini dell'IEA si è arrivati ad una richiesta annua di circa 103-105 TWh, dei quali il 77% viene prodotto mediante combustibili fossili.

Allo stesso tempo, però, l'impiego di combustibili fossili sta venendo sempre di più messo in discussione sia a causa del loro prezzo molto variabile e strettamente condizionato da aspetti economici e politici, sia per il grave impatto ambientale che il loro utilizzo comporta. Nel cercare di rendere il settore energetico indipendente dai combustibili fossili, o per lo meno di limitare il loro utilizzo, l'attenzione di scienziati ed ingegneri si sta spostando sempre di più verso il risparmio ed efficientamento energetico e verso fonti di energia rinnovabile.

Dai dati raccolti nell'UE è emerso che il 40% dell'energia totale consumata a livello annuo è sfruttata dagli edifici, in particolar modo viene impiegata per il riscaldamento e per il raffreddamento degli ambienti abitativi. Si è quindi giunti alla conclusione che per ridurre le emissioni di CO₂ bisogna migliorare l'efficienza e rendere "pulita" l'energia consumata nelle abitazioni, soprattutto in termini di riscaldamento e raffreddamento. Una delle forme di energia che più si presta a sostituire buona parte dell'energia prodotta da combustibili fossili, e che quindi consentirebbe di rendere più green le abitazioni, è sicuramente l'energia solare.

Uno dei grandi limiti però che questa energia impone è che la sua disponibilità non è sempre garantita nell'immediato, ovvero ne possiamo usufruire solo durante le ore di luce e quando le condizioni meteorologiche lo consentono; risulta quindi indispensabile accoppiare le tecnologie basate sul solare con dei sistemi di accumulo dell'energia termica (TES).

2.1 SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA

I TES sono uno degli ambiti di ricerca che più suscita interesse in quanto un loro miglioramento renderebbe sicuramente l'utilizzo dell'energia solare più diffuso.

Nel loro sviluppo, però, bisogna sempre tenere a mente il loro bisogno di essere sostenibili, sia da un punto di vista ambientale che economico.

Questi sistemi di accumulo di energia termica possono essere di tre tipi:

- Termochimici: in questi sistemi l'energia viene immagazzinata a partire da reazioni chimiche che però essendo fortemente instabili, rendono questi sistemi difficilmente utilizzabili.
- Sensibili: in questi sistemi l'energia viene immagazzinata sotto forma di calore sensibile, ovvero andando ad aumentare la temperatura di un materiale (sia che questo si trovi allo stato solido che allo stato liquido).
- Latenti: in questi sistemi l'energia viene immagazzinata sotto forma di calore latente, ovvero viene immagazzinata in un materiale che subisce un cambiamento di fase.

I sistemi di accumulo basati sul calore sensibile sono ad oggi sicuramente i più diffusi poiché sono quelli che garantiscono un impatto ambientale ed economico minore. Il problema però di questi sta nel fatto che la densità di energia che riescono ad immagazzinare è molto bassa e quindi, per essere efficienti, devono essere di grandi dimensioni. Proprio per risolvere questi problemi sono stati introdotti i sistemi di accumulo di calore latente, in cui il calore viene sfruttato per far cambiare di fase a un materiale da solido a liquido o da liquido a gas, per venire poi immagazzinato sotto forma appunto di calore latente.

Questi ultimi sistemi di accumulo sono sicuramente più convenienti in termini energetici in quanto, a parità di volume di materiale, riescono ad accumulare da 5 fino a 14 volte il calore dei sistemi che immagazzinano calore sensibile mantenendo, inoltre, la temperatura del materiale costante durante il processo (Fig. 1).

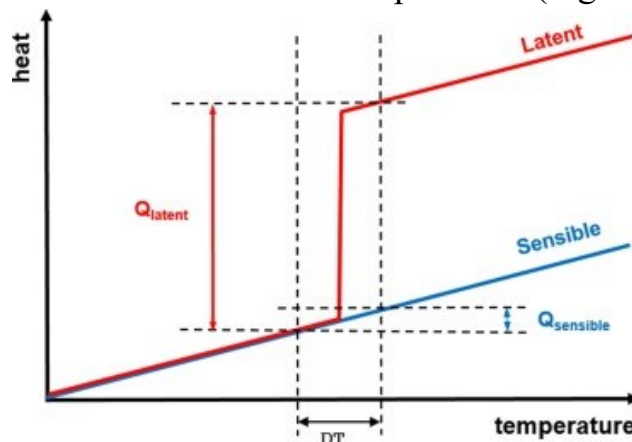


Figura 2.1 - Accumulo di calore sensibile e latente rispetto alla temperatura [2]

2.2 PCM PER L'ACCUMULO DI CALORE LATENTE

In passato l'accumulo di calore latente era ottenuto solo sfruttando il cambiamento di fase di un unico materiale, il ghiaccio. Ad oggi invece sono state individuate una serie di sostanze che consentono di accumulare grandi quantitativi di calore latente e che realizzano il cambiamento di fase in condizioni e in range di temperatura molto variabili, rendendoli altrettanto versatili nella loro applicazione.

Questi materiali sono detti PCM ovvero "Phase Change Materials" (materiali in cambiamento di fase).

La capacità di accumulo di queste sostanze è notevolmente maggiore rispetto ad altri materiali di uso comune e, proprio per questo, il loro cambiamento di fase viene largamente impiegato nei TES a calore latente, come è possibile osservare in fig. 2 dove il PCM in questione è la paraffina.

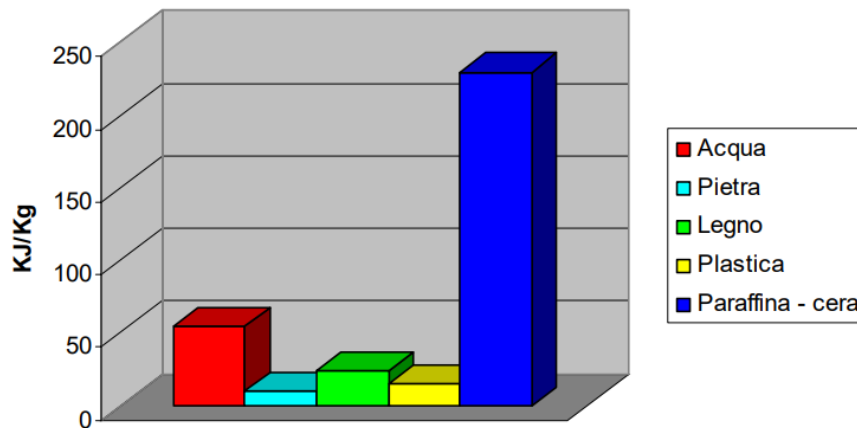


Figura 2.2 - Confronto capacità di accumulo di energia dei PCM con altri materiali [11]

Per accumulare calore latente è possibile sfruttare tre diversi cambiamenti di fase dei PCM: solido-solido (passaggio da un reticolo cristallino ad un altro), liquido-solido e liquido-gas.

Tra queste tre alternative si sfrutta generalmente la trasformazione solido-liquido poiché garantisce un'elevata densità di accumulo di energia anche utilizzando piccole frazioni volumetriche, cosa che invece non si ha né con il cambiamento solido-solido, in quanto fornisce una scarsa quantità di calore latente, né con la trasformazione liquido-gas poiché è soggetta ad un significativo cambiamento dei volumi durante il cambiamento di fase.

Il funzionamento dei PCM si basa quindi sull'accumulo di calore latente, che si verifica grazie alla variazione di entalpia associato al passaggio di fase da solido-liquido o liquido-solido della sostanza.

Inizialmente questi materiali allo stato solido accumulano calore sensibile aumentando la loro temperatura ma nel momento in cui raggiungono il loro punto di fusione,

iniziano ad assorbire energia a temperatura pressoché costante, mentre viceversa quando sono allo stato liquido, raggiungendo il punto di solidificazione iniziano a rilasciare energia sempre a temperatura costante.

2.3 CARATTERISTICHE DEI PCM

La scelta tra i possibili PCM da impiegare è molto ristretta in quanto questi devono rispettare una serie di caratteristiche previste dalle condizioni di uso ed in genere risulta molto difficile trovare anche solo un materiale che presenti tutte le caratteristiche previste.

Le caratteristiche principali che questi materiali devono possedere possono essere raggruppate in cinque categorie: termodinamiche, cinetiche, fisiche, chimiche ed economiche.

Caratteristiche termodinamiche:

- Temperatura di fusione e solidificazione adatta al tipo di applicazione;
- Alta conducibilità termica;
- Alto calore latente di transizione.

Quando si seleziona un PCM, è necessario considerare il range di temperatura di quella particolare applicazione in quanto deve essere abbinata alla temperatura di transizione del materiale. Il calore latente dovrebbe essere il più elevato possibile in modo da massimizzare l'accumulo termico e minimizzare l'eventuale variazione di temperatura.

Caratteristiche cinetiche:

- Velocità di cristallizzazione adeguata;
- Assenza di *supercooling*.

Il fenomeno del *supercooling*, nel quale il materiale rimane liquido anche al di sotto della sua temperatura di solidificazione, va evitato in modo tale che non si verifichi alcuno scambio termico ad una temperatura minore di quella prevista.

Caratteristiche fisiche:

- Bassa espansione termica;
- Bassa pressione di vapore;
- Alta densità per ridurre i volumi;
- Equilibrio tra le fasi.

Un'elevata densità del materiale consente di utilizzare un volume minore per lo stoccaggio e poca variazione di volume durante il cambiamento di fase consente di ridurre il problema del contenimento.

Caratteristiche chimiche:

- Non tossico;
- Stabilità chimica per limitare il degrado delle prestazioni nel tempo;
- Non infiammabile;
- Non corrosivo.

È importante che il materiale sia chimicamente stabile per evitare che si degradi velocemente nel tempo, che non sia tossico o infiammabile per ragioni di sicurezza e che non sia corrosivo per poter essere compatibile con gli altri materiali coinvolti nella sua applicazione.

Caratteristiche economiche:

- Disponibile in grandi quantità;
- Basso costo;
- Facilmente reperibile.

Non solo questi materiali devono essere convenienti a livello tecnologico, ma devono anche esserlo a livello economico. Ora come ora è tra le caratteristiche più difficile da rispettare in quanto i PCM non sono ancora stati largamente introdotti sul mercato quindi il loro prezzo è ancora relativamente alto.

2.4 CLASSIFICAZIONE DEI PCM

I materiali in cambiamento di fase possono essere classificati in tre categorie come in fig. 3.

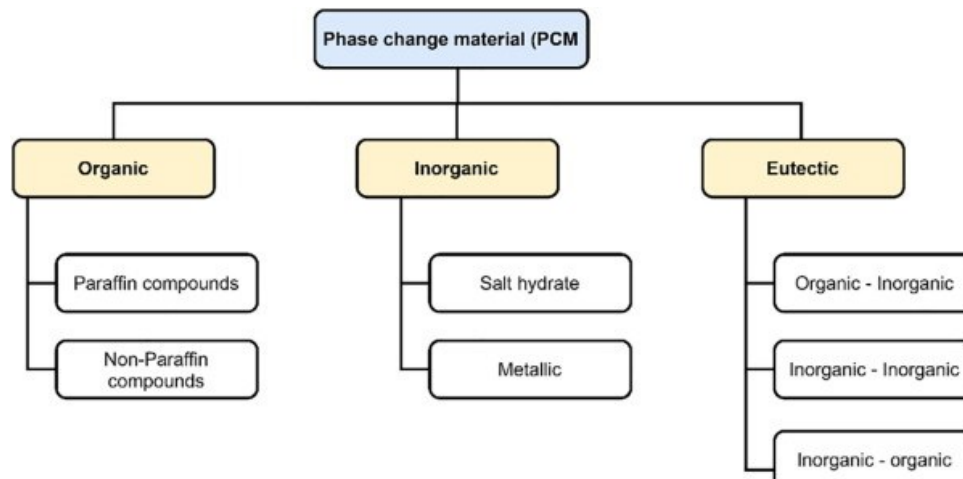


Figura 2.3 - Classificazione dei PCM [1]

PCM ORGANICI

La prima classe di materiali in cambiamento di fase sono i PCM organici, che si dividono a loro volta in altre due categorie: i composti della paraffina e i composti non paraffinici, tra cui si prediligono gli acidi grassi.

