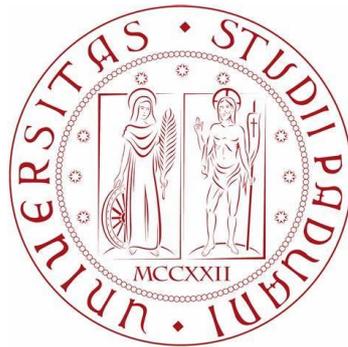


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi
Industriali



Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**ANALISI SPERIMENTALE DI UN ACCUMULO
TERMICO A PCM AL VARIARE DELLA
CIRCUITAZIONE**

Relatore: Prof. Giulia Righetti

Giada Busatto: 1168611

Anno Accademico 2021-2022

Indice

1 Sommario	3
2 Introduzione	4
2.1 I Materiali PCM	
2.1.1. Osservazione sulla proprietà dei PCM.....	4
2.1.2. Tipologie di PCM.....	4
2.2 Motivo per cui si vogliono utilizzare	
2.2.1. CrodaTherm	5
2.3 Aspetti pro e contro dei PCM.....	6
3 Descrizione impianto	7
3.1. Configurazione della struttura.....	7
3.2. Componenti interni.....	8
3.3. Le Termocoppie	8
3.4. Misuratore di portata.....	11
4 Descrizione prova	13
4.1. Componenti specifici	
4.1.1. Il Glicole	14
4.1.2. Scambiatore a Piastre	14
4.1.3. Scambiatori roll bond.....	14
4.2. Carica e scarica	16
4.3. Obiettivi.....	19
5 Obiettivi della tesi	20
5.1. Problematiche	
5.1.1. Fase di carica	20
5.1.2. Fase di scarica	20
5.2. Soluzioni proposte	
5.2.1. Passaggio da alimentazione in serie ad alimentazione in parallelo	22
6 Discussione risultati	25
6.1. Inversione flusso	
6.1.1. Energia accumulata e variazione di temperatura.....	25
6.1.2. Osservazioni.....	25
6.2. Dimensionamento superficie attraverso metodo delta T medio logaritmico	
6.2.1. Determinazione del calore	31
6.2.2. Potenza scambiata	31
6.2.3. Determinazione del coefficiente k	31
6.2.4. Potenza dell'intera zona.....	31
6.2.5. Osservazioni.....	31
6.2.6. Grafici.....	31
6.3. Caso in parallelo	
6.3.1. Energia accumulata e variazione di temperatura.....	36
7 Conclusioni	39
7.1. Osservazioni dei risultati	39
7.2. Consigli per il futuro	40
8 Bibliografia	41

CAPITOLO 1

Sommario

Questo elaborato analizza la sostanza a cambiamento di fase (PCM) all'interno di un accumulatore termico al variare della circuitazione, studiandone l'energia termica immagazzinata a varie condizioni operative al passare del tempo.

Le prove sperimentali sono state eseguite utilizzando il PCM CrodaTherm 9.5 il quale è stato posto all'interno dell'accumulo insieme alle 16 piastre realizzate con la tecnica roll bond in cui scorre l'acqua.

Questa tesi propone nuove alternative di circuitazione per sopperire alla durata maggiore della scarica rispetto a quella della carica.

I risultati, tendono a mostrare, tra le alternative pensate, il migliore utilizzo con scambiatori in parallelo piuttosto che con l'inversione dell'alimentazione dell'acqua tra entrata e uscita.

Abstract

This paper analyzes the phase change substance (PCM) inside a thermal storage as the circuitry changes, studying the thermal Energy stored under various operating conditions over time.

The experimental tests were performed using the PCM CrodaTherm 9.5 which was placed inside the accumulation together with the 16 plates made with the roll bond technique in which the water flows.

This thesis proposes new alternatives of circuit to compensate for the longer duration of the discharge compared to that of the charge.

The results tend to show, among the alternatives conceived, the best use with exchangers in parallel rather than with the inversion of the water supply between inlet and outlet.

CAPITOLO 2

Introduzione

2.1 I Materiali PCM

Le materie a cambiamento di fase sono chiamate PCM, abbreviazione di Phase Change Material. Esse sono sostanze che hanno dimostrato di poter migliorare le prestazioni e l'affidabilità delle applicazioni di accumulo di energia.

Questi materiali si distinguono, infatti, per la loro proprietà di trattenere o liberare energia sotto forma di calore latente, un'energia termica che viene assorbita o rilasciata da un materiale nel processo di congelamento o scioglimento.

2.1.1.Osservazione sulla proprietà dei PCM

Dalla legge della termologia sappiamo che fornendo calore ad un corpo innalziamo la sua temperatura :

$$Q = m C dT$$

ma ciò non accade nei passaggi di stato.

Nella transizione da solido a liquido, o viceversa (Figura 0), il PCM non aumenta la propria temperatura ma rimane costante fino alla fine del suo cambiamento di stato. In questa variazione di fase, passando per la fusione o la solidificazione del materiale, si possono osservare due condizioni. Nel primo caso, in cui viene abbassata la temperatura, si nota che il sistema continua comunque ad assorbire energia e possiamo così ottenere un effetto di raffreddamento dell'ambiente. Nel secondo caso, invece, la temperatura viene rialzata e il calore latente viene ceduto facendo sì che la zona circostante sia gradualmente riscaldata.

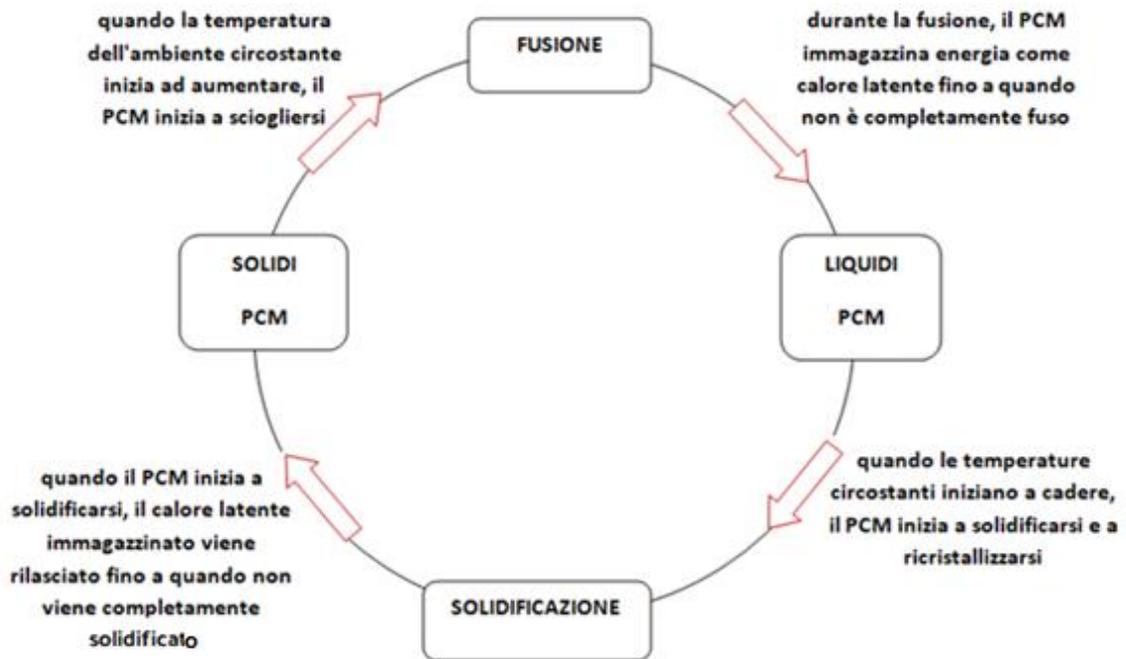


Figura 0. Rappresentazione transizione liquido solido di un PCM

2.1.2. Tipologie di PCM

Nel mercato è presente una vasta varietà di sostanze di questo tipo, ognuna delle quali risulta più adatta a certe applicazioni piuttosto che ad altre. Generalmente però si suddividono per la loro composizione in sostanze: organiche, inorganiche ed eutettiche.

Le sostanze organiche comprendono le paraffine e non, quelle inorganiche i sali, i metalli e leghe metalliche mentre le sostanze eutettiche sono miscele di due o più sostanze il cui punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che lo compongono.

2.2. Motivo per cui si vogliono utilizzare

I materiali appena descritti sono utili perché nel processo di transazione di fase a temperature specifiche riescono ad assorbire molta energia per poi restituirla all'ambiente. Funzionano così come un accumulatore, un sistema che immagazzina energia per un uso successivo.

Ci sono molte sostanze con queste caratteristiche, tante delle quali però derivanti da prodotti petrolchimici e non rinnovabili, a base di paraffinico e idrato di sale.

2.2.1. CrodaTherm

Esistono poi PCM alternativi, studiati dall'azienda Croda, i quali rappresentano un'alternativa sostenibile ed economica. Si tratta dei prodotti CrodaTherm utilizzati negli imballaggi a temperatura controllata ma anche in sistemi di riscaldamento e raffreddamento. In quest'ultimo caso avremo modo di vedere il loro funzionamento. Precisamente utilizzeremo croda 9.5 denominato così per la sua caratteristica di solidificare a circa nove gradi. Questo prodotto ha elevate capacità di calore latente e quindi nelle sue applicazioni risulterà notevolmente efficiente.

2.3.Aspetti pro e contro dei PCM

I materiali a cambiamento di fase sono vantaggiosi perché presentano una temperatura di fusione vicina a quella di comfort termico ottimale, quindi sono condizioni termiche facilmente raggiungibili e che garantiscono un risparmio energetico.

Inoltre le loro proprietà termiche non vengono alterate in migliaia di utilizzi e quindi sono sostanze sicure e riutilizzabili per molto tempo.

Il vero problema però sta nel tempo di risposta perché per quanto possano portare a diversi vantaggi, questi materiali si sono dimostrati lenti nel cedere e assorbire energia.

