



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Problemi e potenzialità degli accumuli termici a cambiamento di fase
Progetto di un impianto di prova

Relatore: Ch.mo Prof. Renato Lazzarin

Correlatori: Prof. Simone Mancin

Prof. Marco Noro

Francesco Grigolato 1105505

Anno Accademico 2015-2016

INDICE

SOMMARIO	5
1 L'ACCUMULO TERMICO	7
2 MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE	11
2.1 CLASSIFICAZIONE	13
2.1.1 PCM ORGANICI	14
2.1.2 PCM INORGANICI	15
2.1.3 EUTETTICI	17
2.2 SELEZIONE DI UN PCM	17
2.3 INCAPSULAMENTO DEI PCM	18
2.4 INCREMENTO DELLE PRESTAZIONI DEI PCMs	19
3 SVILUPPO E COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE: APPARATI IN LETTERATURA	21
4 DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA	31
5 PARAMETRIZZAZIONE IMPIANTO: UTILIZZO DI TRNSYS 16	37
5.1 MODELLO ENTALPICO DI UN ACCUMULO PCM: TYPE860	38
5.2 PARAMETRIZZAZIONE TRAMITE TRNEdit	41
6 SIMULAZIONI	43
CONCLUSIONI	53
APPENDICE 1: NOMENCLATURA TYPE860	55
APPENDICE 2: PARAMETRI TRNEdit UTILIZZATI	59
BIBLIOGRAFIA	63

SOMMARIO

Il lavoro di questa tesi vuole dare una panoramica sulle tecnologie odierne che si occupano di accumulo termico, in particolare riguardante la gestione dell'acqua calda sanitaria; tramite simulazioni verrà analizzato preventivamente un esperimento che verrà successivamente condotto in laboratorio presso il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali dell'Università di Padova, in maniera da ottenere un'idea dei risultati ed evidenziare eventuali problematiche dell'apparato sperimentale.

Nel primo e nel secondo capitolo vengono presentati i materiali a cambiamento di fase, ne viene data una classificazione presentandone al contempo quelli che sono i vantaggi e gli svantaggi rispetto agli accumuli di tipo sensibile; vengono viste quindi le tecnologie utilizzate per ridurre le problematiche di utilizzo.

Nel terzo e nel quarto capitolo si entra nello specifico applicativo: attraverso un percorso che evidenzia la convenienza economica dell'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase nei serbatoi di accumulo termico per l'acqua calda sanitaria (hot tank storages), la tecnica per il miglioramento dell'efficienza di questi e la modellazione analitica per condurre una simulazione realistica, viene presentato l'esperimento oggetto di studio.

Nel quinto e nel sesto capitolo vengono infine illustrati il software di simulazione ed i risultati delle simulazioni effettuate, facendo un confronto tra il comportamento di un materiale a cambiamento di fase e il comportamento dello stesso materiale incrementato nelle prestazioni di scambio termico attraverso l'aggiunta di una schiuma di alluminio.

CAPITOLO 1

L'ACCUMULO TERMICO

L'accumulo di energia permette una serie di benefici che vanno dal risparmio ad un utilizzo più efficiente e razionale sia dell'energia stessa che delle apparecchiature ad un utilizzo ottimale delle energie rinnovabili.

Tra le varie tipologie di accumulo energetico, inerenti alle varie tipologie di energia (meccanica, chimica, elettrica, termica) il presente lavoro si focalizzerà sull'accumulo dell'energia termica.

In questo contesto, lo stoccaggio termico si pone come soluzione negli ambiti di [1]:

- Separazione temporale della produzione o del reperimento di energia ed il suo consumo nel sistema utente
- Sicurezza dei sistemi di fornitura dell'energia
- Inerzia termica e protezione termica

Nel primo caso possiamo considerare la principale applicazione alle fonti di energia rinnovabile, in particolare nell'utilizzo dell'energia solare, fonte intrinsecamente intermittente; la possibilità infatti di affiancare ad un collettore solare un accumulo permette di utilizzare l'energia raccolta durante il giorno anche nelle ore diurne. Altre applicazioni prevalenti si riscontrano negli apparecchi cogenerativi, come riserva per contrastare i picchi di carico termico.

Il secondo caso vede l'utilizzo di impianti sovradimensionati o aggiuntivi per fronteggiare il picco di domanda; l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase permette di evitare o ridurre questi supplementi.

Il terzo campo è quello di maggior interesse per la ricerca ed il mercato attualmente: permette infatti di ridurre le oscillazioni di temperatura. Per citare degli esempi ne vediamo l'utilizzo in edilizia come livellatore del carico di raffrescamento o riscaldamento dell'ambiente oppure nel settore dell'elettronica come dissipatori di calore prodotto dalle apparecchiature.

Il calore può essere stoccato in due modi: tramite accumulo sensibile o tramite accumulo latente, a seconda del contesto e del tipo di applicazioni.

Un accumulo di calore sensibile si basa su una variazione di temperatura da un valore iniziale T_i ad un valore finale T_f di un corpo sulla base della sua massa e del suo calore specifico a pressione costante senza cambiamento di fase

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p(T)dT$$

con

Q = calore accumulato [J]

m = massa del materiale [kg]

c_p = calore specifico del mezzo [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$]

T_i e T_f rispettivamente temperatura iniziale e finale del corpo [K]

dT = variazione di temperatura avvenuta [K]

A seconda dello stato della fase del materiale, l'accumulo si ha con liquidi o con solidi. Una caratteristica che appare evidente è la necessità di utilizzare come variabile decisionale significativa il calore specifico del materiale, quindi a tutta una serie di altre caratteristiche che verranno analizzate nel capitolo 2. Tipicamente viene utilizzata acqua per l'accumulo in fase liquida – materiale con ovvi pregi oltre ad avere un calore specifico elevato; pietrisco, mattoni, ciottoli ecc.. per l'accumulo in fase solida. L'energia termica viene accumulata in funzione della temperatura dei materiali, la quale aumenta in fase di carica e diminuisce in fase di scarica.

Un accumulo latente basa la sua capacità nel processo di cambiamento di fase, dove un materiale chiamato con l'acronimo PCM (Phase Change Material), per una determinata pressione, rimane ad una data temperatura che resta costante per tutto il tempo necessario al cambiamento di fase

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p(T)dT + ma_m\Delta h_m + \int_{t_m}^{t_f} mc_p(T)dT$$

Con

T_m = temperatura di fusione del PCM [K]

a_m = frazione di materiale fuso

Δh_m = calore latente di fusione del materiale per unità di massa [$J\ kg^{-1}$]

Si può facilmente vedere che in tale applicazione un materiale PCM presenta una duplice funzionalità poiché assorbirà calore in entrambi i meccanismi sopradescritti: partendo da una temperatura iniziale la sua temperatura aumenterà in maniera sensibile fino al raggiungimento della temperatura di fusione T_m (caratteristica del materiale), quindi avviene la transizione di fase con continuo assorbimento di calore fino al completamento di essa. Segue ulteriore accumulo sensibile fino alla temperatura finale. Nella Fig.1.1 si può apprezzare il diverso comportamento dei due meccanismi di accumulo. Il materiale illustrato cambia di fase alla temperatura di 27°C.

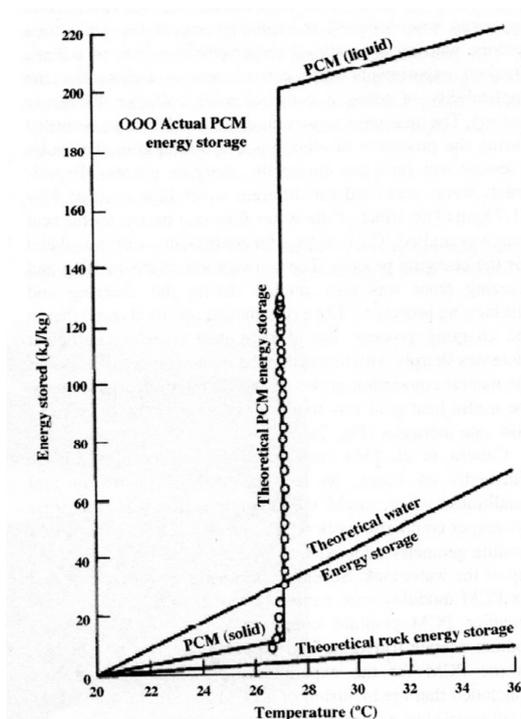


Fig.1.1 – Confronto della capacità di accumulo al crescere della temperatura tra un accumulo sensibile di acqua, uno di roccia ed uno latente con cambiamento di fase a 27 °C.

I cambiamenti di fase possibili sono

- Solido-solido: il materiale cambia la disposizione molecolare della struttura accompagnandosi a modeste variazioni di volume ed un calore latente generalmente inferiore rispetto alle altre trasformazioni. Il vantaggio dell'accumulo di questo tipo deriva da una maggior facilità di progettazione e design degli accumuli stessi.

- Solido-gas / liquido-gas: caratterizzato da notevoli quantità di energia assorbita. Il problema è che questa è accompagnata da un altrettanto notevole aumento di volume, cosa che implica complessità di sistemi e problemi di contenimento, motivo per cui non vengono considerati nel contesto di accumulo.

- Solido-liquido: modeste quantità di calore assorbito e di cambiamenti di volume.

Quest'ultimo è il meccanismo che maggiormente ha trovato impiego in ambito commerciale, permettendo un accumulo coerente con un dimensionamento tecnico-economico favorevole dal punto di vista di dimensioni, caratteristiche di sicurezza e costi .

I visibili benefici di un accumulo termico basato su un accumulo latente piuttosto che sensibile sono legati a:

- maggiore densità di energia accumulata: permette di accumulare dalle 5 alle 14 volte più energia rispetto un materiale ad accumulo sensibile a parità di volume
- variazioni di temperature prossime allo zero: assorbono e rilasciano calore ad una temperatura pressoché costante
- aumento dell'energia accumulata a parità di volume occupato e conseguente riduzione dei cicli di accensione e spegnimento delle apparecchiature di generazione del calore collegate all'accumulo.

CAPITOLO 2

MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

I materiali in cambiamento di fase PCM permettono di sfruttare l'accumulo sensibile e latente, permettono di immagazzinare energia 5-14 volte superiore rispetto ai materiali ad accumulo sensibile e permettono di assorbire/emettere calore in maniera approssimativamente isoterma nel ristretto range di temperatura del cambiamento di fase. Inoltre sono stati studiati numerosi PCM nell'arco di questi anni tantoché è possibile ricoprire un insieme molto ampio di settori ed applicazioni a cui si collegano temperature di fusione diverse (Fig.2.1). Tuttavia devono rispondere a determinate caratteristiche oltre alla temperatura di fusione prossima alla temperatura di esercizio affinché possano essere utilizzati in maniera coerente in un impianto [2, 3]

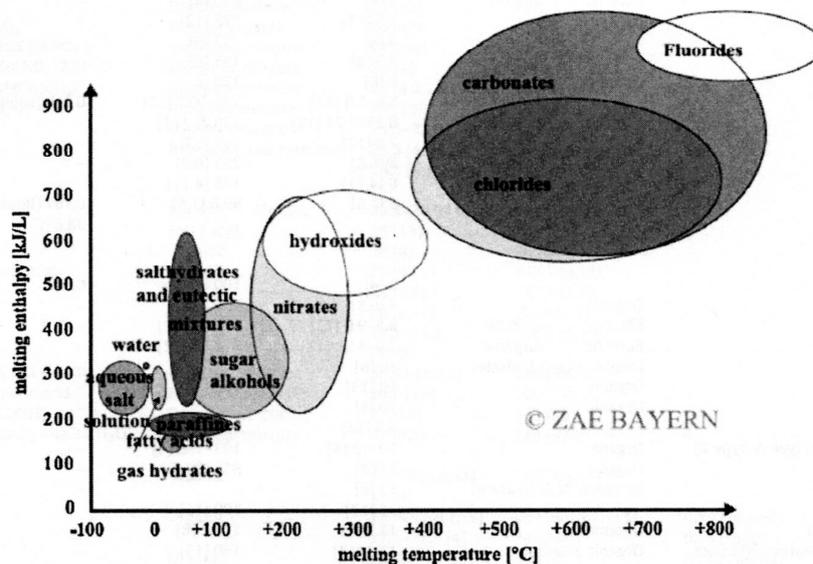


Fig.2.1 – Classi di materiali che possono essere utilizzati come PCM nei diversi campi tecnici

Proprietà termodinamiche

- Appropriata scala di temperatura di fusione
- Elevato calore latente di fusione per unità di volume

- Buona conduttività termica
- Elevato calore specifico e densità
- Basso cambiamento di volume e pressione di vapore durante il cambiamento di fase
- Temperatura di fusione adatta all'applicazione

Nella selezione di un PCM per una particolare applicazione, la temperatura operativa del riscaldamento o raffreddamento dovrebbe essere abbinata alla temperatura di transizione del materiale. Il calore latente deve essere il più elevato possibile su base volumetrica, in modo da poter minimizzare la dimensione fisica del serbatoio termico; per le stesse ragioni è auspicabile un'elevata densità. Un'elevata conducibilità termica incrementerebbe l'efficienza di carico/scarico. Bassi cambiamento di volume e pressione di vapore alla temperatura di esercizio per ridurre i problemi di contenimento.

Proprietà cinetiche

- Elevato rateo di nucleazione per prevenire sottoraffreddamento
- Elevato rateo di cristallizzazione per far coincidere la domanda di calore con l'accumulo di calore

In particolare per i sali idrati, il sottoraffreddamento interferisce negativamente con l'estrazione del calore dall'accumulo. Infatti potrebbe comportare uno scambio isoterma ad una temperatura inferiore a quella operativa prevista con conseguenti perdite di efficienza. Un'elevata velocità di cristallizzazione permette di mantenere costante la temperatura di fusione.

Proprietà chimiche

- Ciclo invertibile di fusione/solidificazione
- Chimicamente stabile
- Non deteriorabilità dopo un alto numero di cicli di cambiamento di fase
- Non corrosivo
- Non tossico, infiammabile ed esplosivo

I PCMs potrebbero degradare perdendo acqua di idratazione, decomponendosi chimicamente o per incompatibilità con il materiale dell'impianto. Non corrosivo, tossico, infiammabile o esplosivo per ragioni di sicurezza.

Proprietà economiche

- Abbondante e disponibile
- Poco costoso

Dalla letteratura è emerso che non ci sono attualmente PCM che rispondano a tutte queste caratteristiche; quelli che sono stati identificati come maggiormente idonei sono le paraffine, acidi grassi, sali idrati e le miscele eutettiche. L'orientamento odierno è quello di cercare soluzioni tecniche tramite un adeguato design per sopperire alla mancanza di qualche proprietà.

2.1 CLASSIFICAZIONE DEI PCMs

La ricerca sui PCM ha reso disponibile sul mercato una grande varietà di sostanze, che consente una scelta applicativa molto ampia di temperature di cambiamento di fase, a seconda del contesto operativo di riferimento. In particolare, nel campo del solare termico e quindi nel contesto dell'edilizia troviamo una grande quantità di materiali che si collocano nel range 0 - 100 °C.

In letteratura si trova largo studio della materia, con varie classificazioni, vantaggi, svantaggi e caratteristiche dei PCM; la classificazione maggiormente condivisa è stata sviluppata da Atul Sharma et al. [3] ed è rappresentata il Fig.2.3.