Paraffina

La paraffina è una miscela di idrocarburi solidi ricavata dal petrolio le cui molecole sono caratterizzate da catene lunghe composte da venti o più atomi di carbonio.

Gli studi condotti hanno dimostrato che la paraffina è in grado di assorbire, immagazzinare e rilasciare un grande quantitativo di calore durante la sua trasformazione tra le fasi solida e liquida e questa caratteristica si mantiene anche dopo numerosi cicli di trasformazione. Presenta, inoltre, un ampio range di temperatura di fusione, la quale si è dimostrata crescere all'aumentare del numero di atomi di carbonio che costituiscono la catena. Altri aspetti favorevoli di questo materiale sono il fatto che presenta una buona stabilità termica al di sopra dei 250°C, non presenta segregazione di fase anche dopo ripetuti cicli di trasformazione, è chimicamente stabile, non è corrosivo, non è tossico, è durevole nel tempo, è facilmente reperibile, poco dispendioso e innocuo a livello ambientale.

Alcune caratteristiche di questo materiale però non lo rendono del tutto ottimale per l'accumulo termico; infatti, è predisposto al fenomeno del supercooling durante il raffreddamento e presenta una bassa conduttività termica che dev'essere migliorata per poterlo impiegare in maniera efficiente.

Acidi grassi

Gli acidi grassi sono acidi monocarbossilici alifatici costituiti da catene da 4 a 30 atomi di carbonio derivati da grasso sia vegetale che animale, olii e cere.

Queste sostanze hanno caratteristiche simili alla paraffina e in alcuni casi anche migliori come la congruenza di fusione, una buona stabilità chimica e fisica, non tossico, biodegradabile e ha un range di temperatura di fusione compatibile con tantissime applicazioni di accumulo termico. Inoltre, sono in grado di eseguire migliaia di cicli di solidificazione e fusione senza perdere le loro proprietà termiche.

Un altro aspetto molto importante da considerare di queste sostanze è che sono facilmente reperibili in quanto già prodotte da industrie cosmetiche, tessili ecc...

Anche questi materiali però presentano degli aspetti da migliorare se si vuole rendere più efficace la loro applicazione, tra cui il cattivo odore, la loro corrosività e la loro velocità di sublimazione.

PCM INORGANICI

I materiali in cambiamento di fase inorganici sono i materiali ideali per un range di temperatura medio-basso. In genere i materiali inorganici più utilizzati sono i Sali idrati.

Sali idrati

I Sali idrati sono dei particolari sali che durante la loro cristallizzazione inglobano al loro interno delle molecole di acqua andando quindi a modificare la struttura cristallina. In ogni sale idrato, il rapporto tra numero di molecole di acqua e numero di ioni di sale deve essere sempre ben definito e costante.

Questo materiale gode di una buona densità di accumulo di calore latente e ha una conduttività termica superiore ai PCM organici. Altri aspetti positivi dei sali idrati sono: un punto di fusione ben definito e la facile reperibilità.

Nonostante questo, però, hanno un alto grado di supercooling, non sono termicamente stabili, durante il loro impiego si verifica la segregazione di fase e risultano corrosivi se abbinati con altri materiali.

PCM EUTETTICI

I materiali in cambiamento di fase eutettici nascono dalla combinazione di due o più componenti che possono essere dello stesso tipo, ovvero organici-organici o inorganici-inorganici, oppure anche di tipi diversi come organici-inorganici.

Andando a mescolare tra loro diversi materiali è possibile andare a modificare la temperatura di fusione, il calore latente, la conduttività termica e si riesce anche a ridurre, o evitare, la segregazione di fase durante la fusione o la solidificazione.

I PCM eutettici però sono quelli che meno vengono impiegati sperimentalmente in quanto sono difficili da reperire e particolarmente dispendiosi.

2.5 MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI DEI PCM

Uno dei principali problemi riscontrati nell'utilizzo dei materiali in cambiamento di fase è sicuramente la scarsa conduttività termica. Per risolvere questo problema sono stati condotti diversi studi che hanno portato ad una serie di possibili soluzioni ottimali:

- Usare superfici più estese o delle alette;
- Micro incapsulazione;
- Inserire all'interno dei PCM delle nano particelle di materiali ad alta conduttività termica.

Superfici estese e alette

Aggiungere delle alette ai PCM è sicuramente una delle soluzioni che più viene impiegata per migliorare le performance di questi materiali. Implementarle, infatti, garantisce una maggiore superficie di trasmissione termica. Sempre più studi sono mirati a trovare dei layout più ottimali per queste alette.

Micro incapsulazione

La micro incapsulazione consiste nell'inserire dei PCM di dimensioni microscopiche, sia che si trovino allo stato liquido e sia che si trovino allo stato solido, all'interno di un guscio o di una parete. Il guscio può essere costituito di diversi materiali e garantisce una maggiore superficie di scambio di calore e quindi una maggiore conduttività termica; inoltre, consente di controllare la variazione di volume dei materiali durante il cambiamento di fase.

Aggiunta di nano particelle

L'aggiunta di nano particelle di materiali ad alta conducibilità termica migliora sicuramente le prestazioni dei materiali in cambiamento di fase. Il materiale inserito deve innanzitutto non generare una reazione chimica con il PCM, deve avere un'elevata conduttività termica e avere una buona stabilità chimica. In genere, i materiali più usati sono la grafite, i metalli ossidi e il grafene.

2.6 APPLICAZIONI DEI PCM

I campi di applicazione dei PCM che si stanno sperimentando negli ultimi anni sono numerosi (fig.4), ma in particolar modo quelli che più hanno dato riscontri positivi sono i sistemi di riscaldamento dell'acqua, nell'edilizia e nel campo elettronico.

Campo	Applicazione
Energia	Immagazzinamento termico dell'energia solare
Edilizia	Accumulatori passivi per costruzioni architettoniche
Raffreddamento	Smorzatori di shock termici
Riscaldamento	Mantenimento della temperatura dell'acqua calda ad uso sanitario e smorzatori di shock termici
Sicurezza	Mantenimento della temperatura in stanze contenenti computer e apparecchiature elettriche
Alimentare	Protezione delle proprietà termiche di alimenti, durante il trasporto. Mantenimento della temperatura all'interno di serre
Elettronica	Protezioni interne in dispositivi elettronici per smorzare picchi di temperatura all'accensione e durante il funzionamento
Medico	Trasporto di sangue, tavoli operatori, terapie caldo-freddo
Automobilistico	Comfort termico all'interno di veicoli
Chimico	Smorzamento dei picchi esotermici di reazioni chimiche (polimerizzazione in bulk)
Aerospaziale	Sistemi termici per veicoli spaziali

Figura 2.4 - Applicazioni dei sistemi TES con PCM [3]

Sistema solare di riscaldamento dell'acqua

Il riscaldamento dell'acqua mediante energia solare è una delle applicazioni più popolari dei PCM, in quanto sono relativamente poco costose, sono semplici da costruire e mantenere nel tempo.

Il sistema più diffuso è quello di inserire uno strato di PCM nella parte inferiore di una caldaia. Durante le ore di sole, l'acqua all'interno della caldaia si riscalda e di conseguenza fa aumentare la temperatura del materiale sul fondo che fondendosi accumula calore latente. Durante, invece, le ore di buio l'acqua calda viene rimossa e sostituita con l'acqua fredda. Essendo il PCM ancora allo stato liquido, quando entra in contatto con l'acqua fredda, rilascia calore a quest'ultima, aumentandone la temperatura e ritornando alla sua forma solida.

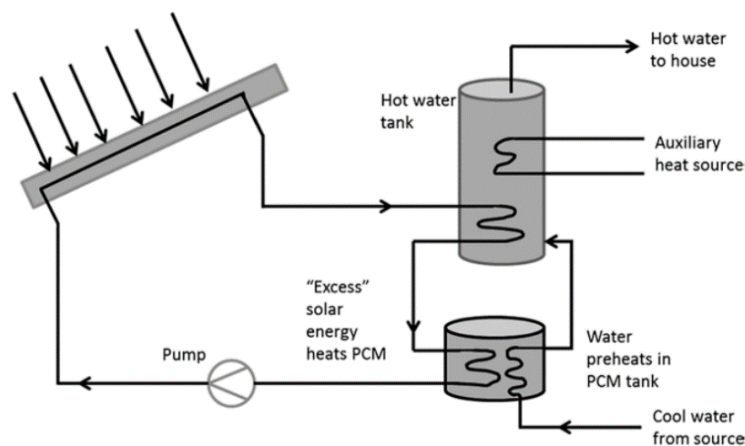


Figura 2.5 - Sistema solare per il riscaldamento dell'acqua con PCM [10]

Struttura interna degli edifici

Una delle applicazioni che sta si sta diffondendo sempre di più negli ultimi anni è sicuramente nell'ambito edilizio.

Il loro grande successo è dovuto principalmente alla possibilità che offrono di accumulare calore mantenendo una temperatura pressoché invariata.

Quando le radiazioni solari impattano su delle comuni mura di abitazioni queste tendono ad accumulare calore sensibile innalzando la temperatura interna della casa.

Questo comporta che nel periodo in cui le temperature aumentano si deve fare un largo impiego di sistemi di climatizzazione per rendere confortevole l'ambiente interno.

Se invece all'interno delle pareti sono presenti dei PCM, il calore viene assorbito sottoforma di calore latente, facendo aumentare la temperatura interna dell'edificio fin tanto che il PCM non si è completamente sciolto. In questo modo l'impiego dei sistemi di climatizzazione verrebbe sicuramente ridotto e il consumo di energia si abbasserebbe significativamente.

La soluzione migliore ad oggi prevede di inserire i PCM all'interno di pareti in cartongesso immergendoli o incapsulandoli, ma al contempo si stanno sperimentando tante altre soluzioni come la loro dispersione nel cemento, all'interno della pavimentazione, nelle persiane, ecc...

Gestione del calore dei componenti elettronici

La crescita esponenziale della potenza dei dispositivi elettronici combinato al tentativo di renderli sempre più piccoli e maneggevoli ha reso sempre più difficile riuscire a garantirne il giusto raffreddamento.

Questo problema si riscontra soprattutto in smartphone e tablet che però, funzionando in maniera intermittente, cioè, alternando momenti di standby a picchi di attività che richiedono elevata potenza di elaborazione, consentono di sfruttare i PCM per migliorare la dissipazione del calore. In questi momenti di attività il calore penetra all'interno del PCM sciogliendolo, consentendo al dispositivo di mantenere una temperatura costante. Una volta interrotto l'utilizzo, il calore viene poi dissipato nell'ambiente riportando il materiale alla sua forma solida pronto per un nuovo ciclo.

Nel caso in cui il tempo di utilizzo si prolunghi oltre il tempo impiegato dal PCM a sciogliersi, il calore verrebbe comunque assorbito dal materiale liquido sottoforma di calore sensibile, con il vantaggio di avere una temperatura media sicuramente più bassa (figura 6).