Infatti, come vedremo, tale PCM troverà alcune difficoltà nella fase di carica e scarica, precisamente quindi nell'assorbire o rilasciare calore latente nel cambiamento di fase. Ciò nonostante i requisiti che contraddistinguono questi materiali a cambiamento di fase sono molteplici e si possono così riassumere (fonte: INGENIO-WEB.IT) :

- Alto valore del calore di fusione;
- Alto valore del calore specifico;
- Alta conducibilità termica;
- Punto di fusione alla temperatura di funzionamento;
- Fusione congruente;
- Piccole variazioni di volume nel cambiamento di fase;
- Velocità di nucleazione e crescita dei cristalli sufficientemente elevate;
- Stabilità chimica nel tempo;
- Scarsa infiammabilità, atossicità e comportamento non corrosivo.

CAPITOLO 3

Descrizione impianto

Viene analizzato qui di seguito un impianto di raffreddamento composto da un accumulo di forma rettangolare al cui interno sono presenti: la sostanza PCM in forma liquida a temperatura ambiente, le termocoppie e un sistema per lo scambio termico. L'impianto viene mostrato in Figura 1.



Figura 1. Immagine dell'impianto sperimentale

3.1. Configurazione della struttura

Il contenitore ha un'altezza di 136,5 cm, la base di 71 cm x 65 cm ed è isolato termicamente con uno strato di isolante di 5 cm per limitare le dispersioni.

Tutta la struttura è collocata all'interno di una camera climatica che mantiene la temperatura costante a 9 ± 0.1 °C, così da eliminare le dispersioni con l'ambiente mentre il materiale sta cambiando di fase.

3.2.Componenti interni

Il sistema per lo scambio termico è invece realizzato da lastre in alluminio disposte verticalmente che vengono chiamate scambiatori, all'interno di questi ci sono dei condotti all'interno dei quali viene fatta passare dell'acqua a diverse temperature a seconda che si voglia riscaldare o raffreddare la sostanza a cambiamento di fase. È possibile inoltre variare la portata d'acqua.

All'interno del nostro accumulatore sono stati predisposti sedici scambiatori, realizzati con la tecnologia roll-bond, tecnica che unisce grazie ad un pressaggio ad alta pressione due fogli di alluminio e che grazie all'applicazione di un particolare tracciante, lascia liberi dei canali per il passaggio dell'acqua.

3.3.Le Termocoppie

Sia all'interno che all'esterno sono state posizionate le termocoppie (Figura 2) con lo scopo di misurare la temperatura in ogni istante desiderato e presentano i seguenti vantaggi:

- Con un unico strumento di riferimento, misurano la temperatura contemporaneamente in diversi punti;
- Hanno una ridotta inerzia;
- Hanno una buona accuratezza, infatti riescono a misurare la temperatura con una precisione di ± 0.1 K, grazie al collegamento con un Ice Point Reference (Kaye K170);
- Hanno un vasto utilizzo per la loro economicità, il cavo costa circa 0.9 €/m
- Sono facili da utilizzare;
- Possono misurare ampi intervalli di temperature con buona accuratezza.

Il funzionamento delle termocoppie è basato su l'effetto termoelettrico Seebeck: avendo un circuito composto da conduttori diversi si genera un campo elettrico, il cui

flusso di corrente è proporzionale alla differenza di temperatura che c'è tra i capi del circuito.

Questi conduttori sono formati da due fili di metallo differenti, ad esempio rame e costantana, che generano un circuito elettrico quando vengono correttamente intrecciati tra di loro.

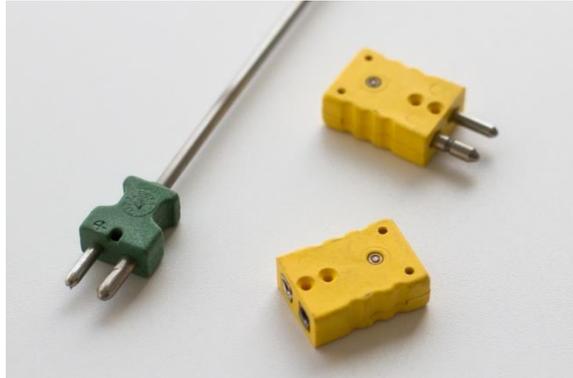


Figura 2. Esempio di termocoppia

Nel nostro caso specifico, una delle due estremità dei fili è inserita in una macchina che rimane costantemente alla temperatura di zero gradi ed è chiamata Ice Point Reference Kaye K-170. Misurando la differenza di potenziale si calcola la differenza di temperatura grazie ad un polinomio di taratura proposto dalla normativa IPTS90 e quindi se ne ricava la temperatura interessata.

Per creare le termocoppie in laboratorio sono stati utilizzati fili in rame e costantana, ne sono state posizionate trentanove all'interno del contenitore e un paio all'esterno. Come vedremo, per poter avere una visione d'insieme su cosa accade in ciascun punto al passare del tempo, sono stati scelti dei punti strategici in cui posizionarle.

In primo luogo l'accumulo è stato suddiviso in cinque piani e lungo undici linee verticali. Come rappresentato nelle Figure 3 e 4.

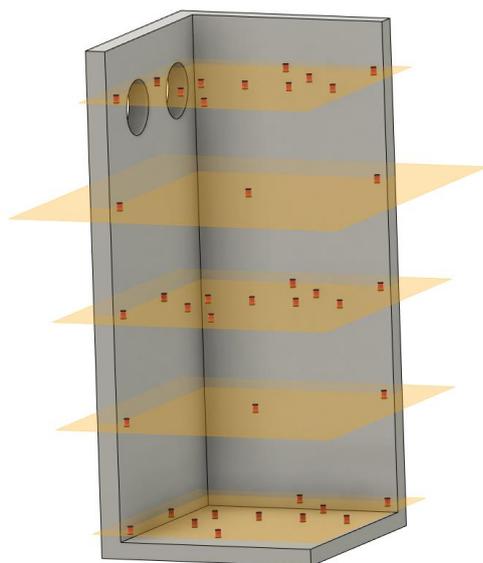


Figura 3. Rappresentazione dei cinque piani orizzontali

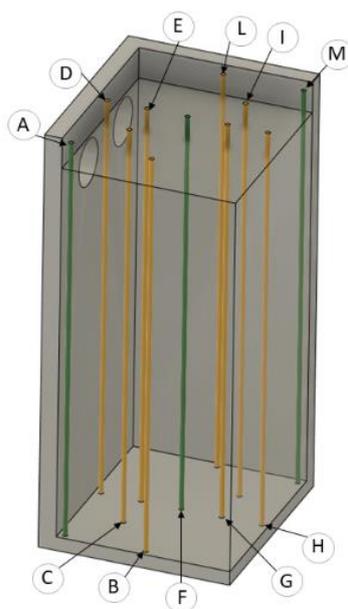


Figura 4. Rappresentazione linee verticali

Ed è stata poi assegnata una nomenclatura con lettere (per la divisione orizzontale) (Figura 5) e numeri (per la suddivisione verticale) con lo scopo di avere riferimenti precisi ed ordinati, facilmente rintracciabili (Figura 6).

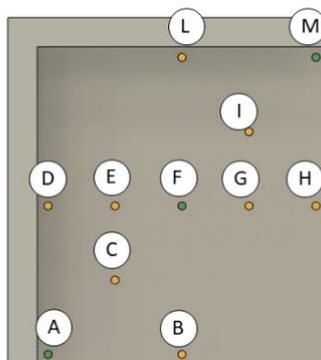


Figura 5. Esempio della suddivisione con lettere

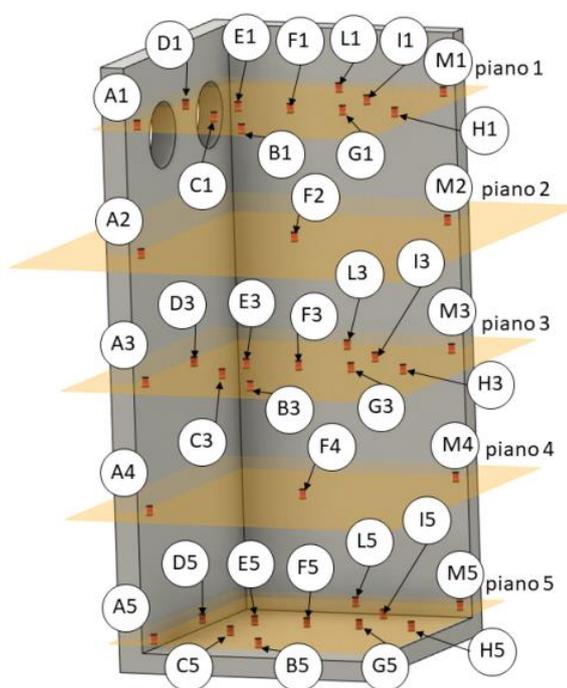


Figura 6. Nomenclatura con numeri e lettere

3.4. Misuratore di portata

Infine all'esterno dell'accumulo, oltre alle tubazioni che permettono il trasporto dell'acqua e le termocoppie, è presente anche un misuratore di portata Endress + Houser promag H con accuratezza pari al $\pm 0,5\%$ del fondo scala (fondo scala pari a 40 l/min). È uno strumento utilizzato per determinare la velocità e di conseguenza la portata volumetrica di liquido che scorre attraverso un tubo ed è costituito da un

trasmettitore e da un sensore. Se si sottopone a un campo magnetico trasversale un tubo attraversato da un fluido conduttore, in questo passerà corrente e verrà generata una forza elettromotrice. Se poi il fluido è a contatto con due elettrodi isolati, si misurerà una differenza di potenziale proporzionale alla velocità del fluido e dalla sezione si potrà ricavare la portata volumetrica. Il sensore del misuratore di portata magnetico misura quindi la tensione indotta generata dal fluido che scorre nel tubo mentre il trasmettitore acquisisce la tensione generata dal sensore, la trasforma in una misura della portata e trasmette questo dato. Lo strumento viene mostrato in Figura 7.



Figura 7. Immagine del misuratore di portata

Tutti i dati sono stati acquisiti mediante un acquisitore Keysight 34970A che ha un campionamento di 1 Hz (ogni dato viene letto ogni secondo). I dati sono poi trasdotti in digitale ed elaborati tramite il software Labview installato su un PC.

CAPITOLO 4

Descrizione prova

Per studiare l'efficienza del macchinario con PCM Croda sono necessarie diverse sperimentazioni.

