



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Analisi dello stato dell'arte dei materiali a cambiamento di fase e la loro possibile applicazione nel settore edilizio

Relatore: Giulia Righetti

Laureando: Francesco Oscar Sambuco

Matricola: 2006147

Anno accademico 2023/2024

*Al nonno Giorgio,
ti voglio tanto bene!*

Indice

1. INTRODUZIONE	5
2. THERMAL ENERGY STORAGE	6
2.1 CARATTERISTICHE E PROPRIETA' DEI TES	7
2.2 METODI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA TERMICA.....	8
3. PHASE CHANGE MATERIALS	11
3.1 PROPRIETA' DEI PCM.....	11
3.2 CLASSIFICAZIONE DEI PCM	13
3.2.1 PCM ORGANICI.....	13
3.2.2 PCM INORGANICI	15
3.2.3 PCM EUTETTICI.....	16
4. INCAPSULAMENTO.....	17
4.1 MICRO-INCAPSULAMENTO	17
4.2 MACRO-INCAPSULAMENTO	18
4.3 NANOPARTICELLE.....	19
4.4 ALETTE	19
5. APPLICAZIONE DEI PCM NEGLI EDIFICI	20
5.1 UTILIZZO DEI PCM NEI SISTEMI PASSIVI.....	21
5.2 UTILIZZO DEI PCM NEI SISTEMI ATTIVI	32
5.3 CONFRONTO TRA SISTEMA PASSIVO E SISTEMA ATTIVO.....	36
6. CONCLUSIONE.....	39
7. BIBLIOGRAFIA.....	40

1. INTRODUZIONE

Lo scopo della tesi è quello di fornire una panoramica generale sui PCM e la loro applicazione in ambito edilizio. Partendo dalle caratteristiche e proprietà dello stoccaggio di energia, si analizzano i materiali a cambiamento di fase, definendone proprietà, funzionalità e caratteristiche ottimali. Segue una classificazione generale dei PCM attualmente a disposizione, stabilendone per ogni categoria punti di forza e criticità. Successivamente il focus è posto sulla tecnica di incapsulamento, dove vengono illustrate le principali modalità che apportano miglioramenti ai PCM e permettono l'integrazione degli stessi negli edifici.

Partendo quindi da una visione generale dello stato attuale degli edifici, si evidenzia come i PCM possano apportare miglioramenti in ambito energetico facendoli passare dallo status di semplici isolanti a mutevoli.

Questo è possibile grazie all'applicazione negli edifici di specifici sistemi integrati da PCM che possono essere distinti in due gruppi: sistemi passivi e attivi.

Approfondimenti vengono fatti su questi andando a definire il loro funzionamento, le variabili che entrano in gioco, fornendo possibili applicazioni e facendo anche un confronto fra gli stessi.

2. THERMAL ENERGY STORAGE

Quando parliamo di energia colleghiamo questo termine a parole come progresso, efficienza e movimento. E in effetti l'energia ha portato tutto ciò nella nostra società: dalla rivoluzione meccanica in poi si sono potuti realizzare sviluppi tecnologici che non si potevano immaginare, creando un nuovo modello di società e destinando la precedente a un punto di non ritorno. Le possibilità offerte dall'energia hanno cambiato radicalmente le nostre abitudini liberando l'agire degli esseri umani prima condizionato dalla natura: dal riscaldamento e raffreddamento desiderato allo spostamento rapido, dall'illuminazione di edifici e strade all'uso di elettrodomestici e strumenti che rendono più facile la vita delle persone su questo pianeta.

Tutto ciò però non è del tutto positivo, infatti la produzione di energia gioca un ruolo rilevante nell'innalzamento del riscaldamento globale. Per esempio ad oggi la maggior parte dell'energia elettrica viene prodotta mediante fonti non rinnovabili come petrolio, gas naturali e carbone, che contribuiscono a un innalzamento della temperatura media del pianeta; l'ultimo decennio è stato il più caldo di tutti con un picco nel 2023 dove la temperatura media globale è stata di 14.98°C, 0.17°C in più rispetto al precedente record. I continui sviluppi tecnologici e innovativi stanno portando ad una produzione sempre maggiore di energia: dalla rivoluzione meccanica ad oggi si è registrato un aumento di produzione dell'energia del 150% e si stima un ulteriore aumento del 48% entro il 2040.

Stiamo facendo molti passi avanti nello sviluppo di energia sostenibile e rinnovabile, come quella fotovoltaica, ma ad oggi non è possibile affidarci solo ad essa per soddisfare la domanda media globale.

Gran parte dell'energia prodotta viene consumata dagli edifici, solitamente consumano il 40% dell'energia prodotta e in determinate città l'80%. La gran parte di essa è energia termica, ovvero destinata al riscaldamento o raffreddamento, e la gestione della sua domanda è difficile perché non è costante ma varia dalla giornata, dal consumatore e dalla stagione. Nelle ore di punta (ore in cui viene richiesta una gran quantità di energia sopra la media) non è possibile affidarsi alle sole fonti rinnovabili a causa della crescente disparità nei carichi elettrici tra le ore di punta e quelle di non punta, quindi la domanda aggiuntiva di energia viene soddisfatta da centrali poco efficienti e molto inquinanti che provocano una grande produzione di CO_2 . Essendo anche molto costoso produrre un quantitativo maggiore di energia rispetto alla media, tutto ciò si ripercuote anche sulle bollette del consumatore. Studiosi hanno affermato che il picco di domanda può essere ridotto grazie allo

stoccaggio di energia termica (TES) per accumulare energia in eccesso durante le ore di non picco e utilizzarla nelle ore di picco. Il sistema TES, acronimo di Thermal Energy Storage, può bilanciare la domanda e fornitura di energia, ridurre le emissioni di CO_2 e il consumo di energia, aumentando al contempo l'efficienza complessiva del sistema energetico.

Un ottimo materiale adatto allo stoccaggio di energia è il materiale a cambiamento di fase (PCM), che tramite la transizione di fase accumula o rilascia grandi quantitativi energetici.

2.1 CARATTERISTICHE E PROPRIETA' DEI TES

Lo stoccaggio di energia termica (TES) è una tecnica che consente di immagazzinare energia termica riscaldando o raffreddando un mezzo di stoccaggio in modo da esser poi riutilizzata in un secondo momento per applicazioni di riscaldamento o raffreddamento e per la produzione di energia. Questo non consente solo di ridurre la discrepanza tra domanda e offerta, ma permette di accumulare l'energia che sarebbe destinata a disperdersi nell'ambiente e di migliorare le prestazioni e l'affidabilità termica del sistema. È una tecnica principalmente pensata per la produzione di energia termica destinata a edifici e processi industriali, ma può essere implementata in tantissimi altri sistemi come il settore tessile, l'automotive, l'assistenza sanitaria, l'agricoltura, la trasformazione alimentare etc.

È ancora una tecnologia in fase di sviluppo: gli alti costi di implementazione e l'attuale livello tecnologico non permettono di poter considerare i TES convenienti rispetto all'utilizzo di combustibili fossili. È necessario fare ancora ricerca sullo sviluppo tecnologico e per poter trovare nuovi materiali alternativi ed economici. Le principali caratteristiche che costituiscono un sistema di accumulo di energia termica sono:

- **Capacità:** definisce l'energia totale che può essere immagazzinata nel sistema. Essa dipende dal processo di stoccaggio, dalle proprietà del mezzo e dalle dimensioni del sistema;
- **Potenza:** definisce la velocità con cui l'energia può essere immagazzinata all'interno del sistema e rilasciata dallo stesso;
- **Efficienza:** è il rapporto tra la quantità di energia fornita dall'utente e la quantità di energia necessaria per attivare il sistema. Tiene conto della perdita di energia durante il periodo di stoccaggio e carica/scarica;
- **Periodo di stoccaggio:** definisce quanto tempo ci si mette a stoccare l'energia, può durare da ore a mesi;

- Tempo di carica e scarica: definisce quanto tempo è necessario per caricare il sistema e per quanto tempo l'energia può essere estratta nella fase di scarica;
- Costo: si riferisce alla capacità (\$/kWh) del sistema di accumulo e comprende costo del capitale, costo di funzionamento e di manutenzione durante il suo ciclo di vita.

2.2 METODI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA TERMICA

L'energia termica può essere immagazzinata con diversi metodi, i più comuni sono: calore sensibile, calore latente e calore termochimico.

A seconda del calore che vogliamo estrarre, esistono diverse tecniche che il sistema TES utilizza per estrarre il calore che prendono il nome di:

- Accumulo di calore sensibile;
- Accumulo di calore termochimico;
- Accumulo di calore latente.

TES System	Capacity (kWh/t)	Power (MW)	Efficiency (%)	Storage Period	Cost (€/kWh)
Sensible (hot water)	10–50	0.001–10.0	50–90	days/months	0.1–10
Phase-change material (PCM)	50–150	0.001–1.0	75–90	hours/months	10–50
Chemical reactions	120–250	0.01–1.0	75–100	hours/days	8–100

Figura 1: Comparazione tra i diversi sistemi TES [2]

In questa tabella già si notano le prime differenze di questi tre sistemi prendendo alcune caratteristiche precedentemente descritte. Si vede come l'accumulo termochimico è quello che presenta più capacità anche se meno potenza e un costo più elevato, mentre al contrario l'accumulo di calore sensibile presenta meno capacità ma più potenza e un costo ridotto.

Si procede col descrivere i diversi tipi di energia termica e i sistemi associati.

ACCUMULO DI CALORE SENSIBILE (STES)

Quando il calore influisce sulla temperatura del materiale, senza cambiamenti di fase, questo si chiama calore sensibile. Lo stoccaggio di calore sensibile (STES) è il metodo più semplice e si basa sull'immagazzinamento dell'energia termica ottenuta riscaldando o raffreddando il materiale di stoccaggio. L'energia termica immagazzinata dal calore sensibile è espressa dalla formula seguente:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Q (J) è il calore, m (kg) è la massa del corpo, c_p ($\frac{J}{kg \cdot K}$) è il calore specifico del corpo e ΔT (K) è l'intervallo di temperatura durante il processo di carica;

Come si vede dall'equazione in questo tipo di applicazione i materiali preferiti sono quelli con elevato calore specifico. L'acqua sembra essere il miglior materiale data la sua economicità e il suo elevato calore specifico ($4186 \frac{J}{kg \cdot K}$), inoltre la sua non tossicità, non infiammabilità e la vasta disponibilità permettono l'integrazione di STES in sistemi domestici e industriali. Tuttavia al di sopra dei $100^{\circ}C$ vengono utilizzati materiali come oli, sali fusi e metalli liquidi. Il sistema STES lo troviamo anche in applicazioni per l'estrazione di energia dal sottosuolo: accumulo di energia termica in falde acquifere (ATES), accumulo di energia termica nei pozzi trivellati (BTES) e stoccaggio dell'energia termica in caverna (CTES). I materiali per l'accumulo di calore sensibile solitamente sono termicamente stabili alle alte temperature, questo li rende i materiali più utilizzati per applicazioni TES ad alte temperature. Lo svantaggio principale è la quantità di calore emesso, essendo 50-100 volte minore rispetto alle altre due tecniche.

ACCUMULO DI CALORE TERMOCHIMICO (TCS)

Quando mediante l'apporto di calore una sostanza viene scomposta nei suoi componenti iniziali o viceversa, in un processo reversibile, il sistema di accumulo di calore si basa sulla reazione chimica.

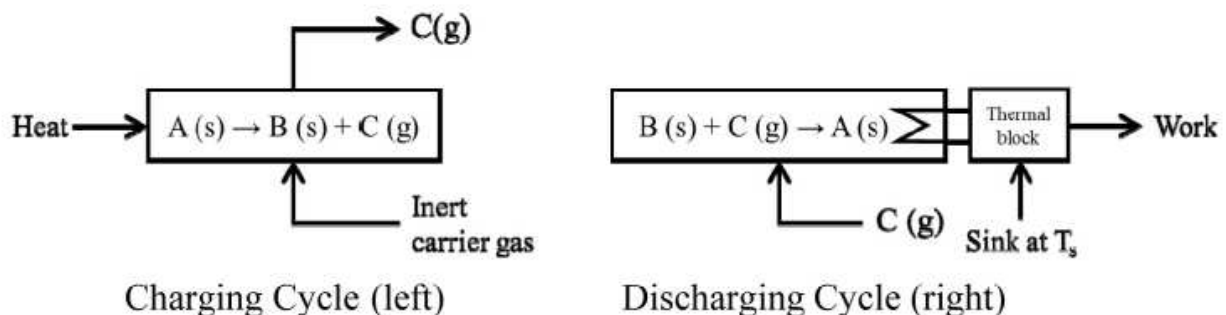


Figura 2: Processo del sistema di accumulo di calore termochimico [11]

In questa immagine viene spiegato il funzionamento del sistema.

Attraverso una reazione endotermica, applichiamo il calore da immagazzinare al materiale A, che si scomporrà nelle sue parti B+C. A questo punto possiamo separare e conservare le due parti. Nel momento in cui si necessita l'energia immagazzinata, attraverso una reazione esotermica è possibile in condizioni di pressione e temperatura adeguata miscelare le due parti B e C riottenendo il materiale di partenza A e rilasciando il calore precedentemente accumulato.