I materiali utilizzati per questo tipo di applicazione devono avere una temperatura di fusione compresa tra i 36°C e i 56°C per evitare che il dispositivo si scaldi eccessivamente; quindi, la scelta ricade per lo più sui PCM a base di paraffina.

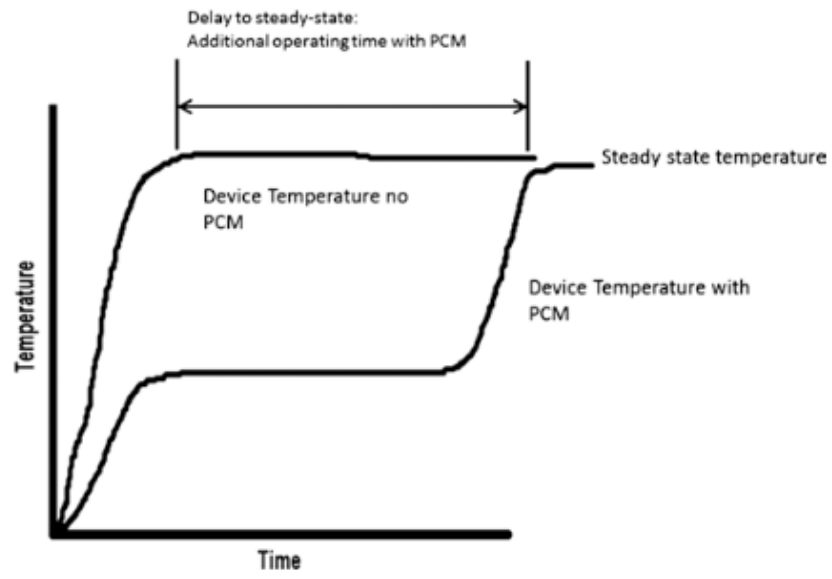


Figura 2.6 confronto temperatura raggiunta dai dispositivi con e senza PCM [10]

3. LIFE CYCLE ASSESSMENT

Nonostante i PCM siano un'importante risorsa dal punto di vista tecnico, bisogna anche però considerare quali conseguenze ambientali comporta il loro utilizzo. Un utile strumento per quantificare il loro impatto ambientale è il Life Cycle Assessment.

3.1 LCA

La maggiore consapevolezza circa l'importanza della protezione dell'ambiente e dei possibili impatti ambientali derivanti dalla fabbricazione e consumazione di prodotti o dall'erogazione di servizi ha fatto crescere l'interesse nello sviluppo di metodologie per comprendere meglio e quantificare questi impatti al fine di compiere azioni mirate a ridurli.

Proprio per questo motivo alla fine degli anni '60 e inizio anni '70 in America si iniziano a sviluppare le prime teorie di valutazione dell'impatto ambientale durante tutto il ciclo di vita di prodotti o servizi. La prima ad eseguire concretamente un'analisi di questo tipo è stata la società Coca Cola nel 1969 con l'obiettivo di quantificare l'impatto energetico, materiale e ambientale di diverse possibili confezioni della bevanda valutandolo a partire dall'estrazione delle materie prime fino al loro smaltimento.

Con gli anni questo tipo di analisi si è diffusa sempre di più fino a diventare una metodologia standard che prende il nome di Life Cycle Assessment ed è descritta dalle norme ISO 14040-4.

Il Life Cycle Assessment risulta quindi essere un processo di analisi oggettivo che valuta gli oneri ambientali associati a un prodotto o processo identificando l'energia, i materiali utilizzati e i rifiuti rilasciati nell'ambiente "dalla culla alla tomba".

L'idea di base del funzionamento di questa tecnica sta proprio nell'andare a registrare tutti i flussi di materiali ed energia connessi ad un prodotto, processo o servizio adottando un approccio estensivo, cioè che non va a considerare solo l'impatto dell'impianto di produzione ma anche l'impatto dell'approvvigionamento, l'utilizzo, il consumo e lo smaltimento delle materie prime. Il vantaggio principale del considerare un panorama così ampio è quello di riuscire ad avere una visione il più veritiera possibile della situazione e riuscire in questo modo ad agire di conseguenza per raggiungere un certo livello di ottimizzazione ed un impatto minimo.

Questo tipo di analisi è un ottimo strumento per:

- Individuare le possibilità di miglioramento circa gli aspetti ambientali in diversi punti del loro ciclo di vita.
- Supportare i processi decisionali interni all'azienda (pianificazione strategica, progettazione di nuovi prodotti o processi...).
- Selezionare indicatori importanti per la misurazione dell'impatto ambientale.
- Fornire una base informativa scientifica al marketing aziendale.

3.2 LE FASI DEL METODO LCA

Stando a quanto è stato definito dalle norme ISO 14040-14044, il metodo LCA si struttura in quattro parti:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione
- Analisi dell'inventario
- Valutazione degli impatti
- Interpretazione del ciclo di vita

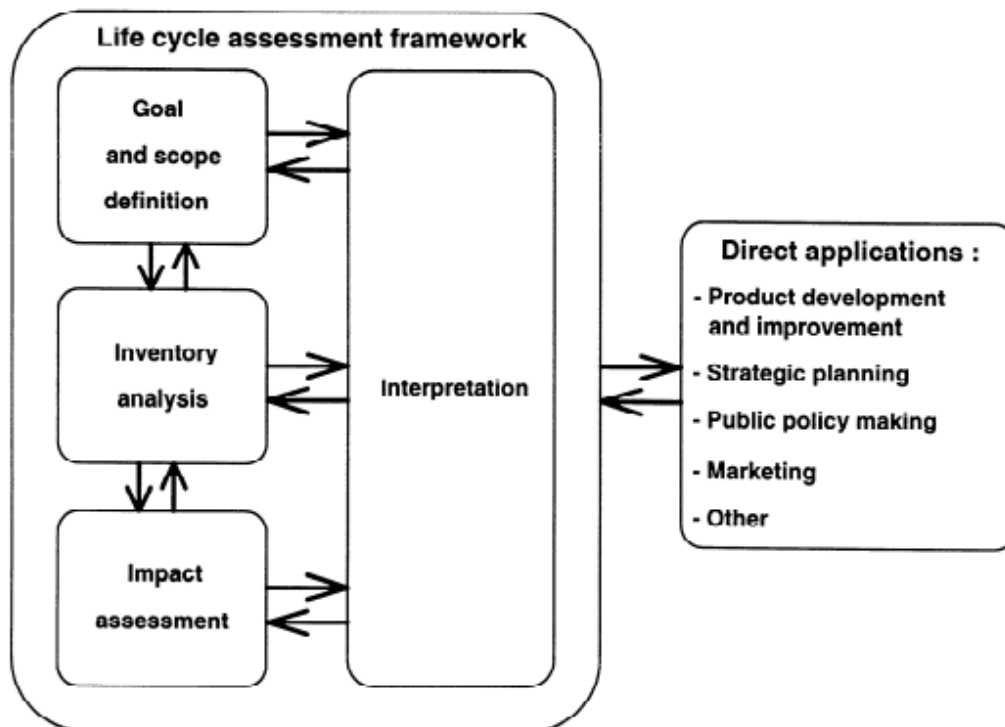


Figura 3.1 Fasi dell'analisi LCA [13]

Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Un'analisi LCA inizia con la definizione del campo di applicazione e degli obiettivi chiave da raggiungere. Questa prima fase risulta essere una fase cruciale in quanto vengono prese le decisioni più importanti, cioè, vengono definiti il contesto di indagine e le richieste per le fasi successive per riuscire a centrare gli obiettivi richiesti.

Per quanto riguarda la definizione dell'obiettivo, questa consiste nell'andare a determinare i fini concreti e gli interessi specifici dello studio. Prima che questi vengano definiti, è necessario però che vengano identificati chiaramente i gruppi a cui è indirizzata l'indagine e che venga sottolineato qual è il ruolo dell'LCA in un eventuale processo decisionale.

Per quanto riguarda, invece, la definizione dell'ambito di applicazione, in questa fase è necessario determinare quelli che saranno i confini del sistema, ovvero l'interfaccia tra il sistema-prodotto in oggetto e l'ambiente. Questi confini vanno a stabilire le unità di processo che devono essere considerate nello studio e sono strettamente legate all'applicazione che si intende fare dell'analisi, dalle ipotesi assunte, dai destinatari dei risultati e da eventuali vincoli imposti dai dati.

Il metodo migliore per individuare i confini del sistema è quello di definire gli aspetti temporali, spaziali, pratici e tecnici dell'LCA andando quindi a vagliare attentamente ogni mezzo utilizzabile, valutare il contesto temporale e la disponibilità di tutti i dati necessari.

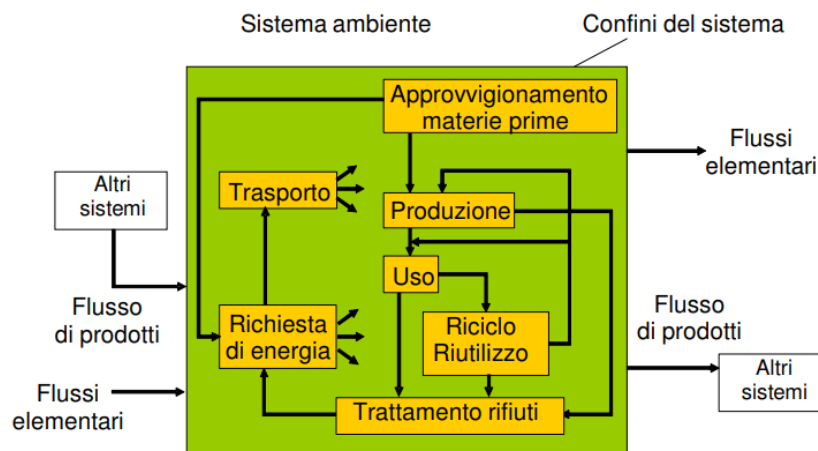


Figura 3.2 Definizione del sistema di un certo prodotto [15]

Analisi dell'inventario

L'analisi dell'inventario consiste nella raccolta dei dati e delle procedure di calcolo per quantificare gli input e gli output rilevanti per il sistema di un prodotto, processo o servizio.

Gli input considerati sono l'energia richiesta e le materie prime, mentre gli output sono fondamentalmente gli scarti di materiale solido, liquido e gassoso, ovvero tutte quelle sostanze che vengono espulse come conseguenza del processo.

Sostanzialmente l'obiettivo di questa fase è quello di raccogliere tutti i dati necessari per il calcolo dell'impatto ambientale reperibili tramite studi condotti precedentemente oppure mediante banche dati industriali, governative o pubbliche.

Il processo di analisi dell'inventario è iterativo. A mano a mano che si raccolgono i dati e si acquisiscono le informazioni, infatti, si arriva sempre di più ad una conoscenza approfondita del sistema che consente di identificare nuovi requisiti o limitazioni circa i dati che possono portare ad una revisione non solo dei metodi stessi di raccolta dati, ma anche dell'obiettivo e dell'ambito di studio.

Valutazione degli impatti

La fase di valutazione dell'impatto ha come obiettivo quello di studiare i flussi di materiali ed energia rilevati durante la fase di analisi dell'inventario in modo da identificare, riassumere e stimare il possibile impatto ambientale del sistema considerato.

Ad oggi si sta ancora lavorando allo sviluppo di un metodo più dettagliato per la realizzazione di questa fase, ma una prima traccia è fornita dalla normativa ISO-14042. In primo luogo, si procede con la "classificazione" dei flussi di materiali ed energia (identificati durante l'analisi dell'inventario), ovvero vengono assegnati a una o più categorie ambientali precedentemente individuate.

Queste categorie ambientali sono potenziali effetti negativi sull'uomo e sull'ambiente dei flussi e vengono selezionate valutando quali sono i dati inerenti allo studio e quali sono i dati effettivamente reperibili, di conseguenza le categorie ambientali che si decide di considerare variano da analisi ad analisi.