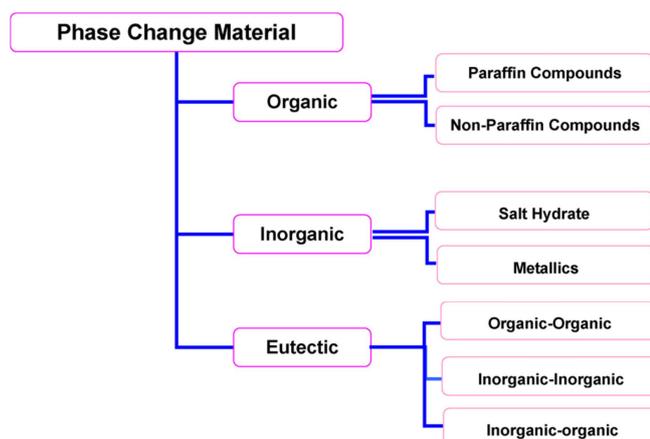


FIG.2.3 – Classificazione dei PCM

2.1.1 PCMs ORGANICI

I materiali organici si dividono in paraffine e non paraffine quali acidi grassi, alcoli ed esteri. Sono caratterizzati da una fusione congruente, ovvero il loro calore latente di fusione non degrada nel tempo. Sono autonucleanti, quindi solidificano con scarso o nullo sottoraffreddamento mantenendo di conseguenza una temperatura apprezzabilmente stabile in fase di cambiamento di fase. Sono solitamente non corrosivi.

Le paraffine sono i PCM di maggior rilievo dal punto di vista applicativo. Come si può osservare dalla Fig.2.1, esiste una grande quantità di paraffine disponibili, le cui diverse temperature di fusione coprono un vasto range di impiego. Sono costituite da una miscela di catene di n-alcani del tipo $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$. Al crescere della lunghezza delle catene di alcano presenti nella molecola, aumentano la temperatura di fusione del materiale e la quantità di calore latente assorbito/rilasciato. Il costo della paraffina pura potrebbe essere problematico; in commercio si trovano quindi delle miscele di paraffine diverse che prendono il nome di technical grade. Esse non si caratterizzano più per una temperatura di cambiamento di fase univoca, ma un campo di qualche grado. Essendo un range molto ristretto, esse rappresentano comunque un'ottima alternativa economica che non compromette le prestazioni.

Presentano tutta una serie di caratteristiche interessanti per l'utilizzo: sono chimicamente stabili, non presentano segregazione di fase né significativo sottoraffreddamento, non sono corrosivi né tossici, non degradano quindi si prestano bene in un'applicazione che prevede una moltitudine di fusioni e solidificazioni, sono commercialmente disponibili a prezzi ragionevoli. Gli aspetti negativi sono: bassa conduttività termica (dell'ordine di $0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), variazioni di volume più o meno importanti nel cambiamento di fase (il volume specifico nel cambiamento da solido a liquido può aumentare anche del 20%); alcune presentano incompatibilità con contenitori di plastica, moderata infiammabilità. Questi problemi sono tutti eliminabili/riducibili: l'utilizzo di schiume metalliche come matrici per la paraffina è possibile aumentarne sensibilmente la conduttività termica; inoltre si riducono le variazioni volumetriche [4].

Il calore di cambiamento di fase risulta essere tra 130 e 210 kJ/kg.

Nel gruppo delle non paraffine troviamo diversi materiali organici come acidi grassi, esteri, alcoli e glicoli. Nonostante la loro diversità, si possono individuare una serie di caratteristiche comuni quali: elevato calore di fusione, bassa conducibilità termica, infiammabilità, vari livelli di tossicità e instabilità alle alte temperature.

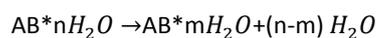
Si possono considerare in particolare gli acidi grassi, come l'acido laurico che cambia di fase attorno a 43 °C con un calore latente di fusione di 170 kJ/kg, l'acido palmitico (62 °C , 201 kJ/kg) e l'acido stearico (69 °C, 210 kJ/kg)[5]. Questi hanno caratteristiche paragonabili alle paraffine, come quantità di calore latente e assenza di sottoraffreddamento. I principali svantaggi la corrosività e il costo commerciale che è 2-2,5 volte quello delle paraffine. È stato inoltre dimostrato [6] che nella ripetibilità presentano un comportamento decrescente di calore specifico latente, per quanto possa essere più o meno marcato a seconda del tipo di acido grasso; in letteratura si è raggiunta una maggiore stabilità nella ripetibilità miscelandoli in sistemi binari, raggiungendo risultati interessanti per l'accumulo dell'energia solare [7].

2.1.2 PCMs INORGANICI

I materiali inorganici comprendono sali idrati, sali, metalli e leghe metalliche a basse di bismuto, piombo, stagno o indio.

I sali idrati, quali il solfato di sodio decaidrato (sale di Glauber), calcio cloruro esaidrato, sodio tiosolfato esaidrato, sodio acetato triidrato e idrossido di bario ottaidrato sono stati largamente investigati grazie al loro basso costo [8] .

Si possono considerare come delle leghe tra sale inorganico ed acqua che formano una struttura solida cristallina, di cui la formula generale è $AB \cdot nH_2O$. Il loro cambiamento di fase risulta in una idratazione/deidratazione del sale, che porta alla formazione di sale idrato e acqua secondo la formula



Alla temperatura di fusione i cristalli idrati si sciolgono in sale anidro e acqua oppure in un livello di sale idrato con meno molecole d'acqua e acqua.

Le principali caratteristiche positive sono legate all'alto calore latente per unità di volume, l'elevata conduttività termica (dell'ordine di $0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), ridotte variazioni di volume durante la fusione, bassa tossicità, compatibilità con materiali plastici, basso costo.

Il problema nell'impiego dei sali idrati è la fusione incongruente, ovvero la segregazione di fase: l'acqua di cristallizzazione non è sufficiente a disciogliere tutta la fase solida presente al momento della solidificazione perché, per la differenza di densità, il sale anidro precipita sul fondo del contenitore, quindi al successivo ciclo di idratazione la quantità disponibile di PCM è di fatto diminuita. Questo si traduce in una progressiva perdita di capacità di accumulo all'aumentare del numero di cicli di

cambiamento di fase, quindi il calore latente cala. Sono state messe a punto diverse soluzioni: utilizzare agenti chimici addensanti volti ad aumentare la viscosità del sale come la bentonite che però ha l'effetto negativo di ridurre velocità di nucleazione e conduttività termica; utilizzare un eccesso d'acqua, che tuttavia riduce la capacità volumetrica di accumulo; incapsulare i PCM; mantenere in agitazione meccanica la miscela.

Altro problema di questa categoria di materiali è la bassa velocità di nucleazione: il liquido passa per un sottoraffreddamento prima che intervenga la solidificazione. Rimedi possono essere l'utilizzo di additivi nucleanti come il borace, l'utilizzo di superfici scabre del contenitore o l'utilizzo di tecniche chiamate "dito freddo".

La categoria dei metalli include metalli con bassa temperatura di fusione e metalli eutettici. Questi materiali non hanno ad ora trovato applicazione a causa del loro peso. Tuttavia, in casi di rigidi vincoli sul volume occupato, sono degli ottimi candidati grazie al loro elevato calore latente per unità di volume.

Tra le caratteristiche di questi materiali troviamo basso calore latente per unità di peso, alto calore latente per unità di volume, basso calore specifico, relativamente basso vapore di pressione ed elevata conducibilità termica; in particolare, quest'ultima risulta essere la caratteristica che maggiormente li contraddistingue dagli altri PCM.

2.1.3 EUTETTICI

Un eutettico è una miscela di due o più sostanze il cui punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che lo compongono. In un materiale eutettico tutti i suoi elementi fondono e solidificano congruentemente e simultaneamente, cioè senza segregazione. Occorre precisare che in letteratura vi sono molti materiali incorrettamente classificati come eutettici quando in realtà si tratta di materiali peritettici.

2.1 SELEZIONE DI UN PCM

Per guidare la corretta selezione del PCM appropriato all'applicazioni di interesse si trovano diverse tabelle in letteratura; grazie alla diffusione dei sistemi informatici è possibile orientarsi nella scelta anche grazie a software che, grazie a sistemi di filtri basati su vincoli, permettono di restringere in campo di

ricerca in maniera comoda e supportata anche da grafici. Si segnala in particolare un database di costruzione recente, implementato da Camila Barreneche et al. [9]. Si basa su un tool del software CES

Selector sviluppato dall'università di Cambridge che permette di combinare le proprietà su oltre 300 PCM, (i quali possono essere divisi anche per settore di utilizzo) e presentare i risultati in maniera intuitiva tramite grafici "vivi" che, selezionandone un componente, forniscono informazioni di dettaglio. A titolo esemplificativo si rimanda alla Fig.2.4 sottostante.

Le proprietà raccolte in questo database sono principalmente la temperatura di fusione e il calore latente di fusione, che sono due delle più importanti proprietà da tenere in considerazione durante il processo di selezione del PCM; ovviamente si trovano anche altre proprietà, non solo termofisiche come la conduttività termica, il calore specifico, ma anche densità, costo di vendita, utilizzo di acqua ecc.. tutte incrociabili tra loro.

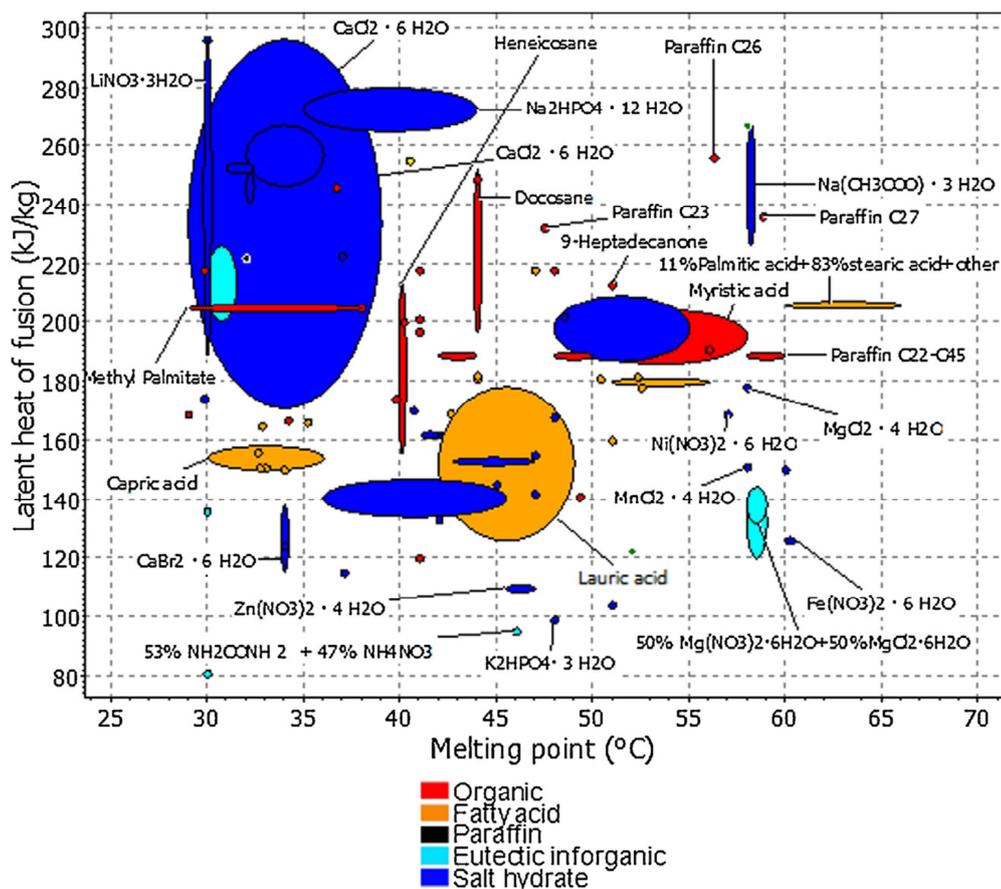


Fig.2.4 – Rappresentazione di calore latente di fusione vs temperatura di fusione dei PCM al software

2.3 INCAPSULAMENTO

Scelto il PCM si deve progettare il contenimento adeguato.

Si distingue tra micro e macro incapsulamento; il macro include l'utilizzo di contenitori a forma sferica, cilindrica, pannelli o altro, con una dimensione maggiore di 1 cm. Questi contenitori possono essere usati essi stessi come scambiatori di calore oppure essere a loro volta incapsulati in altri contenitori. Qualora la dimensione della porzione di PCM abbia un diametro inferiore ad 1mm si parla di micro-incapsulamento. Il PCM viene incorporato in capsule, tipicamente sferiche, di diversi materiali, quali film polimerici piuttosto che metallici. Le capsule possono poi venire a loro volta incorporate in matrici compatibili con il film oppure macro-incapsulate. A. Jamekhorshid et al. [10] descrivono dettagliatamente vari metodi di micro-incapsulamento con relativi vantaggi e svantaggi. Di interesse lo sviluppo recente del nano-incapsulamento (che come si può dedurre dal nome è su scala nanometrica), che presenta una maggiore stabilità del micro-incapsulamento, quali minore deformazione subita dall'applicazione di forze esterne o la drastica riduzione dei fenomeni di sottoraffreddamento.

I vantaggi di contenere il PCM in capsule sono molteplici: maggiore superficie di scambio termico per unità di volume, quindi una maggiore velocità di scambio, incremento della compatibilità del PCM con i materiali circostanti con conseguente maggiore capacità di contenimento, riduzione del volume totale esterno e maggiore stabilità di ciclo (le variazioni di volume durante il cambiamento di fase rimangono confinate nelle capsule, riduzione della separazione di fase).

2.4 INCREMENTO DELLE PRESTAZIONI DEI PCMS

Il problema che maggiormente caratterizza i PCMs è la scarsa conduttività termica. Ciò si traduce in un elevato gradiente di temperatura tra la superficie captante e l'interno del PCM, gradiente che si riduce solo quando la maggior parte del PCM è passata allo stato liquido, ma ciò significa che è passato un tempo di funzionamento del meccanismo di trasmissione del calore sufficiente per passare dalla conduzione alla convezione (che non sempre potrebbe essere gradita).

In letteratura sono stati studiati numerosi metodi per aumentare le prestazioni dei PCM, di seguito vedremo quelli di maggior rilevanza

SCHIUME METALLICHE

Le schiume metalliche sono strutture a celle aperte con una densità volumetrica molto bassa (essendo costituite fino al 95% di aria: la caratterizzazione prende nome di indice di porosità), costruite con materiali ad elevata conduttività termica quali rame, nichel, alluminio. In particolare quest'ultimo sta ricevendo grande interesse nella ricerca come ottimo compromesso tra economicità e prestazioni rispetto gli altri.

Operativamente si impregnano queste schiume nei PCM; quando la schiuma viene scaldata, trasferisce il calore dalla parete al suo interno, cedendolo ad un fluido che passa o si trova nella sua struttura in maniera molto efficiente grazie all'elevato rapporto superficie/volume. Sono inoltre facilmente maneggiabili, leggere e facilmente reperibili.

Esistono anche schiume metalliche a celle chiuse, ma la loro applicazione esula da questo argomento essendo utilizzate come isolanti termici.

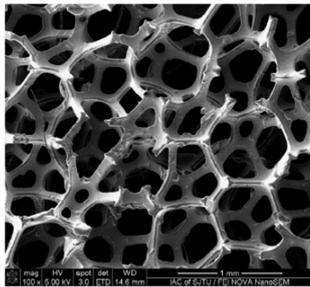


Fig.2.5 – Esempio di schiuma metallica a celle aperte

INTELAIATURE METALLICHE

Sono strutture dalle svariate geometrie, quali sferiche, cilindriche o ad alveare. nella quale si colloca il PCM che fonde e solidifica in maniera più veloce. Hanno tuttavia delle importanti limitazioni legate al volume occupato dall'impianto e dal costo del sistema stesso.