Nei sistemi fotovoltaici, fotochimici o di trasformazione dell'energia rinnovabile in eccesso in calore, lo stoccaggio di energia termochimica (TCS) è sicuramente il favorito. Esso presenta vantaggi come la massima densità ed una lunga durata di

stoccaggio dell'energia termica con basse perdite di calore: quest'ultimo in particolare consente di colmare lunghi periodi tra domanda e offerta, rendendo il sistema particolarmente adatto per la generazione di elettricità su larga scala. Tuttavia l'affidabilità termica, la segregazione di fase e i problemi di sotto-raffreddamento del sistema sono ancora oggetto di studio in laboratorio, non potendolo ancora destinare ad applicazioni commerciali.

ACCUMULO DI CALORE LATENTE (LTES)

L'accumulo di calore latente (LTES) è il trasferimento di calore come risultato di un cambiamento di fase che si verifica in uno specifico intervallo di temperature e ad una determinata pressione, dipendente dal materiale in questione. I materiali utilizzati per l'accumulo di calore latente sono noti come PCM, ovvero Phase Change Material, in grado di immagazzinare energia durante il processo di fusione (passaggio solido-liquido) e di rilasciarla durante il processo di solidificazione (liquido-solido).

Andiamo ad esaminare nel seguente grafico la differenza tra un accumulo di calore sensibile e latente:

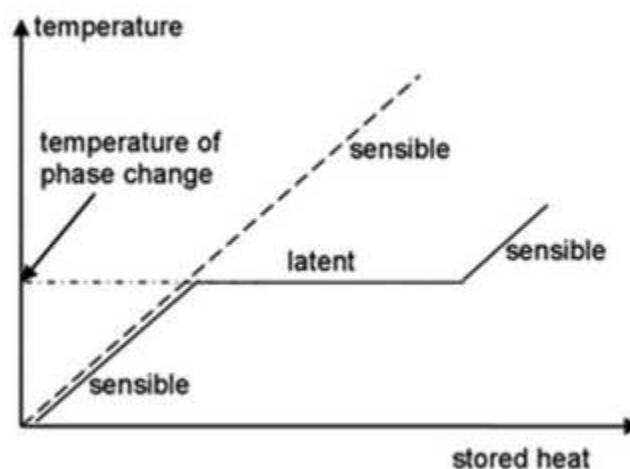


Figura 3: Confronto tra accumulo di calore sensibile e latente [1]

Come si vede dal grafico i materiali si comportano in egual modo durante l'aumento di temperatura. Quando però si raggiunge la temperatura di transizione per il PCM, avviene la transizione di fase e il materiale continua a stoccare energia termica mantenendo la temperatura costante. Possiamo dire quindi che il vantaggio dell'accumulo di calore latente rispetto a quello sensibile in intervalli di temperature uguali è la capacità di poter immagazzinare molta più energia termica.

Il materiale PCM acquisisce in un dato intervallo di temperature molto più calore aggiuntivo dato dalla formula:

$$Q = m \cdot L$$

Con Q (J) calore, m (kg) massa del materiale e L ($\frac{kJ}{kg}$) calore latente

Dei materiali PCM si può utilizzare anche la transizione solido-solido e liquido-gassoso, tuttavia sono molto meno efficienti rispetto alla transizione solido-liquido. Procediamo quindi col fare un'analisi più accurata di questi materiali.

3. PHASE CHANGE MATERIALS

Phase Change Material è il nome di una qualsiasi sostanza in grado di passare da uno stato ad un altro a una specifica temperatura e pressione. Sono molto comuni in natura, se ne trovano di molti tipi e vengono utilizzati per descrivere la transizione di fase tra solido, liquido e gassoso.

I PCM che interessano a noi hanno un elevato valore di calore latente, una buona capacità di accumulo termico e una temperatura di fusione/solidificazione adatta alla specifica funzione per cui sono stati selezionati.

L'acqua, il PCM più comune di tutti, non è adatto, avendo una temperatura di congelamento a 0°C e una bassa capacità di accumulo di calore (abbiamo visto che l'acqua è molto più capace ad assorbire calore sensibile) e quindi non idoneo nella maggior parte delle applicazioni.

Sono stati sviluppati PCM utilizzabili in numerose applicazioni, con temperature comprese tra i -40°C e 150°C, e una capacità di accumulo di calore fino a 14 volte superiore rispetto all'acqua.

Ad oggi sono tra i materiali più innovativi dell'efficienza energetica e sono ancora in fase di studio e sviluppo in ambito ecosostenibile per il risparmio energetico.

3.1 PROPRIETA' DEI PCM

Le principali proprietà che un PCM possiede sono raggruppabili in diversi gruppi: proprietà termiche, proprietà fisiche, proprietà cinetiche, proprietà chimiche e proprietà economiche.

Di seguito si riportano le caratteristiche ideali per un PCM:

Proprietà termiche:

- Elevato calore latente di transizione di fase;
- Elevata conducibilità termica (grandezza che misura l'attitudine di un materiale a trasmettere il calore per conduzione);
- Temperatura di transizione di fase ideale;
- Fusione congruente.

Proprietà fisiche:

- Elevata variazione di densità e piccola variazione di volume durante la transizione di fase (per ridurre al minimo il volume di stoccaggio);
- Bassa pressione di vapore alle temperature di esercizio (è più un fattore di sicurezza).

Proprietà cinetiche:

- Sotto-raffreddamento quasi nullo (è quella condizione in cui il materiale scende oltre la temperatura di transizione senza cambiare fase);
- Velocità elevata di cristallizzazione.

Proprietà chimiche:

- Buona stabilità chimica;
- Buona compatibilità con i materiali;
- Materiali non corrosivi, tossici, infiammabili o esplosivi;
- Nessuna degradazione dopo un gran numero di cicli di fusione/solidificazione.

Proprietà economiche:

- Disponibilità su larga scala;
- Basso costo;
- Facili da reperire;
- Possibilmente riciclabile (anche per ragioni ambientali).

3.2 CLASSIFICAZIONE DEI PCM

I PCM possono essere classificati in tre macro-categorie: PCM organici, PCM inorganici e PCM eutettici. A loro volta le macro-categorie si dividono in categorie, come viene raffigurato nella seguente figura:

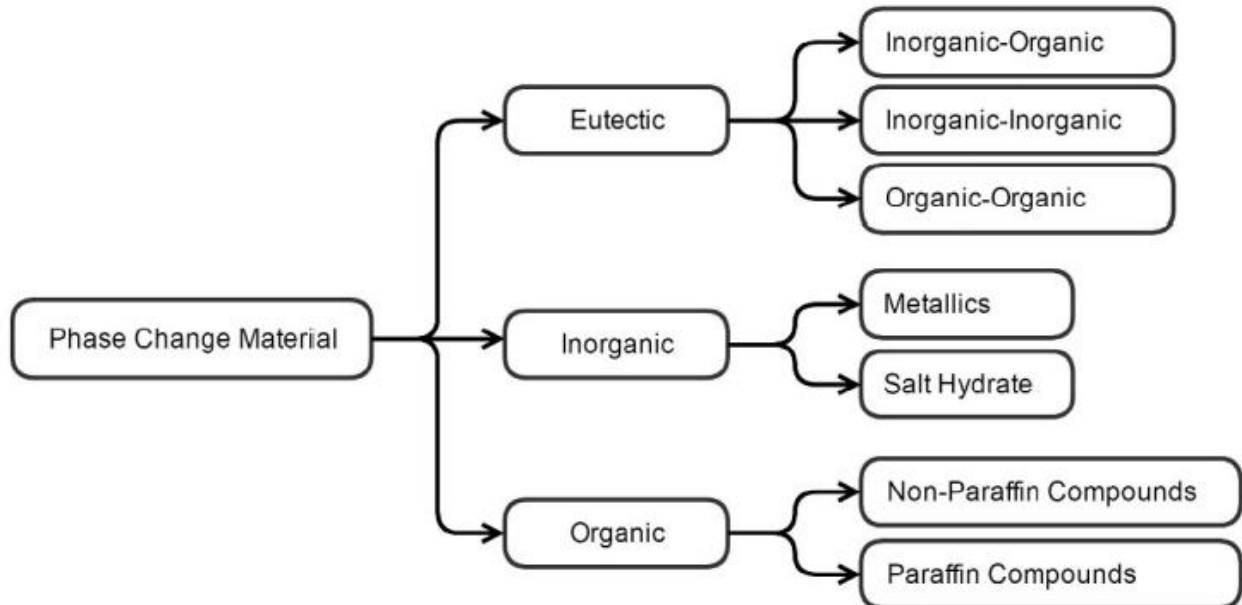


Figura 4: Classificazione dei PCM [11]

Analizziamo ora ogni categoria.

3.2.1 PCM ORGANICI

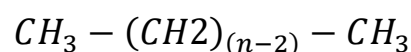
I PCM organici si dividono in paraffine e non paraffine. Presentano vantaggi come un basso sotto-raffreddamento, un elevato calore latente e una buona stabilità anche dopo diversi cicli di carica/scarica. Di contro però sono materiali con una bassa conducibilità termica e una bassa densità.

Analizziamoli più nel dettaglio.

PARAFFINE

La paraffina è il composto organico più utilizzato nelle applicazioni in edilizia. Questo perché si adatta allo stile di vita umano, avendo una temperatura di fusione nel range ideale (fra i -8°C e i 40°C) ed essendo non corrosiva, non tossica e non igroscopica.

Essa è costituita da idrocarburi saturi derivati dalla distillazione del petrolio ed è rappresentata dalla struttura molecolare:



con n numero di atomi di carbonio.

Molte proprietà della paraffina sono legate alla struttura della catena. Infatti è la cristallizzazione della catena CH_3 – che permette il rilascio di una grande quantità di calore latente. Inoltre il punto di fusione e il calore latente di fusione aumentano all'aumentare del numero di atomi di carbonio (C) che costituiscono la molecola. Tuttavia la paraffina necessita di un elevato raffinamento ed è costosa, questo la rende poco applicabile nelle pratiche di accumulo di calore latente. Invece, la cera di paraffina, un sottoprodotto della raffinazione del petrolio, è molto più economica e utilizzabile.

La paraffina presenta vantaggi come:

- Basso sotto-raffreddamento;
- Buona stabilità chimica, anche dopo diversi cicli di congelamento e riscaldamento;
- È compatibile con la maggior parte dei materiali di incapsulamento;
- Elevato calore latente;
- Buona capacità di accumulo termico.

Di contro però presenta svantaggi come:

- Bassa conducibilità termica;
- Bassa densità;
- Grande cambiamento di volume durante il cambiamento di fase;
- Prezzo dipendente da quelli del petrolio;
- Materiale inquinante;
- Infiammabilità.

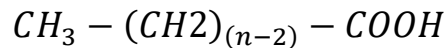
NON PARAFFINE

I PCM organici non paraffinici sono i più numerosi tra i PCM con proprietà molto diverse. Sono stati identificati numerosi esteri, acidi grassi, alcoli e glicoli, tutti appartenenti alla famiglia delle non paraffine, adatti all'immagazzinamento dell'energia. Questo ha potuto estendere i campi di applicazione dei PCM, l'intervallo di temperature di cambiamento di fase disponibile per accumuli di energia e la ricerca di prodotti efficaci. Tra tutti in particolare analizziamo gli acidi grassi.

ACIDI GRASSI

Gli acidi grassi sono composti organici di origine biologica costituiti da grassi presenti in natura come olio di cocco, olio di palma, olio di soia o grassi animali. Essendo questi materiali presenti in grande quantità negli scarti, gli acidi grassi hanno un costo molto basso. Presentano caratteristiche molto simili alla paraffina.

La struttura molecolare differisce dalla paraffina per la presenza di un gruppo funzionale carbossilico (COOH) sulla catena alifatica, con la seguente struttura:



con n numero di atomi di carbonio

Come per la paraffina, la catena $CH_3 -$ rilascia gran parte del calore latente durante la fase di fusione/solidificazione e il punto di fusione aumenta all'aumentare del numero di atomi di carbonio.

I principali vantaggi degli acidi grassi sono:

- Basso sotto-raffreddamento;
- Elevato calore latente;
- Più economici delle paraffine;
- Variazione minima di volume durante la solidificazione;
- Sono stabili e possono durare per decenni.

Mentre gli svantaggi sono:

- Bassa densità;
- Bassa conducibilità termica;
- Odore sgradevole.

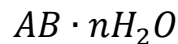
3.2.2 PCM INORGANICI

I PCM inorganici utilizzati come accumulatori di energia termica sono: sali idrati, metalli e leghe. I sali idrati vengono utilizzati per basse temperature, mentre i metalli e leghe per alte temperature. Essi presentano numerosi vantaggi rispetto ai PCM organici: sono molto più economici, abbondanti, non infiammabili e hanno una conducibilità termica migliore. Oltre a ciò funzionano a temperature maggiori, dove i PCM organici si sarebbero decomposti. Il loro svantaggio è l'elevato sotto-raffreddamento, la segregazione e separazione di fase e la potenziale instabilità termica.

