



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Implementazione sperimentale di
tecniche per incrementare le
performance di scambio termico in
sistemi di accumulo del freddo con
materiali a cambiamento di fase

Luigi Mongibello

Report RdS/PTR2020/147

IMPLEMENTAZIONE SPERIMENTALE DI TECNICHE PER INCREMENTARE LE PERFORMANCE DI SCAMBIO TERMICO IN SISTEMI DI ACCUMULO DEL FREDDO CON MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

Luigi Mongibello (ENEA)

Con il contributo di: M. Caliano, C. Cancro, G. Ciniglio, A. D'Angelo, C. Diletto, G. Fiorenza, D. Mele, A. Ricca

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *4 - Reti energetiche integrate*

Linea di attività: *LA4.23 - Incremento delle performance di scambio termico di sistemi di accumulo del freddo basati su PCM e acqua e PCM (2 di 3)*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package (LA4.16-LA4.33): Luigi Mongibello

Indice

SOMMARIO.....	4
1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	5
2 IMPIANTI E APPARECCHIATURE UTILIZZATE PER LE ANALISI SPERIMENTALI.....	5
2.1 IMPIANTO PROVA ACCUMULO FREDDO	5
2.1.1 <i>Serbatoio di accumulo del freddo con PCM e mantello in plexiglass</i>	8
2.1.2 <i>Serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato</i>	9
2.2 ALTRE APPARECCHIATURE	10
3 TEST SPERIMENTALI CON PCM NON INCAPSULATO	12
3.1 MISURE DI TEMPERATURA NEL SERBATOIO DI ACCUMULO DEL FREDDO CON MANTELLO IN PLEXIGLASS.....	13
3.2 MISURA DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL PCM NEL CASO DI AGGIUNTA DI GRAFITE	15
3.2.1 <i>Misura della conducibilità del PCM senza grafite</i>	15
3.2.2 <i>Misura della conducibilità del PCM con grafite</i>	16
4 TEST SPERIMENTALI CON IL PCM MICRO-INCAPSULATO.....	19
4.1 TEST IN CAMERA TERMICA CON UN MODULO DI ACCUMULO DEL FREDDO IN SCALA RIDOTTA	20
4.2 MISURE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA	21
4.2.1 <i>Misura della conducibilità del PCM micro-incapsulato senza grafite</i>	21
4.2.2 <i>Misura della conducibilità del PCM micro-incapsulato con l'aggiunta di grafite</i>	22
5 CONCLUSIONI	24
6 BIBLIOGRAFIA.....	24

Sommario

Nel presente rapporto tecnico sono riportate le attività svolte e i risultati ottenuti durante il secondo anno del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, per quanto concerne l'identificazione di soluzioni tecniche finalizzate a incrementare le performance di scambio termico dei due prototipi di sistemi di accumulo del freddo con materiale a cambiamento di fase (PCM) realizzati presso il laboratorio LPSAT del Centro Ricerche Enea di Portici nel corso del precedente Piano Triennale di Realizzazione 2015-2017 della Ricerca di Sistema Elettrico. Queste attività seguono quelle svolte nella prima annualità del presente piano triennale, in cui sono state individuate le tecniche implementabili per i due suddetti prototipi, ovvero quello costituito da un serbatoio in plexiglass riempito con PCM, e quello costituito da un serbatoio isolato per acqua di tipo convenzionale con acqua e capsule di PCM come materiale di accumulo.

Sono state testate sperimentalmente due soluzioni tecniche per incrementare lo scambio termico nel PCM. La prima tecnica consiste nell'aggiunta di un additivo al PCM, ed è stata implementata su un PCM commerciale presente presso il laboratorio LPSAT, al fine di caratterizzarne gli effetti positivi sui meccanismi di scambio termico conduttivo, mentre la seconda consiste nell'impiego di PCM micro-incapsulato, con o senza l'aggiunta di un additivo. Per ognuna delle suddette tecniche, è stato selezionato un caso base che rappresenterà il caso di riferimento per lo studio di ottimizzazione che sarà svolto nella terza annualità.