Le prove che vengono eseguite seguono tutte lo stesso schema:

- I. L'inizio della prova avviene con l'accumulo di PCM alla temperatura costante di 14 °C e il PCM in forma liquida;
- II. Una miscela di acqua e glicole (il glicole è stato aggiunto per evitare che l'acqua si ghiacci scendendo di temperatura) viene raffreddata da un chiller che la porta ad una temperatura costante di circa -1°C. Questa miscela scorre fino ad uno scambiatore a piastre dove scambia calore con dell'acqua, che esce dallo scambiatore alla temperatura desiderata di 2 °C;
- III. Tramite misuratore di portata volumetrico viene misurata la portata dell'acqua e tramite una termocoppia la sua temperatura;
- IV. A questo punto tramite un collettore entra nell'accumulo;
- V. In quest'ultimo viene distribuita attraverso gli scambiatori di calore di tipo roll bond;
- VI. Infine viene fatta defluire in un collettore di uscita, dal quale attraverso tubature ritorna allo scambiatore a piastre per essere nuovamente raffreddata;

Alla prova di scarica segue un protocollo analogo, ma le temperature della miscela acqua e glicole e dell'acqua che entra nell'accumulo sono diverse per permettere lo scioglimento del PCM.

La miscela acqua + glicole viene portata alla temperatura di 18.5 °C e la temperatura dell'acqua al collettore di ingresso è di 17 °C.

4.1. Componenti specifici

4.1.1. Il Glicole

In dettaglio, analizzando per punti ci ritroviamo in primo luogo questa nuova sostanza, il glicole etilenico, che a temperatura ambiente si presenta come un liquido trasparente. Il suo scopo è di fungere da anticongelante e per questo viene diluito con l'acqua. Essendo poi una sostanza tossica viene colorata per renderla riconoscibile all'occhio umano così da evitare di scambiare per semplice acqua.

4.1.2. Scambiatore a Piastre

In seguito si passa attraverso lo scambiatore a piastre saldo brasate in rame (Figura 8 e Figura 9), esso è uno scambiatore di calore in cui due fluidi a temperatura diversa scambiano calore tra loro attraverso le superfici che separano il liquido caldo da quello freddo. I fluidi si alternano con flusso in controcorrente e tutto ciò fa sì che i fluidi si possano scaldare o raffreddare con livelli di energia minimi.



Figura 8. Immagine dello scambiatore a piastre



Figura 9. Esempio di uno scambiatore a piastre

4.1.3.Scambiatori roll bond

Infine entrando nel contenitore, grazie al misuratore di portata che era stato precedentemente descritto al capitolo 2, il liquido passa ora attraverso gli scambiatori.

Questi scambiatori, come avevamo accennato, sono “fogli di lamiera pressata tra di loro tra i quali sono stati lasciati dei piccoli canali nei quali può scorrere l’acqua”. I roll bond sono distanziati tra di loro 31 mm e hanno un diametro interno di 3 mm. Come si può vedere dalla Figura 10.



Figura 10. Immagine del roll-bond

4.2.Carica e scarica

Principalmente ogni prova effettuata si suddivide in fase di carica e di scarica (Figura 11). Nella prima, grazie al passaggio di acqua a una temperatura inferiore a quella di cambiamento di fase del PCM (9°C), il PCM si raffredda fino alla temperatura in cui avviene il congelamento della sostanza e passa dallo stato liquido allo stato solido.

Nella seconda fase invece si ha il procedimento inverso, ossia, viene fatta scorrere una portata d'acqua a temperatura più alta della temperatura di cambiamento di fase del PCM (9°C) che fa sciogliere il PCM e lo riscalda.

Come già visto in precedenza (nel capitolo 2) in queste due fasi viene scambiato calore latente che durante il passaggio di fase verrà rilasciato o trattenuto.

Nel nostro caso specifico faremo entrare una portata d'acqua di 10 L/h a una temperatura di circa 2°C . La sostanza a cambiamento di fase passa dallo stato liquido a quello solido e si stabilizza nello stato solido dopo circa 8 ore. In secondo luogo poi,

alzeremo la temperatura a 16°C, con la stessa portata d'acqua e aspetteremo il tempo necessario perché avvenga la scarica completa e che quindi il PCM torni alla fase liquida. Dal momento che è stato misurato che il 75% dell'energia viene scambiata nelle prime 4 ore di carica (e di scarica), si è deciso di focalizzarsi solamente su questa prima parte delle prove, in modo da poter evidenziare differenze in funzione della variazione delle condizioni operative.

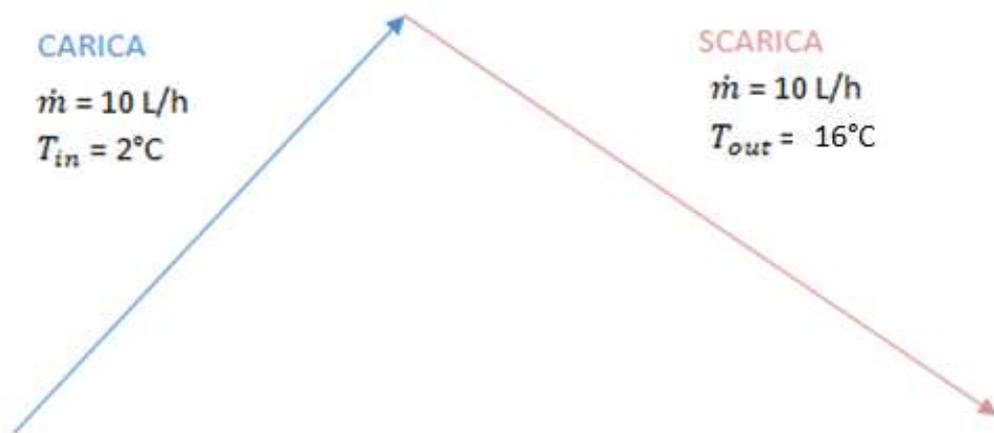


Figura 11. Schema del processo di carica e scarica.

L'impianto, che sia in fase di carica o di scarica, è sempre schematizzabile con un punto d'entrata per l'acqua ad una certa temperatura ed un punto d'uscita dell'acqua dall'accumulo ad una temperatura maggiore (carica) e minore (scarica) (Figura 12).

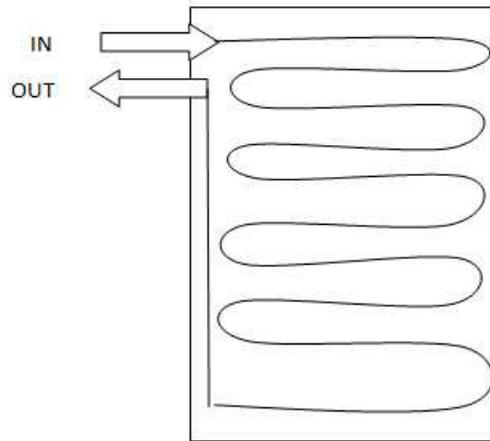


Figura 12. Schema interno dell'accumulo

Una volta all'interno, l'acqua entra in un collettore che la suddivide in 8 ingressi a 8 coppie di roll bond in parallelo (Figura 13). L'acqua in uscita da un primo roll bond entra direttamente nel successivo (Figura 14). Solamente all'uscita dal secondo roll bond viene convogliata all'interno del collettore di scarico.

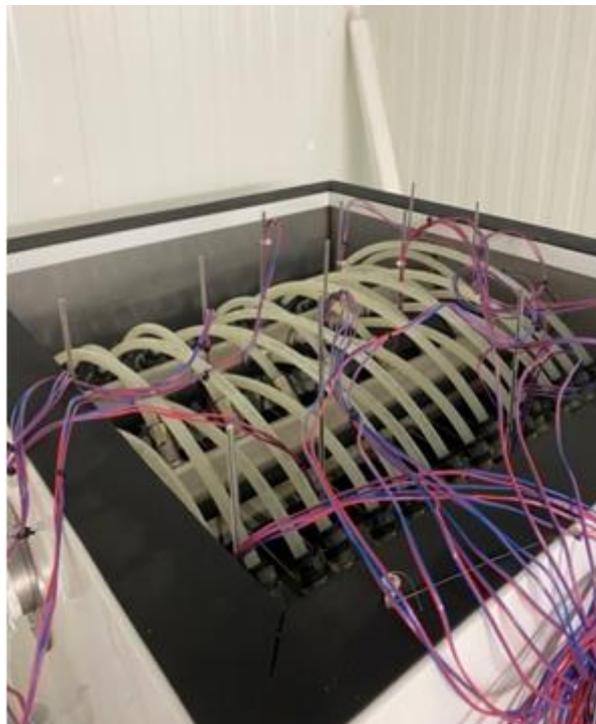


Figura 13. Immagine di roll bond in parallelo.

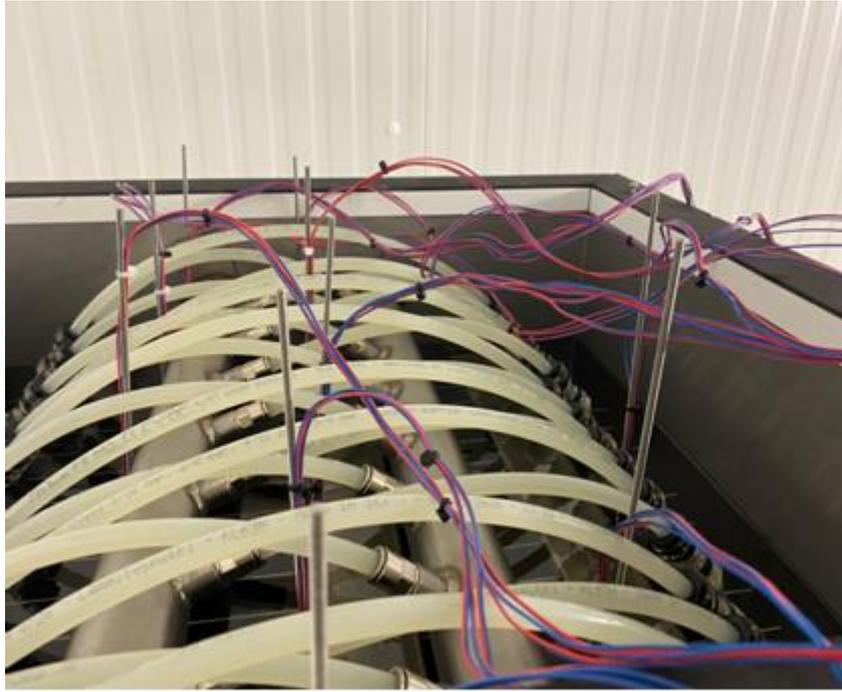


Figura 14. Immagine ravvicinata del collegamento tra piastre a roll bond.