Fig.2.6 – Esempio di intelaiatura metallica

POLVERI

Vengono disperse particelle metalliche ad elevata conduttività all'interno del PCM; il punto critico è trovare la combinazione ideale tra le particelle e il PCM che assicuri al contempo un'elevata conduttività, data dalla frazione di particelle disperse, e una massa di PCM sufficiente a garantire la densità di accumulo richiesta.

TUBI ALETTATI

La superficie alettata metallica permette di incrementare sia la conduzione all'interno del PCM sia la convezione dal lato ambiente. Parametri progettuali sono numero, spessore e altezza delle alette

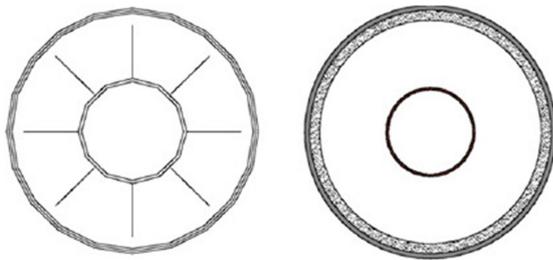


Fig.2.7 – Esempi di tubi alettati

CAPITOLO 3

SVILUPPO E COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE: APPARATI IN LETTERATURA

Prima di iniziare l'esperimento di laboratorio, è stata fatta una ricerca bibliografica volta a conoscere le sperimentazioni già effettuate in altri centri di ricerca. Di seguito vengono riportati quelli considerati più significativi, che offrono una panoramica sull'argomento partendo dai vantaggi che energeticamente si ottengono utilizzando un accumulo latente, si espone quindi un confronto tra diversi metodi di incentivazione della conduttività del materiale a cambiamento di fase, si presentano infine dei riscontri bibliografici volti ad ottenere valori di conduttività effettiva del sistema integrato PCM-schiuma metallica. Questo consentirà di implementare una modellazione del sistema PCM-schiuma nel software TRNSYS.

Un primo esperimento che si presenta è condotto da Arman Najafian, Fariborz Haghighat, Alain Moreau [11]. Questo gruppo di ricerca ha utilizzato il software TRNSYS (di cui si discuterà nel capitolo 4) per effettuare una serie di simulazioni volte a trovare la quantità ideale di PCM da inserire in un serbatoio termico per l'acqua calda sanitaria per rispondere adeguatamente all'utenza giornaliera. Inoltre ha trovato una risposta sulla posizione ideale occupata dal modulo di PCM lungo l'altezza del cilindro per incrementare al massimo il tempo del processo di scarica.

L'apparato sperimentale utilizzato è quello riportato in Fig.3.1

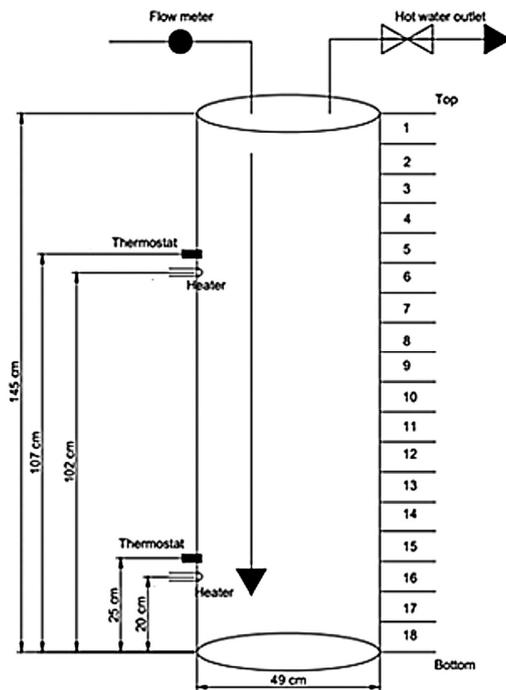


Fig.3.1 – Apparato sperimentale

Il serbatoio è provvisto di due riscaldatori elettrici di potenza 4.2 kW con rispettivi termostati che permettono di portare a regime e mantenere una temperatura desiderata. Il PCM oggetto di analisi è Sodium acetate trihydrate + 10% graphite; le caratteristiche sono:

- calore specifico allo stato liquido 2505 J/(kgK)
- calore specifico allo stato solido 1900 J/(kgK)
- calore latente di cambiamento di fase 180-200 kJ/(kg)
- densità media 1310 kg/ m³
- temperatura di cambiamento di fase 58 °C
- conduttività termica 2.3 W/(mK)

Differenze significative rispetto la paraffina sono quindi legate alla densità e alla conduttività termica; per quanto riguarda i valori entalpici possono invece essere paragonabili.

Il contenitore scelto per il PCM è alluminio.

A seguito di numerose simulazioni, il risultato ottenuto è, come prevedibile, che all'aumentare della massa del PCM aumenta il tempo per la scarica; ben più interessante il risultato presentato nella Fig.3.2

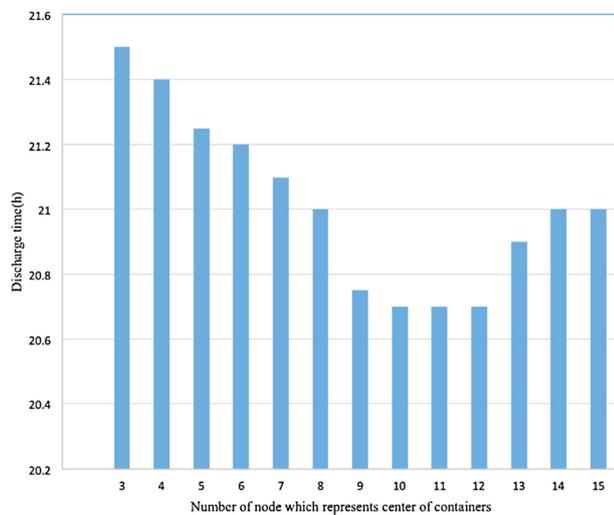


Fig.3.2 – Tempo di scarica in funzione della posizione del PCM nel cilindro

In ascisse la posizione della zona PCM: al crescere del numero del nodo si procede verso la base del cilindro; in ordinata il tempo di scarica del sistema. Installando la zona PCM al centro, il serbatoio è in grado di provvedere acqua calda per 20.7 ore, mettendolo in alto, il tempo di scarica aumenta di circa 50 minuti. In realtà questo andamento è dovuto alla vicinanza del PCM ai riscaldatori elettrici; ciò consente comunque di considerare che il calore assorbito dal materiale viene ceduto in maniera più efficiente rispetto al diretto riscaldamento dell'acqua.

Particolare importanza viene data al bilanciamento di massa del PCM e dimensione del suo contenitore, la cui massimizzazione dell'efficienza passa per una corretta ottimizzazione. Infatti (Fig. 3.3) all'aumentare della massa del PCM aumenta l'energia accumulata e il tempo di scarica, ma non in maniera efficiente poiché aumenta anche il tempo richiesto per la carica. Aumentando il diametro del contenitore aumenta il tempo di scarica ma fino ad un valore di picco, oltre il quale l'andamento si inverte. Questo comportamento è attribuibile al fatto che, a parità di massa impiegata, all'aumentare del diametro, diminuisce la superficie di scambio disponibile tra acqua e PCM (a titolo di esempio: un solo contenitore di un determinato diametro rispetto a due contenitori di diametro inferiore) ed essendo la conduttività termica di questi tipi di materiali un noto problema, esso non riesce a cedere il calore accumulato in tempi adeguati per scaldare l'acqua richiesta dall'utenza.

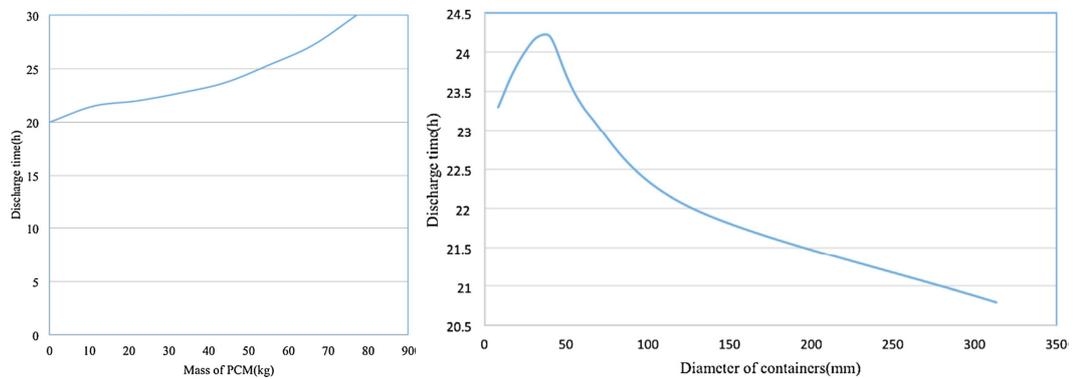


Fig. 3.3 – Tempo di scarica rispettivamente in funzione della massa di PCM e del diametro del contenitore

Attraverso l'utilizzo di algoritmi generici è possibile compiere questa ottimizzazione, con gli obiettivi di minimizzare la massa di PCM impiegato e di massimizzare il tempo di scarica.

A risultato del lavoro, si è reso evidente dal confronto di serbatoio riempito con sola acqua e serbatoio con addizione di PCM che l'energia consumata per fornire acqua calda alle utenze è complessivamente minore nel secondo caso. Infatti (Fig.3.4):

- nel serbatoio con sola acqua la somministrazione energetica avviene nei processi di carica e di scarica
- nel serbatoio con PCM la somministrazione energetica avviene solo nel processo di carica. Seppur questo richieda più energia, il vantaggio deriva dal fatto che una volta caricato non necessita più di contributi da parte dei riscaldatori elettrici.

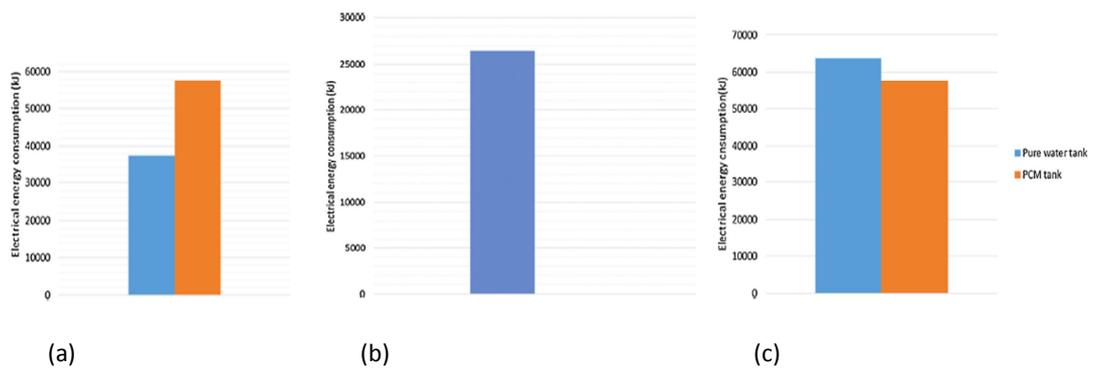


Fig.3.4 – (a) energia richiesta nel processo di carica, (b) energia richiesta durante il processo di scarica, (c) energia totale consumata, confrontando serbatoio con sola acqua (blu) e serbatoio con PCM (arancione).

Nell'esperimento che verrà condotto presso il DTG dell'Università di Padova verrà utilizzato un sistema che, come verrà descritto dettagliatamente nel paragrafo successivo, sarà volto a studiare il comportamento dell'incentivazione della conduttività termica della paraffina addizionandola ad una schiuma di alluminio. Viene ritenuto significativo quindi fornire una panoramica ed un confronto tra diverse tecniche e materiali per incentivare lo scambio termico. Tratta di questo argomento il progetto condotto da Kireeti Chintakrinda, Randy D. Weinstein, Amy S. Fleischer [12], che pone a confronto il comportamento termico di:

- paraffina pura
- paraffina con nanofibre di grafite in sospensione al 10 % sul peso
- paraffina con matrice di schiuma di carbonio
- paraffina con matrice di schiuma di alluminio

La paraffina utilizzata è una generica cera di paraffina organica con temperatura di cambiamento di fase a 54 °C. I sistemi vengono accolti in contenitori cubici di alluminio dal volume di 131 cm³, ai quali viene applicato un flusso termico costante. Ogni modulo è stato riempito di paraffina liquida, con particolare attenzione al preriscaldamento di quelli con schiuma metallica che sono stati portati alla temperatura di 40 °C onde evitare che la paraffina liquida solidifichi al contatto occludendone i pori. Sono state poi applicate sei termocoppie a diverse profondità e posizioni.

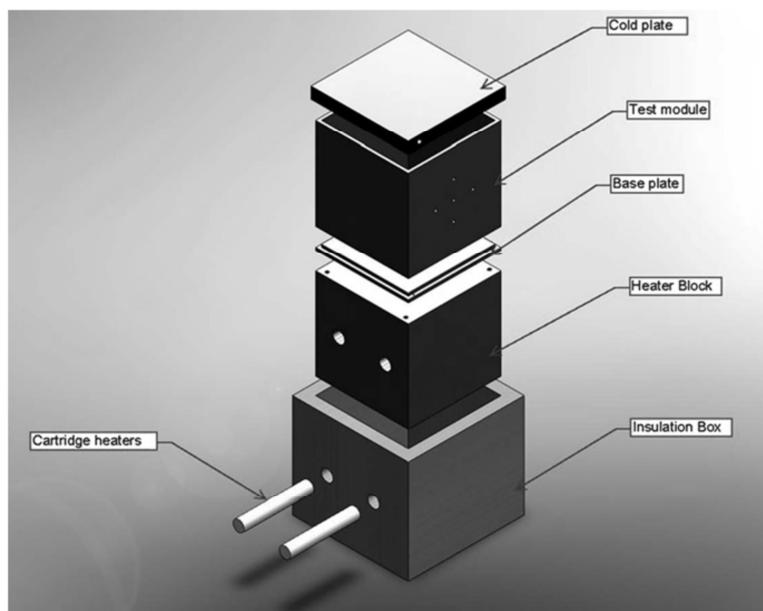


Fig.3.5 – Sistema modulo PCM

Il motivo per cui il modulo è riscaldato dal basso e raffreddato dall'alto è per aumentare la possibilità che si instaurino correnti convettive nel fuso. Questo tipo di meccanismo risulta comunque limitato nei casi delle schiume.