Quanto alla struttura del presente report, nel capitolo 1 è riportata in modo dettagliato la suddivisione delle attività svolte nella seconda annualità. Nel capitolo 2 sono descritti gli impianti e la strumentazione utilizzata per le analisi sperimentali. Nei capitoli 3 e 4 sono riportati e discussi, rispettivamente, i risultati dei test sperimentali nel caso di aggiunta di additivi per migliorare lo scambio termico nel PCM, e quelli ottenuti utilizzando un PCM micro-incapsulato. Infine, nel capitolo 5 sono riportate le principali conclusioni.

1 Descrizione delle attività svolte

In questo documento è descritta l'attività svolta per caratterizzare mediante test sperimentali le soluzioni tecniche individuate per incrementare le performance di scambio termico dei due prototipi realizzati presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici, ovvero il sistema di accumulo del freddo con soltanto PCM come materiale di accumulo, e il sistema con accumulo del freddo ad acqua e PCM. L'intera attività si può dividere in due sub-attività principali, condotte in parallelo.

Nella prima sub-attività sono state realizzate due prove sperimentali con il prototipo per l'accumulo del freddo con soltanto PCM come materiale di accumulo, e dei test per identificare gli effetti sulla conducibilità termica dovuti all'aggiunta di polvere di grafite al PCM del suddetto prototipo. In particolare, nella prima parte sono state realizzate due prove sperimentali utilizzando il prototipo con PCM per validare sperimentalmente il tool sviluppato dal partner UNINA, nell'ambito della linea di attività LA 4.28, per simulare il comportamento termo-fluidodinamico del PCM. Successivamente, sono state effettuate delle prove sperimentali per caratterizzare in termini di scambio termico conduttivo il comportamento del PCM del prototipo nel caso di aggiunta di grafite in fiocchi mesh 100, considerando differenti percentuali in peso. Tali risultati sono stati utilizzati dal partner POLITO, nell'ambito della LA 4.30, per la messa a punto e la validazione di un modello per il calcolo delle proprietà di scambio termico del PCM in funzione della quantità di additivo.

La seconda sub-attività è quella relativa all'implementazione di una soluzione basata sull'impiego di PCM micro-incapsulato, con e senza la presenza di grafite per aumentare la conducibilità termica, finalizzata al miglioramento delle prestazioni del sistema di accumulo termico ad acqua e PCM del laboratorio LPSAT del CR Enea Portici. Nella prima parte è stata realizzata una prova sperimentale in una camera termica utilizzando una unità di accumulo di energia refrigerante rappresentata da un contenitore cilindrico di alluminio con all'interno PCM micro-incapsulato, avente una capacità di 3 litri circa, per validare sperimentalmente il tool di simulazione sviluppato dal partner UNINA per simulare il comportamento termo-fluidodinamico del PCM micro-incapsulato. Successivamente, sono state effettuate delle prove sperimentali per caratterizzare in termini di scambio termico conduttivo il comportamento del PCM micro-incapsulato nel caso di aggiunta di polvere di grafite, considerando differenti percentuali in peso.

2 Impianti e apparecchiature utilizzate per le analisi sperimentali

Nella parte iniziale di questo capitolo è descritto l'impianto utilizzato per realizzare i test sui prototipi di serbatoi di accumulo del freddo in scala 1:1 per uso residenziale basati sull'impiego di PCM, mentre successivamente sono descritte sinteticamente le apparecchiature utilizzate per misurare la conducibilità termica dei PCM, con o senza additivi, e per sottoporre a cicli termici prototipi di sistemi di accumulo termico con PCM di piccola scala.

2.1 Impianto prova accumulo freddo

La Figura 1 e la Figura 2 mostrano rispettivamente il layout e un'immagine dell'impianto realizzato presso il laboratorio LPSAT del Centro Ricerche ENEA Portici. I componenti principali dell'impianto sono il chiller, utilizzato per simulare la produzione del refrigeratore, i due scambiatori di calore in serie per simulare i carichi dell'utenza, ed il serbatoio di accumulo del freddo.

Il chiller, visibile in Figura 2, è di tipo elettrico a compressione di vapore. Si tratta, in particolare, del modello ThermoFlex24000 della Thermo Scientific, caratterizzato da un range di regolazione della temperatura del fluido di processo che va da 5°C a 40°C, con una potenza massima di refrigerazione, a 50 Hz

e con temperatura in uscita di 5°C, di 15 kW. Esso può operare con valori della temperatura ambiente nel range che va da 10°C a 40°C, ed è dotato di una pompa con prevalenza massima a 50 Hz di circa 4 bar. L'accuratezza con cui viene regolata la temperatura del fluido di processo è di ±0.1°C.