Le loro proprietà li rendono adatti per essere applicati in impianti industriali ad alta temperatura per recuperare calore di scarto. Vediamo più nel dettaglio i sali idrati.

SALI IDRATI

I sali idrati sono composti di molecole di sale combinate con molecole d'acqua. Il solido cristallino che si va a formare ha generalmente la formula:



con n numero di molecole d'acqua

Sono i PCM inorganici più utilizzati in ambito commerciale. Questo perché avendo temperature di fusione basse possono adattarsi facilmente ai comfort termici umani, per esempio il cloruro di calcio esaidrato $((CaCl_2) \cdot 6H_2O)$ ha una temperatura di fusione che va dai 28°C ai 30°C. Essi hanno la caratteristica di essere non tossici, non infiammabili ed economici. È possibile ridurre il problema del sotto-raffreddamento aggiungendo alla miscela degli agenti nucleanti. Durante il processo di fusione il sale idrato viene disidratato diventando sale anidro. Tuttavia la maggior parte dei sali idrati presenta problemi durante la fusione.

Si può verificare una delle sotto indicate tre dinamiche:

- Fusione congruente: il sale anidro è completamente solubile in acqua;
- Fusione incongruente: il sale anidro è parzialmente solubile in acqua;
- Fusione semi-congruente: avviene una disidratazione parziale che porta il sale idrato a decomporsi in un sale idrato inferiore solido.

Negli ultimi due scenari il sale idrato all'aumentare dei cicli di carica/scarica perderà gradualmente il suo calore latente. Solo nel primo caso invece ci troviamo di fronte a un buon materiale utilizzabile come PCM.

3.2.3 PCM EUTETTICI

I composti eutettici sono materiali ottenuti dalla combinazione di due o più materiali a cambiamento di fase. È possibile quindi ottenere combinazioni come organico-organico, inorganico-inorganico o organico-inorganico. Nei composti eutettici tutti i materiali si trasformano durante la fusione e il congelamento in modo sincrono in una miscela cristallina che impedisce la segregazione dei materiali. Questo permette di avere una quantità infinita di possibili combinazioni, ognuna adatta a diversi scopi. Ciò consente di ottenere proprietà migliori dei singoli componenti d'origine.

Per esempio, è possibile conseguire una temperatura di fusione/solidificazione più adatta all'applicazione e un elevato valore di calore latente.

Un caso di applicazione per l'accumulo di energia a temperature inferiori a 0°C è una soluzione acqua-salina con composizione eutettica. Sicuramente i composti eutettici sono materiali che presentano un'efficace applicazione, sia a basse che ad alte temperature. Di contro però sono materiali molto costosi a tal punto che ciò costituisce un vincolo per il loro utilizzo.

4. INCAPSULAMENTO

Nonostante i continui sviluppi di ricerca sui PCM e nonostante i loro molteplici vantaggi, come sopra esaminato i PCM presentano dei limiti, ad esempio una bassa conducibilità termica che può impedire al sistema di accumulo di esercitare e mantenere la temperatura desiderata nel sistema di esercizio.

Alla soluzione di questo problema interviene la tecnica d'incapsulamento: un processo che associa al materiale PCM una struttura di supporto. Solitamente viene utilizzato per impedire il contatto diretto tra PCM e ambiente: questo evita le perdite di PCM, consente la protezione dell'ambiente dalla possibile corrosività, tossicità ed infiammabilità del PCM ed evita una probabile modifica della composizione chimica dello stesso. Oltre a ciò l'incapsulamento può migliorare le performance termiche del sistema, come la conducibilità termica.

Esistono diversi tipi di incapsulamento, i più noti e utilizzati sono: macro-incapsulamento, micro-incapsulamento, nano-particelle e alette.

4.1 MICRO-INCAPSULAMENTO

Il micro-incapsulamento è un processo che consiste nel rivestire piccole particelle di PCM in un guscio inorganico o polimerico, formando delle micro-capsule. La singola micro-capsula presenterà uno o più nuclei di PCM in un guscio come viene mostrato nella seguente figura:

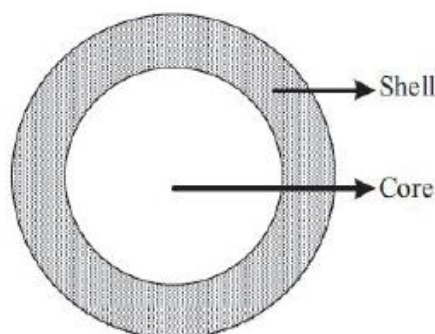


Figura 5: Micro-incapsulamento [14]

I parametri più importanti nel micro-incapsulamento sono la dimensione della micro-capsula, la sua geometria e morfologia. Le micro-capsule sono molto piccole, con una dimensione tra il micrometro e il millimetro. Per quanto riguarda invece la geometria, possiamo avere micro-capsule di forma regolare, come sferiche, tubolari o ovali, oppure di forma irregolare. Le micro-capsule possono essere di tipo mononucleare, polinucleare a matrice o layer multiplo, come viene mostrato nella seguente figura:

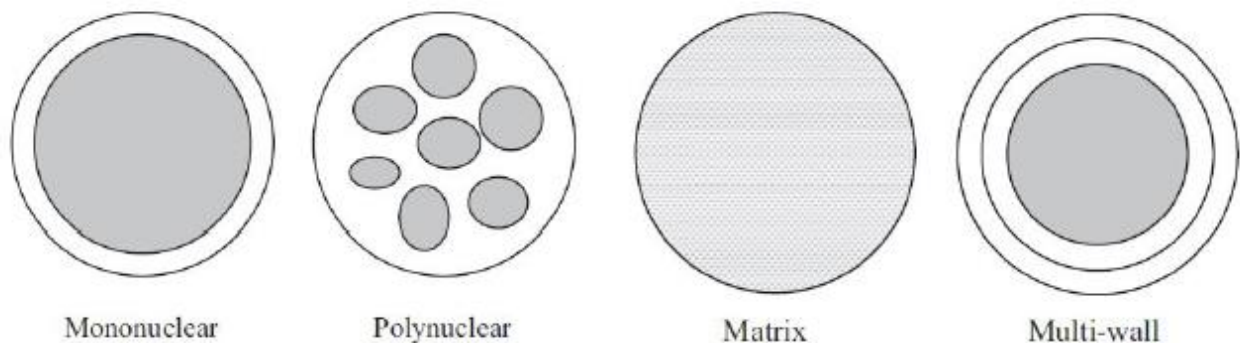


Figura 6: Morfologia delle Micro-capsule [14]

Le microcapsule mononucleari sono caratterizzate da un unico nucleo, mentre le micro-capsule polinucleari hanno più nuclei. Nel micro-incapsulamento a matrice, il materiale del nucleo è distribuito omogeneamente nel materiale nel guscio. Nel layer multiplo, il nucleo è rivestito da molteplici strati di guscio.

Per la realizzazione delle micro-capsule vengono utilizzati processi fisici o chimici: i processi chimici sono i più costosi ma offrono le proprietà e le dimensioni richieste, mentre i processi fisici sono più economici ma meno performanti.

Una volta formate le micro-capsule, queste vengono messe insieme in un contenitore sferico, cilindrico, tubolare o rettangolare, e verrà utilizzato per l'applicazione richiesta.

4.2 MACRO-INCAPSULAMENTO

Il macro-incapsulamento è un'ulteriore tecnica di incapsulamento. La struttura è la stessa del micro-incapsulamento, solo che viene accumulata una elevata quantità di materiale nel nucleo (la massa varia da grammi a chili) in un guscio con uno spessore superiore a 5 millimetri. Il principale vantaggio di questa tecnica è che non esistono delle forme e dimensioni ben definite per le capsule. Questo consente al macro-incapsulamento di essere molto adatto agli involucri edilizi, in quanto le forme della macro-capsula possono adattarsi a qualsiasi esigenza.

Tuttavia il macro-incapsulamento presenta delle performance ridotte rispetto al micro-incapsulamento, in particolare nello scambio termico durante il passaggio di fase. Di seguito si riporta una foto di un muro con lastre di PCM macro-incapsulato.



Figura 7: Esempio di macro-incapsulamento [15]

4.3 NANOPARTICELLE

Questa tecnica consiste nell'andare a inserire particelle di piccole dimensioni nei materiali PCM per migliorarne le prestazioni. Le dimensioni delle particelle vanno da 1 a 100 nanometri. Per la produzione di queste nano-particelle viene utilizzata una delle due seguenti tecniche:

- Tecnica top-down: viene utilizzato un metodo specifico per ridurre le dimensioni e la modellizzazione per le applicazioni richieste alle nano-particelle;
- Tecnica botton-up: le nano-particelle si formano mediante l'autoassemblaggio di molecole attraverso fattori come concentrazione, proprietà degli ioni, temperatura e Ph.

Tutto ciò apporta diversi benefici come una migliore conducibilità termica, una riduzione del sotto-raffreddamento e dei tempi di solidificazione/fusione. I materiali più utilizzati sono le fibre di carbonio, grafite e grafene.

4.4 ALETTE

Le alette vengono utilizzate per aumentare la superficie di scambio termico. Possono essere assiali o radiali e sono fissate a dei tubi integrati ai PCM. Questo permette di diminuire il tempo di solidificazione del PCM. La formula seguente spiega il perché:

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T \cdot \Delta t}$$

con $h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ coefficiente di scambio termico, Q (kJ) calore scambiato, A (m^2) area della superficie di scambio termico, ΔT (K) differenza di temperatura e Δt (s) intervallo di tempo;

Con l'inserimento delle alette la superficie di scambio termico aumenta. Scegliendo un buon materiale di cui sono fatte le alette, compatibile al materiale PCM, la differenza di temperatura non varia se non di poco. Dovendo rimanere invariato il coefficiente di scambio termico, ecco che l'unica variabile che si modificherà sarà il tempo di solidificazione che andrà a diminuire. Nonostante ciò il coefficiente di scambio termico tende a diminuire lo stesso, probabilmente ciò è dovuto all'interferenza della convezione naturale che fanno le alette sul PCM.

5. APPLICAZIONE DEI PCM NEGLI EDIFICI

Come detto precedentemente, oggi gli edifici consumano un quantitativo esagerato di energia prodotta soprattutto dai combustibili fossili. Il nostro Paese non è da meno, anzi l'Italia si posiziona al primo posto come Paese con il più alto consumo di energia nelle abitazioni. Questo perché la maggior parte dei suoi edifici sono stati costruiti nella seconda metà del secolo scorso, quando in quel periodo termini come "risparmio energetico" ed "efficienza energetica" non erano di tale rilevanza come ai tempi d'oggi. Solo per il riscaldamento e raffreddamento, gli edifici italiani consumano una media annua tra i 140 e i 170 kWh/m^2 .

Gli involucri edilizi permettono di mantenere il calore prodotto nella nostra abitazione per molto tempo grazie alla loro poca conduttività ed essendo molto isolanti. Questo consente di contrastare il disagio termico, raggiungendo il comfort. Negli ultimi anni la crescita delle esigenze legate alla qualità della vita e dei canoni legati al benessere sta portando ad ampliare le caratteristiche dell'involucro passando da semplice isolante a mutevole, ovvero in grado di rispondere a funzioni di regolazione climatica degli ambienti interni. Ecco che l'abitazione quindi non viene più vista come un elemento immutabile, ma diventa parte del sistema energetico in grado di interagire con l'ambiente circostante. Qui intervengono i nostri PCM, che opportunamente integrati possono contribuire a ciò. Un sistema integrato con PCM permette di avere una struttura capace di opporsi al flusso di calore proveniente dall'esterno assorbendone una parte più o meno elevata che verrà immagazzinata e poi rilasciata nel momento desiderato. Grazie a ciò, i PCM stanno guadagnando sempre più popolarità in quanto consentono il raggiungimento di un "edificio a energia quasi zero (Nzeb)". Per il loro corretto funzionamento, gli

“edifici a energia quasi zero” richiedono pochissima energia. Pertanto, il loro fabbisogno energetico può essere alimentato da fonti energetiche rinnovabili, compresa l’energia da essi stesso prodotta o nelle immediate vicinanze.

I principali sistemi che possiamo applicare negli edifici con l’utilizzo di PCM si possono distinguere in due gruppi:

- Sistemi passivi;
- Sistemi attivi.

Procediamo col esaminarli più nel dettaglio.

5.1 UTILIZZO DEI PCM NEI SISTEMI PASSIVI

L’utilizzo dei PCM nei sistemi passivi ha lo scopo di fornire il comfort termico all’interno dell’edificio senza l’impiego eccessivo di energia elettrica. Per “passivo” si intende che i processi di cambiamento di fase avvengono senza ricorrere ad attrezzature meccaniche, ma ci si riconduce al riscaldamento solare. Il PCM quindi cambia fase attraverso il riscaldamento/raffreddamento fornito dall’esterno potendo così immagazzinare e rilasciare l’energia nell’ambiente interno, mantenendo il più possibile i valori di comfort. Questo sistema permette in certi casi di sostituire in gran parte il sistema di riscaldamento/raffreddamento basato sull’energia elettrica.

Le possibili applicazioni dei PCM nei sistemi passivi sono molteplici: possiamo inserirli in muri, finestre, soffitti, pavimenti e altri componenti degli edifici.