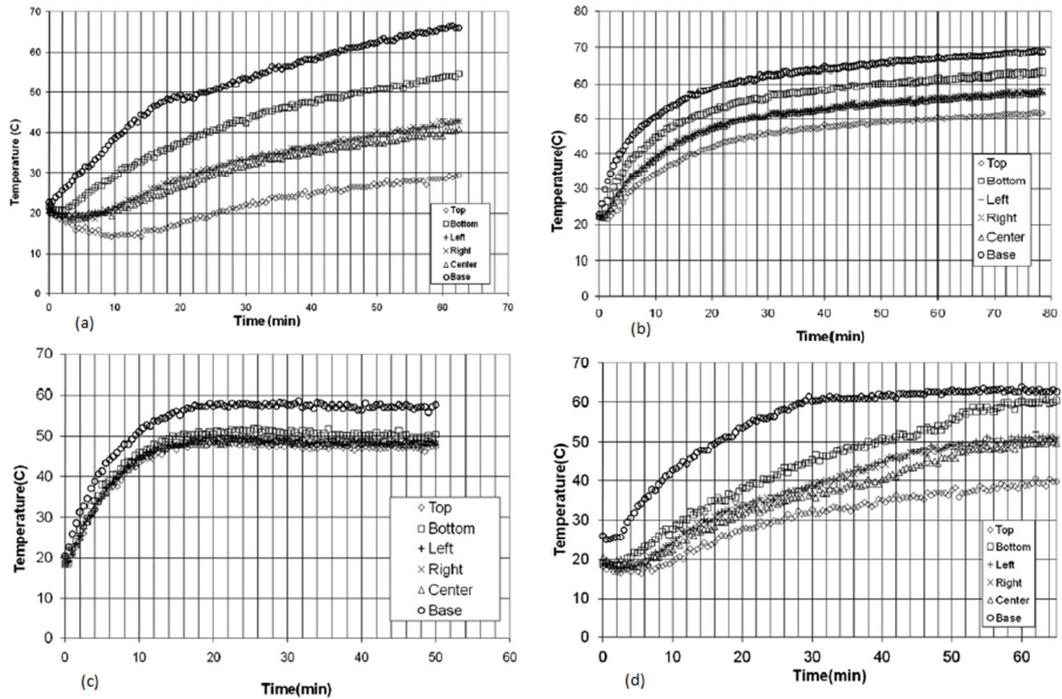


Fig.3.6 - (a) modulo con 11% nanofibre di grafite/PCM, (b) modulo PCM/schiuma di alluminio, (c) modulo PCM/schiuma di grafite, (d) paraffina pura

La Fig.3.6 rappresenta il diverso comportamento dei moduli; considerando l'andamento delle temperature della sola paraffina sottoposta all'applicazione di un flusso termico costante (d), si nota la formazione di una stratificazione termica dal basso all'alto del modulo. Poiché la temperatura di fusione del materiale è 54 °C, risulta chiaro che al tempo finale, ovvero dopo 60 minuti, il fronte di fusione non ha raggiunto nemmeno la metà del modulo. Inoltre è utile osservare che si è formato un gradiente di temperatura che arriva a 15 °C tra la zona a contatto con la fonte di calore e quella più lontana.

In (a) il comportamento delle nanoparticelle di grafene in sospensione nel PCM: la stratificazione delle temperature è in questo caso ancora più evidente; l'aumento della temperatura avviene sicuramente in maniera più lineare rispetto al caso precedente, tuttavia non viene raggiunta la temperatura di fusione. La diffusività incrementata non permette di ottenere un risultato grafico di interesse poiché il calore viene velocemente smaltito dalla piastra fredda in alto.

In (b) la risposta termica della schiuma di alluminio. Il comportamento è qualitativamente simile al caso precedente ad eccezione del sottoraffreddamento, che avviene in maniera del tutto trascurabile. La stratificazione delle temperature è minore e il tasso di riscaldamento è superiore, permettendo un andamento delle temperature molto lineare nel tempo. Alla fine del tempo di test, più della metà del modulo ha raggiunto lo stato liquido, senza che si creino correnti convettive al suo interno.

In (c) la risposta termica del sistema con schiuma di grafite. Il comportamento è differente rispetto agli altri casi, poiché non vi è praticamente alcun gradiente di temperatura all'interno del PCM. Inoltre, contrariamente agli altri casi, in un tempo molto breve di 17 minuti raggiunge una situazione di equilibrio portandosi stabilmente a 58 °C: tutto il calore fornito dalla sorgente è stato assorbito. Ciò è dovuto al fatto che il materiale in esame è caratterizzato dalla miglior conduttività termica. Questo sistema consente il miglior controllo in assoluto delle temperature e la miglior efficienza nei processi di carico e scarico del calore.

Ulteriore dettaglio da osservare è il gradiente di temperatura che intercorre tra la base e la termocoppia più bassa, chiamata bottom: permette di vedere quanto rapidamente viene trasferito il calore dalla zona di contatto al resto del sistema. La paraffina pura trasferisce molto velocemente verso la fine, poiché nel momento in cui è liquefatta subentrano fenomeni convettivi. La schiuma di grafite agisce con miglior efficienza nei fenomeni conduttivi, seguita da schiuma di alluminio.

Ultima considerazione sul fatto che la schiuma di alluminio consente di ottenere la maggior percentuale di fuso.

Questo risultato è interessante poiché nell'esperimento che si andrà a fare in laboratorio, che si incentra sull'accumulo energetico a cambiamento di fase, quindi sull'esigenza di raggiungere velocemente la fusione del PCM, l'utilizzo della schiuma di alluminio sembra essere un materiale promettente.

Un terzo esperimento di interesse è stato condotto da Zichen Wang, Zhuqian Zhang, Li Jia, Lixin Yang [13] e tratta il confronto tra tempi di carica di un modulo riempito con paraffina pura e un modulo di paraffina addizionata con una schiuma di alluminio, per diverse porosità della schiuma e per diversi flussi termici applicati. Al di là della conduzione e dei risultati dell'esperimento in sé, attenzione particolare viene data alla trattazione sul calcolo della conduttività termica del sistema integrato paraffina-schiuma di alluminio. Secondo le

$$\lambda_{max} = (1 - \varepsilon)\lambda_{Al} + \varepsilon\lambda_{PCM}$$

$$\lambda_{min} = \frac{\lambda_{Al}\lambda_{PCM}}{\varepsilon\lambda_{Al} + (1 - \varepsilon)\lambda_{PCM}}$$

Dove:

λ_{Al} , λ_{PCM} sono rispettivamente la conduttività dell'alluminio e del PCM

ε = porosità della schiuma metallica

λ_{max} = conduttività termica massima del PCM composito

λ_{min} = conduttività minima del PCM composito

È possibile ricavare

$$\lambda_e = \sqrt{\lambda_{max}^2 \cos^2 \beta + \lambda_{min}^2 \sin^2 \beta}$$

λ_e = conduttività termica effettiva del PCM composito

β = angolo tra il flusso termico e la disposizione dei materiali ricavabile da

$$\tan^2 \beta = 16(1 - \varepsilon)\varepsilon^2 \frac{\ln\left(\frac{\lambda_{Al}}{\lambda_{PCM}}\right)}{\left(\frac{\lambda_{Al}}{\lambda_{PCM}} - 1\right)^2}$$

La conduttività termica dell'alluminio è 218 W/(m K), quelle della paraffina liquida e solida nell'esperimento presentato sono rispettivamente 0.21 W/(m K) e 0.29 W/(m K). Dalle formule sopraelencate, si è ricavato che la conduttività termica effettiva teorica del sistema PCM-schiuma metallica con paraffina liquida e solida sono rispettivamente 46.04 W/(m K) e 46.12 W/(m K). È un risultato ritenuto interessante sia perché evidenzia come il sistema composito abbia una conduttività termica almeno 218 volte superiore rispetto alla paraffina pura, sia perché tali calcoli potrebbero essere

utilizzati per simulare tramite il software TRNSYS, un sistema composto di questo tipo, altrimenti non modellizzabile.

I diversi comportamenti del sistema composto e del sistema con paraffina pura si possono apprezzare nella Fig.3.7

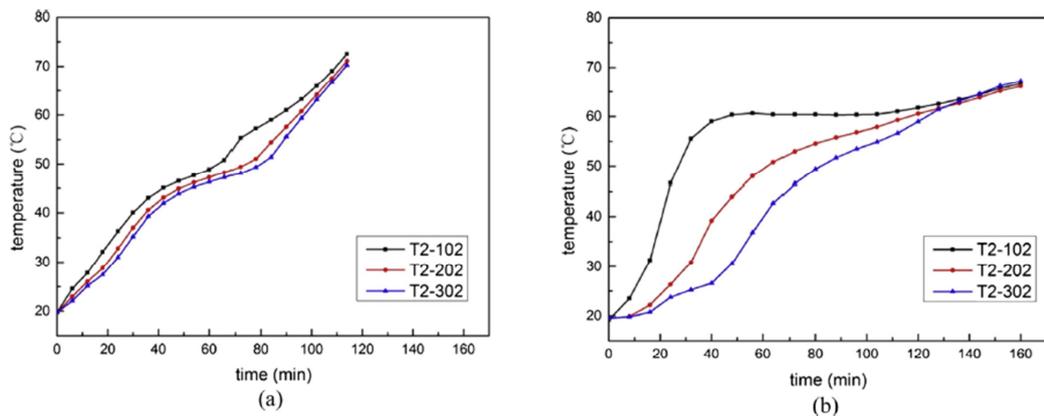


Fig.3.7 – Curve di temperatura durante il processo di accumulo termico. (a) sistema composto PCM/schiuma di alluminio. (b) paraffina pura

T2-102, T2-202, T2-302 sono tre termocoppie posizionate a distanza incrementale dal flusso termico. In (a) si può notare che, oltre a raggiungere la fusione in un tempo ridotto, la fusione stessa avviene in maniera molto più omogenea. Viceversa in (b) si nota che si crea un gradiente significativo di temperatura tra la parte più vicina al flusso termico (T2-102) e la parte più distante (T2-302) dovuta alla minore conduttività termica. Il tutto accompagnato da un tempo di accumulo del calore significativamente maggiore.

CAPITOLO 4

DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA

Obiettivo dell'esperimento è lo studio e il monitoraggio delle temperature e del comportamento nel tempo dei processi di carica e di scarica energetica del materiale a cambiamento di fase inserito in un serbatoio termico a temperatura costante e confrontando le differenze che intercorrono tra l'utilizzo di paraffina pura e paraffina addizionata con schiuma metallica.

Il punto di partenza per il dimensionamento del sistema è stato l'acquisto dei tubi contenenti la schiuma metallica. La scelta dell'alluminio come materiale per la schiuma contro i tradizionali rame e grafite utilizzati largamente in letteratura è dovuta a questioni principalmente di costo a scapito di una ridotta conduttività termica. Un costo inferiore permetterebbe infatti una maggiore applicazione commerciale a questo tipo di incentivazione di scambio termico per gli impianti di accumulo dell'energia. La schiuma è contenuta in tubi cilindrici a loro volta di alluminio ed ad essi è brasata. Il processo di brasatura sui tubi permette di ridurre la resistenza termica di contatto tra la parete del cilindro e la schiuma.

Le dimensioni e le caratteristiche della schiuma metallica nei tubi sono riportati nella Tab.1

PPI	Densità relativa
5	7.9
10	5.2, 7.3, 10.7
20	7.3
40	8.6

Tab.1 – Caratteristiche schiuma: PPI indica i pori per pollice, densità relativa indica la densità percentuale della schiuma per unità di volume

Tutti i tubi hanno le seguenti caratteristiche dimensionali:

lunghezza totale: 78.5 cm

altezza della schiuma all'interno del tubo: 60 cm

diametro interno: 48.6 mm

diametro esterno: 50.8 mm

Si è iniziato da un calcolo di massima circa la quantità di volume di acqua contenuta, quindi le dimensioni reali del sistema.

A partire dai dati dimensionali dei tubi contenenti la schiuma metallica di alluminio, si è calcolata la massa di paraffina all'interno del sistema, corrispondente mediamente a 0.973 kg. Quindi, utilizzando i valori di calore specifico e calore latente della paraffina dichiarati dal fornitore (le cui caratteristiche sono riportate nella Tab.2), si è calcolato il calore necessario da fornire al PCM per portarsi alla temperatura di 55°C.

Caratteristiche paraffina	
Calore specifico stato solido	3000 J/(kg K)
Calore specifico stato liquido	2300 J/(kg K)
Temperatura di cambiamento di fase	45 °C
Densità	800 kg/ m ³

Tab.2

Inizialmente si è ipotizzato un sistema chiuso, dove lo scambio di calore avveniva senza deflusso di acqua dal serbatoio. Per questo motivo si è moltiplicato il calore da fornire per un coefficiente di sicurezza di 6, per garantire una adeguata inerzia termica.

Imponendo l'equilibrio termodinamico con l'acqua che deve cedere calore, si è dunque ricavato il volume necessario, pari a 662,95 litri. Questo comportava un diametro del serbatoio di 1,14 metri, in accordo con l'altezza massima dell'acqua nel serbatoio vincolata dall'altezza dei cilindri contenenti la schiuma metallica. Un serbatoio di queste dimensioni comportava una duplice problematicità: una legata meramente allo spazio occupato nel laboratorio e una legata al problema delle dispersioni termiche, il cui calcolo al variare dello spessore di isolante è riportato in Tab.2; sono infatti ritenute eccessive ai fini del controllo della stabilità della temperatura del sistema. Per il calcolo è stato considerato un comune isolante termico con conduttività di 0.05 W/(m K).

Spessore isolante (m)	Resistenza termica (m ² K/W)	Dispersioni termiche (W/m ²)	Dispersioni termiche (W)
0.01	0.345	101.3	496.8
0.02	0.545	64.2	314.7

0.03	0.745	46.9	230.2
0.04	0.945	37.0	181.5
0.05	1.145	30.6	149.8
0.06	1.345	26.0	127.6
0.07	1.545	22.6	111.1
0.08	1.745	20.1	98.3
0.09	1.945	18	88.2
0.1	2.145	16.3	80

Tab.3 – Dettaglio delle dispersioni termiche

Si è dunque preferito ripensare il progetto come un circuito, con i seguenti elementi:

serbatoio di acciaio inox di altezza 75 cm, diametro 30 cm e spessore 1 mm con un'entrata a 60 cm di altezza dalla base ed un'uscita posizionata a 2 cm dalla base. È previsto un coperchio che appoggia su degli spessori con la duplice funzione di limitare le perdite termiche e contenere l'evaporazione dell'acqua. È inoltre previsto di un alloggiamento per accogliere i cilindri, in pratica due manichette visibili in basso della Fig.4.1.

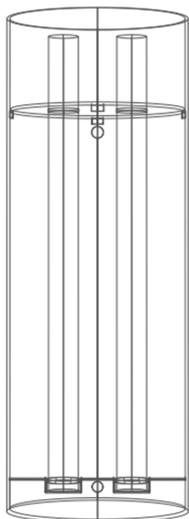


Fig.4.1 – dettaglio del progetto del serbatoio

un circolatore: una pompa che permette la ricircolazione dell'acqua nel circuito

un riscaldatore elettrico: permette di aumentare la temperatura dell'acqua in ingresso al serbatoio qualora sia necessario

un controllore PID: sistema di controllo che, monitorando la temperatura del sistema, consente di regolare attivamente la potenza del riscaldatore

una valvola di mandata e tre valvole di non ritorno, la prima consente di regolare la portata, le altre per un corretto funzionamento del circuito

In Fig. 4.2 si può vedere il circuito reale come è stato pensato

In Fig. 4.3 si può vedere il circuito come è stato modellizzato in simulazione

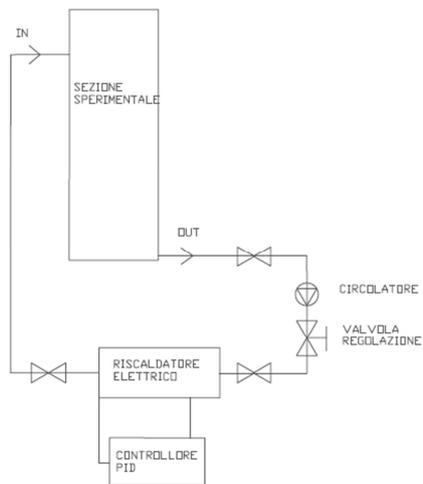


Fig.4.2

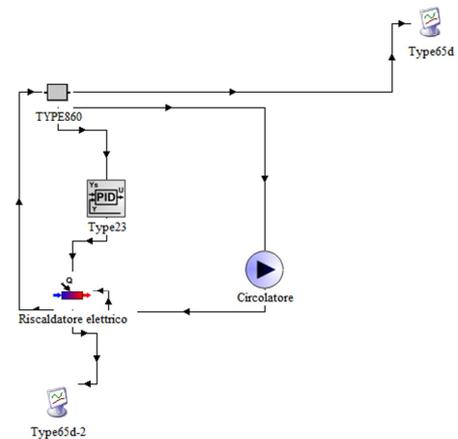


Fig.4.3

L'esperimento prevede ora di utilizzare un serbatoio di 53 litri del diametro di 30 cm. La temperatura del sistema verrà mantenuta a 55 °C e per ottenere questo è previsto un circolatore che preleva l'acqua raffreddata dalla parte bassa del serbatoio e la indirizza ad un riscaldatore elettrico. Attraverso un controllore PID, viene monitorata la temperatura dell'acqua del serbatoio e qualora vi siano variazioni dalla temperatura predefinita, manda un segnale al riscaldatore elettrico che modula la potenza delle resistenze per bilanciare il calore dell'acqua di mandata, al fine di mantenere costante la temperatura del

sistema, in continua riduzione sia perché il calore viene ceduto ai cilindri di paraffina sia perché viene dissipato nell'ambiente.