Le categorie ambientali più impiegate sono:

- Riscaldamento globale
- Riduzione dell'ozono presente nell'atmosfera
- Formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera
- Eutrofizzazione
- Acidificazione
- Tossicità per l'uomo
- Eco-tossicità
- Utilizzo del territorio

Successivamente si passa alla "caratterizzazione" nella quale, mediante modelli scientifici e fattori di equivalenza, è possibile quantificare il contributo di ogni singola emissione.

I flussi individuati nella fase di analisi dell'inventario vengono, infatti, moltiplicati per i fattori di equivalenza e sommati agli altri flussi presenti nella stessa categoria di impatto. In questo modo è possibile per ogni categoria definire un potenziale d'impatto che rappresenta il possibile danno ambientale che si può generare.

Una volta quantificato il potenziale di impatto si passa alla "standardizzazione", cioè il valore ottenuto viene messo in relazione con un valore nominale di riferimento associato ad una certa area evidenziando quindi quali sono le categorie d'impatto che hanno una rilevanza maggiore.

Interpretazione del ciclo di vita

Nella fase finale dell'analisi ci si concentra sull'interpretazione dei risultati ottenuti prima verificandone la completezza, sensibilità e consistenza e successivamente cercando di spiegare il significato che questi assumono e di comprendere i limiti che questi comportano.

È naturale in questa fase richiamare l'obiettivo e l'ambito di analisi precedentemente definiti e sulla base di questi trarre delle conclusioni e prendere delle decisioni coerenti.

4. LIFE CYCLE COSTING

Un altro aspetto che non si può fare a meno di considerare quando si parla del possibile impiego dei PCM è sicuramente l'aspetto economico, è necessario, infatti, che il progetto risulti sostenibile anche da un punto di vista monetario e per farlo è utile eseguire anche in questo caso un'analisi che coinvolga l'intero ciclo di vita di un prodotto, processo o servizio.

4.1 LCC

Il Life Cycle Costing è una tecnica avanzata di valutazione economica che rappresenta un pilastro importante per l'analisi della sostenibilità dell'intero ciclo di vita di un prodotto o di un processo.

Il concetto di Life Cycle Costing viene implementato per la prima volta negli anni '70 dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti nel settore dell'aviazione militare ma comprendeva nel calcolo dei costi totali solo le fasi di acquisto e logistica, negli anni però si è vista sempre di più la necessità di includere in questa metodologia anche le fasi di progettazione, produzione e controllo. Ad oggi è usato in svariati ambiti ed è diventato un metodo standardizzato secondo la norma ISO 15686 ed in questa è definito come “tecnica di valore che viene utilizzata per prevedere e valutare le prestazioni in termini di costi dei beni costruiti” e inoltre “consente di effettuare un confronto coerente tra alternative con flussi di cassa diversi e tempi diversi”.

Questa tecnica nasce per prevenire un importante errore di valutazione che si è per molti anni commesso nelle organizzazioni, ovvero quello di scegliere l'alternativa di investimento che prevede i minori costi iniziali di acquisto, tralasciando così un considerevole quantitativo di costi che invece incidono lungo tutto il ciclo di vita di un progetto, ad esempio in figura è riportata la ripartizione dei costi durante la vita utile di un edificio e come si può vedere i costi più consistenti sono i costi operativi e i costi di manutenzione.

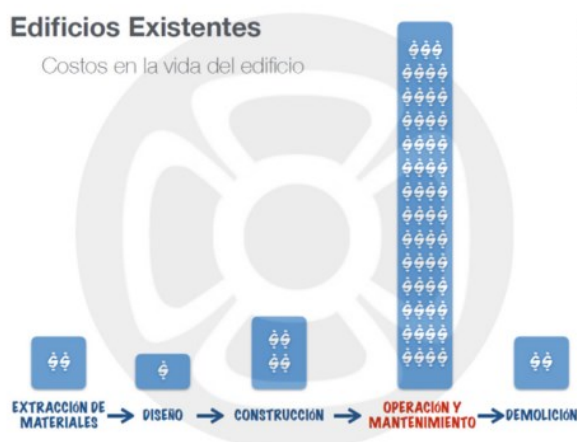


Figura 4.1 Flusso di cassa durante il ciclo di vita di un edificio [26]

Questa metodologia è così chiamata poiché consente di calcolare il costo totale del ciclo di vita (LCC) di un bene che è definito come la somma di tutti i costi che ne caratterizzano la vita utile, includendo quindi i costi di pianificazione, progettazione, acquisizione, supporto e tutti i costi di manutenzione strettamente collegati al suo utilizzo/sviluppo.

In questo modo si ottiene una base comune per confrontare le diverse proposte, ma per avere un confronto veritiero è indispensabile che questo avvenga considerando un periodo di utilizzo uguale per tutte le alternative (anche se questo non coincide con l'effettiva vita utile) e che tutti i costi vengano attualizzati ad un ipotetico istante zero. Ovviamente questo tipo di analisi è uno degli strumenti messi a disposizione durante il processo decisionale, durante il quale devono essere considerati anche altri aspetti importanti come impatto ambientale, calcolabile mediante LCA, sicurezza, ecc....

Come già precisato in precedenza, in questa metodologia si vanno a individuare tutti i costi che caratterizzano un'attività o un progetto "dalla culla alla tomba", i costi inseriti variano al variare dello scopo dell'analisi e dal tipo di progetto, ma in generale vengono considerati:

- **COSTO INVESTIMENTO INIZIALE (I):** i primi costi considerati sono i costi di investimento iniziali di un'alternativa. In questi sono inclusi tutti i costi dell'acquisizione o costruzione di un bene.
- **COSTI OPERATIVI (O):** Questa categoria di costi sono tutti quei costi collegati alla futura gestione di un progetto, ad esempio i costi associati al funzionamento di un impianto escludendo però eventuali costi per manutenzione o riparazione che sono in una categoria a parte. Essendo costi che sono ripartiti annualmente, questi devono essere attualizzati prima di essere aggiunti al totale dei costi.
- **COSTI DI MANUTENZIONE E RIPARAZIONE (M&R):** I costi di manutenzione sono costi programmati e sono finalizzati a garantire il corretto funzionamento nel tempo di un'attività, ad esempio i costi per ispezioni periodiche dei macchinari da produzione.
I costi di riparazione sono invece costi finalizzati all'allungamento della vita utile di un bene senza necessariamente sostituirlo. Essendo questi ultimi molto difficili da prevedere, solitamente si stima una quota annua che include entrambe le componenti di costo che anche questa verrà attualizzata.
- **COSTI DI SOSTITUZIONE (S):** i costi stimati in questo caso sono quelli di sostituzioni di materiali danneggiati in modo irreparabile durante il periodo preso in esame.

- VALORE RESIDUO (VR): Il valore residuo propriamente è il valore monetario di un bene alla fine di un certo periodo di utilizzo. È l'unica voce negativa, ovvero l'unica voce che riduce i costi totali. Questa stima è molto importante soprattutto nel momento in cui si vanno a valutare alternative con vite utili differenti che in questo modo possono comunque essere valutate su un orizzonte temporale comune.

Il LCC si calcola quindi come somma di tutte queste voci di costo:

$$LCC = I + O + M\&R + S - VR$$

4.2 LE FASI DEL METODO LCC

L'applicazione del metodo LCC prevede il susseguirsi di tre fasi:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione;
- Raccolta dati per l'analisi dell'inventario;
- Interpretazione e Analisi della Sensitività.

Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

La fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione è molto simile a quella già vista nell'analisi LCA e valgono quindi gli stessi presupposti.

Essendo comunque l'LCC un metodo iterativo, nonostante l'obiettivo dell'indagine debba essere chiaramente definito all'inizio, questo non preclude che durante l'analisi possa essere rivisto e modificato. In linea di massima, comunque, il principale motivo per cui l'LCC viene impiegato è quello di fare valutazione prospettiche per il confronto di diverse alternative per poi supportare sia una possibile progettazione o un possibile processo decisionale.

La definizione dei confini del sistema è la stessa della LCA; quindi, se le due analisi vengono condotte parallelamente questi coincidono e assumono la stessa prospettiva d'uso.

È molto importante anche sottolineare che molto spesso l'LCC viene sviluppato prima di un LCA in quanto ne guida lo svolgimento, quando si considera il ciclo di vita di un prodotto o di un sistema, infatti, è più facile individuare i flussi in ingresso e in uscita associati a dei costi piuttosto che a degli impatti, e quindi partendo dai costi è più facile individuare tutti i processi da considerare all'interno dell'analisi.

Raccolta dati per l'analisi dell'inventario

La disponibilità di dati affidabili sui costi è fondamentale per eseguire un'analisi realistica dei costi del ciclo di vita. La raccolta dei dati finanziari può richiedere molto tempo e spesso dipende dalla collaborazione tra l'azienda e le istituzioni coinvolte. In generale però le informazioni richieste possono o essere presenti in dei database aziendali basati sugli storici dell'azienda oppure possono essere raccolti da dei database pubblici dei quali ovviamente va valutata l'affidabilità, oppure vanno ricavati indirettamente mediante tecniche di stima.

Interpretazione e analisi della sensitività

La fase dell'interpretazione dei risultati è molto simile a quella dell'analisi LCA, con la sola differenza considerevole che i costi considerati hanno una variabilità sicuramente maggiore rispetto agli impatti ambientali e alle emissioni. Pertanto, in un'ottica di LCC, la tempistica dei costi è molto importante e quindi i costi che più sono soggetti a una certa variabilità, come ad esempio il carburante, devono essere sottoposti a controlli di sensibilità.

4.3 INTEGRAZIONE TRA LCA E LCC

Negli ultimi anni le crescenti preoccupazioni per il cambiamento climatico hanno spinto organizzazioni e imprenditori a cambiare le loro priorità che non sono più mirate al solo raggiungimento degli obiettivi economici, ma anche al rispetto di certi obiettivi ecologici.

Tuttavia, raggiungere entrambi questi obiettivi non è una sfida facile in quanto gli sforzi dei produttori per ridurre i costi spesso sono contrastati dai maggiori costi richiesti per soddisfare i requisiti ambientali e questo, se non bilanciato, può portare ad un conflitto di interessi. Risulta quindi molto importante a questo punto concentrarsi sull'integrazione tra le crescenti esigenze ambientali e l'importanza del successo economico.

Il Life Cycle Costing (LCC) e il Life Cycle Assessment (LCA) sono strumenti moderni e promettenti che possono essere utilizzati per semplificare questa integrazione.

La caratteristica principale che fa sì che LCA e LCC si distinguano da altre tecniche è il fatto che si basano su una prospettiva di ciclo di vita a lungo termine ed è un aspetto che hanno in comune proprio perché nascono dalla stessa teoria che è il Life Cycle Thinking.

Il concetto di Life Cycle Thinking (LCT) è definito come un modo di pensare che include le conseguenze economiche, ambientali e sociali di un prodotto o di un processo durante tutto il suo ciclo di vita. Più precisamente, consiste in un approccio teorico che studia i miglioramenti e le riduzioni degli impatti di servizi e prodotti in tutte le fasi di lavorazione, tra cui estrazione, trasformazione, distribuzione, utilizzo e consumo finale.

Questo approccio di integrazione tra LCA e LCC offre benefici considerevoli e garantisce una visione equilibrata delle conseguenze ambientali e finanziarie dei vari progetti al fine di ottimizzare le decisioni aziendali guidando così verso scelte più consapevoli e informate.