La Figura 3 mostra una foto degli scambiatori di calore utilizzati per simulare sperimentalmente i carichi termici dell'utenza relativi al condizionamento dell'aria nel periodo estivo. Entrambi sono a tubi alettati, con tubi in rame e alette in alluminio, con una superficie di scambio termico totale di 63,5 m². Ciascun scambiatore è dotato di 2 ventole con motori trifase da 100 W ognuno, con velocità di rotazione controllabile tramite un inverter, e insieme possono trasferire al fluido termovettore fino a 25 kW. Le misure di temperatura nel circuito dell'impianto sono tutte realizzate mediante termocoppie di tipo T classe 1, caratterizzate da un'accuratezza di ±0,5°C, mentre le misure di portata sono effettuate con flussometri magnetici "Comac Flow 38 mass flow meter", caratterizzati da un'accuratezza dello 0.2% del valore misurato, fino a un minimo di 0.05 litri/s.

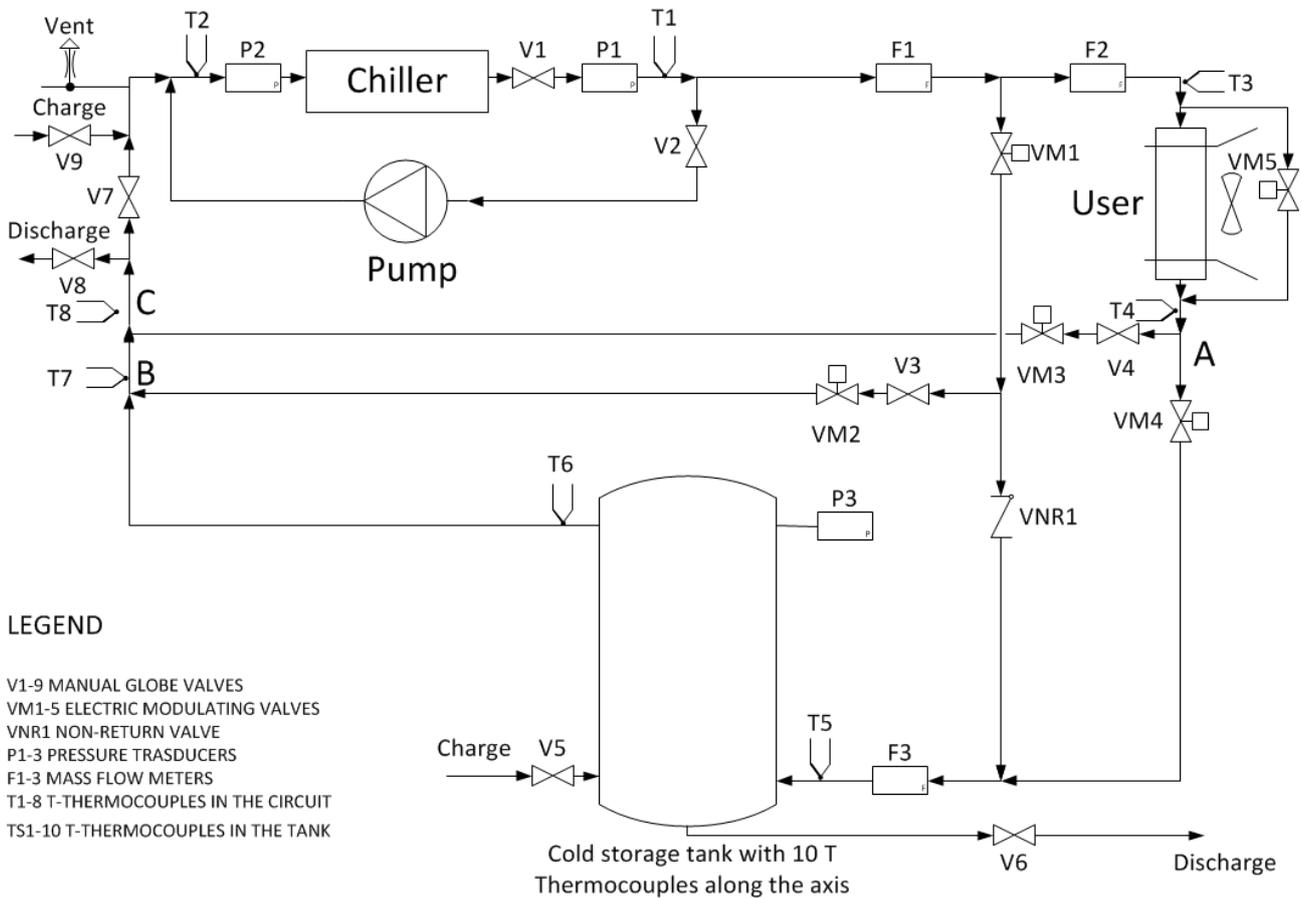


Figura 1. Layout dell'impianto prova accumulo freddo.



Figura 2. Impianto prova accumulo freddo presso il CR Enea Portici.



Figura 3. Scambiatori di calore utilizzati per simulare i carichi di refrigerazione.

Nelle seguenti due sottosezioni sono descritti brevemente i sistemi di accumulo realizzati nell'ambito dello scorso piano triennale della Ricerca di Sistema (PAR 15-17), ovvero il serbatoio con PCM e mantello in plexiglass e il serbatoio con acqua e PCM macro-incapsulato, che sono parte integrante del presente impianto, e che rappresentano i due sistemi di accumulo del freddo di riferimento per la validazione sperimentale dei modelli per le simulazioni numeriche sviluppati in questa annualità. Nello specifico, in quest'annualità sono state fatti dei test sperimentali con il serbatoio con PCM e mantello in plexiglass finalizzati alla validazione dei risultati numerici ottenuti utilizzando il modello 3D sviluppato dal partner UNINA. Mentre, per quanto riguarda la validazione sperimentale del modello sviluppato per simulare il comportamento del PCM micro-incapsulato, questa è stata effettuata utilizzando una "unità" di accumulo del freddo di piccola scala, descritta nella sezione 4.1. Tale modello, una volta validato, sarà integrato nell'applicativo sviluppato dal partner UNINA nel corso dello scorso piano triennale per simulare il serbatoio con acqua e PCM macro-incapsulato, al fine di valutare il comportamento del serbatoio nel caso di utilizzo di PCM micro-incapsulato in sostituzione di quello macro-incapsulato.