La figura seguente ci mostra un esempio di sistema passivo nel quale uno strato di PCM è stato integrato in un muro nell’intercapedine tra la parete esterna e la parete interna.

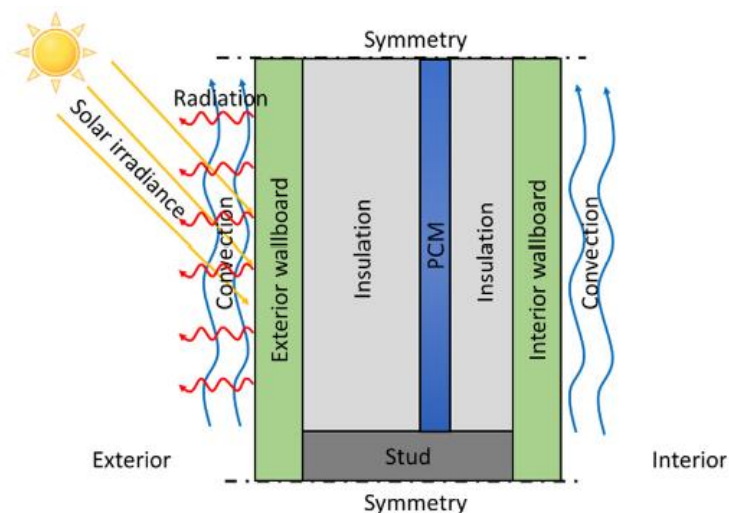


Figura 8: Sistema passivo integrato nel muro [17]

Come si vede, la parete esterna è esposta alle radiazioni solari, allo scambio convettivo con l'aria e allo scambio di radiazione con le superfici circostanti. Il calore passa dalla parete esterna all'intercapedine dove è posto il PCM e se la temperatura che arriva è abbastanza per cambiare fase, il PCM accumulerà calore e successivamente quando la temperatura scenderà di nuovo a quella di transizione di fase lo rilascerà nell'ambiente interno.

Nonostante i PCM abbiano un funzionamento molto semplice, l'edificio è un sistema termodinamico molto complesso, sottoposto a continue sollecitazioni interne ed esterne, perciò è difficile realizzare un sistema passivo utile al risparmio energetico. Inoltre l'approccio all'implementazione del sistema passivo non è lo stesso per tutti gli ambienti: la progettazione dei PCM negli edifici è diversa per gli edifici residenziali o per quelli di servizio; è diversa se il PCM è stato pensato per un raffreddamento estivo o un riscaldamento invernale.

Abbiamo visto che esistono molti tipi di applicazioni di PCM in sistemi passivi: partendo dal presupposto che tutti ricorrono alla radiazione solare diretta, in questa analisi ci concentreremo sulle principali variabili che determinano una implementazione conveniente o sconveniente del PCM all'interno di un muro.

Nella seguente analisi si presuppone una giusta selezione del tipo di PCM e una giusta incapsulazione per ciò a cui è destinato. Le variabili che analizzeremo sono:

- Struttura dell'edificio;
- Quantità di materiale PCM;
- Oscillazioni di temperatura esterna;
- Temperatura di cambiamento di fase del PCM;
- Posizione del PCM all'interno del muro.

STRUTTURA DELL'EDIFICIO

Nel mercato edilizio esistono due tipologie di edifici: edifici a struttura leggera e edifici a struttura pesante. Gli edifici leggeri hanno una struttura in acciaio o legno, mentre gli edifici pesanti hanno una struttura in muratura o cemento. Nonostante sembri sconveniente avere un edificio composto da materiali leggeri, esso presenta alcuni vantaggi come:

- più facile e veloce da costruire;
- maggior flessibilità architettonica per scopi di ristrutturazione;
- impatto minore sull'ambiente: il ridotto peso riduce l'energia per la produzione, per il trasporto e riduce la quantità di materiali di scarto;

- la maggior parte dei componenti dell'edificio possono essere facilmente separati e riciclati a fine vita.

Questo rende l'edificio leggero il migliore candidato tra i due dal punto di vista ecologico e di risparmio. Di contro però sono poco costruiti perché presentano svantaggi dal punto di vista del comfort termico. Infatti la loro bassa massa termica e inerzia termica non consentono di isolare bene l'ambiente interno da quello esterno, questo per esempio può provocare problemi di surriscaldamento in estate dovuti ai carichi interni o alla radiazione solare. L'integrazione dei PCM potrebbe aumentare la capacità di accumulo termico di questi edifici e mantenere una temperatura più costante possibile e vicina a quella di comfort.

L'integrazione dei PCM presenta vantaggi anche negli edifici pesanti: possono ridurre il loro peso prelevando materiale e sostituendolo con PCM opportunamente incapsulato, mantenendo la stessa capacità termica.

QUANTITA' DI MATERIALE PCM

La quantità di materiale PCM dipende dal periodo di insolazione, dalla quantità di radiazione solare e dalle proprietà termofisiche dell'involucro edilizio. L'energia immagazzinata dall'involucro edilizio in un ciclo giornaliero è proporzionale alla quantità di materiale PCM sciolto. D'altra parte, l'energia rilasciata è proporzionale alla quantità di materiale solidificato durante il periodo di scarica. Di conseguenza, se la quantità di materiale viene sovrastimata, potrebbe succedere che il tempo disponibile di insolazione non è abbastanza per far sciogliere tutto il PCM.

Allo stesso modo il processo di solidificazione potrebbe non completarsi in quanto il periodo di rilascio del calore potrebbe essere maggiore di quello di scarica. In un contesto simile per esempio durante l'estate il PCM non sarebbe in grado di funzionare. La quantità di PCM quindi dev'essere selezionata affinché tutta la massa sia in grado di solidificare e fondere durante un ciclo di giornata. Se ciò non è possibile, anziché considerare il ciclo giornaliero, si può considerare il ciclo annuale-

Per l'analisi delle ultime tre variabili si è presa un'indagine numerica condotta negli Stati Uniti nel 2020. Lo studio in oggetto analizza le condizioni chiave richieste per un utilizzo efficace del PCM integrato nella parete dell'edificio per ridurre gli apporti di calore in estate e le perdite di calore in inverno. Si sono prese a campione cinque città degli Stati Uniti e ci si è concentrati sulle caratteristiche termiche del muro e non dell'intero edificio. Per l'analisi delle tre variabili in questione si è preso come esempio una parete posta a sud di un edificio nella città di Baltimora. Come si evince nella seguente figura, un tipico muro americano è composto da un pannello interno in cartongesso e da un pannello esterno rivestito in legno, separati da un'intercapedine e collegati da dei montanti. Il pannello esterno è solitamente coperto o protetto da qualche tipo di rivestimento. Il PCM viene inserito nella parete come uno strato posizionato nell'intercapedine ad una certa distanza dalla parete esterna.

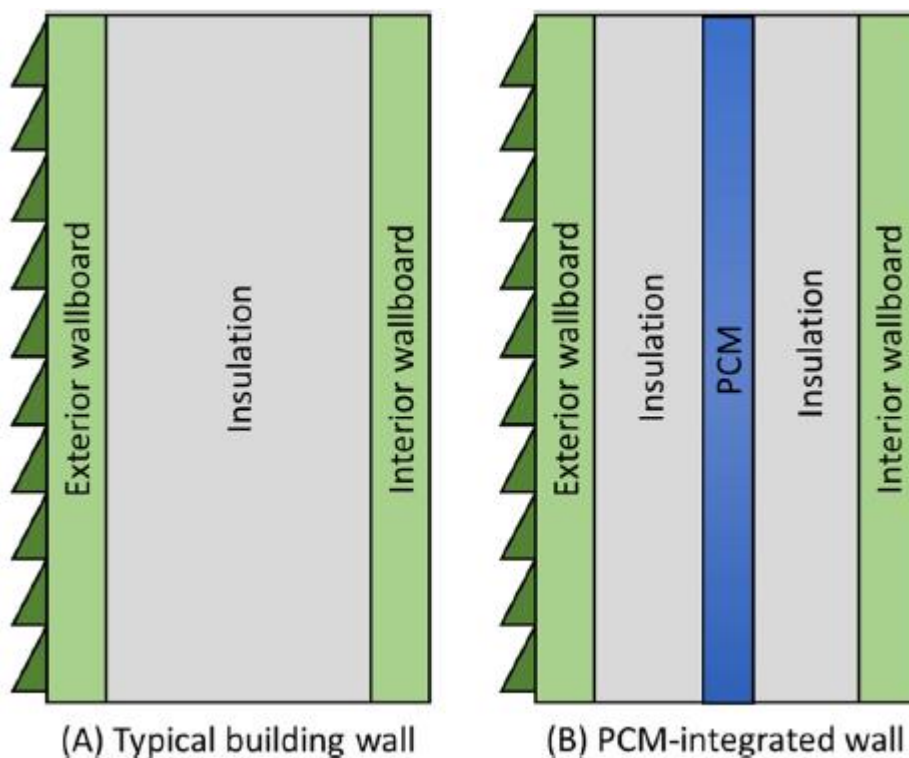


Figura 9: Struttura del muro con PCM e senza [17]

OSCILLAZIONI DI TEMPERATURA ESTERNA

La seguente figura mostra l'effetto del PCM sul flusso di calore in una parete posta a sud a Baltimora nei mesi di giugno e luglio:

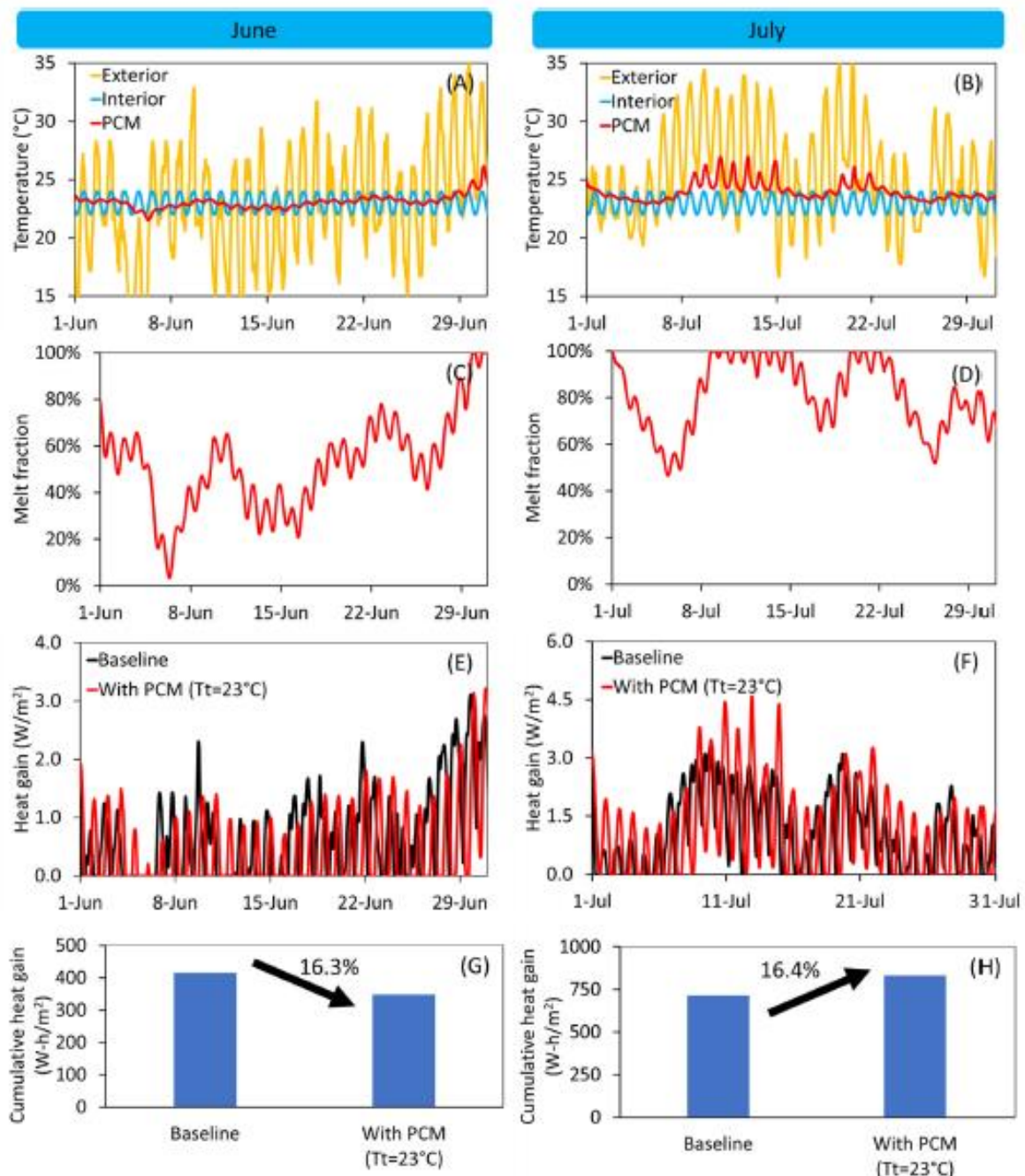


Figura 10: Effetto delle oscillazioni di temperatura nella parete nei mesi di giugno e luglio [17]

È stata scelta una temperatura di transizione del PCM di 23°C, posto nell'intercapedine ad una distanza di $\frac{3}{4}$ della stessa dalla parete esterna. La temperatura interna varia nell'intervallo 22-24°C.