5. ANALISI LCA E LCC DI APPLICAZIONI DEI PCM

I primi studi sulle conseguenze ambientali dell'impiego dei materiali a cambiamento di fase risalgono agli anni '70 e ancora oggi continuano sfruttando la nuova metodologia precedentemente introdotta del Life Cycle Assessment. L'obiettivo principale è essenzialmente capire se la riduzione dell'impatto durante la fase operativa che il loro utilizzo comporta rispetto a sistemi tradizionali è abbastanza per bilanciare l'impatto maggiore che è invece generato dall'acquisizione, lavorazione, incapsulamento e smaltimento di questi materiali, ottenendo quindi un potenziale d'impatto complessivo minore. In molti progetti, infatti, nella fase di costruzione è proprio l'alternativa basata su PCM che ha conseguenze ambientali peggiori e in genere questo è causato dall'elevato impatto del reperimento dello stesso materiale e dal maggior quantitativo di energia richiesta per la realizzazione del progetto.

Studiando invece l'applicazione dei PCM da un punto di vista economico, sfruttando la procedura indicata dal Life Cycle Costing, poiché vengono per lo più utilizzati l'accumulo termico, si è dimostrato che possono ridurre significativamente i costi operativi annuali in quanto consentono di diminuire il quantitativo di energia impiegata per il controllo della temperatura. Tuttavia, è importante valutare se questi risparmi possano poi effettivamente compensare i maggiori costi iniziali della costruzione degli impianti che impiegano PCM. Molto spesso, infatti, la realizzazione di questi progetti può risultare nel complesso più costosa di quelli tradizionali a causa dell'elevato costo dei materiali sul mercato, dai costi associati all'incapsulazione e dal quantitativo di energia consumata per la costruzione.

Nelle sezioni successive sono riportati alcuni casi studio che esaminano la fattibilità ambientale ed economica di diverse potenziali applicazioni di PCM tramite un'analisi combinata di LCA e LCC. Da questi casi studio è emerso che:

- Dal punto di vista ambientale, in tutti i casi l'impiego dei PCM porta a soluzioni con impatto globale minore, ma questo risultato è strettamente legato al tipo di materiale utilizzato nonché dalla sua entalpia. Usare, infatti, un materiale ad alta entalpia consente di impiegare un quantitativo minore di materiale riducendo le conseguenze ambientali derivanti dal suo reperimento. Purtroppo, però, i materiali che soddisfano questa richiesta sono pochi; quindi, anche se i casi studi mostrano questi risultati non si può dare per scontato che nella realizzazione concreta siano poi la soluzione a minor impatto ambientale.
- Dal punto di vista economico, le soluzioni basate sui PCM raramente vengono classificate come più convenienti e questo è causato dal fatto che questi materiali non siano ancora ben introdotti sul mercato. Non si esclude però che questa situazione in un futuro cambi rendendo quindi queste soluzioni realizzabili.

In conclusione, entrambe le analisi condotte evidenziano come la fase costruttiva sia la più critica, solo che da un punto di vista ambientale considerando il restante ciclo di vita è possibile compensare, mentre da un punto di vista economico questo non è possibile.

Nonostante non sempre le analisi abbiano portato a risultati soddisfacenti è comunque interessante sottolineare come è possibile non escludere completamente queste iniziative poiché si sta considerando l'intero ciclo di vita delle proposte, riuscendo quindi a includere nella valutazione sia criticità ma anche vantaggi che in altre situazioni si rischierebbe di tralasciare.

5.1 APPLICAZIONE PCM PER CONTROLLO TEMPERATURA DI UNA SERRA

La maggiore preoccupazione pubblica circa le emissioni di CO₂ e il costante aumento del prezzo dei combustibili fossili sta portando alla ricerca di soluzioni alternative anche nell'ambito dell'agricoltura.

Il caso studio trattato in questa sezione riguarda proprio una piantagione di pomodori situata nel nord della Spagna nella quale si confrontano in termini economici e ambientali quattro possibili modalità di riscaldamento del terreno delle serre.

Le modalità usate fino ad ora si sono per lo più basate su fonti non rinnovabili, in particolare gas e olio; tuttavia, negli ultimi anni sono state introdotte anche caldaie alimentate a biomasse. La proposta che però interessa questo caso studio è quella che prevede l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase, dei quali si vuole valutare la fattibilità economica ed ambientale rispetto ai sistemi convenzionali sopra citati.

Questi materiali consentirebbero, infatti, di accumulare calore durante il corso della giornata e rilasciarlo durante la notte per compensare le basse temperature. In questo modo all'interno della serra si mantiene una temperatura confortevole per la piantagione senza il bisogno di ricorrere all'energia elettrica.

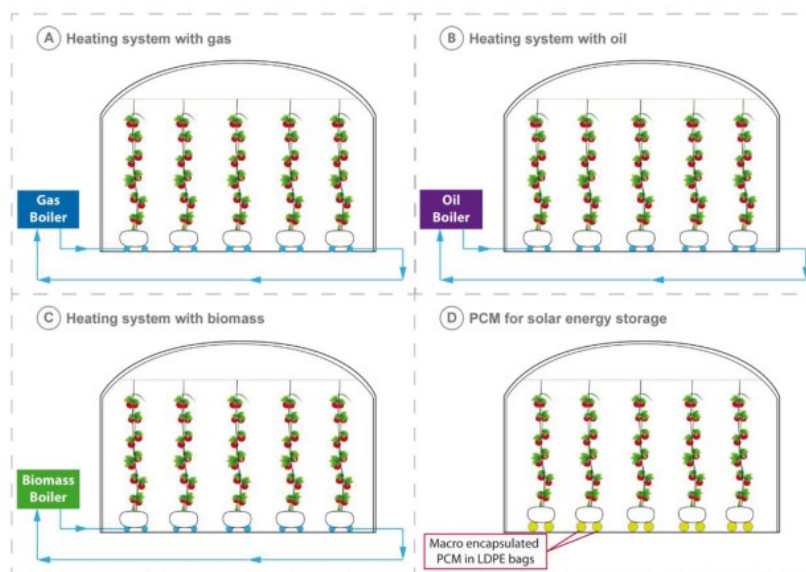


Figura 5.1.1 Le soluzioni alternative analizzate nel caso studio [30]

Il progetto analizzato prevede come PCM di riferimento il Rubitherm RT18HC, che è una paraffina con un'entalpia pari a 250 kJ/kg e con una temperatura di cambiamento di fase pari a 17-19°C. La selezione di questo PCM è stata per di più spinta dall'elevata entalpia che questo presenta, in quanto consente di ridurre notevolmente il quantitativo di materiale utilizzato, rendendo più agibile anche la manutenzione della serra stessa, e la temperatura di fusione coerente con l'applicazione.

Per l'impiego di questo PCM è necessario, inoltre, che questo venga incapsulato all'interno di borse tubolari di polietilene a bassa densità (LDPE).

Per analizzare questa nuova proposta sono state condotte parallelamente sia l'analisi LCA che l'analisi LCC per i quattro scenari individuati.

Nell'LCA, come previsto da normativa, i quattro scenari sono stati valutati dal punto di vista ambientale sulla base di sette categorie di impatto.

Sia le categorie di impatto che i risultati ottenuti sono riportati in figura 5.1.2 e mostrano chiaramente come la soluzione basata sui PCM sia la migliore da un punto di vista ecologico, successivamente c'è la soluzione a base di biomassa, dopo ancora quella a gas, per ultima invece c'è la soluzione a olio che sicuramente è quella a maggior impatto.

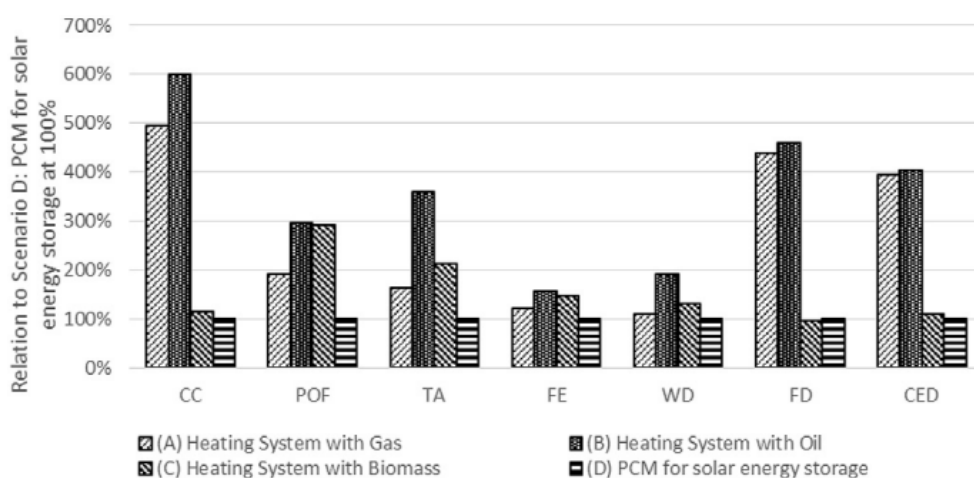


Fig. 3. Scenarios A,B,C and D environmental impact in relation to scenario D at 100% for the following impact categories: climate change (CC); photochemical oxidant formation (POF); terrestrial acidification (TA); freshwater eutrophication (FE); water depletion (WD); fossil depletion (FD); and cumulative energy demand (CED).

Figura 5.1.2 Risultati LCA per le diverse alternative studiate [30]

Chiaramente la soluzione a PCM è risultata essere la meno impattante dal momento che non prevede durante il suo impiego l'utilizzo di energia.

Entrando però nel dettaglio degli impatti è possibile vedere che per questa soluzione il 93% dell'impatto globale è generato dal PCM stesso e il 6.9% dal LDPE per il suo incapsulamento. La restante parte, che produce un impatto irrisorio, è invece causata dallo smaltimento di entrambi i materiali.

Nonostante sia stato constatato che da questo punto di vista la soluzione a PCM sia la migliore è importante sottolineare che i risultati ottenuti sono strettamente collegati al fatto che il Rubitherm ha un'elevata entalpia e ciò consente di fare un minor uso del materiale stesso. Se si ipotizzasse di usare invece un materiale con entalpia pari a 150kJ/kg l'impatto ambientale crescerebbe considerevolmente non rendendo più questa soluzione la migliore.

Un ultimo aspetto che influenza l'intero studio è il fattore climatico. Il fatto che sia impossibile prevedere le esatte temperature fa sì che il risultato dell'analisi sia comunque incerto; quindi, se in un certo anno l'inverno è più caldo del previsto il consumo di biomasse e gas per il riscaldamento è inferiore rendendoli quindi l'alternativa a minor impatto ambientale a discapito del PCM.

Per quanto riguarda invece l'analisi LCC condotta è stato rilevato che i costi operativi medi annuali per l'impianto a PCM sono significativamente inferiori rispetto agli altri scenari e questo è strettamente legato al fatto che negli anni questo sistema richiede solo manutenzione, mentre nelle altre soluzioni incidono notevolmente anche i costi degli stessi combustibili impiegati e dell'energia consumata.

Nonostante questo, però, l'investimento iniziale per il nuovo progetto ammonta a circa quattro volte l'investimento iniziale richiesto dai sistemi tradizionali.

Dall'analisi è quindi emerso che l'unico scenario in grado di far sì che la soluzione a base di PCM sia la più vantaggiosa economicamente, e che quindi sia in grado tramite i risparmi generati di compensare gli elevati costi di costruzione, sia quella in cui si ipotizza un incremento del 20% della produzione. Nonostante questo risultato ottenuto comunque bisogna precisare che i PCM non sono ancora inseriti del tutto nel mercato, quindi in un futuro prossimo il loro prezzo potrebbe notevolmente calare rendendo questa alternativa molto più vantaggiosa delle altre soluzioni in ogni scenario.