2.1.1 Serbatoio di accumulo del freddo con PCM e mantello in plexiglass

La Figura 4 mostra il serbatoio con mantello in plexiglass, con e senza isolamento termico, realizzato nello scorso piano triennale per effettuare test utilizzando soltanto PCM come materiale di accumulo. Il serbatoio è composto dai seguenti componenti principali: 1. fascio tubiero costituito da 66 tubi da 3/8" schedula 40s, di acciaio austenitico AISI 316, distribuiti secondo una maglia triangolare; 2. plenum inferiore in acciaio AISI 316, con un tubo da 3/4", filettato esternamente, saldato tangenzialmente al mantello del plenum per l'ingresso del fluido termovettore (acqua a 1,5 bar); 3. plenum superiore in acciaio AISI 316, anch'esso con un tubo da 3/4", filettato esternamente, saldato tangenzialmente al mantello del plenum per l'uscita del fluido termovettore, e da una valvola di sfiato 1/2" in testa al plenum; 4. mantello in plexiglass trasparente, con diametro interno 500 mm e spessore 5 mm, per il contenimento del PCM.

Sul mantello sono calettate 25 termocoppie di tipo T classe 1 (5 termocoppie su 5 piani a quote differenti) mediante raccordi a compressione, ognuna delle quali con la giunzione calda posizionata in ben preciso punto all'interno del materiale di accumulo. I piani di misura distano 0,195 m l'uno dall'altro, con il primo a partire dal basso a 0,195 m dalla base del mantello, e su ogni piano di misura, una sonda misura la temperatura sull'asse del serbatoio mentre le altre quattro misurano le temperature ai semi-raggi, con i punti di misura posizionati a formare una croce. Il mantello è anche dotato di una valvola su tubo dritto da 1/2" per il caricamento/scaricamento del materiale di accumulo in fase liquida, posizionata nella parte bassa del mantello. L'altezza del mantello è pari a 1,350 m ed è tale da ottenere un'apertura verso l'ambiente esterno tra il bordo superiore del mantello e il plenum superiore. In altre parole, il mantello non tocca la base del plenum superiore, per cui il pelo libero del PCM si trova a pressione ambiente.