I grafici (A), (C), (E) e (G) mostrano le analisi fatte a giugno, mentre i grafici (B), (D), (F) e (H) mostrano quelle di luglio.

Il grafico (A) mostra le variazioni di temperatura esterna, interna e del PCM durante il mese. Come si può notare in determinate giornate la temperatura esterna è maggiore di quella interna, mentre in altre è inferiore.

Il grafico (B) mostra invece le fluttuazioni di temperatura esterna, interna e del PCM durante il periodo di luglio: in questo caso per gran parte del mese notiamo come la temperatura esterna è sempre superiore a quella interna. Gli sbalzi di temperatura durante le giornate hanno un ruolo importante sul PCM, esse garantiscono il suo corretto funzionamento. Se la temperatura esterna rimane sempre superiore a quella interna, il PCM fonderà una volta sola e poi non avrà modo di solidificare, non potrà rilasciare la temperatura immagazzinata (di solito in estate negli orari notturni, quando la temperatura esterna è inferiore) e non potrà immagazzinare nuovamente l'energia riducendo gli apporti di calore attraverso la parete.

I grafici (C) e (D) ci danno ulteriore conferma di quanto detto mostrando la frazione di fusione del materiale PCM. Nel grafico (C) si vede come il PCM fonda e si solidifichi durante il mese di giugno; nel mese di luglio come si vede nel grafico (D) invece la frazione di fusione è sempre vicina al 100% per gran parte del mese, indicando che il PCM è sempre allo stato liquido e non può essere utilizzato.

I grafici (E) e (F) mostrano il passaggio di calore che avviene dall'esterno verso l'interno. Durante il mese di giugno si nota una diminuzione del calore entrante all'interno dell'abitazione con il PCM. Come si nota dal grafico (G) gli aumenti di calore cumulativi diminuiscono del 16,3% rispetto alla situazione di base se integriamo il PCM. Nel mese di luglio invece il PCM fa aumentare il passaggio di calore, guadagnando calore cumulativo superiore del 16,4% rispetto alla situazione di base.

Dalle seguenti osservazioni possiamo affermare che:

Le oscillazioni della temperatura devono essere favorevoli per consentire il riscaldamento/raffreddamento dell'abitazione. Durante l'estate, il PCM si solidifica quando la temperatura esterna è inferiore a quella interna, così da poter ricominciare il ciclo riducendo ulteriormente gli apporti di calore successivamente. In inverno, quando la temperatura esterna è superiore a quella interna, il PCM fonde immagazzinando il calore, che sarà destinato all'ambiente una volta che il PCM raggiungerà nuovamente la propria temperatura di transizione. Oltre a ciò è importante vedere che il PCM potrebbe essere vantaggioso durante certi periodi dell'anno ed essere svantaggioso in altri. Pertanto, la decisione di incorporare i

materiali PCM all'interno delle abitazioni dovrebbe esser fatta su base annuale e non solo per una stagione.

TEMPERATURA DI TRANSIZIONE DI FASE

Anche la temperatura di transizione del PCM influenza le sue prestazioni. La seguente figura illustra l'effetto della temperatura di transizione sul PCM. Anche questa volta la temperatura interna varia da 22°C a 24°C e il PCM si trova a $\frac{3}{4}$ dalla parete esterna.

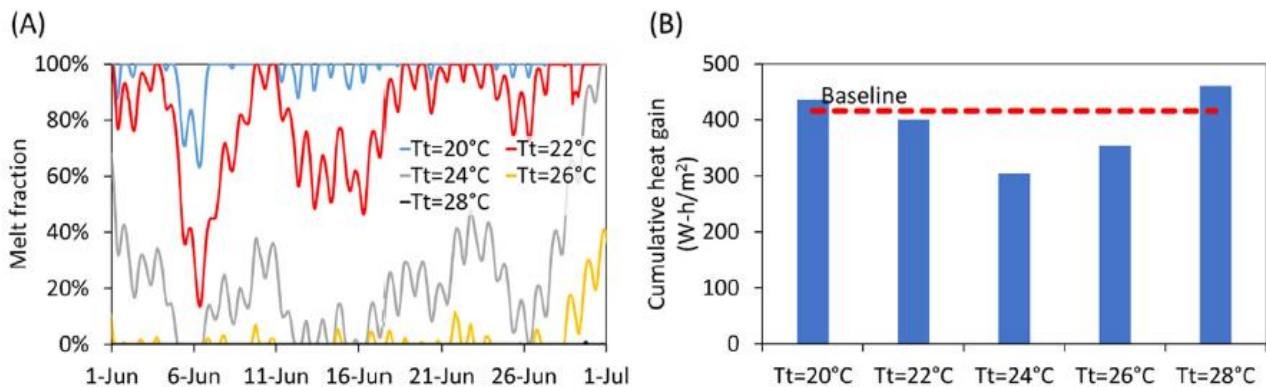


Figura 11: Confronto tra le diverse temperature di transizione del PCM [17]

Il grafico (A) mostra la frazione di fusione durante il mese di giugno, mentre il grafico (B) mostra il calore cumulativo assorbito durante lo stesso mese. Quando il PCM ha una temperatura di transizione molto bassa, per esempio 20°C, il PCM rimane per la maggior parte del mese a una frazione di fusione intorno al 100%, ovvero rimane per lo più sempre fuso e quindi non viene utilizzato, inoltre vediamo come il calore cumulativo accumulato durante il mese è superiore rispetto alla situazione di base. Allo stesso modo se scegliamo un PCM con una temperatura di transizione troppo elevata, sopra i 26°C, il materiale rimarrà per la maggior parte del tempo allo stato solido (frazione di fusione intorno allo 0%) e non potrà funzionare correttamente. Una temperatura di transizione compresa tra i 22°C e i 24°C consente la transizione di fase e riduce gli apporti di calore mensili attraverso la parete.

Possiamo concludere che:

La temperatura di transizione di fase dev'essere ottimizzata per migliorare le prestazioni del PCM. Se la temperatura di transizione è troppo elevata o troppo bassa, il PCM non cambia fase e non fornisce alcun beneficio in termini di accumulo di energia termica.

POSIZIONE DEL PCM NEL MURO

Per il posizionamento dello strato di PCM nel muro, prendiamo come riferimento la distanza dalla parete esterna. Nella seguente figura, il simbolo X indica la distanza relativa tra lo strato di PCM e la parete esterna:

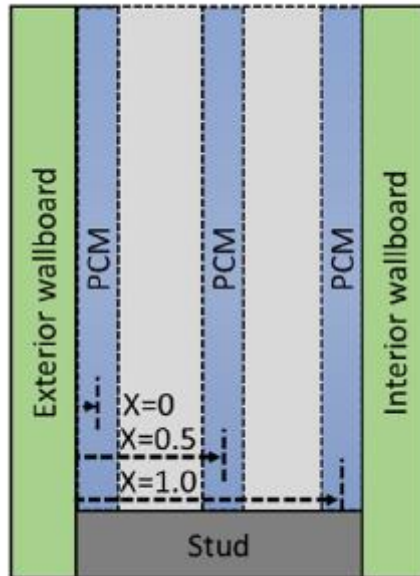


Figura 12: Raffigurazione sulle posizioni che può assumere il PCM all'interno del muro [17]

Se $X=0$ il PCM è adiacente alla parete esterna, se $X=0.5$ il PCM si trova nel mezzo, se $X=1$ il PCM si trova adiacente alla parete interna. A seconda della posizione in cui si trova il PCM, otterremo diversi risultati. Nella seguente figura andiamo a vedere come la posizione del PCM può influenzare l'intero sistema nel mese di giugno:

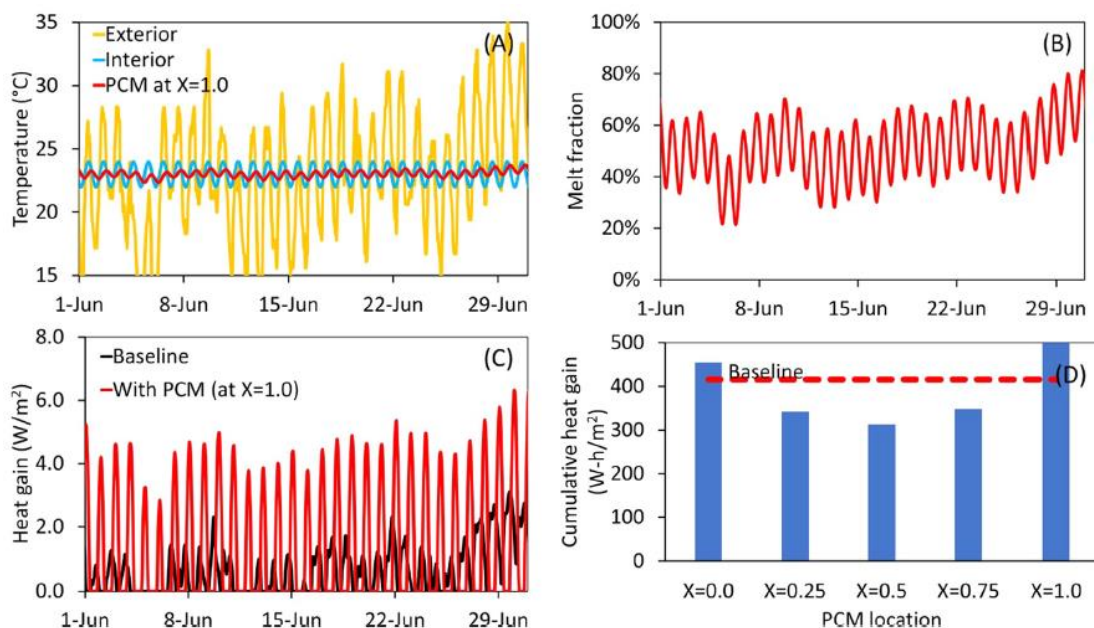


Figura 13: Effetto della posizione del PCM all'interno della parete [17]

Consideriamo il caso in cui il PCM è posto a $X=1$ (adiacente alla parete interna). Il grafico (A) mostra le diverse oscillazioni di temperatura. La temperatura esterna durante il mese passa da valori superiori a valori inferiori rispetto alla temperatura interna, questo consente al PCM di raggiungere la propria temperatura di transizione di fase e di funzionare nel corretto modo. Ciò è ribadito nel grafico (B), dove si vede che la frazione di fusione del materiale PCM è sempre compresa tra lo 0% e il 100%, indicando che il materiale cambia fase correttamente durante il mese. Nonostante ciò l'aggiunta del materiale PCM porta a guadagni di calore spropositati, come si vede nel grafico (C). Questo contraddice le precedenti osservazioni fatte. È proprio la posizione del PCM all'interno della parete a determinare l'aumento di calore. Infatti quando il PCM si trova vicino alla parete interna, il suo rapporto con l'ambiente esterno è limitato a causa della resistenza termica fornita dall'isolamento della parete, riducendo il raffreddamento interno. Se posizioniamo il PCM a $X=0$ (adiacente alla parete esterna) esso interagirà con l'esterno in modo molto efficace sfruttando le oscillazioni termiche, tuttavia si presenterà un ampio isolamento termico tra il PCM e la parete interna facendo sì che esso non contribuisca al raffreddamento ambientale. Il grafico (D) mostra i guadagni di calore cumulativi durante il mese. Come possiamo notare nelle situazioni di $X=0$ e $X=1$ abbiamo un guadagno di calore superiore rispetto alla situazione di base. Secondo il grafico la posizione più conveniente è $X=0.5$, dove il guadagno di calore è il minimo, questo perché la posizione permette di interagire efficacemente sia con l'interno che con l'esterno, riducendo al meglio gli apporti di calore.

L'analisi ci porta a dire che:

Affinché il PCM interagisca efficacemente con i diversi ambienti, immagazzini energia utilizzando il riscaldamento/raffreddamento e trasferisca l'energia immagazzinata all'interno per ridurre al minimo il guadagno/perdita di calore complessivo attraverso il muro, esiste una posizione ottimale del PCM.

Avendo visto tutte le principali variabili in gioco, procediamo col fare un'analisi su base annuale dell'inserimento di uno strato di PCM all'interno della parete. Il seguente esempio è stato preso dal medesimo studio citato prima, analizzando stavolta una parete posta a sud nella città di Phoenix. L'obiettivo principale del PCM integrato nella parete è ridurre il più possibile le perdite e i guadagni di calore su tutto l'anno al fine di mantenere il più possibile una temperatura interna di comfort termico. Come descritto precedentemente, l'analisi è stata fatta su una parete leggera composta dai medesimi componenti, si presuppone che la quantità di materiale di PCM inserito, la tipologia di PCM e l'incapsulazione siano le più adeguate.