5.2 APPLICAZIONE DEI PCM NEI RIVESTIMENTI PER EDIFICI

Essendo il settore edilizio uno dei settori a più alto impatto ambientale, la maggiore sfida ad oggi è quella di ottenere la massima ottimizzazione possibile dei fattori economici ed ecologici durante tutto il ciclo di vita della struttura.

La costituzione dell'involucro dell'edificio offre l'opportunità di ridurre significativamente la domanda di energia riducendo di conseguenza il suo impatto ambientale. L'inserimento dei PCM nell'involucro consentirebbe, infatti, un comfort termico migliorato abbinato ad un consumo energetico complessivo inferiore diminuendo, di conseguenza, anche le dimensioni del sistema di riscaldamento e raffreddamento.

Nel caso preso in esame si esegue un confronto tra un normale edificio cubico dotato di un'unica stanza con pareti in semplici mattoni da costruzione rivestiti in cartongesso, con un edificio uguale però realizzato con uno strato doppio di cartongesso al cui interno è stato inserito un PCM, in particolare una paraffina che ha una temperatura di fusione tra i 22 e i 26°. Nell'ultima soluzione sono stati inseriti ulteriori materiali a cambiamento di fase anche nel calcestruzzo del soffitto e del pavimento.

L'obiettivo di questa ricerca è verificare la fattibilità dell'edificio integrato con PCM in termini economici ed ambientali mediante rispettivamente analisi LCA e LCC in modo da garantire una riduzione del fabbisogno di raffreddamento in termini di kWh mantenendo il corretto modello di comfort interno all'edificio previsto da normativa.

Dai risultati dell'analisi LCA, mostrati in figura 5.2.1, si evince che il problema principale della fattibilità dell'integrazione del PCM nell'involucro dell'edificio è l'eccessivo impatto ambientale che si riscontra in fase di produzione del PCM stesso. Non a caso, nella fase di costruzione il potenziale di riscaldamento globale aumenta del 40% mentre quello di consumo di energia primaria addirittura del 270%.

Sector	Global Warming (kg CO ₂ e)	Acidification (kg SO ₂ e)	Eutrophication (kg PO ₄ e)	Ozone Depletion Potential (kg CFC11e)	Formation of Ozone of Lower Atmosphere (kg Ethylene)	Primary Energy (MJ)
Undivided office unit—REF_UN						
Construction materials	2.42E + 04	5.27E + 01	7.87	1.62E-04	5.38	2.88E + 05
Energy use	5.34E + 05	3.16E + 03	3.86E + 02	3.41E-02	1.48E + 02	7.86E + 06
Water use	1.10E + 02	5.95E-01	3.01E-01	1.20E-05	2.68E-02	2.32E + 03
Deconstruction	3.81E + 02	2.64	6.02E-01	8.84E-06	3.31E-01	7.74E + 03
Total	5.60E + 05	3.22E + 03	3.95E + 02	3.45E-02	1.54E + 02	8.00E + 06
Undivided office unit—OPT_UN						
Construction materials	3.4E + 04 +40%	1.3E + 02 +150%	2.5E + 01 +220%	5.1E-04 +220%	1.24E + 01 +130%	1.07E + 06 +270%
Energy use	4.36E + 05 -18%	2.58E + 03 -18%	3.15E + 02 -18%	2.78E-02 -18%	1.21E + 02 -18%	6.27E + 06 -18%
Water use	1.1E + 02 0%	5.95E-01 0%	3.01E-01 0%	1.2E-05 0%	2.68E-02 0%	2.32E + 03 0%
Deconstruction	4.37E + 02 +15%	3.03 +15%	7.13E-01 +18%	6.79E-09 -100%	4.13E-01 +25%	8.71E + 03 +13%
Total	4.72E + 05 -16%	2.72E + 03 -16%	3.42E + 02 -14%	2.86E-02 -17%	1.34E + 02 -13%	7.38E + 06 -8%

Figura 5.2.1 Risultati analisi LCA [31]

Osservando i risultati, però, non è da trascurare il fatto che il consumo energetico, che è la principale fonte inquinante in entrambe le soluzioni, è ridotto del 18% in tutte le categorie di impatto nell'edificio integrato con PCM. Questo è strettamente collegato al fatto che il bisogno di raffreddamento nella nuova proposta è del 48,5% rispetto al caso di riferimento.

In conclusione, come è possibile vedere nella tabella l'integrazione del PCM nell'edificio sicuramente porta ad una riduzione di tutte le categorie di impatto, riduzioni che vanno dall' 18% al 18%, risultando quindi essere sicuramente l'alternativa migliore a livello ambientale.

Nonostante già così si è ottenuta una prima ottimizzazione in termini ecologici è possibile passare ad un livello successivo impiegando come materiali a cambiamento di fase delle sostanze biologiche per riuscire a ridurre l'impatto della fase più critica, ovvero la costruzione e reperimento del materiale.

Per quanto riguarda invece l'analisi LCC condotta, i risultati riportati in figura 5.2.2 evidenziano che le fasi di costruzione e demolizione dell'edificio sono sicuramente quelle che comportano un aumento significativo dei costi, dell'80% in condizioni normali e del 120% considerando un'inflazione del 2%. L'utilizzo del PCM integrato, però, porta anche dei risparmi al momento dell'applicazione; infatti, consente di ridurre i costi operativi di consumo dell'energia di circa il 18%.

Anche se negli anni c'è un risparmio, questo non è in grado di compensare i sostanziosi costi di inizio e fine vita del progetto, ragion per cui i costi complessivi aumentano del 4% e del 0.9% in caso di inflazione. Per ora la fattibilità in termini economici non è ancora garantita a causa dell'elevato costo di acquisto dei PCM, ma ciò nonostante, non si esclude che in un futuro questa situazione cambi, in particolar modo qualora il prezzo dell'energia crescesse eccessivamente o il costo dei materiali diminuisse.

Undivided Office Unit						
Sector	Life Cycle Cost, Discounted €			Life Cycle Cost, Real (Discount = Inflation) €		
	REF_UN	OPT_UN	Comparison	REF_UN	OPT_UN	Comparison
Construction	10 012	18 009	+80%	10 012	18 009	+120%
Operational energy use	33 938	27 711	-18%	41 448	33 843	-18%
Operational water use	77	77	0%	94	94	0%
End of life	57	103	+80%	93	167	+120%
Total	44 084	45 900	+4.1%	51 647	52 114	+0.9%

Figura 5.2.2 Risultati dell'analisi LCC per lo scenario di riferimento e la nuova proposta [31]

5.3 APPLICAZIONE DEI PCM DISPERSI IN SCHIUMA DI RAME PER LO STOCCAGGIO DI ENERGIA TERMICA

A causa dell'incremento negli ultimi anni del consumo di energia da parte degli edifici si stanno valutando nuovi metodi per migliorare le performance dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento tramite fonti rinnovabili, in particolar modo tramite energia solare. Questo studio si occupa della valutazione del ciclo di vita di un innovativo sistema di accumulo dell'energia termica (TES), basato su un PCM organico incorporato all'interno di una schiuma di rame, accoppiato con un sistema solare di riscaldamento e raffreddamento, che produce acqua calda e fredda per regolare la temperatura interna di un'abitazione situata nel sud Italia. Il progetto in questione è quindi poi stato confrontato con un sistema di accumulo di energia termica tradizionale ad acqua con la stessa capacità di accumulo di energia. Entrambi i sistemi sono stati studiati abbinati ad una caldaia a gas ausiliaria per compensare quell'energia che le fonti rinnovabili non riescono a fornire.

Lo scopo è quello di valutare i benefici di un innovativo sistema di accumulo termico dell'energia, detto PF-TES, con un tradizionale sistema di accumulo dell'energia a base d'acqua, detto W-TES.

Per costruire un'analisi LCA e LCC integrata bisogna innanzitutto trovare una base comune su cui confrontare le due alternative. È stato quindi stabilito che entrambi i modelli devono soddisfare una domanda energetica pari a 7300kWh/anno per una durata di 20 anni, dopo dei quali verrà smesso.

Per quanto riguarda l'analisi LCA condotta sono riportate nella figura 5.3.1 tutte le categorie di impatto considerate con rispettivi indicatori calcolati per entrambe le alternative che poi sono stati sommati per ottenere un indicatore globale d'impatto.

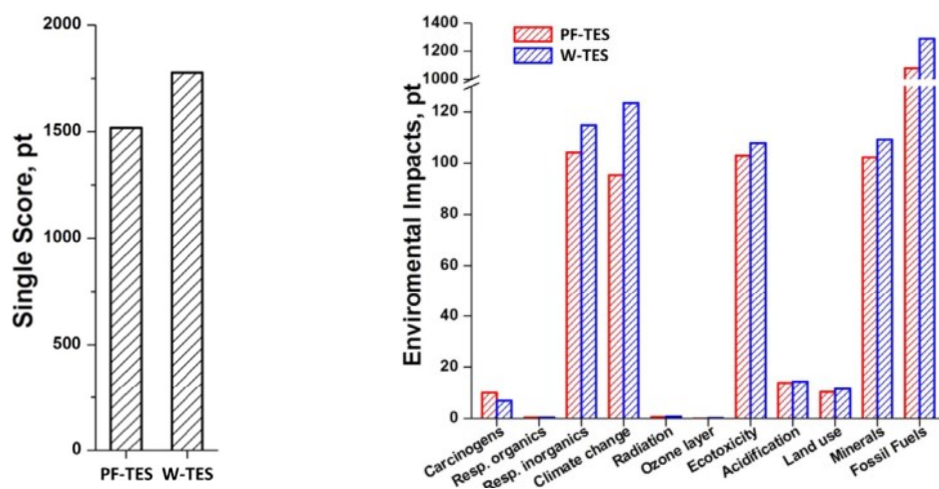


Figura 5.3.1 Indicatori di impatto globali e per categoria per le alternative PF-TES e W-TES [32]

Già dai diagrammi è possibile vedere come il PF-TES sia la soluzione non solo con minor impatto globale, ma con impatto minore in ogni categoria considerata, diventando quindi l'alternativa migliore da un punto di vista ambientale.

Entrando più nel dettaglio, in entrambe le soluzioni individuate il flusso che genera l'impatto maggiore è sicuramente il gas ausiliario utilizzato per coprire il carico termico richiesto che tutti e due i TES non sono in grado di coprire interamente. Per quanto riguarda il PF-TES questo corrisponde al 78,8% del punteggio totale d'impatto, mentre per il W-TES corrisponde al 82,5%, questa differenza è legata alla minore capacità termica dell'acqua rispetto al PCM.

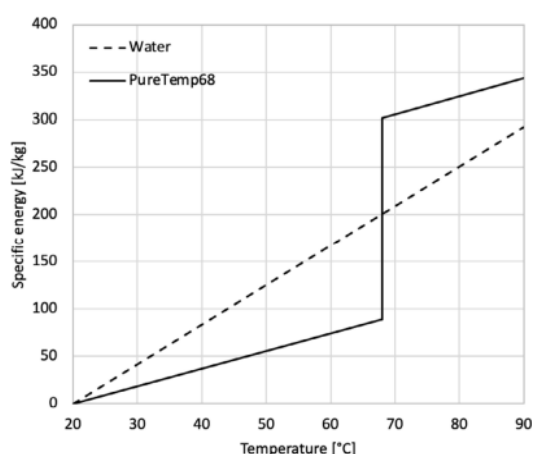


Figura 2.3.2 differenza energia specifica accumulata tra l'acqua e la paraffina (PureTemp) [32]

È proprio però la capacità del PF-TES di ridurre notevolmente la quantità di gas ausiliario impiegato che rende questa alternativa quella a minor impatto ambientale. Questa riduzione annuale del circa 18,4% non solo riesce a compensare, però, il maggior impatto causato dalle materie prime e dalla maggiore energia impiegate per realizzare il sistema, ma consente di ottenere un impatto ambientale minore sull'orizzonte temporale di 20 anni.