Questa è la configurazione con cui l'accumulo viene venduto sul mercato, ma probabilmente non è la condizione più efficiente.

4.3.Obbiettivi

Questa tesi si propone di studiare una diversa configurazione dell'alimentazione dell'acqua all'interno dei roll bond in cui tutti e 16 i roll bond vengono alimentati in parallelo dal collettore di immissione e scaricano direttamente nel collettore di ritorno.

CAPITOLO 5

Obbiettivi della tesi

Si è visto nel precedente capitolo la geometria dell'accumulo che comprende la presenza delle diverse piastre roll-bond, assimilabili ad una serpentina che corre lungo tutto l'interno. Di seguito invece, vengono considerati differenti modi di circuitazione per ottimizzare il funzionamento dell'accumulo, con l'obiettivo di esaminare i punti critici e trovare possibili soluzioni.

5.1.Problematiche

Eseguendo le prime prove sperimentali è stato subito osservato un problema nella fase di scarica. Diversamente dalla fase di carica, in cui facendo passare acqua fredda il liquido si congela in tempi ragionevoli (attorno le quattro ore), nella fase di scarica, invece, il PCM fatica a ritornare allo stato liquido. Nell'ultima fase si riscontra così un considerevole problema di lentezza della scarica.

L'attenzione verrà posta su una possibile soluzione ma vediamo prima nel dettaglio un possibile motivo del limite riscontrato.

5.1.1.Fase di carica

Partendo come sempre dalla fase di carica, raffreddiamo il sistema attraverso il passaggio di acqua fredda. Possiamo assumere che la piastra scambi in modo abbastanza omogeneo il calore al PCM. Il PCM è in forma liquida e al variare della temperatura varia la sua densità. Più si raffredda più la sua densità aumenta.

All'interno del liquido quindi si instaurano dei moti convettivi che portano il liquido più freddo verso il fondo dell'accumulo e quello più caldo in alto.

E' facilmente intuibile che la parte superiore dell'accumulo avrà una differenza di temperatura tra acqua e PCM maggiore rispetto alla parte inferiore. (Figura 13)

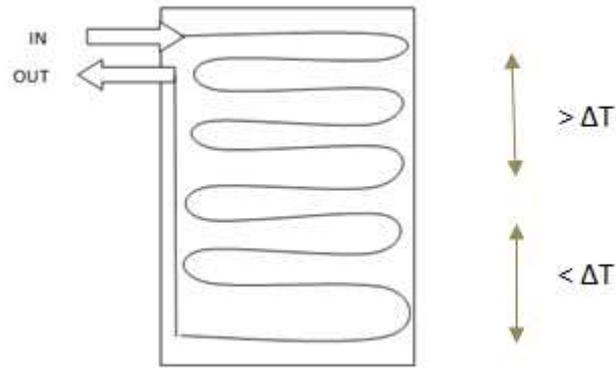


Figura 13. Schema differenza temperatura tra parte alta e bassa.

A causa di questa differenza di temperatura si generano ulteriori moti convettivi dovuti a variazioni nella densità del PCM(Figura 14).

Come spiegato in ****weschool**: “fra porzioni di fluido a diverse temperature, e quindi dotate di differenti densità, viene a mancare l’equilibrio idrostatico e la forza di gravità fa sì che porzioni più dense di liquido si spostino verso il basso, e porzioni più calde vengano sospinte in alto”. In questo modo, dopo un certo intervallo di tempo dall’inizio della prova, ci si ritrova ad avere la parte inferiore completamente congelata mentre la parte superiore ancora liquida in quanto la densità del liquido è minore di quella del solido.

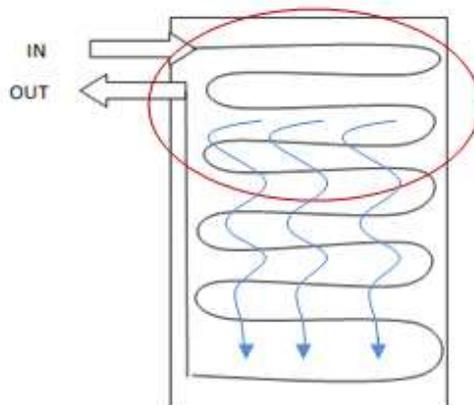


Figura 14. Schema interno dell’accumulo nella fase di carica

5.1.2. Fase di scarica

Proseguendo ora con la fase di scarica, dall'alto viene immessa acqua a una temperatura maggiore del PCM. L'obiettivo è quello di scongelare tutto il PCM solidificato nella fase di carica ma emerge fin dalle prime prove sperimentali che occorrono troppe ore per riportarlo in fase liquida. Il liquido che man mano si forma non riesce a mescolarsi grazie alla presenza di moti convettivi perché nell'accumulo è ancora presente molto PCM allo stato solido che blocca la convezione. La parte più in alto mano a mano raccoglie tutto il liquido (a bassa densità) che riesce a passare ma fatica a scambiare calore perché il PCM si porta velocemente alla temperatura di equilibrio, a causa dei limitati moti convettivi con la parte inferiore e così l'accumulo, che lavora con un'area di scambio effettiva minore, impiega un tempo superiore per terminare il passaggio di fase (Figura 15).

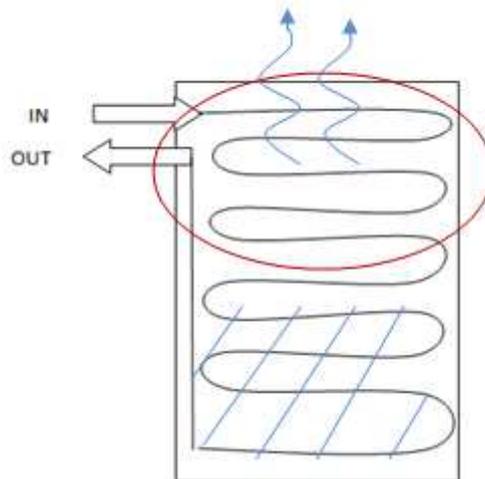


Figura 15. Schema interno dell'accumulo nella fase di scarica

5.2. Soluzioni proposte

Per rimediare alla lentezza della scarica quando tutto il PCM si trova in forma solida, in primo luogo è stato considerato di modificare la circuitazione invertendo l'alimentazione dell'ingresso con l'uscita.

Il disegno del tubo dove scorre l'acqua nella piastra è simmetrico, per cui non dovrebbero esserci differenze. Si è comunque voluto provare a misurare sperimentalmente l'effetto dovuto all'inversione tra ingresso e uscita.

In secondo luogo invece si è pensato di cambiare la configurazione dell'alimentazione in modo che tutti e 16 i roll bond vengano alimentati in parallelo dal collettore di immissione e scarichino direttamente nel collettore di ritorno (Figura 16 e 17).

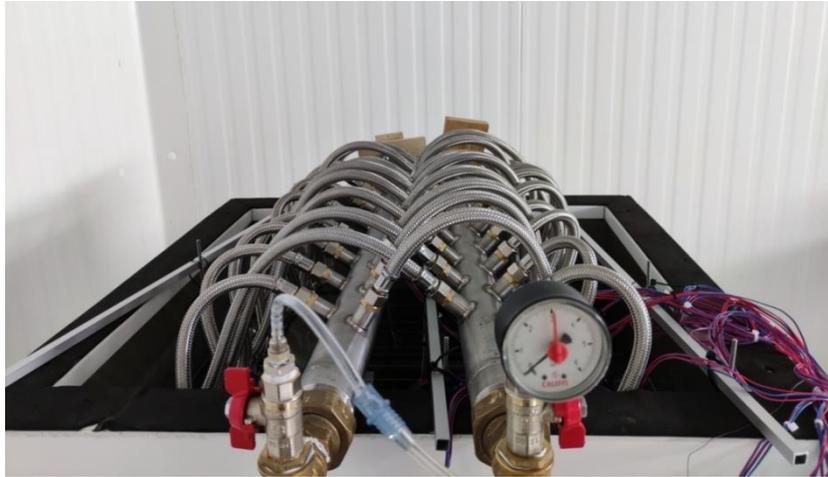


Figura 16, 17. Immagini dei roll bond in parallelo.

5.2.1. Passaggio da alimentazione in serie ad alimentazione in parallelo

Nella configurazione precedente avevamo un collegamento in serie a due a due in cui per il primo roll-bond l'acqua in entrata passava dal collettore alla prima lastra mentre

successivamente la portata in ingresso del successivo roll-bond era data da quella in uscita dal precedente roll-bond. Il secondo roll bond scaricava nel collettore di uscita. In seguito, si verificava il collegamento tra il terzo e il quarto roll-bond, tra il quinto e il sesto e così via. Quanto appena descritto è schematizzato dalla Figura 18.

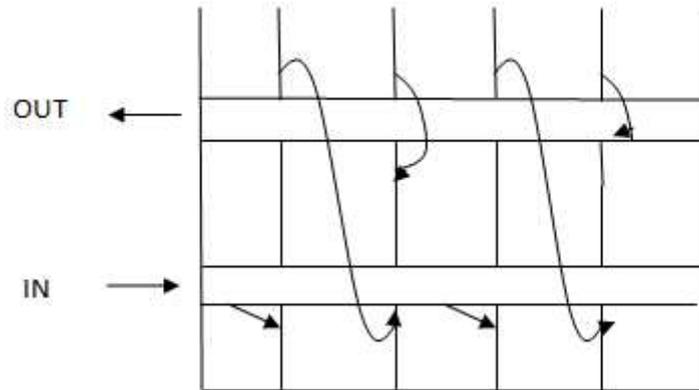


Figura 18. Rappresentazione configurazione in serie

Come precedentemente accennato ora ci proponiamo di studiare la configurazione in parallelo, vedendo se, come da obiettivo prefissato, riusciremo a ridurre i tempi di scarica. In questa casistica la portata di fluido entra ed esce dallo stesso roll-bond, ogni volta passando attraverso i collettori (Figura 19).