Figura 4. Serbatoio di accumulo con PCM e mantello in plexiglass con e senza isolamento termico.

2.1.2 Serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato

La Figura 5 mostra una foto del serbatoio cilindrico da 400 litri utilizzato per l'accumulo del freddo con acqua e PCM macro-incapsulato come materiale di accumulo, mentre la Figura 6 mostra una delle "macro-capsule" di PCM, che in pratica consiste in una bottiglia di alluminio, per il contenimento del PCM. Il serbatoio è provvisto di un isolamento termico realizzato con uno strato di 5 cm di poliuretano espanso sulle pareti esterne, ed è equipaggiato con 9 termocoppie (tipo T classe 1), utilizzate per misurare la temperatura dell'acqua lungo l'asse del serbatoio, ed una flangia posta in testa al serbatoio per l'inserimento delle bottiglie con il PCM.



Figura 5. Serbatoio da 400 litri con 120 bottiglie di PCM.



Figura 6. Bottiglia di alluminio per il contenimento del PCM.

2.2 Altre apparecchiature

La Figura 7 mostra il sensore TCi della C-THERM utilizzato per misurare la conducibilità termica dei PCM con e senza la presenza di additivi. La tecnica di misura utilizzata dal sensore TCi è la MTPS (Modified Transient Plane Source), e i coefficienti misurati sono la conducibilità termica e l'effusività termica. La precisione del sensore è inferiore al 1%, mentre l'accuratezza è inferiore al 5%.



Figura 7. Sensore TCi C-THERM per la misura della conducibilità termica.

La Figura 8 mostra l'accessorio del sensore TCi per misurare la conducibilità termica di materiali in fase liquida, o nel caso di polveri, montato in testa al sensore. Tale accessorio è stato impiegato in tutte le misure effettuate poiché i PCM considerati per l'accumulo del freddo hanno la temperatura di transizione liquido-solido pari a 15°C, e pertanto alla temperatura ambiente (interna) si trovano in fase liquida. È importante evidenziare che, essendo il sensore di dimensioni relativamente piccole, la quantità di materiale liquido che il sensore può processare non può eccedere i 2 ml, il che implica che occorre utilizzare delle bilance estremamente precise per misurare piccole frazioni di additivo nel PCM. Nel presente caso, il peso del PCM è stato misurato utilizzando la bilancia RADWAG 220/C/2 visibile in Figura 9, con un errore di 0,02 g, mentre il peso degli additivi è stato misurato utilizzando la bilancia dell'analizzatore termico simultaneo STA 6000 della Perkin Elmer, visibile in Figura 10, con una precisione inferiore allo 0,5% e un'accuratezza inferiore al 2%. Infine, la Figura 11 mostra la camera termica Tenney TPS Junior, che permette di operare con temperature che vanno da -68°C a 180°C, e che è stata impiegata sia per fare misure di conducibilità termica in temperatura, che per sottoporre a un ciclo termico l'unità di accumulo del freddo con PCM micro-incapsulato di piccola scala descritta nella sezione 4.1.



Figura 8. Sensore TCi C-THERM con accessorio per la misura della conducibilità di liquidi o polveri.

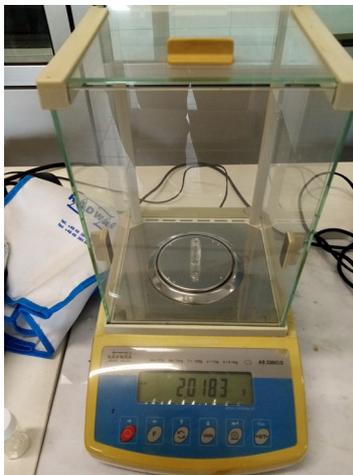


Figura 9. Bilancia RADWAG 220/C/2.