I risultati dell'analisi LCC sono, invece, mostrati in figura 5.3.3.

Phase	Cost item	PF-TES				W-TES			
		20 years		1 year		20 years		1 year	
		€	€/kWh	€	€/kWh	€	€/kWh	€	€/kWh
Manufacturing	Materials	13,873.10	379.05	693.66	18.95	1629.00	44.51	81.45	2.23
	Manpower	934.34	25.53	46.72	1.28	300.00	8.20	15.00	0.41
	Energy	15.40	0.42	0.77	0.02	-	-	-	-
	Total	14,822.84	405.00	741.15	20.25	1929.00	52.70	96.45	2.64
Operating	Maintenance	1600.00	43.72	80.00	2.19	2400.00	65.57	120.00	3.28
	Energy	7792.68	212.91	389.63	10.65	9552.25	260.99	477.61	13.05
	Total	9392.68	256.63	469.63	12.83	11,952.25	326.56	597.61	16.33
Dismissing	Manpower	133.48	3.65	6.67	0.18	8.34	0.23	0.42	0.01
	Energy	1.63	0.04	0.08	< 0.01	0.10	< 0.01	0.01	< 0.01
	Disposal	443.66	12.12	22.18	0.61	25.54	0.70	1.28	0.03
	Total	578.77	15.81	28.93	0.79	33.98	0.93	1.71	0.05
Total costs		24,794.28	677.44	1239.71	33.87	13,915.23	380.20	695.76	19.01

Figura 5.3.3 Risultati analisi LCC del confronto tra PF-TES e W-TES [32]

Dalla tabella è possibile visionare come l'uso del sistema innovativo PF-TES comporti una riduzione consistente dei costi operativi annuali sia per quanto riguarda la manutenzione sia per il consumo di energia elettrica (addirittura questi calano del 21,4% rispetto al W-TES). La componente di costi che più incide su quest'ultimo è infatti, quella legata al consumo di energia 69%, e questo perché avendo una minore capacità di accumulo dell'energia solare, compensa consumando un maggiore quantitativo di gas ausiliario.

D'altro canto, non si può fare a meno di notare come invece i costi di costruzione, soprattutto quelli che riguardano le materie prime e l'assemblaggio, sono molto più elevati per quanto riguarda il PF-TES, addirittura arrivano ad essere sette volte tanto rispetto al W-TES.

Anche valutando dal punto di vista della dismissione e disassemblaggio la nuova proposta risulta svantaggiosa, questa categoria di costi, infatti, risulta essere sedici volte maggiore rispetto alla soluzione tradizionale a base d'acqua. Bisogna comunque precisare che questi costi non sono così ingenti come quelli di costruzione poiché contribuiscono solo al 2.3% dei costi totali del PF-TES.

Da un punto di vista economico possiamo ancora una volta vedere come il maggiore limite del sistema PF-TES sia proprio il costo della materia prima, rendendolo quindi non vantaggioso dal punto di vista monetario.

Traendo una conclusione generale è possibile sostenere che nonostante i risultati abbiamo dimostrato come il sistema PF-TES sia in grado di ridurre il consumo annuale di gas ausiliario, grazie all'efficienza migliorata dell'accumulo di energia, e i costi annuali per la manutenzione e l'elettricità del 21,4%. Il prototipo mostra ancora un importante limite di applicabilità strettamente collegato all'elevato costo e consumo di materie prime per la sua realizzazione. Considerando, infatti, un ciclo di vita di vita operativo di 20 anni questi aspetti portano ad aver un costo totale che è il 78% più alto rispetto al sistema tradizionale.

5.4 APPLICAZIONE DEL PCM PER IL TRASPORTO DI ALIMENTI

L'avvento di concetti e tecnologie finalizzate al miglioramento dei sistemi tradizionali di refrigerazione è indispensabile per ridurre le emissioni di gas e il consumo energetico anche nell'ambito alimentare.

In questo studio in particolare viene presentato un innovativo frigorifero termoelettrico basato sui materiali a cambiamento di fase. Questo nuovo prototipo è in grado di mantenere le temperature al di sotto dei 5° anche per sette ore senza il bisogno di elettricità, rendendolo una valida alternativa per i veicoli frigoriferi.

Nonostante questi risultati molto interessanti è comunque necessario analizzare l'intero ciclo di vita di questa proposta per verificare che il suo impatto ambientale globale sia inferiore rispetto a un convenzionale sistema frigorifero.

Per il prototipo in questione è stato impiegato come materiale a cambiamento di fase il Rubitherm 5. La scelta è stata in primo luogo spinta dalla sua temperatura di cambiamento di fase pari a 5°C, caratteristica perfettamente in linea con l'applicazione. Oltre a questo, è stato scelto anche perché non tossico, aspetto molto importante dal momento che la sua applicazione è nell'ambito alimentare.

Gli attuali frigoriferi sono sì in grado di raffreddare, ma presentano dei significativi problemi ambientali che non possono essere trascurati. Pertanto, in questo caso studio è stata condotta un'analisi LCA valutando le alternative sulla base di diverse categorie ambientali, in particolare sul potenziale di riscaldamento globale e la riduzione dell'ozono.

L'analisi mostra come il maggior impatto della nuova proposta sia dato per lo più dal materiale in sé e dalla fase di utilizzo.

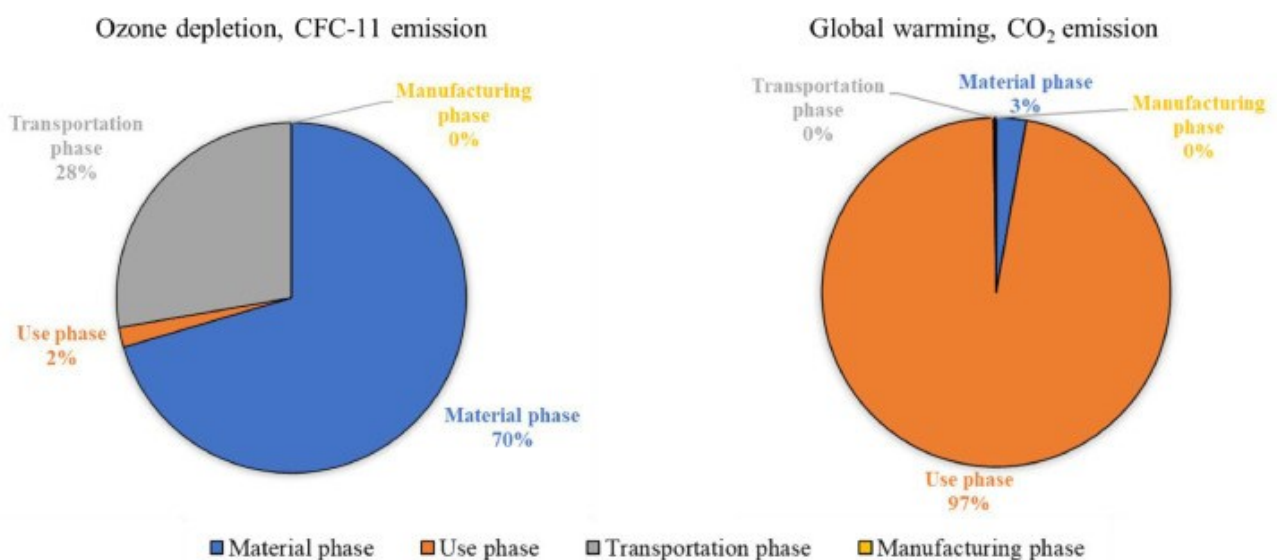


Figura 5.4.1 Contributi delle diverse fasi del ciclo di vita agli impatti [36]

Il contributo circa l'emissione di CO₂ ha ancora un impatto ambientale importante, con un ciclo di vita di 15 anni ammonta a 1190kg, confrontando però il sistema proposto con un sistema frigorifero convenzionale si può affermare che questa nuova soluzione consente una riduzione del 28% delle emissioni di CFC-11 responsabili della riduzione dell'ozono. Questo può essere considerato un risultato molto promettente per il futuro almeno dal punto di vista ambientale.

5.5 APPLICAZIONE DI UN PCM ALL'INTERNO DI UN PANNELLO FOTOVOLTAICO

L'oggetto di studio di questa sezione è un innovativo pannello fotovoltaico detto PV-PCM, in quanto nella sua parte posteriore è integrato un materiale in cambiamento di fase, in questo caso una cera paraffinica con temperatura di cambiamento di fase pari a 35°C. Questo nuovo prototipo non solo garantisce un'ottimizzazione della produzione dell'energia rispetto ai pannelli convenzionali, in quanto il PCM permette un miglior raffreddamento, ma anche il calore in eccesso accumulato dal materiale consente di scaldare un serbatoio di acqua ad uso domestico.

Il confronto, eseguito mediante analisi LCA, viene fatto tra questa nuova proposta di pannello PV-PCM e un pannello PV convenzionale, entrambi adibiti a coprire i bisogni energetici e di acqua calda di una abitazione del centro Italia abitata da 4 persone, con un periodo d'uso pari a 20 anni prima della dismissione.

La life cycle assessment riguardo la nuova proposta evidenzia una netta diminuzione degli impatti ambientali in quanto durante tutta la sua fase operativa non necessita di manutenzione e non emette gas serra, annullandone così i flussi inquinanti. Inoltre, anche gli impatti legati alla dismissione del pannello sono ridotti grazie al fatto che molti materiali impiegati possono essere riciclati.

Ciò nonostante, però, il 60% dell'impatto globale è ancora generato dallo smaltimento del pannello a causa dell'incenerimento del PCM a fine vita utile. Nel complesso è comunque possibile affermare che il recupero energetico che questo materiale è in grado di generare riesce a compensare le emissioni da esso rilasciate. Confrontandolo invece con l'alternativa di riferimento, possiamo vedere come questo consenta un risparmio ambientale di circa 950kg di CO₂ nei 20 anni di utilizzo, riducendo quindi questa categoria di impatto di circa il 10%.

Questi dati mostrano chiaramente come questo pannello integrato possa essere un'azione utile per la riduzione dell'impatto ambientale che ad oggi è uno degli aspetti più limitanti dell'impiego dei pannelli fotovoltaici.

5.6 CONFORNTO APPLICAZIONE DI DUE PCM RICAVATI DA SOSTANZE BIOLOGICHE

Fino ad ora è stato possibile vedere come nella maggior parte dei casi si sfruttino come materiali a cambiamento di fase prodotti che sono ricavati da materie prime non rinnovabili, perlopiù componenti dell'industria petrolchimica ottenendo di conseguenza impatti importanti per quanto riguarda la fase di produzione dei materiali stessi.

I possibili PCM qui proposti sono invece di origine biologica, in particolare l'acido dodecanoico, ricavato dall'olio di palma, sostanza di scarto di molte aziende alimentari a causa dell'impatto nocivo sulla salute dell'uomo, e il palmitato di etile, ricavato dalle alghe.

Entrambi i materiali si prestano molto bene ad applicazioni nell'ambito dell'accumulo termico grazie alle caratteristiche mostrate in figura.

	Dodecanoic acid	Ref	Ethyl hexadecanoate	Ref
Melting temperature (°C)	43	a	23.2	b
Enthalpy of fusion (kJ/kg)	180	a	187	b
Density (kg/m ³)	930	a	852	c
Specific heat capacity (J/g/K)	1.95 (solid) 2.4 (liquid)	a	1.63 (solid) 2.09 (liquid)	b
Thermal conductivity (W/m/K)	0.15	a	—	

Figura 5.6.1 Proprietà termiche delle due sostanze proposte [34]

In questo caso studio in particolare l'acido dodecanoico è stato integrato in un sistema di riscaldamento dell'acqua mediante energia termica, mentre il palmitato di etile come cuscinetto termico all'interno delle pareti di un edificio.