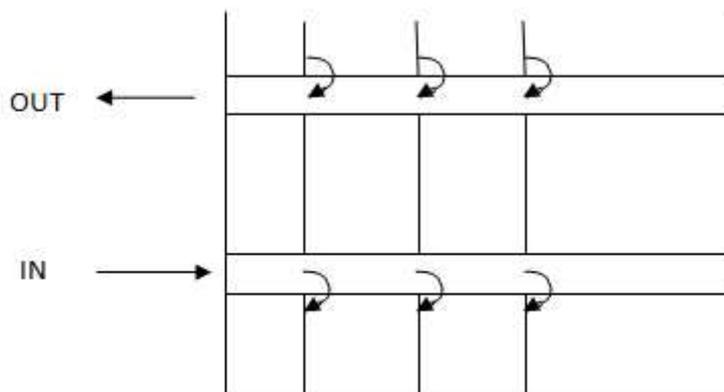


Figura 19. Rappresentazione configurazione in parallelo

CAPITOLO 6

Discussione risultati

6.1. Inversione flusso

Come anticipato dal capitolo precedente, studieremo per primo il caso di inversione del flusso di entrata e di uscita. Una volta svolta la prova fisica potremmo analizzare i grafici ottenuti, osservando l'andamento del caso iniziale, denominato caso di riferimento e rappresentato dalla linea blu, rispetto i risultati ottenuti dall'inversione di flusso raffigurati dalla linea rossa.

6.1.1. Energia accumulata e variazione di temperatura

Nel primo grafico (Figura 20) viene studiata l'energia accumulata al passare del tempo mentre nel secondo (Figura 21) il variare della temperatura media del PCM.

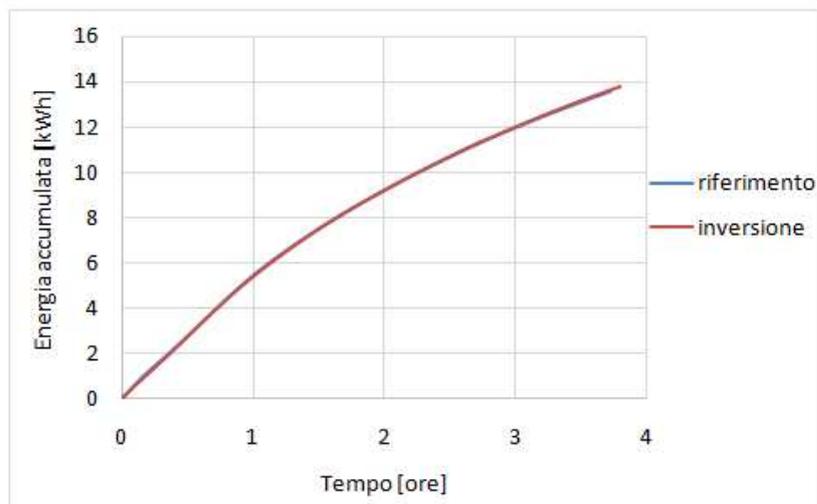


Figura 20. Grafico energia accumulata

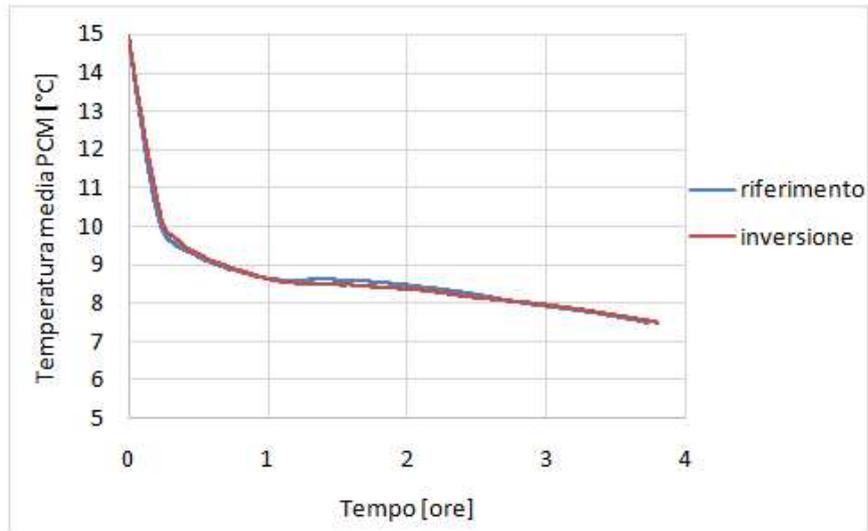


Figura 21. Grafico temperatura media PCM

Questi grafici si riferiscono alla fase di carica e tra caso iniziale e inversione d'ingresso con uscita non si osserva nessun cambiamento considerevole. Le due linee di colori diversi (energia accumulata e temperatura media), si sovrappongono quasi perfettamente da sembrare una linea sola, dimostrando appunto così l'uguaglianza tra i due casi.

Nei successivi grafici osserveremo invece la temperatura del PCM in ognuno dei cinque piani all'interno dell'accumulo, prima nel caso di riferimento (caso iniziale) e poi in quello di inversione tra ingresso e uscita come rispettivamente osservabile dalle sottostanti figure 22 e 23.

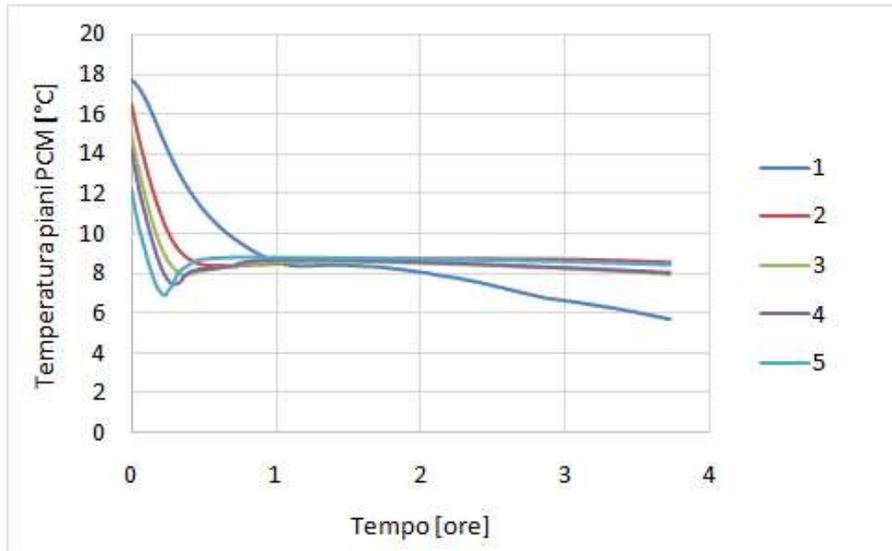


Figura 22. Grafico di riferimento della temperatura media dei PCM nei piani

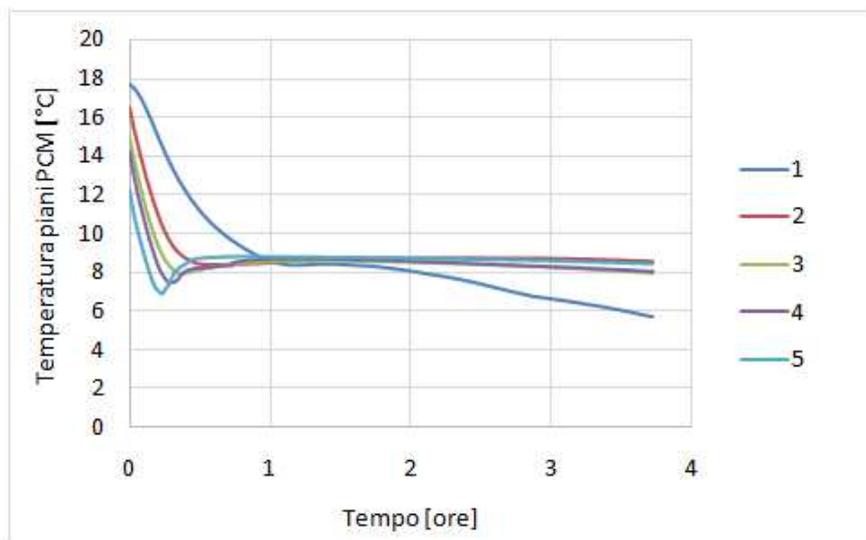


Figura 23. Grafico con inversione tra ingresso e uscita della temperatura media dei PCM nei piani

A prima vista, sembrerebbe esserci una differenza di temperatura tra i due casi nel piano inferiore. Analizzeremo quindi più dettagliatamente qui di seguito solamente il quinto piano in modo da vedere in un unico grafico i due casi a confronto (figura 24).

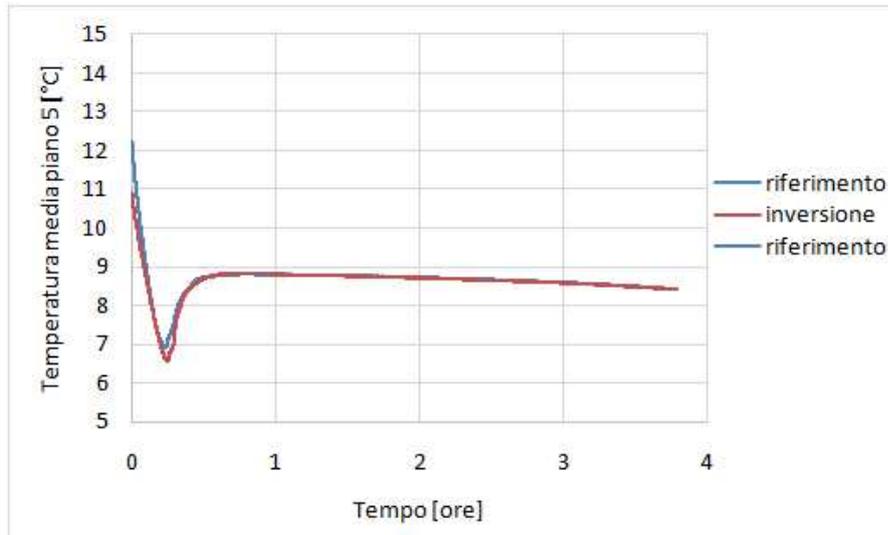


Figura 24. Grafico della temperatura media del PCM nel quinto piano

Come si può vedere, ciò che sembrava una differenza in realtà non lo è. Quindi anche nel caso dello studio di piano per piano all'interno dell'accumulo lo scostamento è davvero minimo e irrilevante.