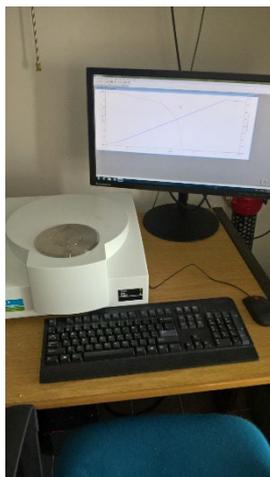


Figura 10. STA 6000 Perkin Elmer.



Figura 11. Camera termica Tenney TPS Junior.

3 Test sperimentali con PCM non incapsulato

Questo capitolo include tutte le attività sperimentali finalizzate alla caratterizzazione delle performance in termini di scambio termico conduttivo del PCM presente all'interno del serbatoio di accumulo del freddo con soltanto PCM come materiale di accumulo, ovvero il serbatoio con mantello in plexiglass, nel caso di aggiunta di additivi. Relativamente al PCM presente nel serbatoio, questo è il PCM commerciale PT15 della ditta statunitense PureTemp LLC, di cui si riportano le proprietà in Tabella 1.

Tabella 1. Proprietà termo-fisiche del PCM.

Proprietà	Valore
Temperatura di fusione (°C)	15
Calore latente (kJ kg ⁻¹)	182
Conducibilità termica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	
Solido	0,25
Liquido	0,15
Densità (kg m ⁻³)	
Solido	950
Liquido	860
Calore specifico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	
Solido	2250
Liquido	2560

Il calore latente e i calori specifici del PCM in Tabella 1 sono quelli riportati sulla scheda tecnica del materiale fornita dalla ditta fornitrice. Tali valori sono stati confermati dalle misure effettuate utilizzando l'analizzatore STA 6000.

Nella prima parte del capitolo sono riportati i risultati di due test sperimentali realizzati utilizzando l'impianto prova accumulo freddo e il serbatoio con mantello in plexiglass, uno con il mantello isolato termicamente e l'altro senza isolamento. In particolare, sono mostrati profili di temperatura nel PCM misurati utilizzando 17 delle 25 termocoppie montate sul mantello. Questi profili di temperatura, come già riportato in precedenza, sono stati utilizzati dal partner UNINA, nell'ambito della linea di attività LA 4.28, per validare

mediante confronto con risultati sperimentali il modello 3D non stazionario per la simulazione numerica del serbatoio di accumulo del freddo con soltanto PCM.

Nella restante parte del capitolo sono mostrati i risultati sperimentali relativi alle misure della conducibilità termica PCM nel caso di aggiunta di additivi, e in particolare di grafite in fiocchi mesh 100 (dimensione caratteristica 100 μm). Questi risultati sperimentali sono stati utilizzati dal gruppo di lavoro del POLITO, nell'ambito della linea di attività LA 4.30, per validare il modello sviluppato per calcolare la conducibilità termica in funzione della percentuale in peso dell'additivo.

3.1 Misure di temperatura nel serbatoio di accumulo del freddo con mantello in plexiglass

La Figura 12 e la Figura 13 mostrano rispettivamente l'andamento temporale nell'arco di 24 ore delle temperature del PCM relative alla colonna di termocoppie assiale e a una delle colonne verticali di termocoppie passante per i semi-raggi, a varie altezze a partire dalla base del serbatoio, nel caso senza isolamento termico del mantello in plexiglass. Le altre tre colonne di termocoppie ai semi-raggi danno profili di temperatura sovrapponibili a quelli di Figura 13, a dimostrazione della distribuzione uniforme del fluido termovettore nel fascio tubiero, che pertanto non sono riportati. Si precisa che questa prova senza isolamento termico, così come tutte le altre prove realizzate senza isolare termicamente il serbatoio, è stata realizzata al fine di poter visionare, grazie al mantello in plexiglass trasparente, l'evoluzione temporale del passaggio di fase del PCM nel serbatoio.

In entrambe le figure sono riportati anche l'andamento temporale della temperatura dell'acqua in ingresso al serbatoio (curva gialla), e quello della temperatura dell'acqua in uscita (curva ciana). Con riferimento al layout dell'impianto prova accumulo freddo di Figura 1, la portata massica dell'acqua è regolata tramite il ramo di by-pass del circuito dove è presente la pompa (PUMP), mentre la temperatura all'ingresso del serbatoio dipende dalla regolazione della temperatura di uscita dagli scambiatori di calore che simulano sperimentalmente il carico termico (USER), ovvero la T4, che è regolata tramite la valvola di modulazione VM5 montata sul ramo di by-pass. Non sono state effettuate parzializzazioni della portata, per cui la portata che attraversa il serbatoio è la stessa che attraversa il chiller e gli scambiatori di calore che simulano l'utenza. Il set-point della temperatura dell'acqua all'uscita del chiller è 7°C, quello della portata massica è costante nelle 24 ore e pari a 0.075 kg/s, mentre il set-point della T4 varia di ora in ora in funzione del carico termico simulato dagli scambiatori di calore.