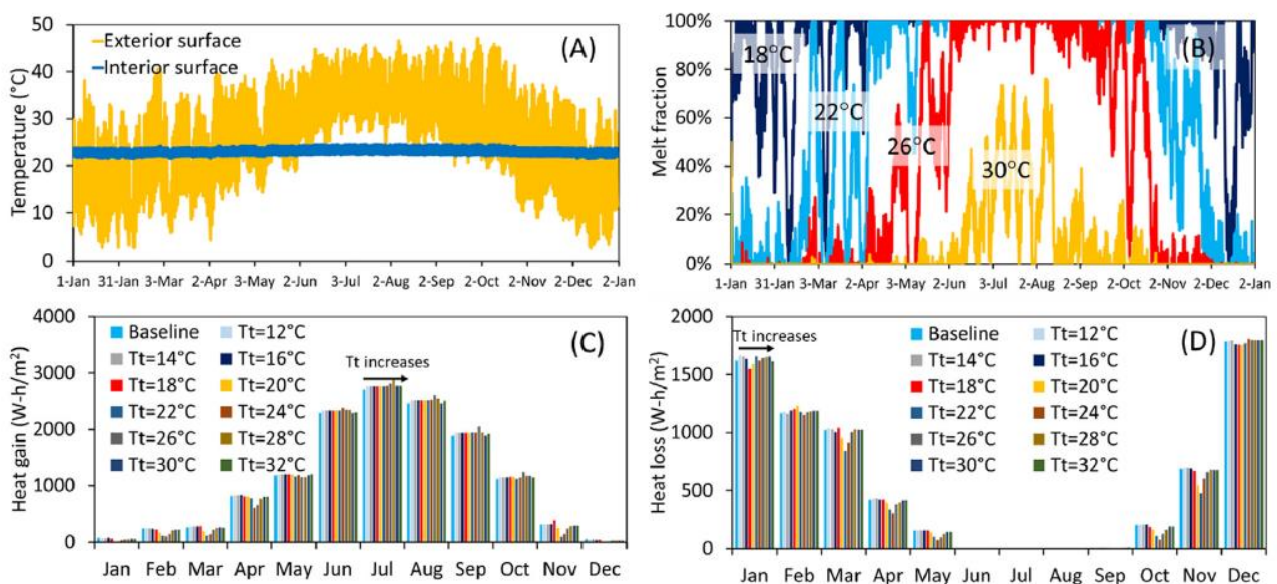


Figura 14: Analisi annuale di una parete integrata con PCM nella città di Phoenix [17]

Il grafico (A) mostra l'andamento della temperatura esterna in tutto l'anno rispetto a quella interna. Si nota già subito come la temperatura esterna è sempre superiore a quella interna nei mesi di giugno, luglio, agosto e settembre, rendendo il PCM inefficace nel ridurre gli apporti di calore. Ciò lo si può notare anche nel grafico (C), notando come la temperatura di transizione non influisce nel ridurre gli apporti di calore in questi mesi. Nel resto dell'anno invece la temperatura esterna oscilla al di sopra e al di sotto di quella interna, fornendo al PCM riscaldamento/raffreddamento necessario per ridurre i guadagni/perdite di calore. Il grafico (B) mostra invece il comportamento del PCM nell'arco dell'anno a seconda della sua temperatura di transizione. Si nota come temperature di transizione troppo basse (per esempio 14°C) o troppo alte (per esempio 32°C) non sono neanche segnate, affermando che il PCM rimane allo stato liquido (quello a 14°C) o solido (quello a 32°C) per tutto

l'arco dell'anno non portando miglioramenti al sistema. La temperatura di transizione di fase compresa tra i 22°C e i 24°C permette una transizione di fase nei periodi marzo-maggio e ottobre-novembre, fornendo guadagni e perdite di calore inferiori in questi periodi. Le temperature di transizione di fase maggiori permettono la transizione di fase nel periodo estivo, ma nonostante il cambiamento di fase ciò non porta ad alcun miglioramento. Possiamo vedere nel grafico (D) come una temperatura di transizione di fase compresa tra 18°C e 24°C permetta di ridurre le perdite di calore nella stagione di riscaldamento, tuttavia la scelta di essa è difficile da fare in quanto la migliore cambia da mese a mese. Lo studio afferma come la posizione ottimale della parete all'interno dell'edificio sia tra $X=0.25$ e $X=0.75$, in quanto permettono guadagni e perdite di calore migliori. Le posizioni alle estremità ($X=0$ e $X=1$) fanno aumentare i guadagni e perdite di calore, come detto precedentemente questo accade a causa della bassa interazione tra il PCM e l'ambiente interno o esterno.

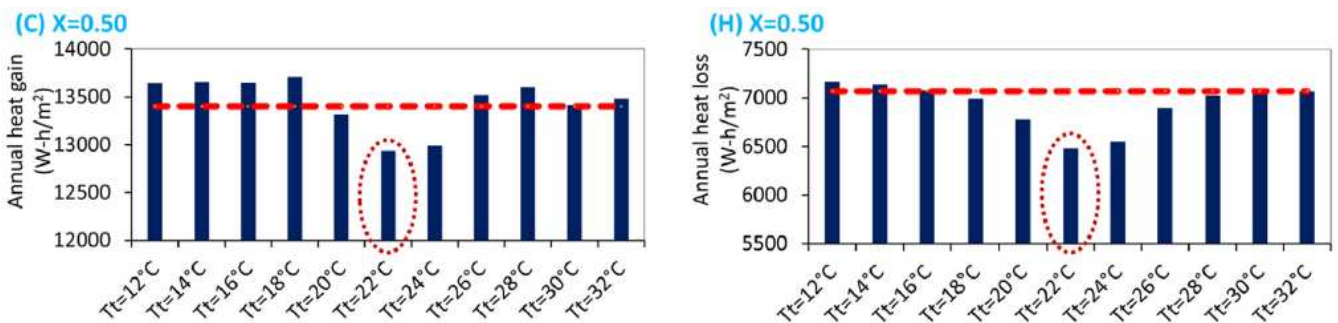


Figura 15: Valutazione sulla posizione e temperatura di transizione migliori per il PCM [17]

I due grafici (C) e (H) mostrano come in questo ambiente la temperatura di transizione di fase sia di 22°C per un PCM posto nel mezzo dell'intercapedine ($X=0.5$), in quanto in essi abbiamo perdite e guadagni minimi di calore. Il PCM situato al centro del muro riduce il guadagno di calore annuale di $710 J/m^2$ e la perdita di calore annuale di $590 J/m^2$, che rappresentano il 3.5% e l'8.3% della situazione di base senza PCM.

5.2 UTILIZZO DEI PCM NEI SISTEMI ATTIVI

Nonostante i sistemi passivi possono presentare benefici in termini di comfort termico e risparmio energetico, la loro efficacia è dettata da numerose variabili. Alcune di esse si limitano a una buona progettazione del sistema, altre invece, come le fluttuazioni di temperatura esterna, non sono prevedibili e controllabili dal nostro volere. In un contesto in cui la domanda di energia cresce di anno in anno e la richiesta di comfort termico negli edifici è sempre più esigente, dobbiamo cambiare strategia. Il sistema attivo sfrutta la capacità del PCM e la ottimizza utilizzando l'energia elettrica, con l'obiettivo di ottenere un maggior risparmio energetico e comfort termico. Il materiale a cambiamento di fase viene integrato con un componente meccanico, affinché possa funzionare al meglio ed eseguire i propri cicli di carica/scarica. Pompe di calore, scaldacqua solari, unità di trattamento dell'aria e molto altro sono i principali componenti meccanici utilizzati. Ecco che quindi i parametri da controllare si limitano esclusivamente alle specifiche di progetto, ottenendo un sistema autonomo, efficiente e costante. Inoltre può presentare molti più vantaggi rispetto ad un sistema passivo, andandone a superare i limiti.

La regolazione del punto di fusione diventa molto più facile: non essendo più condizionati dalle fluttuazioni di temperatura esterna non sarà più necessario determinare il valore migliore della temperatura di transizione di fase; con questo sistema potremmo scegliere un valore più vicino al valore di comfort o un PCM con una temperatura di transizione che si discosta un po' ma presenta una conducibilità termica migliore. Non ci si deve più preoccupare che la quantità di materiale PCM sia adeguato o no, possiamo aumentarne il contenuto incrementando così la quantità di energia che assorbe/rilascia, non essendoci più la dipendenza dal clima. I sistemi attivi vengono integrati negli edifici proprio come i sistemi passivi: tramite la tecnica di incapsulamento possiamo inserire il PCM in muri, pavimenti, finestre e altri componenti edilizi. Oltre a ciò posso inserire il PCM in componenti esterni all'edificio, definendo un sistema che permetta l'interazione tra i due. Il miglior componente su cui integrare il PCM in un sistema attivo è il soffitto dell'abitazione, essendo la struttura più a contatto con la radiazione solare durante la giornata. I sistemi attivi più comuni sfruttano ventilatori o tubazioni per trasferire l'energia all'aria o acqua che fungono da fluidi e permettono di caricare/scaricare il PCM. Esaminiamo a titolo esplicativo due specifiche casistiche.

PCM-TRATTAMENTO DELL'ARIA

Il seguente esempio mostra come si potrebbe ottimizzare il comfort termico di una stanza che funge da ufficio. Il "plenum", sistema contenente il PCM e le componenti meccaniche, sfrutta i periodi in cui l'ufficio non viene utilizzato per poter ottimizzare quelli in cui invece viene utilizzato. L'ufficio infatti non richiede energia termica tutti i giorni e durante tutto l'arco della giornata in quanto è una zona lavorativa, di conseguenza il riscaldamento non sarà sempre attivo. La seguente figura mostra il funzionamento del sistema:

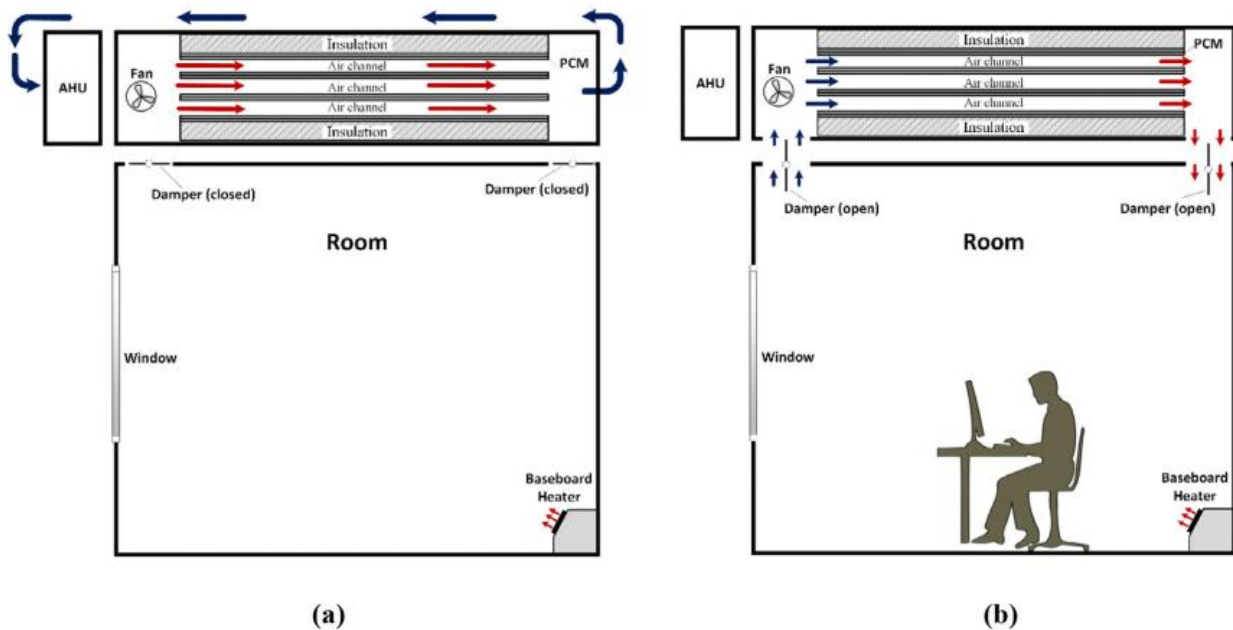


Figura 16: Analisi di un sistema di riscaldamento attivo pensato per un ufficio [21]

Il plenum è composto da un'unità di trattamento dell'aria (AHU) a batteria che riscalderà l'aria, da una ventola che la indirizzerà verso i canali d'aria e da un materiale PCM su cui arriverà l'aria e permetterà la carica/scarica. Il plenum è situato sopra il soffitto della stanza ed è collegato ad esso tramite delle botole apribili. Il sistema ha le seguenti modalità:

- Modalità di ricarica: l'ufficio non è utilizzato durante questa modalità. L'AHU e la ventola convogliano l'aria calda prodotta verso il PCM in modo da farlo diventare liquido ed assorbire energia. Il flusso d'aria passa attraverso tutto il sistema e torna all'AHU per essere nuovamente utilizzata. In questa modalità le botole sono chiuse e non c'è scambio tra plenum e la stanza.
- Modalità di scarica: l'ufficio è occupato, l'AHU è spento e le botole sono aperte permettendo lo scambio tra plenum e ambiente. L'aria fredda dell'ambiente arriverà ai canali d'aria e poi al PCM grazie alla ventola, il PCM

si raffredderà e comincerà a rilasciare l'energia precedentemente accumulata.