In conclusione, l'ipotesi dell'inversione tra ingresso e uscita, come si era ipotizzato, non comporta differenze rispetto al caso di riferimento e quindi essendo un sistema parallelo si otterrebbero analoghi risultati anche per il caso di scarica.

Per quest'ultimo, osserviamo quindi solo i grafici dell'energia accumulata e della temperatura media (figure 25 e 26) per il caso di riferimento, tralasciando invece la comparazione con l'inversione tra ingresso e uscita. Non avendo osservato nessuna differenza nella fase di carica analizzata precedentemente e, come detto prima, utilizzando una piastra simmetrica, supponiamo non ci siano differenze nemmeno per la fase di scarica.

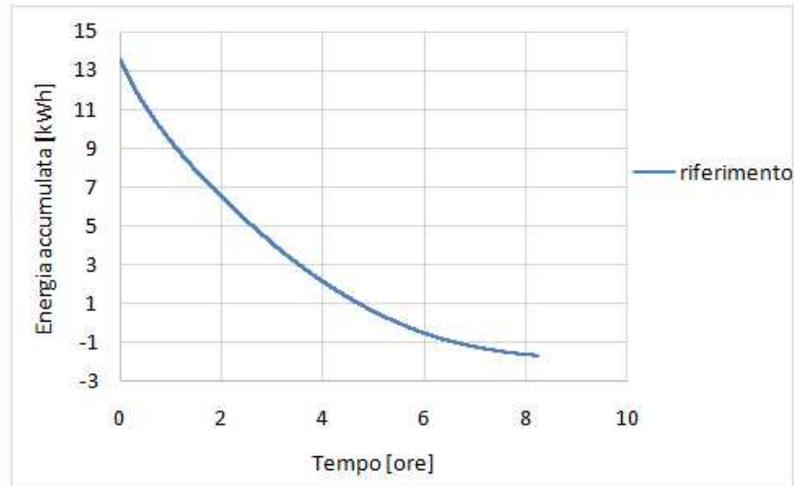


Figura 25. Grafico energia accumulata nella fase di scarica

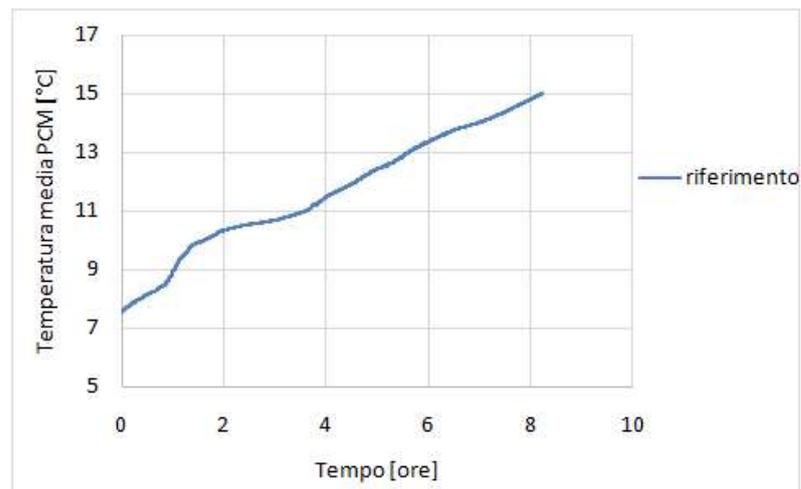


Figura 26. Grafico temperatura media PCM nella fase di scarica

Come si può facilmente vedere da questi grafici, nella fase di scarica, al passare del tempo l'energia accumulata diminuisce mentre la temperatura aumenta. Un andamento esattamente opposto al processo di carica.

6.1.2.Osservazioni

Come si era detto, da questi grafici si può vedere la lentezza della scarica di cui si parlava. Rispetto le quattro ore della carica, vista nei grafici precedenti, la scarica ce ne impiega il doppio, attorno appunto le otto ore.

Si è capito che invertire ingresso con uscita non comporta nessuna modifica dei risultati, a causa della simmetria delle piastre osservabile nelle immagini sottostanti (figura 27 e 28).

La geometria selezionata dal produttore dell'accumulo in un primo momento non sembra essere bilanciata. Infatti, si suppone che la maggior parte della portata entra, passa dal canale più alto e più corto per uscire immediatamente, grazie a delle minori perdite di carico. In questo caso, ci troviamo di fronte quindi ad uno scambiatore che non sfrutta tutta la sua area di scambio ma solo una parte e le misure che rilevavano uno scambio termico maggiore nella parte alta sono sicuramente corrette.

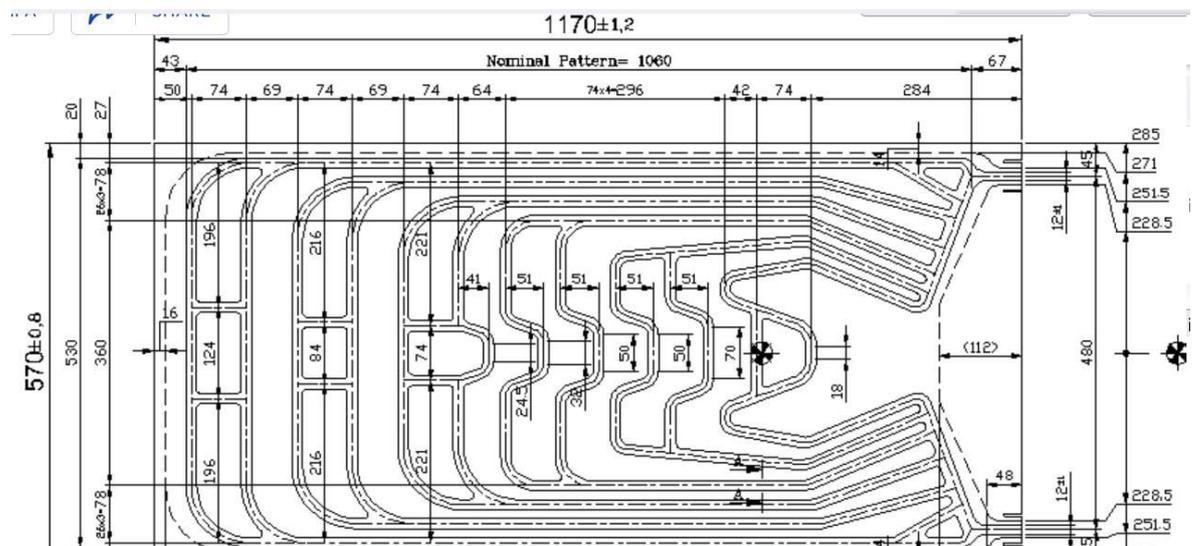


Figura 27. schema della piastra utilizzata



Figura 28. Immagine della piastra utilizzata

6.2. Dimensionamento superficie attraverso metodo delta T medio logaritmico

Da quanto appena visto è possibile supporre che la piastra non venga sfruttata interamente ma solo per circa un terzo.

Seguendo questa intuizione è possibile procedere con il seguente ragionamento, basato sul metodo del delta T medio logaritmico. Un'equazione che grazie al calcolo della differenza tra le temperature del fluido, determina il dimensionamento della superficie in uno scambiatore termico.

6.2.1. Determinazione del calore

Da tale metodo è possibile valutare il calore scambiato, come prodotto tra il coefficiente k , l'area interessata e il ΔT_{mL} .

$$\rightarrow q = k A \Delta T_{mL} = k A \left(\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\ln \frac{\Delta_2}{\Delta_1}} \right)$$

6.2.2. Potenza scambiata

Inoltre, è possibile calcolare la potenza scambiata dal lato acqua, grazie alle misure sperimentali effettuate sull'impianto (misura della portata dell'acqua e della differenza di temperatura dell'acqua tra ingresso ed uscita). Si stima un calore specifico dell'acqua costante pari a 4186 J/kg K.

$$P_{scambiata} = \dot{m} c_p \Delta T_{H_2O}$$

Nel nostro caso avevamo accennato di avere la temperatura dell'acqua in entrata intorno a 2°C, quella in uscita viene misurata ogni secondo tramite una termopila, mentre quella del PCM sarà ovviamente alla temperatura in cui congela e quindi 9°. Nella seguente Figura 29 si riassume l'attuale situazione.