Relativamente al carico termico, questo corrisponde al profilo di carico giornaliero, su base oraria, dell'utenza domestica rappresentata da una casa monofamiliare, caratterizzata da una superficie utile di 150 m², un fattore di forma di 0.9 m⁻¹, e situata nella zona climatica E. Il profilo di carico giornaliero per il condizionamento ambientale estivo è stato calcolato utilizzando come riferimento il lavoro di Mongibello et al. [1], ed è stato simulato sperimentalmente in scala 1:1 a mezzo degli scambiatori di calore mostrati in Figura 3. Le evidenti oscillazioni della temperatura all'ingresso del serbatoio sono dovute all'algoritmo PID implementato per regolare la T4. Tale controllo è stato successivamente perfezionato, come si può evincere dalla Figura 14 e dalla Figura 15 che si riferiscono alla prova con isolamento termico.

Infine, sia nel caso con isolamento termico che nel caso senza, i profili di temperatura si riferiscono al primo giorno di simulazione sperimentale, e non corrispondono ai profili di temperatura che si ottengono dopo che si sono stabilite le condizioni di periodicità, che in entrambi i casi si ottengono a partire dal terzo giorno di simulazione. Questa scelta è legata alle condizioni iniziali relative allo stato fisico del PCM da assegnare al tool di simulazione. Invero, il PCM si trova inizialmente alla temperatura ambiente del laboratorio indoor, e quindi tutto allo stato liquido, e in base a ispezioni visive si è constatato che l'istante iniziale è l'unico istante in cui è noto lo stato del PCM nell'intero dominio computazionale. Questo perché nel

corso delle prove sperimentali il serbatoio non raggiunge mai la condizione di completa solidificazione del PCM, né quella di completa fusione.

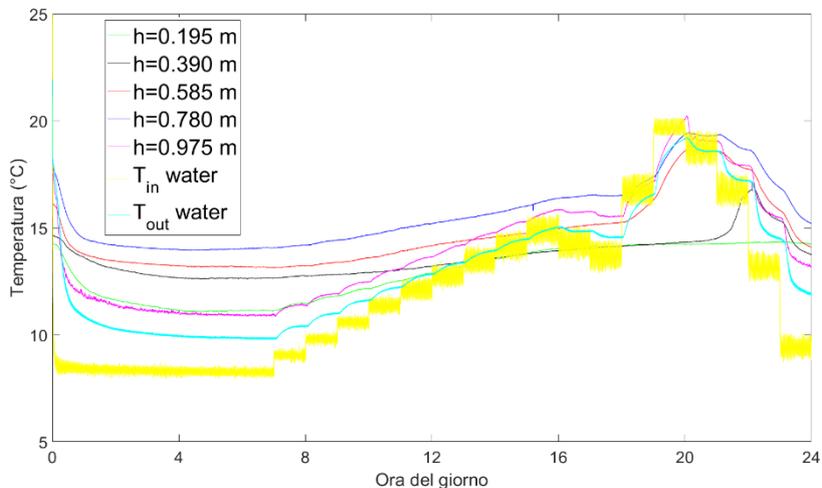


Figura 12. Temperature termocoppie colonna assiale – caso senza isolamento termico.