Per rendere concettualmente visibile l'esperimento viene fornita di seguito una scaletta delle operazioni che saranno condotte. Come "punto zero" occorre impregnare la schiuma di alluminio di paraffina. Per questa operazione la letteratura suggerisce come miglior metodo quello di impregnare sotto vuoto: facendo un buco nel fondo del cilindro e collegando l'estremo opposto ad una pompa per vuoto, nel momento in cui si aziona la pompa, la paraffina precedentemente liquefatta e surriscaldata viene risucchiata all'interno, riducendo al minimo le inclusioni d'aria che diminuirebbero l'efficienza del sistema. È consigliabile preriscaldare anche la schiuma prima di questo procedimento, perché in questo modo si evita che la paraffina solidifichi a contatto col reticolo metallico inglobando aria nei pori.

Una volta preparati i moduli, si procede con:

- i. inserimento delle termocoppie
- ii. calibrazione delle termocoppie
- iii. stabilizzazione della temperatura dell'accumulo a 55 °C mediante sistema di riscaldamento e ricircolo dell'acqua
- iv. inserimento di due tubi contenenti la paraffina nel serbatoio, uno contenente la schiuma metallica e la paraffina, l'altro con sola paraffina pura
- v. monitoraggio delle temperature nella fase di carica
- vi. raggiungimento della fusione completa della paraffina. Lo stadio non è riscontrabile visivamente; si considera allo stato liquido la paraffina che ha raggiunto la temperatura di 47 °C
- vii. esclusione del sistema di riscaldamento
- viii. monitoraggio della temperatura in fase di scarica
- ix. rimozione dei cilindri di pcm
- x. inserimento di nuovi tubi e ripetizione del processo al variare della porosità della schiuma metallica

CAPITOLO 5

PARAMETRIZZAZIONE IMPIANTO : UTILIZZO DI TRNSYS16

Per prevedere il funzionamento dell'apparato sperimentale sopra descritto, si sono effettuate una serie di simulazioni al fine di anticipare i risultati che si otterranno empiricamente attraverso la conduzione dell'esperimento. È stato possibile in questo modo avere un'idea dei vantaggi e delle problematiche di un impianto di questo genere, comparando l'accumulo latente con PCM puro ed uno latente con caratteristiche di conduttività del PCM incrementate mediante utilizzo di schiuma metallica. Si sono ottenuti in questo modo i profili di temperature e potenze scambiate all'interno del serbatoio.

Le simulazioni sono state effettuate con l'ausilio di TRNSYS 16.0, in particolare utilizzando una sua type denominata TYPE860, un'implementazione sviluppata dalla Graz University of Technology (Austria) che deriva da una funzione standard del software, la TYPE60, ma che in aggiunta simula il comportamento di un accumulo a cambiamento di fase. Data l'elevata complessità del modello, di seguito verrà fornita una descrizione dettagliata del suo funzionamento e della sua utilizzazione.

Si vuole qui anticipare che, data l'eccessiva rigidità del modello stesso, sono state fatte diverse ipotesi semplificative che hanno portato la simulazione a discostarsi dalla realtà; è stato comunque raggiunto il miglior compromesso possibile.

Tali differenze sono le seguenti:

- non è stato possibile distinguere la temperatura iniziale del serbatoio da quella della paraffina: dove il test di laboratorio prevedeva che, al tempo zero, la temperatura dell'acqua del serbatoio fosse di 50 °C e la temperatura della paraffina nei cilindri immersi nell'acqua fosse a 20 °C (temperatura ambiente), nella TYPE860 entrambe le componenti sono ad eguale temperatura.
- non è stato possibile modellizzare la schiuma di alluminio tramite parametri nativi del software; si è quindi utilizzata l'approssimazione matematica descritta nel capitolo 3. La letteratura ha dimostrato la validità di suddette formulazioni.

5.1 MODELLO ENTALPICO DI UN ACCUMULO PCM: TYPE860

La TYPE860 è stata sviluppata da un gruppo di ricercatori della Graz University of Technology (Austria) per poter simulare il trasferimento di calore all'interno dei materiali a cambiamento di fase inseriti in un accumulatore ad acqua. È sviluppata a partire dalla TYPE60 per accumuli stratificati di tipo sensibile.

Il modello entalpico sulla quale si basa è il seguente (Fig.5.1)

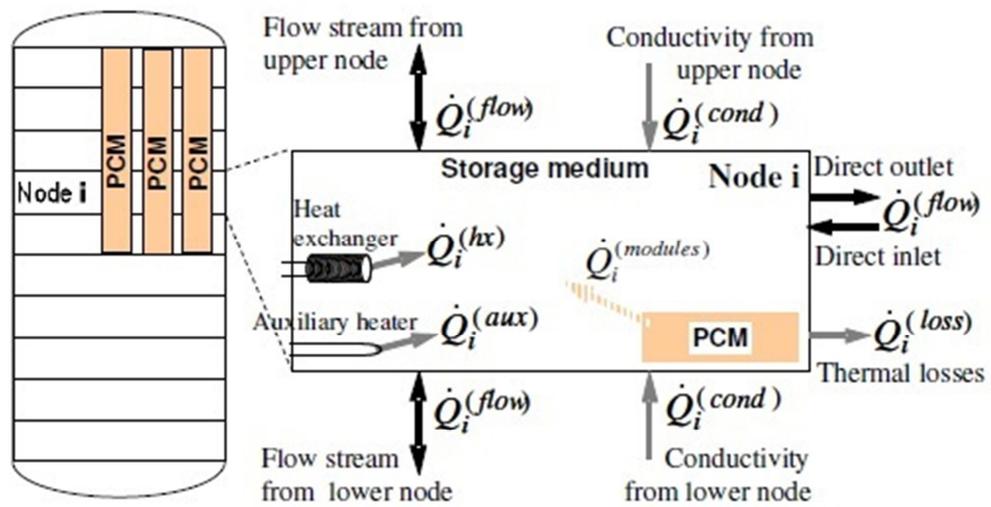


Fig.5.1 – Modello entalpico TYPE860

Il serbatoio termico dimensionato è diviso in nodi (derivatives); per ogni nodo avvengono gli scambi energetici secondo lo schema della Fig.5.1.

Di seguito viene data una panoramica sui punti più problematici della parametrizzazione della type, in modo da lasciare un feedback qualora un utente nel futuro necessiti di utilizzarla. In ogni caso, per la modifica del numero delle variabili, che siano parametri, input o derivatives, si rimanda al paragrafo successivo sull'utilizzo del software TRNEdit.

- Derivatives: il loro numero rappresenta il numero di nodi con cui è suddiviso il serbatoio; il valore assegnato rappresenta la temperatura iniziale della simulazione. Una problematicità delle

derivatives è che, come si può vedere nella Fig.5.1, tale temperatura è comune sia al nodo del PCM sia al nodo dell'acqua.

- Parameters: sono i valori di parametrizzazione del serbatoio e del PCM; fino al parametro 32 i parametri coincidono con quelli della TYPE60, per i quali si rimanda alla guida specifica; il parametro 33 è quello che caratterizza la TYPE860: va ad impostare il numero di zone PCM, che dividono il serbatoio lungo la verticale. Possono essere al massimo 10. A titolo esemplificativo se vengono impostate 2 zone PCM, va inteso che il serbatoio termico si divide in due zone lungo la verticale, ognuna della quale va impostata con 40 parametri.

La parametrizzazione della zona PCM è avvenuta nel seguente modo:

1) cilindro di paraffina del diametro di 50,8 mm e altezza 60cm impostabile agendo sui parametri nodesup(i) e nodeinf(i), rispettivamente il nodo in corrispondenza del quale inizia il modulo PCM e il nodo in corrispondenza del quale questo finisce.

2) Per definire i parametri PCT1 e HH, è stato necessario ricavare la curva entalpica caratteristica della paraffina, calcolata a partire dai dati di calore specifico allo stato solido, calore specifico allo stato liquido, calore latente e temperatura di fusione (i cui valori sono stati elencati nel capitolo 4). È stato ipotizzato un intervallo di temperatura di cambiamento di fase di tre gradi, approssimazione realistica dato che, come già descritto nel paragrafo 2.1.1, non si ha mai il cambiamento di fase in corrispondenza di un singolo grado per via delle miscele di paraffine diverse (paraffine technical grade).

Il risultato è visibile in Fig.7 dove:

- la pendenza del primo tratto rappresenta il calore specifico del materiale allo stato solido
- la pendenza del secondo tratto è stata ricavata per interpolazione lineare a partire dal calore latente di fusione e dal range di temperatura all'interno del quale il materiale cambia di fase
- la pendenza del terzo tratto rappresenta il calore specifico del materiale allo stato liquido

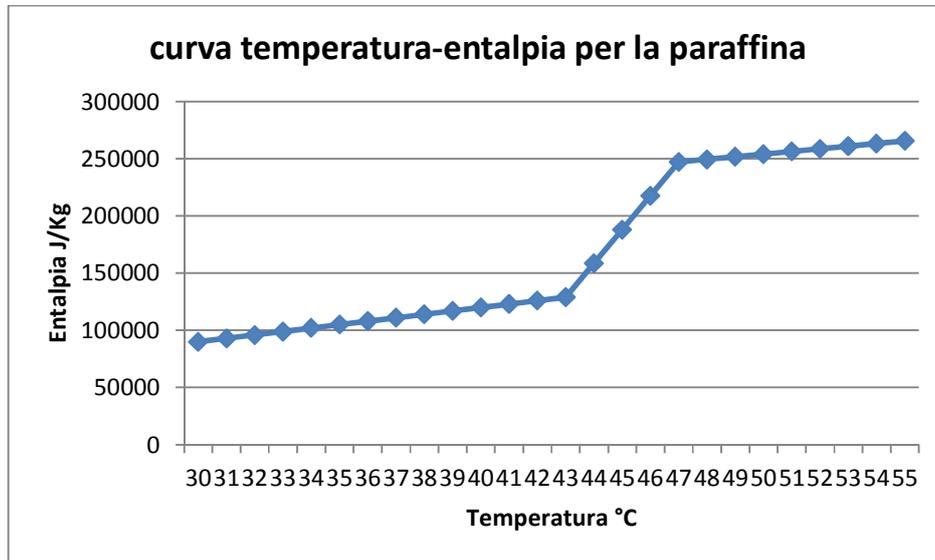


Fig.5.2 – Curva entalpica della paraffina utilizzata

3) il parametro number of PCM radial node (k) indica il numero di suddivisioni lungo l'asse orizzontale che si vuole impostare all'interno del modulo PCM; questo perché mentre la TYPE60 calcola in 1D (lungo la verticale), la TYPE860 calcola in 2D. Il concetto viene palesato dalla Fig.5.3. All'aumentare di questo parametro (max 10) aumenta l'accuratezza della simulazione; con essa aumenta anche il tempo di calcolo.

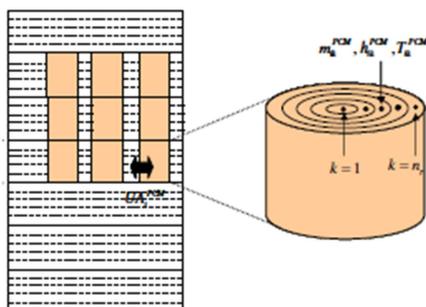


Fig.5.3 – Meshing del modulo PCM

4) Il parametro Number of container in horizontal cross section è quello che identifica il numero di moduli PCM oggetto della simulazione. Nel caso specifico è stato impostato in numero 2 cilindri.

5.2 PARAMETRIZZAZIONE TRAMITE TRNEdit

Poiché la TYPE860 è stata programmata per avere un numero fisso di parametri (174) e di derivatives (18), per fare delle simulazioni che si discostino dal modello preconfezionato si deve utilizzare l'ambiente TRNEdit. Esso rappresenta testualmente ciò che viene rappresentato graficamente in TRNSYS. La procedura per un corretto utilizzo prevede:

- i) apertura del software TRNSYS studio
- ii) importazione del modello della TYPE860
- iii) costruzione del proprio circuito in TRNSYS studio, inserendo tutti i proforma necessari ed effettuando tutti i collegamenti del caso
- iv) lancia una simulazione indipendentemente dal funzionamento; si creerà nella cartella dove si trova il file della type un file denominato "default" di tipo TRNSYS input file (TRNSED)
- v) apertura del suddetto file nell'ambiente TRNEdit. Da qui si possono modificare fisicamente con un editor di testo il numero di parametri e numero di derivatives, e naturalmente i valori. Da qui inoltre si lanceranno le successive simulazioni.

CAPITOLO 6

SIMULAZIONI

Le simulazioni condotte e presentate vogliono rappresentare l'andamento delle temperature all'interno del serbatoio, diviso in 15 nodi. Viene inoltre presentato l'andamento delle temperature del PCM ai nodi dove concettualmente sarà presente una termocoppia: i nodi selezionati sono

Nodo 1: in alto, all'inizio del cilindro PCM; valori rilevati: Serie1

Nodo 6: al centro del cilindro PCM; valori rilevati: Serie2

Nodo 12: in basso, alla fine del cilindro PCM; valori rilevati: Serie3

Le temperature dell'acqua del serbatoio invece vengono monitorate dal software tutte contemporaneamente.