Sono state poi analizzate le prestazioni di 1 kg di ogni sostanza mediante LCA considerando in questa tutte le fasi della produzione dei PCM: crescita e raccolta delle materie prime, estrazione, trattamento e separazione dei singoli componenti.

Il tempo di payback energetico per l'acido dodecanoico è risultato essere circa 2 anni, infatti nonostante la produzione dell'acido generi grandi emissioni di CO₂, l'utilizzo di questo PCM in un sistema solare termico consentirebbe di compensare la CO₂ prodotta in meno di un anno.

Per quanto riguarda invece il palmitato di etile prodotto dalle alghe, usato per garantire un maggiore comfort termico all'interno di una abitazione, richiede almeno un utilizzo di 30 anni prima che i risparmi che consente di ottenere in termini energetici compensino le emissioni rilasciate per la produzione di questo particolare PCM.

Da questa analisi si è potuto concludere che l'acido dodecanoico è un'alternativa molto valida che avrà molti riscontri in futuro; mentre il palmitato di etile, nonostante sia un buon candidato, mostra un periodo di payback ancora troppo elevato per dare il via libera al suo impiego.

6. CONCLUSIONI

Questo studio ha mostrato come nel concreto i materiali in cambiamento di fase abbiano un grandissimo potenziale per quanto riguarda lo stoccaggio termico rispetto alle soluzioni tradizionali che si basano sull'accumulo di calore sensibile. Nonostante questo, però molti PCM sono penalizzati da una bassa conduttività termica e da un basso tasso di diffusione termica, entrambi aspetti che ne peggiorano la performance. Sicuramente quindi aumentando l'area di scambio termico, disperdendo il PCM in sostanze ad elevata conducibilità o incapsulandolo si riuscirà a superare queste difficoltà riuscendo a dare un grande contributo alla diffusione di sistemi rinnovabili che sfruttano l'energia solare.

Per quanto riguarda invece le metodologie qui descritte, ovvero LCA e LCC, nonostante siano abbastanza diffuse, le normative a cui riferiscono lasciano ancora largo spazio all'interpretazione rischiando quindi di non portare sempre a dei risultati corretti.

Concentrandoci, invece, su quello che è il vero obiettivo, ovvero la valutazione ambientale ed economica dei materiali in cambiamento di fase è possibile concludere che la loro introduzione nei sistemi di accumulo dell'energia termica non è ancora fattibile.

Da un punto di vista ambientale questo non è possibile poiché la riduzione degli impatti tra le alternative a base di PCM e quelle tradizionali non è ancora così elevata, a causa degli ingenti flussi generati dalla produzione dei PCM stessi, soprattutto dal momento che tutti i risultati ottenuti sono frutto di simulazioni e quindi presentano un certo grado di incertezza.

Da un punto di vista economico non è ancora fattibile l'impiego di questi materiali a causa del loro elevato costo, questo infatti, fa crescere notevolmente l'investimento iniziale richiesto, costo che non riesce poi ad essere bilanciato dai risparmi che le nuove proposte garantiscono nelle fasi operative.

Essendo che da un punto di vista tecnico questi materiali offrono un grande potenziale nel futuro:

- È importante che la ricerca miri a ridurre i flussi generati dalla produzione dei materiali a cambiamento di fase e in parte anche dal loro smaltimento, in modo da evidenziare ancora di più il distacco dai sistemi convenzionali per poter giustificare il loro impiego.
- Si cerchino sostanze alternative da utilizzare come materiali a cambiamento di fase di derivazione biologica per risolvere il problema della produzione. Per ora la sostanza che meglio si presta ad una possibile applicazione è l'olio di palma, che non solo è di derivazione biologica, ma ad oggi è presente in grandi quantità come scarto nelle industrie alimentari.

- Dato l'aumento importante dei costi dell'energia nell'ultimo periodo, prossimamente l'ammontare dei costi totali dei sistemi tradizionale potrebbe superare quello dei sistemi a base di PCM, rendendoli quindi una valida alternativa di investimento.
- Tramite un sistema di incentivi si favorisca la creazione di un mercato più solido per queste sostanze con una conseguente riduzione del prezzo degli stessi.

BIBLIOGRAFIA (in corso)

1. Ram Kunwer, Swapnil Sureshchandra Bhurat. *Thermal characterization of phase change materials (PCM) for heating applications*. Materials today: proceeding 50 (2022) 1960-1996
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321059617>
2. F.S. Javadi, H.S.C. Metselaar, P. Ganesan. *Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review*. Solar Energy 206 (2020) 330-352.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20306058>
3. Claudia Borrelli, Domenico Frattini, Marco de Pertis, Francesco Colangelo, Antonella Petrillo, Raffaele Cioffi. *Analisi LCA della produzione di aggregati innovativi per l'accumulo termico*.
<https://www.ingenio-web.it/pdfs/analisi-lca-della-produzione-di-aggregati-innovativi-per-l-accumulo-termico.pdf>
4. Nihal Sarier, Emel Onder. *Organic phase change materials and their textile applications: An overview*. Termochimica Acta 540 (2012) 7-60
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603112001773>
5. Alexis Sevault, Fride Vullum-Bruer, and Olaf Lehn Tranås. *Active PCM-Based Thermal Energy Storage in Buildings*. Encyclopedia of Energy Storage, Volume 1, 2022, pages 453-469.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197233000081>
6. R. Bubbico, B. Loreti, C. Menale. *Analisi teorica delle modalità di scambio termico tra acqua e PCM: studio parametrico delle principali variabili in gioco*.
https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/climatizzazione-rinnovabili/2013/rds-par2013-157.pdf
7. Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 13, issue 2, 2009, pages 318-345.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001402>
8. P. Corongiu, M. Papagni, M. Surra. *Utilizzo dei materiali a cambiamento di fase in edilizia*. AiCARR journal 55.
<http://www.aicarrjournal.org/cont/journals-articles/730/volume-marchaprile-utilizzo-materiali-cambiamento-fase-3224allasp1.pdf>
9. T. N. Porto, J. M. P. Q. Delgado, A. S. Guimarães, A. G. Barbosa de Lima, T. F. Andrade, H. L. F. Magalhães, G. Moreira, and B. B. Correia. *Phase Change Materials: From Fundamentals and Melting Process to Thermal Energy Storage System for Buildings Application*.
10. Amy S. Fleischer. *Thermal energy storage using phase change materials, fundamentals and applications*. Series editor, Francis A. Kulacki, Minneapolis, MN, USA
11. <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/132473>
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material
13. Manish Rathod. *Phase Change Materials - Technology and Applications*. United Kingdom, 2022 by IntechOpen.
14. Angeliki Kylili, Paris A. Fokaides. *Life Cycle Assessment (LCA) of Phase Change Materials (PCMs) for building applications: A review*. Journal of Building Engineering 6 (2016) 133-143
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216300171>
15. ISO 14040 (1997) *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*
16. *Metodologia LCA (Life Cycle Assessment): valutazione carichi ambientali*
<https://biblus.acca.it/metodologia-lca-life-cycle-assessment>

17. https://www.oc-praktikum.de/nop/it/articles/pdf/LCAMethod_it.pdf
18. https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/MIR/L4/20201120_workshop_14_presentazione_villoresi.pdf
19. Gregory A. Norris, *Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA*
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02977849>
20. Life Cycle Assessment Michael Z. Hauschild Ralph K. Rosenbaum Stig Irving Olsen Editors *Theory and Practice*
21. Pernilla Glucha;*, Henrikke Baumannb, *The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making* Building and Environment 39 (2004) 571 – 580
https://www.academia.edu/21835231/The_life_cycle_costing_LCC_approach_a_conceptual_discussion_of_its_usefulness_for_environmental_decision_making
22. Annett Bierer, Lilly Meynerts, Uwe Gowe *Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing - Methodical Relationships, Challenges and Benefits of an Integrated Use.* Re-engineering Manufacturing for Sustainability pp 415–420
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-4451-48-2_68
23. Noha Gawdat Atia, Makram A. Bassily a, Ahmed A. Elamer. *Do life-cycle costing and assessment integration support decisionmaking towards sustainable development?* Journal of Cleaner Production 267 (2020)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262032103X>
24. Senthil Kumaran Durairaj, S.K. Ong, A.Y.C. Nee and R.B.H. Tan. *Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies.* Corporate Environmental Strategy Volume 9, Issue 1, February 2002, Pages 30-39
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1066793801001415>
25. Buildings and constructed assets — Service life planning. INTERNATIONAL STANDARD ISO 15686-5 Second edition 2017-07.
26. Ignacio Bernardino-Galeana1(B) , Carmen Llatas1 , María Victoria Montes1 , Bernardette Soust-Verdaguer1 , Jacinto Canivell2 , and Pedro Meda2. *Life Cycle Cost (LCC) and Sustainability. Proposal of an IFC Structure to Implement LCC During the Design Stage of Buildings.* Life Cycle Cost (LCC) and Sustainability. Proposal of an IFC Structure to Implement LCC During the Design Stage of Buildings.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-61118-7_33?utm_source=getftr&utm_medium=getftr&utm_campaign=getftr_pilot
27. <https://www.wbdg.org/resources/life-cycle-cost-analysis-lcca>
28. David G. Woodward. Life cycle costing—Theory, information acquisition and application International Journal of Project Management Volume 15, Issue 6, December 1997, pages 335-344
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263786396000890>
29. *Life Cycle Cost Analysis Handbook.* State of Alaska - Department of Education & Early Development 2nd Edition Finance & Support Services / Facilities 2018
30. Pere Llorach-Massana, Javier Pena, Joan Rieradevall, Juan Ignacio Montero. *LCA & LCCA of a PCM application to control root zone temperatures of hydroponic crops in comparison with conventional root zone heating systems.* Renewable energy 85 (2016) 1079-1089.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301592>
31. Christina A. Konstantinidou, Werner Lang, Agis M. Papadopoulos, Mattheos Santamouris. *Life cycle and life cycle cost implications of integrated phase change materials in office buildings.* International journal of energy research – volume 43 (2019) 150-166.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.4238>

32. Simone Venettacci, Raffaello Cozzolino, Gennaro Salvatore Ponticelli, Stefano Guarino. *Environmental and economic life cycle assessment of thermal energy storage based on organic phase change material embedded in open-cell copper foams*. Sustainable Production and Consumption 29 (2022) 387-405.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550921003092>
33. Angeliki Kylili, Paris A. Fokaides. *Life Cycle Assessment (LCA) of Phase Change Materials (PCMs) for building applications: A review*. Journal of Building Engineering, volume 6 (2016) 133-143.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216300171>
34. John A. Noël, Paul M. Allred, Mary Anne White. *Life cycle assessment of two biologically produced phase change materials and their related products*. Int J Life Cycle Assess (2015) 20:367–376.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-014-0831-1>
35. Daniele Colarossi, Eleonora Tagliolini, Alessia Amato, Paolo Principi. *Life cycle assessment and circularity evaluation of a PV panel integrated with phase change material*. Renewable Energy 201 (2022) 150-156.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122017177>
36. Mehran Bozorgi, Poritosh Roy, Abu Raihan Mohammad Siddique, Kumar Venkateshwar, Syeda Tasnim, Shohel Mahmud. *Experimental investigation and life cycle assessment of a phase change material (PCM) based thermoelectric (TE) refrigerator*. International Journal of Thermofluids 19 (2023).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202723001118>