Se il calore fornito dal PCM non è abbastanza o i tempi affinché la stanza si riscaldi sono piuttosto lunghi, un riscaldatore a battiscopa è posizionato nella stanza. Tale configurazione permette di avere maggiore flessibilità e controllo nei cicli di carica/scarica rispetto a un PCM convenzionale integrato a parete.

INTEGRAZIONE PCM-TUBAZIONI D'ACQUA

Solitamente nei sistemi passivi viene utilizzato l'orario notturno per raffreddare il PCM. Questo consente al PCM di poter essere rigenerato e di poter funzionare correttamente il giorno successivo. Purtroppo però come abbiamo visto la maggior parte delle volte il tempo a disposizione non è abbastanza per raffreddare tutto il PCM, lasciandone una frazione liquida e rendendone quindi una parte del tutto inefficace. Il seguente esempio mostra il raffreddamento di un soffitto integrato con i PCM dalle 22.00 alle 6.00 attraverso delle tubazioni d'acqua.

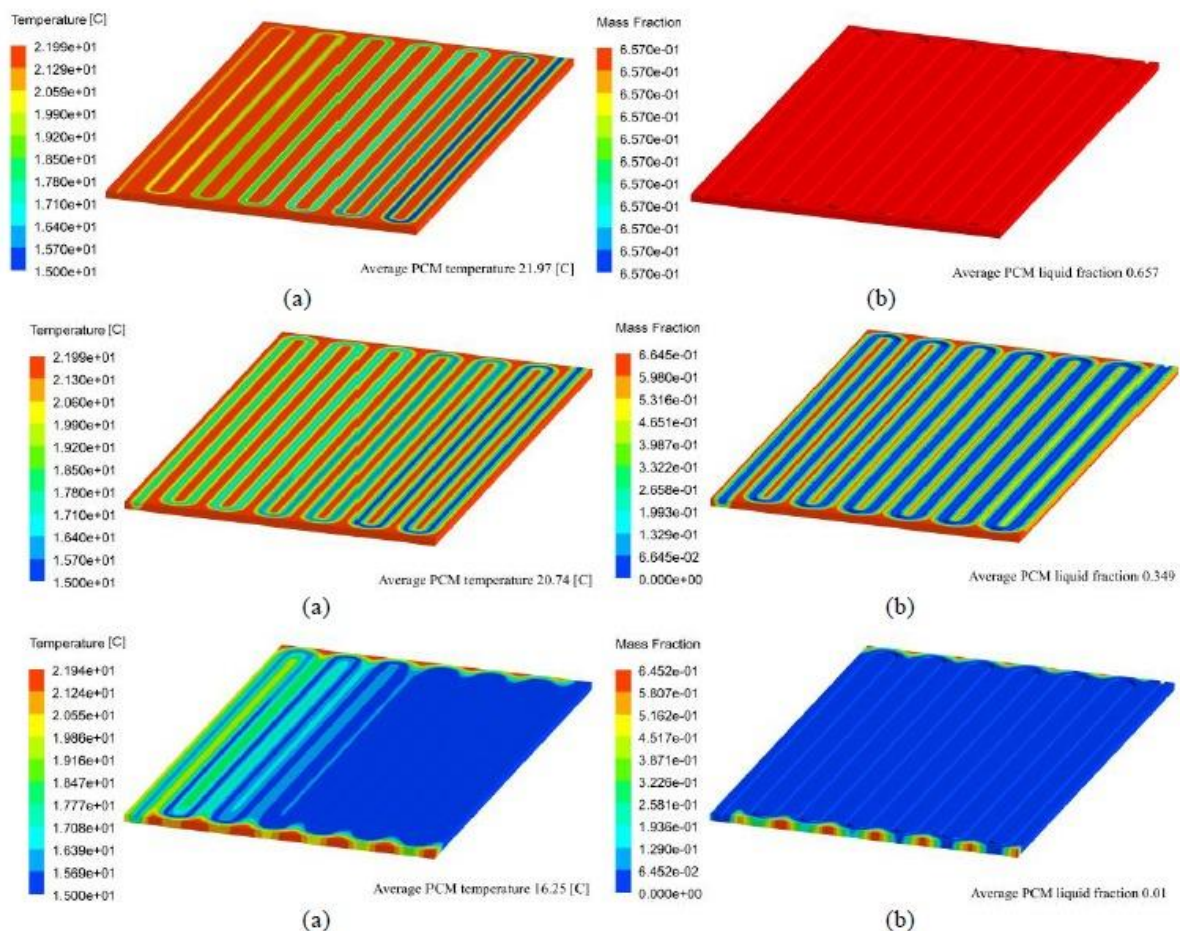


Figura 17: Analisi del raffreddamento attivo del PCM attraverso tubazioni d'acqua [19]

Le tubazioni forniscono acqua fredda sotto la temperatura di transizione del PCM e sono assemblati in una forma "a spirale". La temperatura interna da mantenere

dev'essere compresa tra i 21°C e i 28°C. Le diverse figure mostrano la temperatura e la frazione liquida del PCM a diversi orari della notte. Le figure di sinistra sono collegate a quelle di destra: quelle di sinistra mostrano la temperatura media del PCM, mentre quelle di destra mostrano la sua frazione liquida.

All'inizio del raffreddamento notturno la temperatura media del PCM è di 21,97°C con una frazione liquida del 65,7%. La seconda coppia di figure mostra i risultati ottenuti dopo 2 ore e 30 minuti. Si nota come la temperatura media del PCM non sia diminuita di tanto, tuttavia la frazione liquida è scesa al 34,9%, ovvero quasi della metà. La distribuzione della temperatura mostra che la temperatura del PCM nelle regioni vicine all'ingresso dell'acqua è quasi uguale alla temperatura dell'acqua mentre più ci allontaniamo dalle tubazioni più siamo ancora allo stato bifase.

La terza coppia di figure mostra il profilo di temperatura corrispondente a 3 ore e 46 minuti dall'inizio del raffreddamento notturno. La temperatura media del PCM è scesa a 16,25°C e la frazione liquida residua è dell'1%. Si vede come la temperatura presente all'interno dell'unità di stoccaggio è inferiore rispetto alla temperatura di solidificazione del PCM, ad eccezione dei bordi del soffitto. Si ritiene accettabile una frazione liquida dell'1%.

Il seguente sistema è quindi in grado di raffreddare il PCM nel tempo desiderato, affinché esso possa essere di nuovo operativo il giorno dopo.

5.3 CONFRONTO TRA SISTEMA PASSIVO E SISTEMA ATTIVO

Nel seguente confronto si vuole vedere quale sistema tra i due consente il maggior risparmio di energia elettrica e minor costo dell'energia termica consumata. Infatti non è detto che nonostante il sistema attivo ottimizzi le prestazioni del PCM esso non consumi più energia di quanta ne risparmi, senza contare i costi di implementazione del sistema.

Lo studio su cui faremo affidamento è stato condotto presso l'Università di Auckland in Nuova Zelanda nel 2019. Lo scopo dello studio era quello di confrontare due diverse capanne perfettamente identiche ma una dotata di un sistema passivo (PTSS) mentre l'altra di un sistema attivo (ATSS).

Andiamo ad evidenziare alcune informazioni utili al confronto:

- Nella capanna PTSS il PCM è stato integrato nelle pareti, mentre nella capanna ATSS è stato installato un accumulatore di calore aria-PCM, in grado di gestire i cicli di carica/scarica del PCM.
- I pannelli di rivestimento della capanna PTSS sono stati impregnati con PT20 PCM attraverso la tecnica di micro-incapsulamento per un totale di 25 kg. L'ATSS conta di due unità di stoccaggio identiche composte da 19 set di pannelli di PCM RT25HC macro-incapsulato, facendo pesare ogni unità 9,5 kg. Le seguenti quantità sono state scelte affinché entrambe le capanne abbiano la stessa capacità di accumulo di energia termica.
- Il comfort termico stabilito è compreso tra 22°C e 27°C in estate e 18°C e 25°C in inverno, pertanto il PCM deve avere una temperatura di transizione compresa tra i 18°C e 27°C. Se il sistema integrato nella capanna non riesce a mantenere la temperatura ideale, un dispositivo elettrico agisce ripristinandola. I dispositivi sono un riscaldatore solare (alimentato da un pannello fotovoltaico), un riscaldatore elettrico e un'unità di condizionamento dell'aria.
- All'interno delle capanne non vi è alcun dispositivo elettronico o sistema di illuminazione, di conseguenza tutti i costi e i consumi sono relativi al riscaldamento/raffreddamento.

Nella nostra analisi ci è utile sapere che il riscaldatore solare aspira l'aria presente all'interno della stanza nel suo condotto e poi la rimanda nella stanza, oppure la manda nell'ATSS e infine la restituisce all'ambiente. Il riscaldatore elettrico invece si aziona se la temperatura interna della capanna scende sotto un certo livello, prevenendo l'uscita dalla zona di comfort termico.

Dopo aver fatto tutte queste premesse, procediamo col fare un'analisi sui consumi e costi di energia per stabilire quale dei due sistemi conviene.

Il seguente grafico analizza l'andamento della temperatura all'interno delle capanne durante la giornata del 7 settembre 2019. I setpoint del riscaldatore erano compresi tra i 19°C e i 20°C.

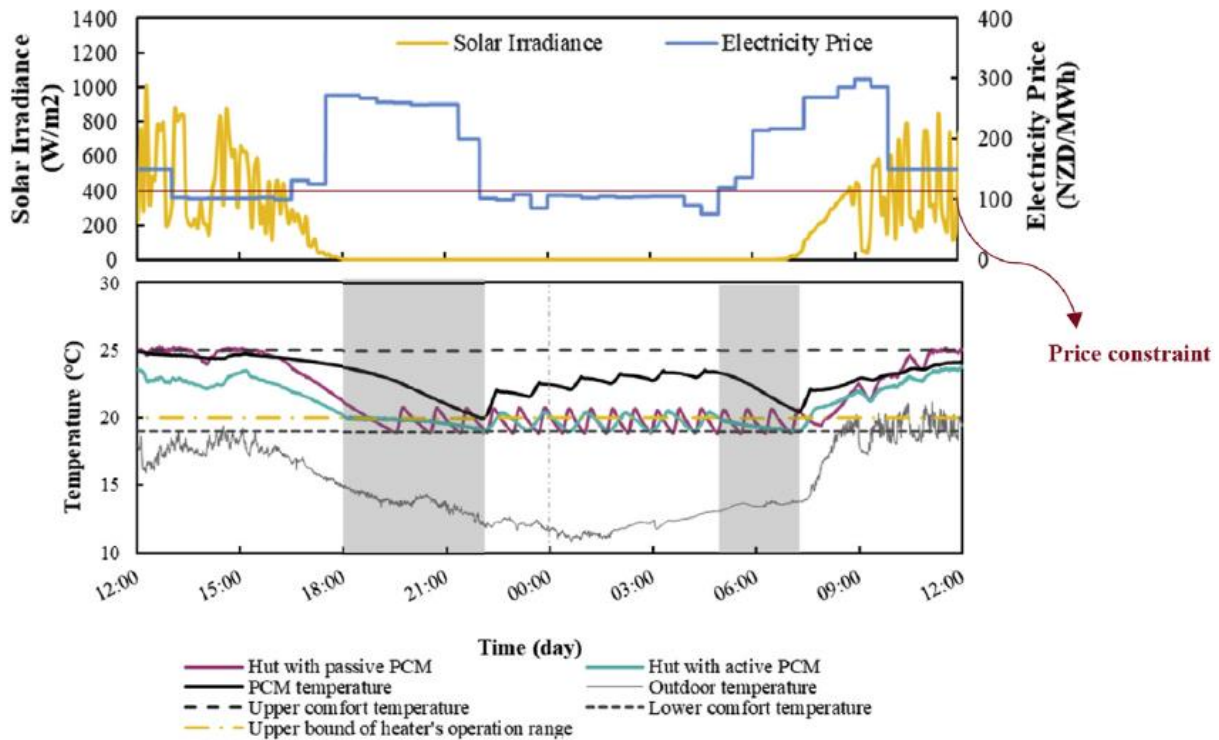


Figura 18: Analisi comparata sui costi energetici a diversi orari della giornata per un sistema passivo e attivo [20]

Il primo grafico mostra gli orari in cui è presente la radiazione solare e gli orari di maggiore e minore richiesta di energia elettrica, con conseguenza di un aumento o una diminuzione del suo costo. Il secondo grafico illustra l'andamento della temperatura nelle due capanne, sottolineando il range di comfort termico e i setpoint del riscaldatore. Fino alle 18.00 entrambe le capanne presentano un comportamento pressoché uguale. Dalle 18.00 alle 22.30 si verifica una prima differenza tra i due sistemi: la temperatura del PTSS scende repentinamente raggiungendo il limite inferiore e facendo quindi azionare il riscaldatore, che porta la temperatura a 20°C e poi si spegne, questo succede ripetute volte. Durante questo periodo invece l'ATSS non richiede il fabbisogno del riscaldatore perché la sua automazione permette di rilasciare il quantitativo di calore accumulato precedentemente. Ciò non è fatto a caso, infatti il primo grafico ci mostra come queste siano le ore di maggior picco, con un costo molto superiore alla media. Dopo le 22.30, anche nella capanna ATSS viene azionato il riscaldatore in un ciclo perpetuo. È da notare come l'ATSS ha permesso di evitare le ore di maggior picco

(maggior costo) per sfruttare invece le ore di minor picco (minor costo). La stessa situazione si presenta nella fascia oraria 5.30-7.30: il calore accumulato dall'ATSS durante le ore di non punta viene poi utilizzato per evitare di utilizzare il riscaldatore durante questa fascia oraria, in cui il costo dell'energia supera il prezzo standard. Dalla seguente analisi possiamo trarre che l'ATSS ha consentito di risparmiare sul costo dell'energia elettrica, andando a richiederne durante i periodi di minor picco attraverso un sistema automatizzato. Proiettando la stessa analisi su una scala più ampia, prendendo 5 giorni del mese di aprile, otteniamo il seguente grafico.