La simulazione viene condotta facendo un confronto tra un serbatoio con cilindri di paraffina pura e cilindri con paraffina addizionata con una schiuma di alluminio, facendo variare:

- in fase di carica: temperatura del sistema: 20 °C
 - temperatura di ingresso dell'acqua: 55 – 70 – 90 °C.
- in fase di scarica: temperatura del sistema 55 °C
 - temperatura di ingresso dell'acqua: 15 – 25 °C

Le caratteristiche di materiali e contenitori sono quelle descritte nel capitolo 4 "dimensionamento del sistema". La condizione paraffina + schiuma di alluminio è stata parametrizzata secondo le formule descritte nel paragrafo 3.2

PROCESSO DI CARICA

1- CONDIZIONI INIZIALI: SISTEMA A 20 °C, TEMPERATURA DI INGRESSO DELL'ACQUA 55 °C

Il comportamento dei due cilindri di paraffina viene confrontato nella Fig.6.1

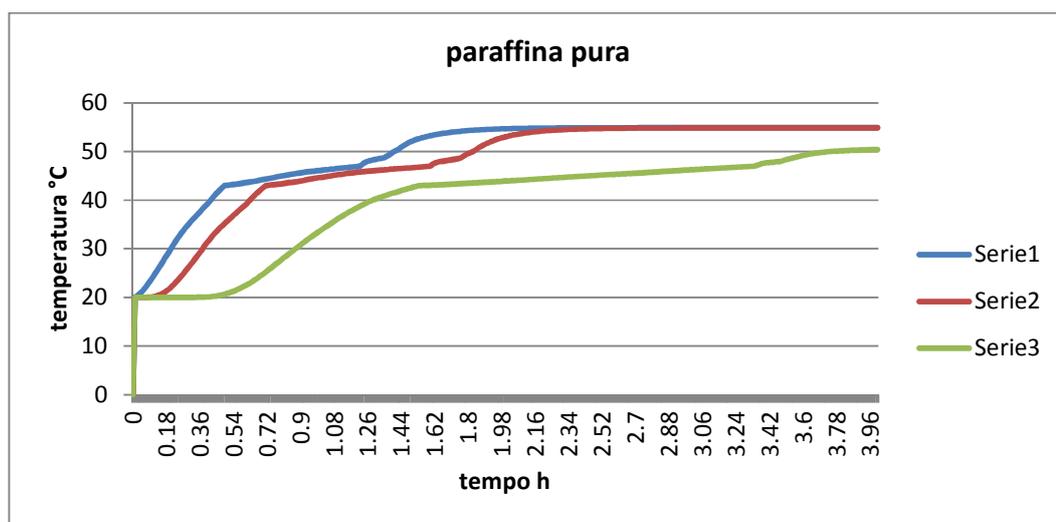


Fig.6.1a

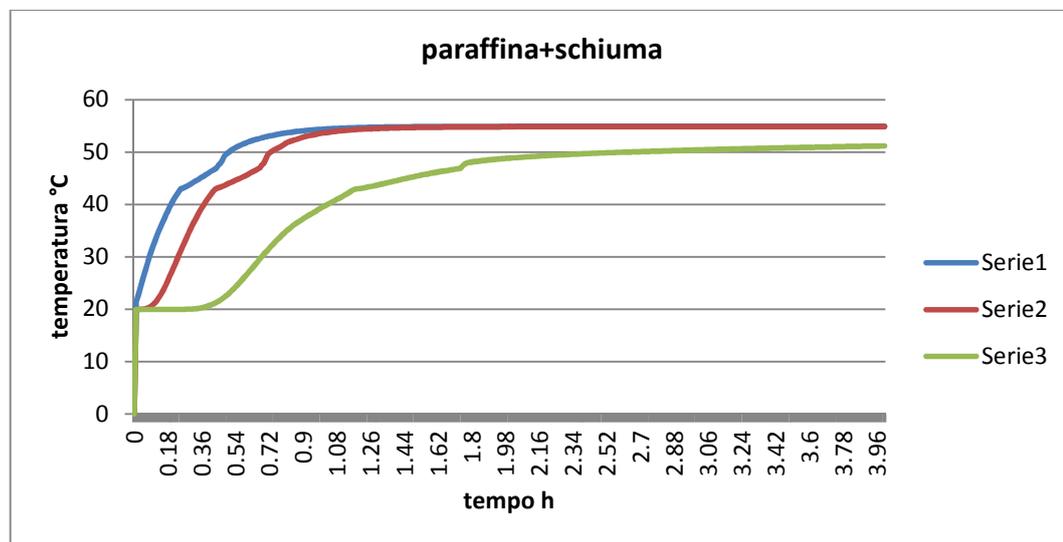


Fig.6.1b

Le tre serie seguono l'andamento rilevato dalle tre termocoppie posizionate lungo il cilindro di PCM. Esse evidenziano come la paraffina si comporti in funzione del cambiamento di fase che subisce. Infatti

questo processo si può apprezzare graficamente dal brusco cambiamento del coefficiente angolare nell'intervallo di temperatura tra i 44 e i 47 °C. Per completare il processo di fusione lungo l'intero contenitore cilindrico, la paraffina pura impiega 200 minuti, contro i 105 minuti del composito con schiuma di alluminio. Il PCM si considera fuso nel momento in cui raggiunge la temperatura di 47 °C. Ci si può quindi aspettare che il processo di cambiamento di fase con l'aggiunta del metallo si completi nel 52% del tempo richiesto senza. Nelle tabelle (Tab.6.1 e successive) si possono leggere i tempi in minuti richiesti per raggiungere la temperatura di cambiamento di fase e i tempi richiesti per completare il cambiamento di stato per ogni condizione di simulazione; questi vengono messi a confronto nei due casi di cilindro con schiuma (P+S) e senza (P) e viene visualizzato il risparmio di tempo percentuale teorico (RISP) conseguito con l'adozione della schiuma.

1	S1			S2			S3		
	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP
t richiesto per raggiungere Tf	30.6	15	51%	43.8	26.4	39.7%	93.6	71.4	23.7%
t richiesto per completare fusione	74.4	27	63.7%	96.6	40.8	57.8%	201.6	105	47.9%

Tab.6.1

L'andamento delle temperature del serbatoio d'acqua viene visualizzato nel grafico della Fig.6.2.

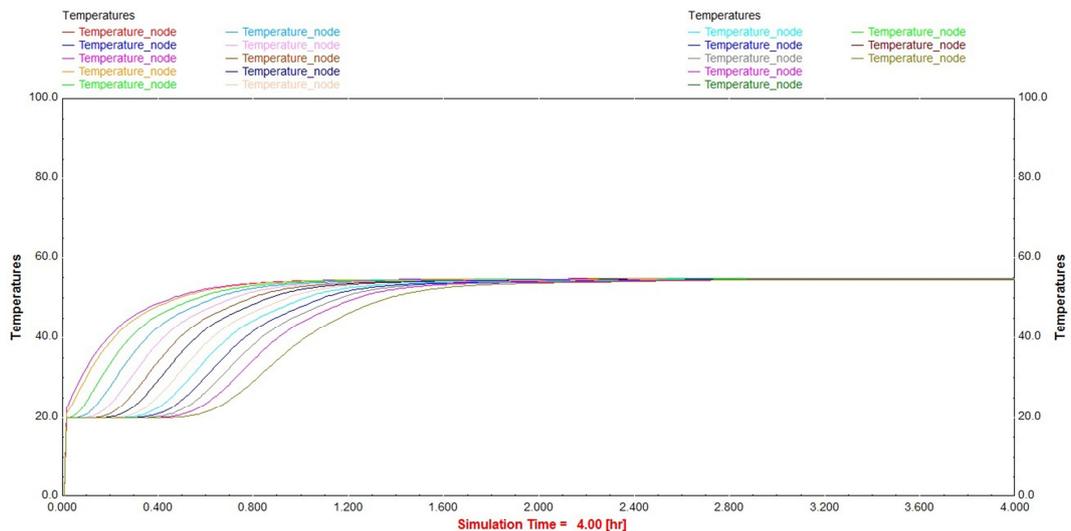


Fig.6.2 – Andamento delle temperature dei nodi dell'acqua nel serbatoio

Si focalizza proprio in questo punto il discostamento tra esperimento reale di laboratorio e questa simulazione: dove qui l'acqua del serbatoio deve portarsi in temperatura impiegandoci più di un'ora di

tempo, nel caso reale l'acqua è già in temperatura di regime. Questo spiega anche come, per effetto degli spiccati fenomeni di stratificazione termica, il tempo di fusione del PCM nei nodi in fondo sia molto maggiore rispetto al PCM nei nodi iniziali: quando nei primi nodi, all'entrare del fluido caldo, il calore viene scambiato da subito sia con l'acqua del serbatoio sia con la paraffina, nei nodi finali, prima che la temperatura cominci a salire è passata già una mezzora, lasso di tempo entro in quale non è avvenuto nessuno scambio di potenza.

2- CONDIZIONI INIZIALI: SISTEMA A 20 °C, TEMPERATURA DI INGRESSO DELL'ACQUA 70 °C

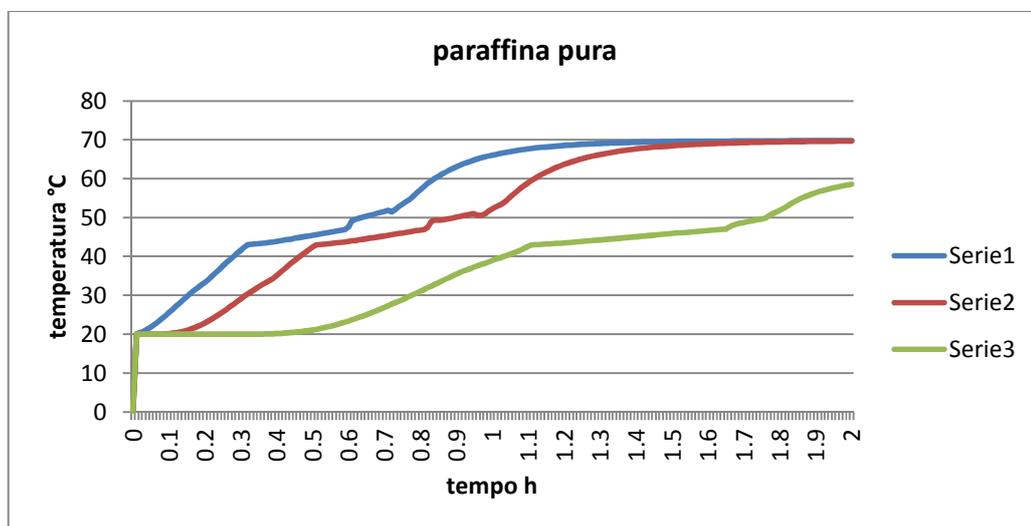


Fig.6.3a

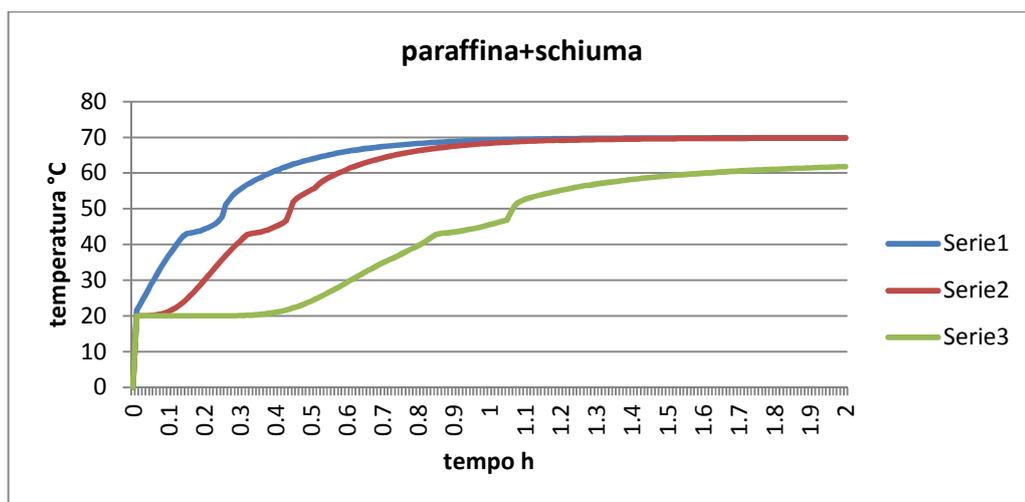


Fig.6.3b

Nelle Fig.6.3 sono analizzati gli andamenti di temperatura della paraffina con un ingresso del fluido cedente calore a 70 °C.

In questo secondo caso la paraffina pura completa il processo di fusione nel tempo di 99 minuti contro i 64 minuti richiesti dall'insieme PCM-schiuma. In questo caso il secondo processo richiede il 64% del tempo del primo.

2	S1			S2			S3		
	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP
t richiesto per raggiungere Tf	19.2	9	53.1%	30.6	19.8	35.3%	67.2	51.6	23.2%
t richiesto per completare fusione	36	15	58.3%	49.2	26.4	46.3%	99.6	63.6	36.1%

Tab.6.2

3- CONDIZIONI INIZIALI: SISTEMA A 20 °C, TEMPERATURA DI INGRESSO DELL'ACQUA 90 °C

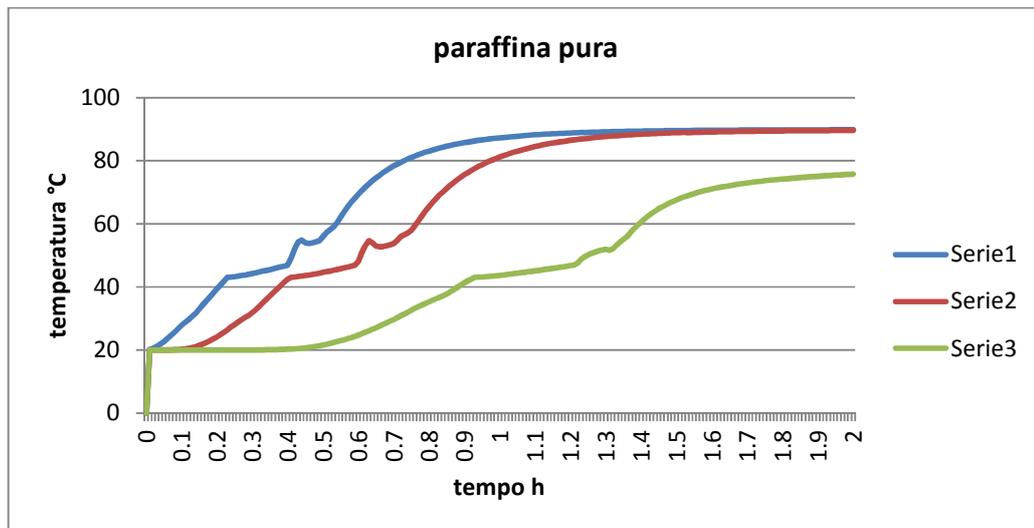


Fig.6.4a

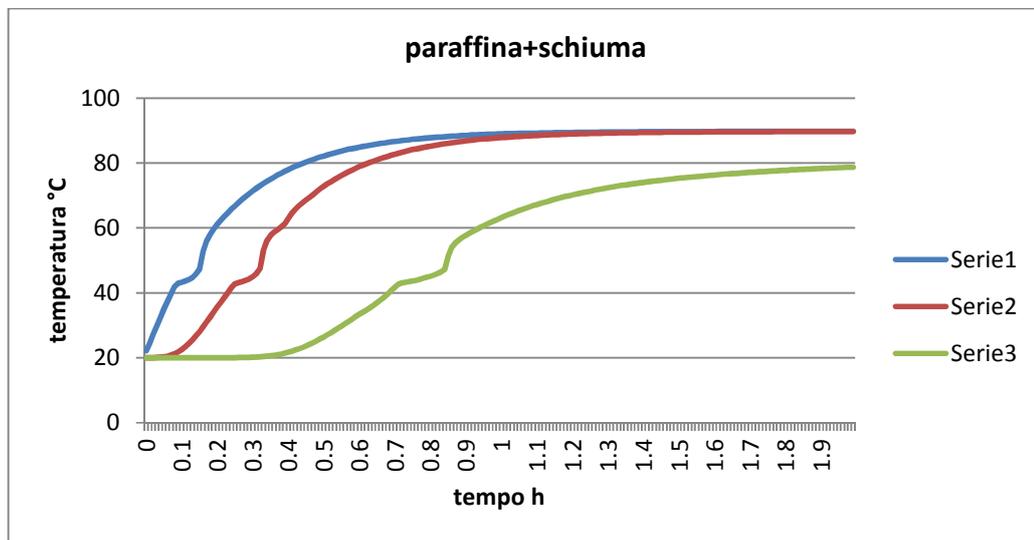


Fig.6.4b

In questo terzo caso la paraffina pura arriva a fusione completa nel giro di 73 minuti, contro i 51 minuti del sistema composito che impiega quindi il 70 % del tempo.