Per un primo ragionamento, supponiamo di fissare la temperatura dell'acqua in uscita a 5 °C, che è pari al valore medio durante tutta la fase di carica (media 4.94 °C)

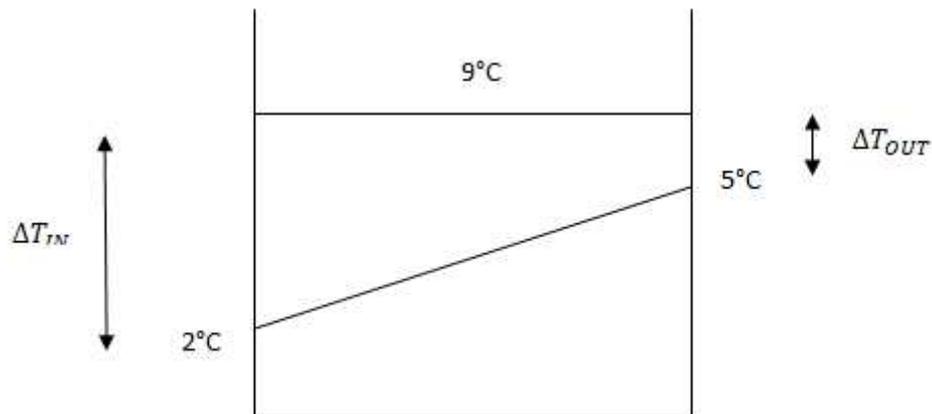


Figura 29. Schema temperatura entrata ed uscita

Quindi facendo dei semplici conti otteniamo:

$$\Delta T_{IN} = 9 - 2 = 7^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{OUT} = 9 - 5 = 4^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{mL} = \frac{7-4}{\ln \frac{7}{4}} = 5,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Inoltre, possiamo calcolare la potenza media scambiata come:

$$\rightarrow P_{scambiata} = \dot{m} c_p \Delta T_{H_2O} = \left(17 \frac{\text{L}}{\text{min}}\right) (4186) (5-2) = \frac{10}{60} (4186) (3) = 3558 \text{ W}$$

6.2.3. Determinazione del coefficiente k

Ora, consideriamo di utilizzare solo un terzo dell'area dell'accumulo come abbiamo visto dal precedente disegno. Ritornando alla formula iniziale, sappiamo di dover calcolare l'area interessata, ossia i primi due circuiti:

$$\text{perimetro} = 284+74+42+74+74 = 528 \text{ mm} = 0,548 \text{ m}$$

$$A = (0,57) (0,548) = 0,31236 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow k = \frac{P_{scambiata}}{2A\Delta T_{mL}} = \frac{3558}{3,373488} = 1055,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

nota: la potenza scambiata è stata divisa anche per il valore 2 in quanto passa attraverso due piastre, quindi passa attraverso un'area doppia nel caso di circuitazione di riferimento.

6.2.4. Potenza dell'intera zona

Ora invece, per confrontare, determiniamo la potenza considerando di utilizzare tutta l'area dell'accumulo:

$$A = (1170) (570) \text{ mm} = 0,6669 \text{ m}^2$$

$$2 A = 1,3338 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow P = k A \Delta T_{mL} = (620,42) (1,3338) (5,4) = 4468,6 \text{ W}$$

6.2.5. Osservazioni

Come facilmente ipotizzabile, a parità di condizioni la potenza scambiata con un'area minore è inferiore a quella scambiata con un'area maggiore.

Se ne deduce quindi che è sicuramente preferibile utilizzare tutta l'area a disposizione piuttosto che solo una parte e questa è un'ulteriore dimostrazione di quanto sia importante la configurazione della piastra utilizzata dal fornitore.

6.2.6. Grafici

Qui di seguito possiamo osservare i grafici ottenuti dalla prova dell'accumulo con le nostre piastre roll bond (figure 30 e 31). Queste figure dimostrano l'andamento della temperatura nel tempo e come dalla parte teorica sopra osservata si osserva che il ΔT_{mL} è intorno ai 5,4 °C.

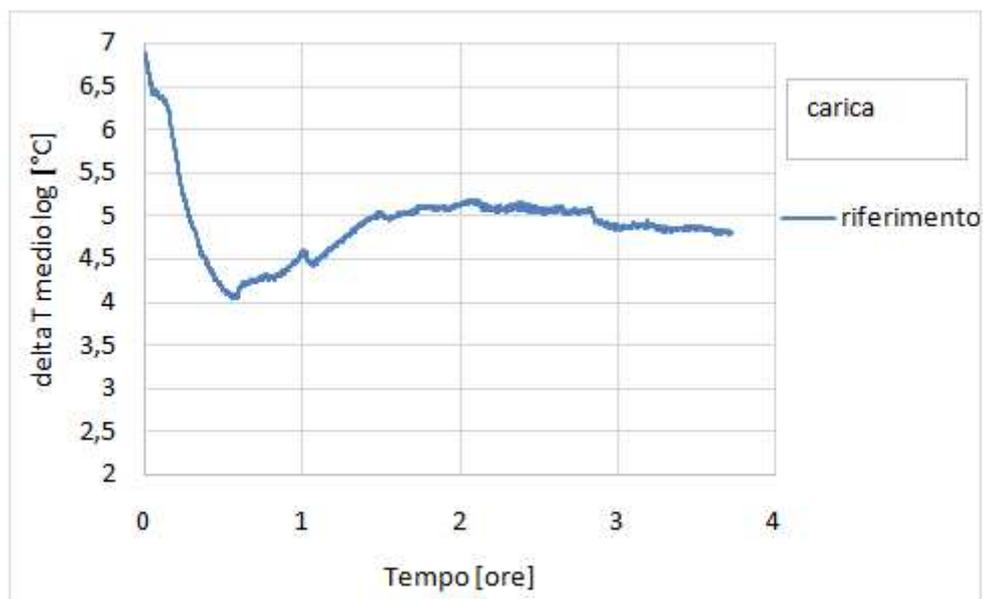


Figura 30. Grafico ΔT_{mL} nella fase di carica

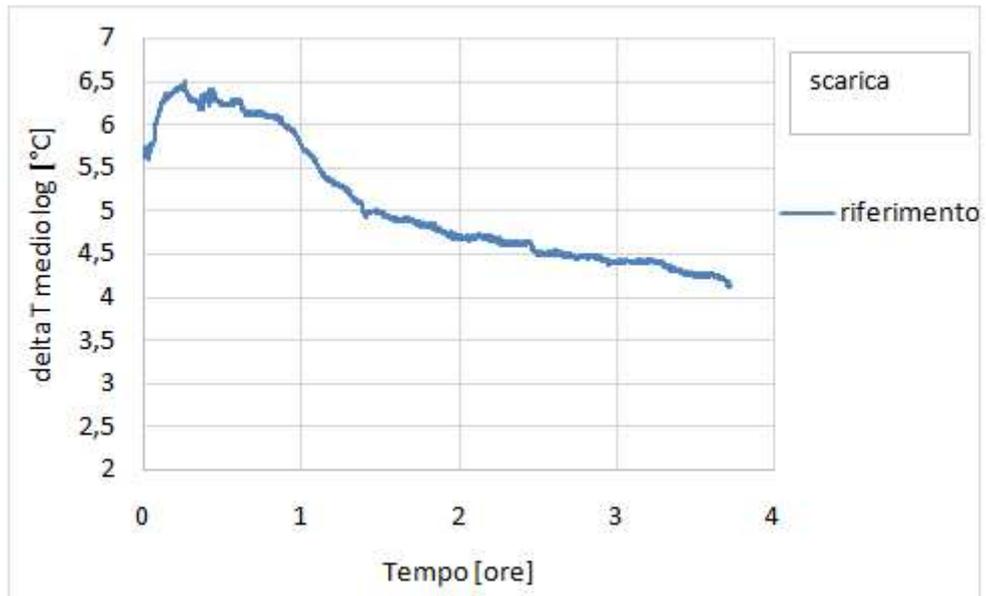


Figura 31. Grafico ΔT_{mL} nella fase di scarica

Con un ulteriore grafico, della figura 32, possiamo vedere anche l'andamento nel tempo a seconda dell'area in cui avviene lo scambio:

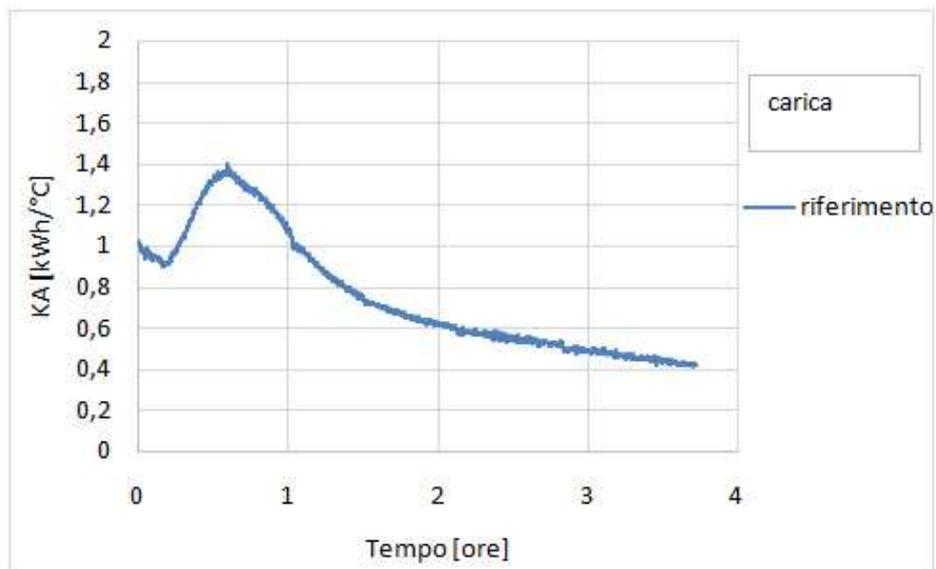


Figura 32. Grafico KA nella fase di carica di riferimento

6.3.Caso in parallelo

Analizzeremo ora i risultati ottenuti con la configurazione, anticipata precedentemente, del caso in parallelo.

Nella fase di carica e scarica (figure 33 e 34) si nota che l'energia accumulata al passare delle ore è minore rispetto al caso di riferimento, nonostante la prova venga terminata prima in quanto viene raggiunta in minor tempo la condizione decisa per il fine prova di temperatura media dell'accumulo pari a 7.5°C . Questo può essere collegato a leggeri spostamenti delle termocoppie nell'accumulo.

Inoltre, come osservabile dalla figura 34 sottostante, le temperature medie, sempre per il caso di riferimento e in parallelo, sono all'incirca uguali nella fase di carica. Piccole differenze possono essere rilevate a causa di leggere variazioni della posizione delle termocoppie all'interno dell'accumulo, che sono state spostate nel cambio di configurazione.