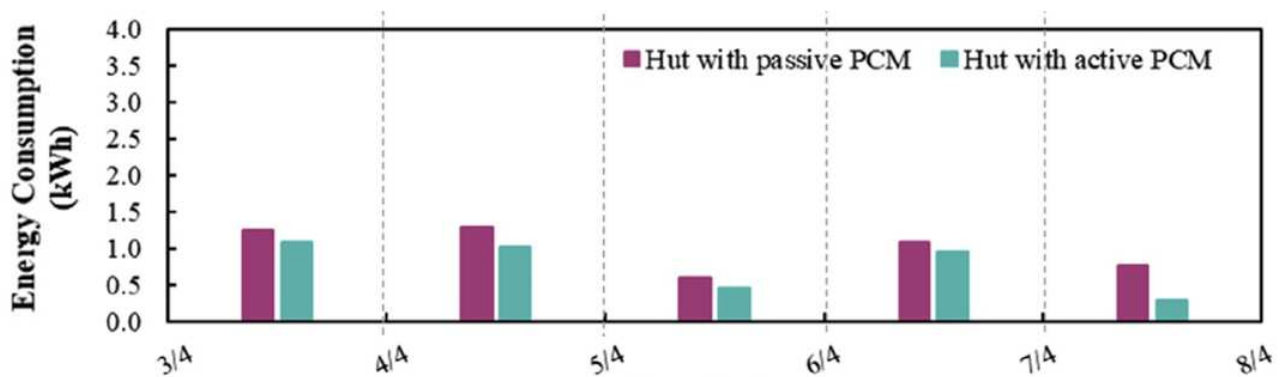


Figura 19: Analisi comparata sui consumi energetici per un sistema passivo e attivo [20]

Come si può notare, i consumi energetici prodotti dall'ATSS sono sempre inferiori a quelli prodotti dal PTSS. Prendendo come esempio la giornata del 4 aprile, l'ATSS ha mostrato un consumo energetico inferiore del 20% e una riduzione dei costi del 32%. Ciò determina in questa analisi l'ATSS come miglior sistema integrato negli edifici per un minor consumo energetico e una riduzione dei costi.

6. CONCLUSIONE

Ad oggi l'energia consumata è per la maggior parte prodotta da fonti non rinnovabili, andando ad inquinare l'ambiente ed innalzando il riscaldamento globale. Inoltre la domanda di energia cresce di anno in anno essendo legata ai canoni di vita umani che sono sempre più energivori. Gli edifici consumano una grande fetta di energia prodotta, in media il 40%, la maggior parte destinata al riscaldamento e raffreddamento. Per ottimizzare l'involucro edilizio, affinché esso non funga solo da isolante tra ambiente interno ed esterno ma diventi anche in grado di interagire con l'ambiente circostante, nella presente tesi viene proposto l'accumulo di calore latente. In particolare viene analizzato come i PCM apportino benefici e si possano effettivamente applicare all'edificio, tuttavia il loro corretto funzionamento dipende da numerose variabili.

Per prima cosa bisogna scegliere il sistema più adatto all'edificio, che permetterà di sfruttare le capacità del materiale PCM al fine di risparmiare energia. Abbiamo visto attraverso un confronto come il sistema attivo risparmi molta più energia di quello passivo, restando quest'ultimo anch'esso efficace, soprattutto se ci troviamo nelle condizioni climatiche ideali.

Successivamente bisogna scegliere il materiale PCM più adatto al sistema, in modo che esso interagisca al meglio con esso e non arrechi danni alla struttura. Come abbiamo visto non esistono PCM conosciuti in grado di possedere tutte le caratteristiche ideali, di conseguenza si cerca un materiale che si avvicina il più possibile a quelle desiderate.

Infine si è scelta la tecnica d'incapsulamento, che permette l'integrazione del PCM nel sistema ottimizzandone le prestazioni. Si cerca una tecnica compatibile col PCM e il sistema in grado di correggere alcuni difetti del PCM o di migliorarne i pregi.

Per esempio la paraffina si presenta come un buon materiale PCM tranne principalmente per la sua bassa conducibilità termica e infiammabilità. In un sistema passivo, nel quale il PCM è integrato nelle componenti strutturali, sarà necessario prevenire l'infiammabilità attraverso un micro/macro-incapsulamento. In un sistema attivo invece, nel quale il materiale PCM non è necessariamente a contatto con l'ambiente interno ma può essere posto anche fuori casa, possiamo aggiungerci delle nano-particelle per migliorarne la conducibilità termica.

In conclusione l'integrazione dei PCM negli edifici è fattibile e può apportare piccoli benefici in termini di risparmio energetico e maggior comfort termico, tuttavia attualmente la loro applicazione è molto limitata a causa delle numerose variabili di cui il sistema deve tener conto.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Hussan Jouhara, Alina Żabnieńska-Góra, Navid Khordehgah, Darem Ahmad, Tom Lipinski. *Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. International Journal of Thermofluids* 5-6 (2020) 100039.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202720300264>
2. Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici. *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability.*
<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>
3. Mohammad Irfan Lone, Ravindra Jilte. *A review on phase change materials for different applications. Materials Today: Proceedings* 46 (2021) 10980-10986.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532101110X>
4. Guruprasad Alva, Yaxue Lin, Guiyin Fang. *An overview of thermal energy storage systems. Energy* 144 (2018) 341-378.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421732056X>
5. Ismaila H. Zarma, Hamdy Hassan, Shinichi Ookawara, Mahmoud Ahmed. *Thermal Energy Storage in Phase Change Materials: -Applications, Advantages and Disadvantages.*
https://www.researchgate.net/publication/321344723_Thermal_Energy_Storage_in_Phase_Change_Materials-Applications_Advantages_and_Disadvantages
6. Luca Ferrari. *I MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE* (2016).
<https://lucaferrari.info/i-materiali-a-cambiamento-di-fase/>
7. Ravi Anant Kishore, Marcus V.A. Bianchi, Chuck Booten, Judith Vidal, Roderick Jackson. *Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings. Applied Thermal Engineering* 187 (2021) 116568.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431121000259>
8. Isaac Scaramella, *Materiali a cambiamento di fase in edilizia: principi e applicazioni* (2016).
<https://www.teknoring.com/guide/guide-edilizia-e-urbanistica/materiali-a-cambiamento-di-fase-in-edilizia-principi-e-applicazioni/>
9. Suhanyaa S. Magendran, Fahad Saleem Ahmed Khan, N.M. Mubarak, Mahesh Vaka, Rashimi Walvekar, Mohammad Khalid, E.C. Abdullah, Sabzoi Nizamuddin, Rama Rao Karri. *Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. Nano-Structures & Nano-Objects* 20 (2019) 100399.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352507X1930321X>

10. Carmine Cancro, Gabriele Ciniglio, Luigi Mongibello. *Selezione della tecnica più promettente basata sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM) per migliorare le performance di sistemi di refrigerazione commerciali di tipo residenziale. Report Ricerca di Sistema Elettrico. Dicembre 2019.*
https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_062.pdf
11. Huili Zhang, Jan Baeyens, Gustavo Cáceres, Jan Degrève, Yongqin Lv. *Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. Progress in Energy and Combustion Science 53 (2016) 1-40.*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128515300149>
12. Cristina V. Podara, Ioannis A. Kartsonakis, Costas A. Charitidis. *Towards Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Classification, Improvements and Applications in the Building Sector. Applied Science (2021).*
<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1490>
13. Redazione Tecnica. *Materiali a cambiamento di fase: cosa sono, come funzionano e quali sono i possibili impieghi in edilizia per il risparmio energetico. 17 dicembre 2015.*
<https://biblus.acca.it/materiali-cambiamento-fase-edilizia/>
14. Martina Caliano, Luigi Mongibello. *Selezione della tecnica di micro-incapsulamento del PCM e di opportuni additivi da utilizzare per incrementare le performance di accumulo termico di un serbatoio ad acqua e PCM per l'accumulo del freddo. Report Ricerca di Sistema Elettrico. Dicembre 2019.*
https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_061.pdf
15. N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos. *Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. Energy and Buildings 59 (2013) 82-103.*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813000157>
16. Luigi Coppola, Sergio Lorenzi. *Impiego dei materiali a cambiamento di fase (PCM) negli intonaci. Dipartimenti di Ingegneria e Scienza Applicate, Università di Bergamo. Dicembre 2015.*
https://www.researchgate.net/publication/286443618_L_Coppola_S_Lorenzi_Impiego_dei_materiali_a_cambiamento_di_fase_PCM_negli_intonaci

17. Ravi Anant Kishore, Marcus V.A. Bianchi, Chuck Booten, Judith Vidal, Roderick Jackson. *Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings*. *Energy & Buildings* 226 (2020) 110355.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820301900?casa_token=lzkqzjXrm9kAAAAA:BLRPMqEcfvkfxoSjvldlL3xfidPKHtOdD1Ty7uO4QYvEpziLsMR075tbM1T8EisSKES1MQvIGq
18. U. Stritih, V.V. Tyagi, R. Stropnik, H. Paksoy, F. Haghghat, M. Mastani Joybari. *Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings*. *Sustainable Cities and Society* 41 (2018) 286-295.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717310466?casa_token=usM4413duD0AAAAA:pTFVh4vWdMmVLhrOTRN_WF6A8GZ7n0lNmrE9x5QX5AcZMWlap7cPSXacK5WarlnOFLORYd4Aag
19. Sandris RUCEVSKIS, Pavel AKISHIN, Aleksandrs KORJAKINS. *Performance Evaluation of an Active PCM Thermal Energy Storage System for Space Cooling in Residential Buildings*. *Environmental and Climate Technologies*. 2019.
<https://sciendo.com/article/10.2478/rtuect-2019-0056>
20. Gohar Gholamibozanjani, Mohammed Farid. *A comparison between passive and active PCM systems applied to buildings*. *Renewable Energy* 162 (2020) 112-123.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120312386>
21. Navid Morovat, Andreas K. Athienitis, José A. Candanedo, Vasken Dermardiros. *Simulation and performance analysis of an active PCM-heat exchanger intended for building operation optimization*. *Energy & Buildings* 199 (2019) 47-61.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881930578X>
22. https://it.wikipedia.org/wiki/Conducibilit%C3%A0_termica
23. [https://www.treccani.it/enciclopedia/sottoraffreddamento_\(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/sottoraffreddamento_(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche)/)
24. <https://www.pcmproducts.net/>
25. https://www.infodata.ilsole24ore.com/2024/01/13/il-caldo-record-del-2023-raccontato-con-tre-grafici/?refresh_ce=1
26. https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente_di_scambio_termico#:~:text=In%20fisica%20e%20in%20ingegneria,un%20fluido%20e%20un%20solido.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio innanzitutto i prozii Marisa e Mauro, per essere stati così gentili da avermi sostenuto in questo percorso e per le belle chiamate fatte assieme.

Ringrazio mia mamma Silvia, che senza di lei non sarei mai arrivato dove sono ora, che ha sempre creduto in me, anche nei momenti difficili, e si è sempre fatta in quattro per aiutarmi dov'ero carente.

Ringrazio mio papà Federico, che tutto quello che conosco sul mondo lo devo a lui, mettendomi sempre alla prova mi hai insegnato a vivere.

Ringrazio mio fratello Jacopo, per i bei anni d'infanzia che mi porto appresso e che tornano in mente scatenandomi un sorriso, anche se siamo due persone diverse ti sento comunque vicino.

Ringrazio la nonna Paola, per l'amore, la gentilezza e l'ospitalità che ha per i suoi nipoti; è sempre bello fare una chiacchierata e passare il tempo con te.

Ringrazio la zia Caterina, che è sempre disposta ad aiutarci e per avere sempre un occhio di riguardo per noi.

Ringrazio Anita, che mi ha mostrato una vita più colorata, solare e felice. Da quando ti conosco ho scoperto la versione più felice di me.

Ringrazio la mia famiglia, che mi dimostra sempre tanto affetto in ogni modo, ogni momento con voi lo ritengo prezioso, vi voglio tanto bene.

Ringrazio gli amici, le persone che mi stanno attorno, chi mi esprime amore anche con un gesto semplice, siete la felicità di questo mondo.