Come si è potuto notare, all'aumentare della temperatura del fluido cedente calore, diminuisce il tempo necessario a completare la fusione in corrispondenza dell'ultimo nodo: quando il fluido entra a 55 °C e cedendo calore dall'alto al basso, mette a disposizione una quantità di calore minore che viene assorbito dal PCM nei primi nodi, con conseguente avanzamento del fronte di fusione molto più lenta rispetto al caso di fluido in ingresso a 90 °C.

3	S1			S2			S3		
	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP
t richiesto per raggiungere Tf	13.8	6	56.5%	26.6	16.2	39.1%	55.8	43.8	21.5%
t richiesto per completare fusione	24.6	9.6	61%	36	19.8	45%	73.2	51	30.3%

Tab.6.3

PROCESSO DI SCARICA

1- CONDIZIONI INIZIALI: SISTEMA A 55 °C, TEMPERATURA DI INGRESSO DELL'ACQUA 15 °C

Per quanto riguarda il processo di scarica, viene inviata acqua alla temperatura di 15 °C, che sottraendo il calore accumulato nel serbatoio, presenta gli andamenti descritti in Fig.6.5.

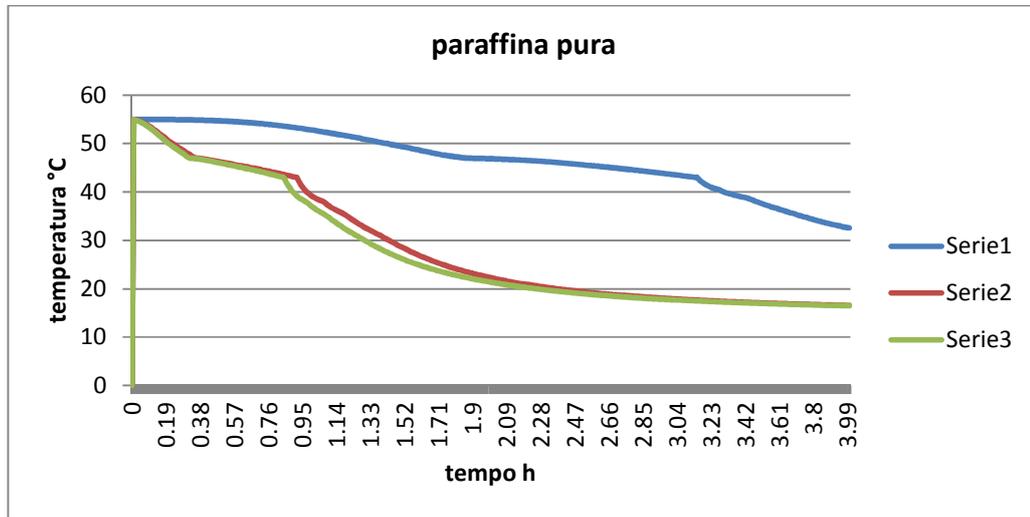


Fig.6.5a

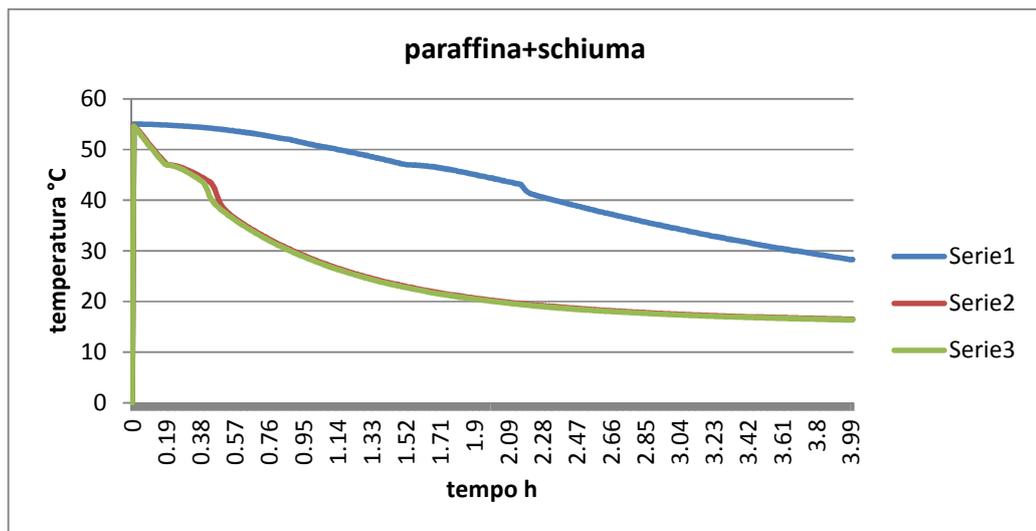


Fig.6.5b

Si può apprezzare anche in questo caso come la schiuma di alluminio agevoli lo scambio termico rendendo il processo di cessione del calore decisamente più efficace.

1	S1			S2			S3		
	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP
t richiesto per raggiungere Ts	111.6	91.8	17.7%	21	12	42.9%	19.2	11.4	40.6%
t richiesto per completare solidificazione	189.6	130.2	31.3%	55.2	27	51.1%	51	24.6	51.8%

Tab.6.4

2- CONDIZIONI INIZIALI: SISTEMA A 55 °C, TEMPERATURA DI INGRESSO DELL'ACQUA 25 °C

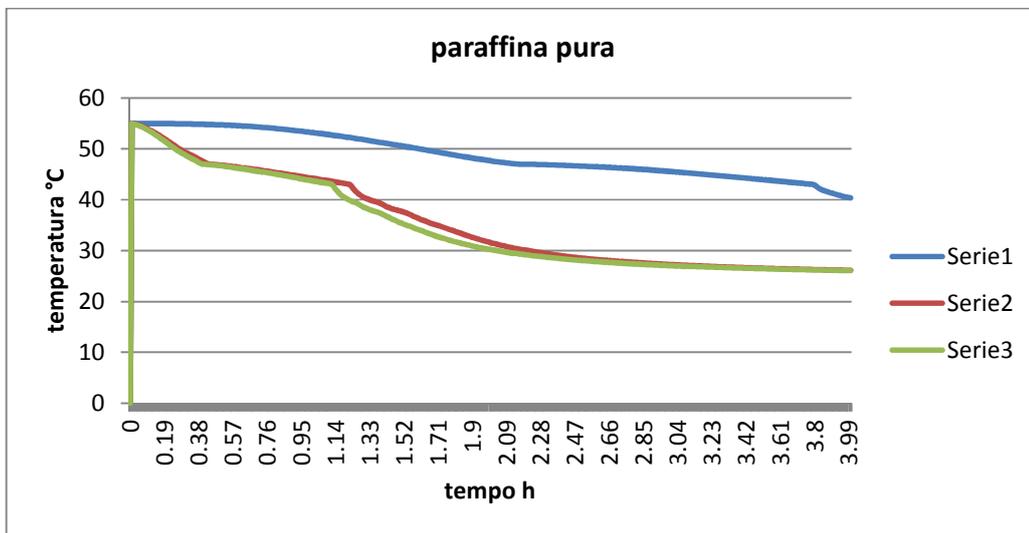


Fig.6.6a

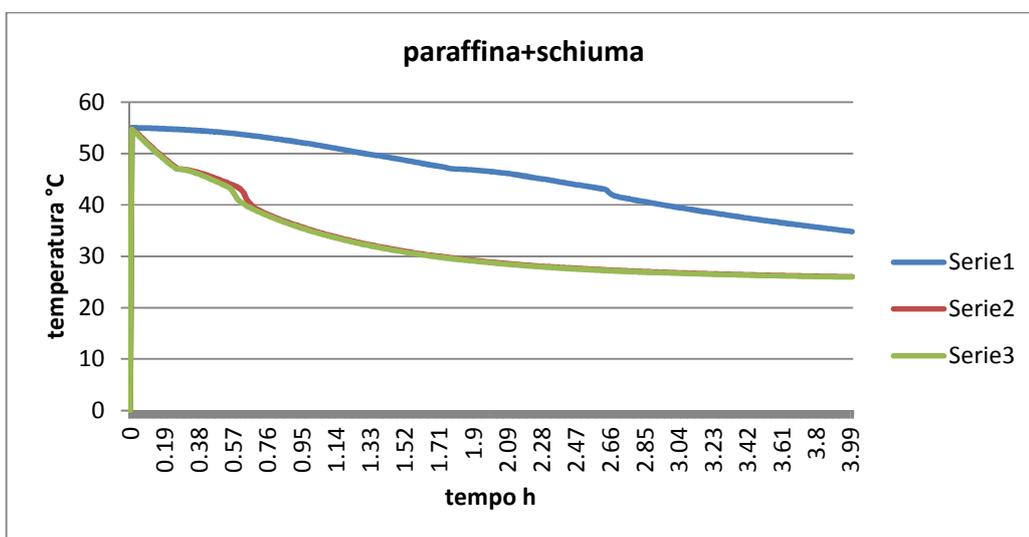


Fig.6.6b

La ragione per cui la termocoppia Serie1 registra un andamento molto più che proporzionalmente superiore alle altre è trovabile nel fatto che il cilindro di paraffina è collocato in maniera che il flusso d'acqua che assorbe calore entra pochi centimetri sotto a dove è collocata la termocoppia. Avendo poi il flusso una direzione verso il basso, si assiste ad una sorta di stratificazione che porta la paraffina a rimanere ad una temperatura più alta rispetto a quella collocata nel resto del contenitore. Questo

problema è facilmente risolvibile nell'esperimento semplicemente avendo cura di collocare la zona PCM interamente al di sotto del flusso in ingresso.

2	S1			S2			S3		
	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP	P	P+S	RISP
t richiesto per raggiungere Ts	129.6	108	16.7%	26.4	16.2	38.6%	24	15.6	35%
t richiesto per completare solidificazione	228	158.4	30.5%	73.8	37.2	59.6%	67.8	34.2	49.6%

Tab.6.5

CONCLUSIONI

Al di là dei risultati strettamente matematici ottenuti, che come è stato chiarito non possono rappresentare la situazione reale, ciò che ne esce da questo studio è la possibilità di diminuire sensibilmente il tempo di carica e di scarica di un serbatoio termico a cambiamento di fase. La ripercussione può essere valutata su due aspetti fondamentali nell'orientamento odierno: aspetto economico e aspetto ambientale.

L'aspetto economico è legato al fatto che l'integrazione di un impianto con materiali a cambiamento di fase porta tipicamente ad una spesa iniziale maggiore, dovuta al costo intrinsecamente superiore dei materiali per l'accumulo, per il contenimento e per l'accrescimento delle proprietà dei PCM, rispetto ai metodi di accumulo sensibile. Questa maggiore spesa iniziale è sempre ripagata in tempi più o meno brevi da costi di utilizzo inferiori. Inoltre il crescente interesse industriale in questo campo ha portato un numero in crescita di aziende nel mondo ad occuparsi dei suddetti materiali, avendo come risultato un decremento progressivo dei prezzi delle attrezzature. Nel particolare, la schiuma di alluminio non è più oggi oggetto di una produzione di nicchia legata ad utilizzi prettamente aerospaziali, ma ha trovato applicazione in diversi campi quali acustica, isolamento termico etc. divenendo quindi di accessibile reperibilità. Quella utilizzata nella sperimentazione tecnica deve la sua scarsa economicità al fatto di essere brasata internamente al tubo contenitore; il motivo è l'azzeramento (più correttamente minimizzazione) del fenomeno di convezione a favore della conduzione nella trasmissione del calore dalla parete del cilindro alla schiuma. Risulterebbe quindi interessante portare ad esperimento un confronto sull'efficienza di trasmissione termica tra un cilindro di schiuma di alluminio brasata e un cilindro di schiuma di alluminio inserita "ad incastro" (schiuma tagliata in modo da entrare nel contenitore con un gioco di qualche frazione di millimetro). Se la differenza fosse trascurabile, sarebbe economicamente giustificata l'adozione della seconda metodologia, rendendo economicamente sfruttabile sul mercato questo metodo di incentivazione.

L'aspetto ambientale lega l'utilizzo di questo genere di accumulo termico alle energie rinnovabili. Se consideriamo un impianto solare termico, la riduzione del tempo di accumulo permetterebbe di sfruttare meglio l'energia solare in condizione di intermittenza diurna della stessa, portando di conseguenza il vantaggio di poter evitare l'integrazione con altre forme di energia, solitamente tradizionali quali una caldaia o una resistenza, quindi il risparmio sia di denaro che di inquinanti emessi in atmosfera.

APPENDICE 1: NOMENCLATURA TYPE860

Parameters

1. User-specified inlet positions
 2. Tank volume
 3. Tank height
 4. Tank perimeter
 5. Height of flow inlet 1
 6. Height of flow outlet 1
 7. Height of flow inlet 2
 8. Height of flow outlet 2
 9. Fluid specific heat
 10. Fluid density
 11. Tank loss coefficient
 12. Fluid thermal conductivity
 13. Destratification conductivity
 14. Boiling temperature
 15. Auxiliary heater mode
 16. Height of 1st aux. Heater
 17. Height of 1st thermostat
 18. Set point temperature for element 1
 19. Deadband for heating element 1
 20. Maximum heating rate of element 1
 21. Node containing heating element 2
 22. Node containing thermostat 2
 23. Set point temperature for element 2
 24. Deadband for heating element 2
 25. Maximum heating rate of element 2
 26. Overall loss coefficient for gas flue
 27. Flue temperature
 28. Fraction of critical timestep
 29. Gas heater?
 30. Number of internal heat exchangers
 31. Node heights supplied
 32. Additional loss coeff's supplied
 33. PCM indicator-N° of PCM zone
 34. Additional node number by node
 35. HX Fluid Indicator-1
 36. Fraction of glycol-1
 37. Heat exchanger inside diameter-1
 38. Heat exchanger outside diameter-1
 39. Heat exchanger fin diameter-1
 40. Total surface area of heat exchanger-1
 41. Fins per meter for heat exchanger-1
 42. Heat exchanger length-1
 43. Heat exchanger wall conductivity-1
 44. Heat exchanger material conductivity-1
 45. Height of heat exchanger inlet-1
 46. Height of heat exchanger outlet-1
 47. HX Fluid Indicator-2
 48. Fraction of glycol-2
 49. Heat exchanger inside diameter-2
 50. Heat exchanger outside diameter-2
 51. Heat exchanger fin diameter-2
 52. Total surface area of heat exchanger-2
 53. Fins per meter for heat exchanger-2
 54. Heat exchanger length-2
 55. Heat exchanger wall conductivity-2
 56. Heat exchanger material conductivity-2
 57. Height of heat exchanger inlet-2
 58. Height of heat exchanger outlet-2
- PCM SPECIFIC PARAMETERS
- Prima zona PCM
59. Nb top node
 60. Nb bot node
 61. PCT1
 62. PCT2
 63. PCT3
 64. PCT4
 65. PCT5
 66. HH1

- 67. HH2
- 68. HH3
- 69. HH4
- 70. HH5
- 71. Hysteres
- 72. Subcool
- 73. Rhol
- 74. Lampcm1
- 75. LambLiq
- 76. Lampcm2
- 77. Nb pcm node
- 78. Thick cont
- 79. Dia
- 80. Shape
- 81. Nb cont
- 82. Rhoc
- 83. Cpc
- 84. Lambda
- 85. KpcmAdd
- 86. Coeff01
- 87. TinitPCM
- 88. N° node output
- 89. Viscocin
- 90. Hlimit
- 91. Rholiq
- 92. CpLiq
- 93. CoefDilat
- 94. LambLiq
- 95. Coeff02
- 96. Coeff03
- 97. Coeff04
- 98. Coeff05

Seconda zona PCM

- 99. Nb top node
- 100. Nb bot node
- 101. PCT1
- 102. PCT2
- 103. PCT3
- 104. PCT4
- 105. PCT5