6.3.1. Energia accumulata e variazione di temperatura

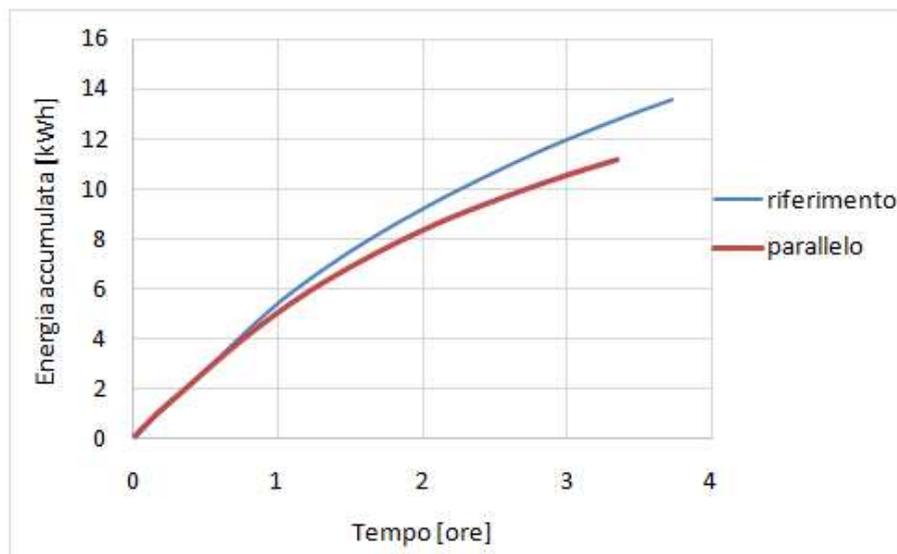


Figura 33. Grafico dell'energia accumulata al passare delle ore nella fase di carica

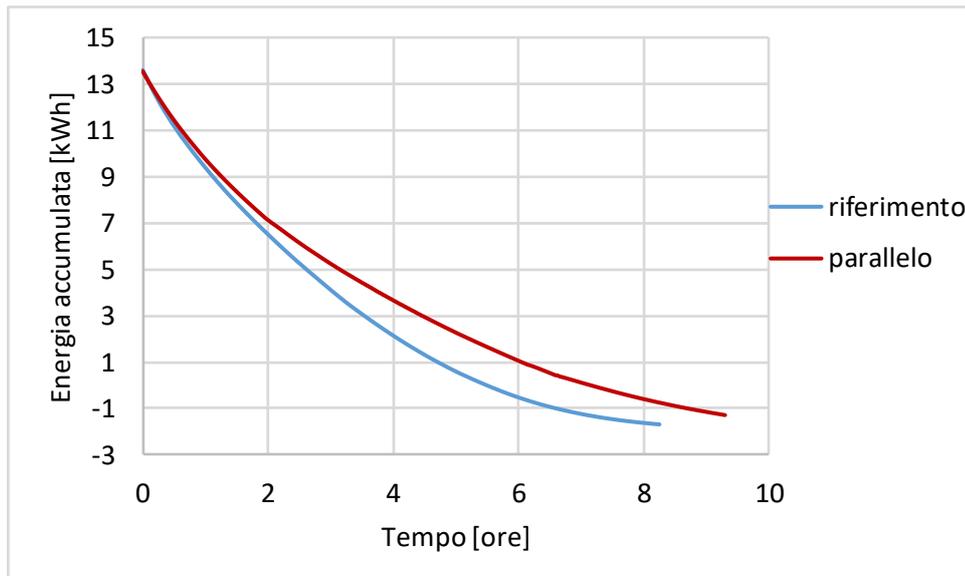


Figura 34. Grafico dell'energia accumulata al passare delle ore nella fase di scarica

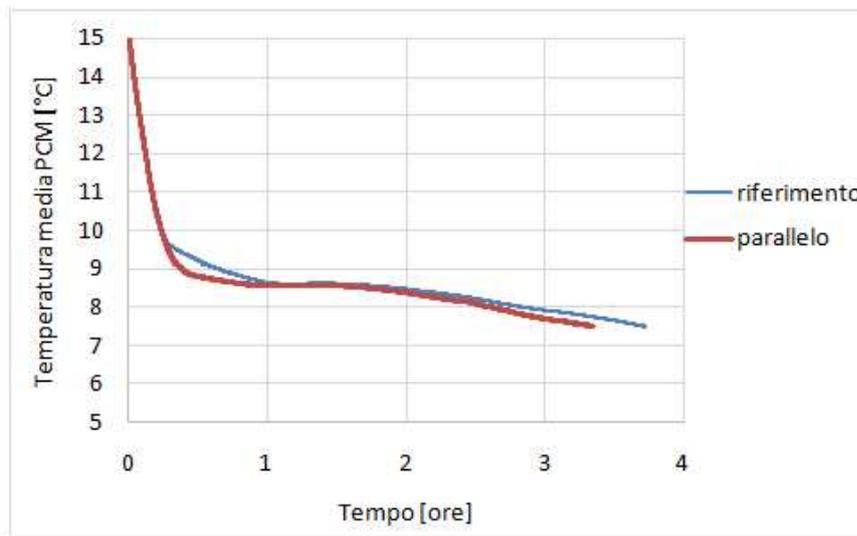


Figura 35. Grafico della temperatura media al passare delle ore nella fase di carica

Invece, dal grafico della temperatura media nella fase di scarica (figura 36), si nota come nel caso della configurazione in parallelo il sistema abbia bisogno di più tempo rispetto al caso iniziale per tornare alla temperatura decisa come criterio di fine prova.

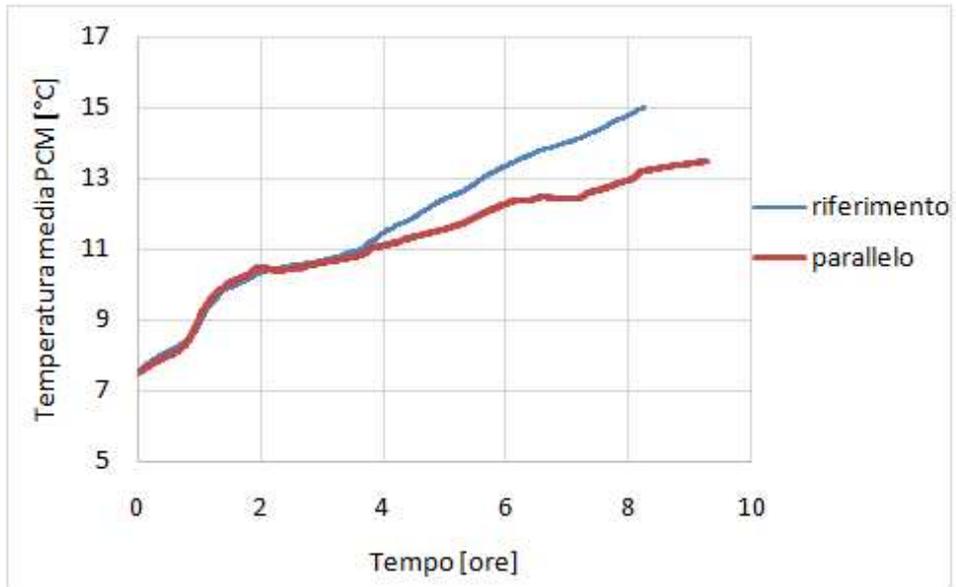


Figura 36. Grafico della temperatura media al passare delle ore nella fase di scarica

CAPITOLO 7

Conclusioni

Questa tesi è stata svolta all'interno del laboratorio di termotecnica del dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova.

L'obiettivo è stato quello di raccogliere ed analizzare dati sperimentali su un accumulo di energia termica latente basato sulla tecnologia dei PCM.

Tre diverse condizioni di circuitazione sono state confrontate per decretare la condizione migliore da suggerire al fornitore dell'accumulo.

7.1.Osservazioni dei risultati

Dopo aver analizzato i grafici, è possibile trarre le seguenti conclusioni: le differenze riscontrate sono state minime ma ogni piccolo cambiamento si è dimostrato coerente con ciò che ci si aspettava. I risultati ottenuti rispecchiano esattamente ciò che scientificamente sarebbe dovuto accadere.

Si è capito e dimostrato che la distribuzione della temperatura all'interno dell'accumulo PCM (CrodaTherm 9.5) non viene influenzata molto dalla circuitazione. Ossia, a prescindere dalle diverse configurazioni delle circuitazioni interne, la temperatura negli strati più alti sarà sempre più reattiva nelle variazioni, ossia inizierà e terminerà il cambiamento di stato sempre più facilmente rispetto agli strati inferiori. Ciò accade, come abbiamo spiegato e dimostrato, sia per la particolare configurazione della piastra proposta dal fornitore che per i moti convettivi che si instaurano nel liquido e tendono a portare verso l'alto il liquido più caldo.

Come ampiamente visto poi, però, la resistenza termica principale del sistema è data dal PCM e ogni modifica sulla circuitazione o condizione dell'acqua ha un peso molto minore che quindi non influisce sul risultato finale.

Da questa tesi se ne deduce che il cambio di circuitazione con la configurazione invertita o in parallelo non comporta miglioramenti e quindi che non risolve i problemi di lunghezza della scarica.

Il problema proposto inizialmente risulterà quindi un limite di questa sostanza e di questa geometria di accumulo e si dovrà lavorare per ridurre la resistenza lato PCM, con la consapevolezza di ciò che ora si conosce meglio, al fine di ottimizzarne l'utilizzo dell'impianto per farlo funzionare al meglio.

7.2.Consigli per il futuro

Per ridurre la resistenza termica lato PCM si consiglia di:

- valutare un materiale con una maggiore conducibilità termica;
- aumentare il numero di piastre di alluminio presenti all'interno dell'accumulo;
- ridurre la distanza tra le piastre presenti;
- inserire inserti metallici all'interno del PCM, in aggiunta alle piastre.

CAPITOLO 8

Bibliografia

Ingegno informazione tecnica e progettuale (<https://www.ingenio-web.it/>)
10 Aprile 2022

WeSchool (<https://m-library.weschool.com/>)

Materiali a cambiamento di fase, croda Energy technologies
(<https://www.crodaenergytechnologies.com/en-gb/functions/phase-change-materials>)

Materiale a cambiamento di fase (https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material)

Domenico FEO, Claudio Zilio, Simone Mancin, 2021, "Organic PCM Thermal Storage".

Calore latente e calore sensibile
(https://www.interfred.it/Scuola/Fisica_freddo/Clcs/Calore_latente_sensibile.asp)