- 106. HH1
- 107. HH2
- 108. HH3
- 109. HH4
- 110. HH5
- 111. Hysteres
- 112. Subcool
- 113. Rhol
- 114. Lampcm1
- 115. LambLiq
- 116. Lampcm2
- 117. Nb pcm node
- 118. Thick cont
- 119. Dia
- 120. Shape
- 121. Nb cont
- 122. Rhoc
- 123. Cpc
- 124. Lambda
- 125. KpcmAdd
- 126. Coeff01
- 127. TinitPCM
- 128. N° node output
- 129. Viscocin
- 130. Hlimit
- 131. Rholiq
- 132. CpLiq
- 133. CoefDilat
- 134. LambLiq
- 135. Coeff02
- 136. Coeff03
- 137. Coeff04

Parametrizzazione nodi: dal numero di derivatives. La somma delle altezze dei singoli nodi deve corrispondere all'altezza del serbatoio (Parametro 3)

- 139. heigh of node-i
- 140. thermal loss coefficient

Si ripete dall'1 al 18. Si arriva quindi a 174 parametri

input

- 1 flow rate at inlet 1
- 2 flow rate at outlet 1
- 3 flow inlet 2
- 4 flow outlet 2
- 5 temperature at inlet 1
- 6 temperature at inlet 2
- 7 environment temperature
- 8 control signal for element 1
- 9 control signal for element 2
- 10 flow rate for heat exchanger 1
- 11 Inlet temperature for heat exchanger 1
- 12 Nusselt constant for heat exchanger 1
- 13 Nusselt exponent for heat exchanger 1
- 14 flow rate for heat exchanger 2
- 15 Inlet temperature for heat exchanger 2
- 16 Nusselt constant for heat exchanger 2
- 17 Nusselt exponent for heat exchanger 2

Output

- 1 Flowrate at inlet 1
- 2 Flowrate at outlet 1
- 3 Not used (inlet 2 flow)
- 4 Not used (outlet 2 flow)
- 5 Temperature of outlet flow 1
- 6 Not used (temp flow 2)
- 7 [Thermal losses](#)
- 8 Energy supplied by inlet 1
- 9 Energy removed by outlet 1
- 10 Not used (energy inlet 2)
- 11 Not used (energy outlet 2)
- 12 Auxiliary heating rate
- 13 Element 1 power
- 14 Element 2 power
- 15 Losses to gas flue
- 16 Internal energy change

- 17 Average tank temperature
- 18 Static pressure difference - inlet 1
- 19 Static pressure difference - outlet 1
- 20 Not used (pressure inlet 2)
- 21 Not used (pressure outlet 2)
- 22 Energy input from heat exchanger1
- 23 Temperature of fluid exiting heat exchanger1
- 24 Tank temperature at outlet of heat exchanger1
- 25 LMTD of heat exchanger1
- 26 UA of heat exchanger1
- 27 Energy input from heat exchanger2
- 28 Temperature of fluid exiting heat exchanger2
- 29 Tank temperature at outlet of heat exchanger2
- 30 LMTD of heat exchanger2
- 31 UA of heat exchanger2
- 32 Tank temperature - top
- 33 Tank temperature - bottom
- 34 Temperature of node 1+
- 35 Temperature of node 1+
- 36 Temperature of node 1+
- 37 Temperature of node 1+
- 38 Temperature of node 1+
- 39 Temperature of node 1+
- 40 Temperature of node 1+
- 41 Temperature of node 1+
- 42 Temperature of node 1+
- 43 Temperature of node 1+
- 44 Temperature of node 1+
- 45 Temperature of node 1+
- 46 Temperature of node 1+

I seguenti tre sono le temperature del modulo PCM. Il nodo misurato dipende dal valore del parametro N° node output

- 47 Temperature of PCM
- 48 Temperature of PCM
- 49 Temperature of PCM

APPENDICE 2: PARAMETRI TRNEdit UTILIZZATI

Viene riportata la parametrizzazione utilizzata in una delle simulazioni: qui si identifica un serbatoio con una zona PCM e due moduli PCM, corrispondenti ai due cilindri di paraffina. Il serbatoio d'acqua è stato diviso in 15 derivatives.

```
*****
*** Units
*****

*****
*** Control cards
*****
* START, STOP and STEP
CONSTANTS 3
START=0
STOP=4
STEP=0.001
* User defined CONSTANTS

SIMULATION      START  STOP   STEP   ! Start time   End time       Time step
TOLERANCES 0.001 0.001   ! Integration  Convergence
LIMITS 30 30 30           ! Max iterations   Max warnings   Trace
limit
DFQ 1                ! TRNSYS numerical integration solver method
WIDTH 80              ! TRNSYS output file width, number of characters
LIST                  ! NOLIST statement
                    ! MAP statement
SOLVER 0 1 1         ! Solver statement   Minimum   relaxation   factor
    Maximum relaxation factor
NAN_CHECK 0          ! Nan DEBUG statement
OVERWRITE_CHECK 0    ! Overwrite DEBUG statement
EQSOLVER 0           ! EQUATION SOLVER statement

* Model "TYPE860" (Type 860)
*

UNIT 2 TYPE 860      TYPE860
*$UNIT_NAME TYPE860
*$POSITION 98 100
*$LAYER Main #
PARAMETERS 128
2                ! 1 Parameter-1
0.05             ! 2 Parameter-2
0.75             ! 3 Parameter-3
-1              ! 4 Parameter-4
0.6             ! 5 Parameter-5
0.2             ! 6 Parameter-6
0.6             ! 7 Parameter-7
0.2             ! 8 Parameter-8
4.19            ! 9 Parameter-9
1000.0          ! 10 Parameter-10
2.34            ! 11 Parameter-11
2.34            ! 12 Parameter-12
9               ! 13 Parameter-13
100             ! 14 Parameter-14
2               ! 15 Parameter-15
0.6             ! 16 Parameter-16
0.65            ! 17 Parameter-17
55             ! 18 Parameter-18
```

5	! 19 Parameter-19
0	! 20 Parameter-20
0.6	! 21 Parameter-21
0.65	! 22 Parameter-22
55	! 23 Parameter-23
10.0	! 24 Parameter-24
0	! 25 Parameter-25
0	! 26 Parameter-26
20	! 27 Parameter-27
6	! 28 Parameter-28
0	! 29 Parameter-29
2	! 30 Parameter-30
1	! 31 Parameter-31
1	! 32 Parameter-32
1	! 33 Parameter-33
3	! 34 Parameter-34
1	! 35 Parameter-35
0.75	! 36 Parameter-36
0.019	! 37 Parameter-37
0.02	! 38 Parameter-38
0.02	! 39 Parameter-39
0.01	! 40 Parameter-40
0	! 41 Parameter-41
0.01	! 42 Parameter-42
55	! 43 Parameter-43
55	! 44 Parameter-44
0.7	! 45 Parameter-45
0.5	! 46 Parameter-46
1	! 47 Parameter-47
0.75	! 48 Parameter-48
0.019	! 49 Parameter-49
0.020	! 50 Parameter-50
0.02	! 51 Parameter-51
0.01	! 52 Parameter-52
0	! 53 Parameter-53
0.01	! 54 Parameter-54
55	! 55 Parameter-55
55	! 56 Parameter-56
0.7	! 57 Parameter-57
0.5	! 58 Parameter-58
1	! 59 Parameter-59
12	! 60 Parameter-60
30	! 61 Parameter-61
43	! 62 Parameter-62
45	! 63 Parameter-63
47	! 64 Parameter-64
55	! 65 Parameter-65
90	! 66 Parameter-66
129	! 67 Parameter-67
188.05	! 68 Parameter-68
247.1	! 69 Parameter-69
265.5	! 70 Parameter-70
0	! 71 Parameter-71
0	! 72 Parameter-72
800	! 73 Parameter-73
0.2	! 74 Parameter-74
0.2	! 75 Parameter-75
0.2	! 76 Parameter-76
4	! 77 Parameter-77
0	! 78 Parameter-78
50.001	! 79 Parameter-79
2	! 80 Parameter-80
2	! 81 Parameter-81
2700	! 82 Parameter-82
880	! 83 Parameter-83
200	! 84 Parameter-84
1.4	! 85 Parameter-85
1	! 86 Parameter-86

```

55          ! 87 Parameter-87
06.0102    ! 88 Parameter-88
5          ! 89 Parameter-89
150        ! 90 Parameter-90
800        ! 91 Parameter-91
2300       ! 92 Parameter-92
0.001      ! 93 Parameter-93
0.2        ! 94 Parameter-94
0          ! 95 Parameter-95
0          ! 96 Parameter-96
0          ! 97 Parameter-97
0          ! 98 Parameter-98
0.05       ! 99 Parameter-99
0          ! 100 Parameter-100
0.05       ! 101 Parameter-101
0          ! 102 Parameter-102
0.05       ! 103 Parameter-103
0          ! 104 Parameter-104
0.05       ! 105 Parameter-105
0          ! 106 Parameter-106
0.05       ! 107 Parameter-107
0          ! 108 Parameter-108
0.05       ! 109 Parameter-109
0          ! 110 Parameter-110
0.05       ! 111 Parameter-111
0          ! 112 Parameter-112
0.05       ! 113 Parameter-113
0          ! 114 Parameter-114
0.05       ! 115 Parameter-115
0          ! 116 Parameter-116
0.05       ! 117 Parameter-117
0          ! 118 Parameter-118
0.05       ! 119 Parameter-119
0          ! 120 Parameter-120
0.05       ! 121 Parameter-121
0          ! 122 Parameter-122
0.05       ! 123 Parameter-123
0          ! 124 Parameter-124
0.05       ! 125 Parameter-125
0          ! 126 Parameter-126
0.05       ! 127 Parameter-127
0          ! 128 Parameter-128

```

INPUTS 17

```

0,0        ! [unconnected] Input-1
0,0        ! [unconnected] Input-2
0,0        ! [unconnected] Input-3
0,0        ! [unconnected] Input-4
0,0        ! [unconnected] Input-5
0,0        ! [unconnected] Input-6
0,0        ! [unconnected] Input-7
0,0        ! [unconnected] Input-8
0,0        ! [unconnected] Input-9
0,0        ! [unconnected] Input-10
0,0        ! [unconnected] Input-11
0,0        ! [unconnected] Input-12
0,0        ! [unconnected] Input-13
0,0        ! [unconnected] Input-14
0,0        ! [unconnected] Input-15
0,0        ! [unconnected] Input-16
0,0        ! [unconnected] Input-17

```

*** INITIAL INPUT VALUES

```

50 50 0 -2 15 15 20 0.0 0.0 0 20 0.6 0.3 0 5 0.6 0.3

```

DERIVATIVES 15

```

55          ! 1 Derivative-1
55          ! 2 Derivative-2
55          ! 3 Derivative-3
55          ! 4 Derivative-4

```

```

55          ! 5 Derivative-5
55          ! 6 Derivative-6
55          ! 7 Derivative-7
55          ! 8 Derivative-8
55          ! 9 Derivative-9
55          ! 10 Derivative-10
55          ! 11 Derivative-11
55          ! 12 Derivative-12
55          ! 13 Derivative-13
55          ! 14 Derivative-14
55          ! 15 Derivative-15
*-----

* Model "Type65d" (Type 65)
*

UNIT 3 TYPE 65 Type65d
*$UNIT_NAME Type65d
*$MODEL .\Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d.tmf
*$POSITION 205 104
*$LAYER Main #
PARAMETERS 12
10          ! 1 Nb. of left-axis variables
8           ! 2 Nb. of right-axis variables
0           ! 3 Left axis minimum
100        ! 4 Left axis maximum
0           ! 5 Right axis minimum
100        ! 6 Right axis maximum
1           ! 7 Number of plots per simulation
10         ! 8 X-axis gridpoints
0          ! 9 Shut off Online w/o removing
-1         ! 10 Logical unit for output file
0          ! 11 Output file units
0          ! 12 Output file delimiter
INPUTS 18
2,32      ! TYPE860:Output-32 ->Left axis variable-1
2,34      ! TYPE860:Output-34 ->Left axis variable-2
2,35      ! TYPE860:Output-35 ->Left axis variable-3
2,36      ! TYPE860:Output-36 ->Left axis variable-4
2,37      ! TYPE860:Output-37 ->Left axis variable-5
2,38      ! TYPE860:Output-38 ->Left axis variable-6
2,39      ! TYPE860:Output-39 ->Left axis variable-7
2,40      ! TYPE860:Output-40 ->Left axis variable-8
2,41      ! TYPE860:Output-41 ->Left axis variable-9
2,42      ! TYPE860:Output-42 ->Left axis variable-10
2,43      ! TYPE860:Output-43 ->Right axis variable-1
2,44      ! TYPE860:Output-44 ->Right axis variable-2
2,45      ! TYPE860:Output-45 ->Right axis variable-3
2,46      ! TYPE860:Output-46 ->Right axis variable-4
2,47      ! TYPE860:Output-47 ->Right axis variable-5
2,48      ! TYPE860:Output-48 ->Right axis variable-6
2,49      ! TYPE860:Output-49 ->Right axis variable-7
2,33      ! TYPE860:Output-33 ->Right axis variable-8
*** INITIAL INPUT VALUES
Temperature_node_1 Temperature_node_2 Temperature_node_3 Temperature_node_4
Temperature_node_5 Temperature_node_6 Temperature_node_7 Temperature_node_8
Temperature_node_9 Temperature_node_10 Temperature_node_11 Temperature_node_12
Temperature_node_13 Temperature_node_14 Temperature_node_15 Temperature_node_16
Temperature_node_17 Temperature_node_18
LABELS 3
"Temperatures"
"Temperatures"
"Graph 1"
*-----

END

```

BIBLIOGRAFIA

- [1] Belèn Zalba, Marìn, Cabeza, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications - *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251–283
- [2] Devrim Aydin, Zafer Utlu, Olcay Kincay, Thermal performance analysis of a solar energy sourced latent heat storage - *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) 1213–1225
- [3] 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* 13 (2009) 318–345
- [4] Simone Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman, L. Rossetto, Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams - *International Journal of Thermal Sciences* 90 (2015) 79e89
- [5] Renato M. Lazzarin - L'accumulo di energia termica: nuove tecnologie e possibilità applicative
- [6] Ahmet Sari, Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications - *Energy Conversion and Management* 44 (2003) 2277–2287
- [7] Jian-Jun Zhang et Al., Thermal studies on the solid±liquid phase transition in binary systems of fatty acids - *Thermochimica Acta* 369 (2001) 157±160
- [8] S. M. HASNAIN, REVIEW ON SUSTAINABLE THERMAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES, PART I: HEAT STORAGE MATERIALS AND TECHNIQUES - PII: S0196-8904(98)00025-9
- [9] Camila Barreneche, M. Elena Navarro, Luisa F. Cabeza, A. Inés Fernández, New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications - *Journal of Energy Storage* 3 (2015) 18–24
- [10] A.Jamekhorshid, S.M.Sadrameli, M.Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium - *RenewableandSustainableEnergyReviews*31(2014)531–542
- [11] Arman Najafian, Fariborz Haghighat, Alain Moreau, Integration of PCM in domestic hot water tanks: Optimization forshifting peak demand - *Energy and Buildings* 106 (2015) 59–64
- [12] Kireeti Chintakrinda, Randy D. Weinstein, Amy S. Fleischer, A direct comparison of three different material enhancement methods on the transient thermal response of paraffin phase change material exposed to high heat fluxes - *International Journal of Thermal Sciences* 50 (2011) 1639e1647
- [13] Zichen Wang, Zhuqian Zhang, Li Jia, Lixin Yang, Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery - *Applied Thermal Engineering* 78 (2015) 428e436