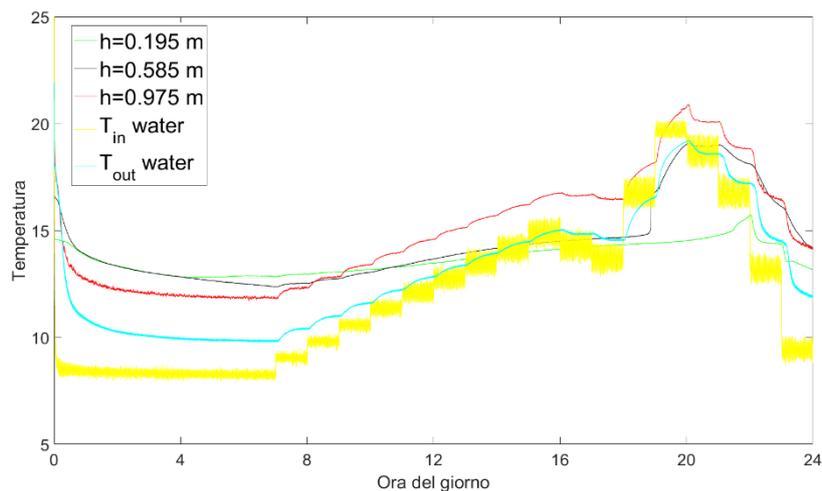


Figura 13. Temperature termocoppie colonna verticale dei semi-raggi – caso senza isolamento termico.

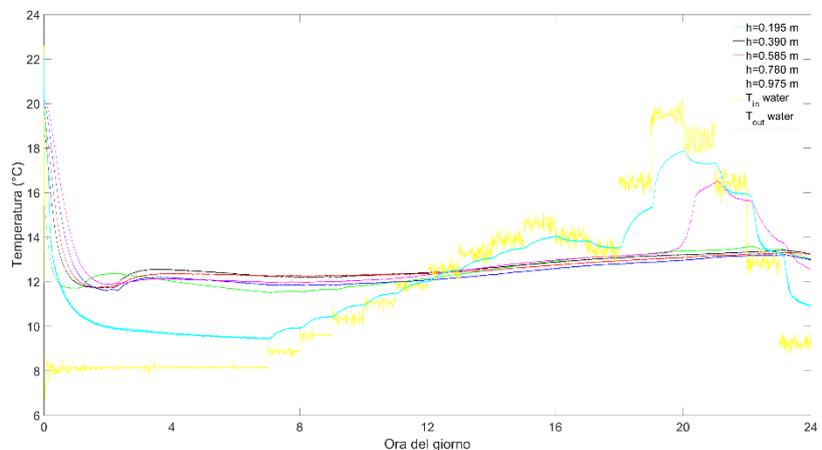


Figura 14. Temperature termocoppie colonna assiale – caso con isolamento termico.

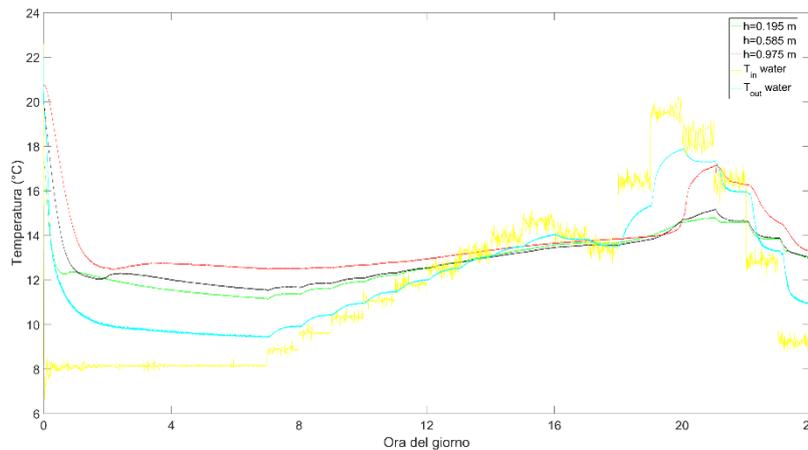


Figura 15. Temperature termocoppie colonna verticale dei semi-raggi – caso con isolamento termico.

3.2 Misura della conducibilità termica del PCM nel caso di aggiunta di grafite

Nel corso della seconda annualità è stata effettuata a più riprese una serie di misure di conducibilità del PCM con l'aggiunta di diverse quantità di grafite in fiocchi mesh 100, partendo ovviamente dal caso senza grafite, con l'obiettivo di costruire una curva di fitting che rappresentasse la conducibilità termica del PCM in funzione della percentuale in peso di grafite, e di selezionare un caso base, ovvero un valore della percentuale di grafite da utilizzare come riferimento per le attività di ottimizzazione che saranno svolte nel corso della terza annualità.

3.2.1 Misura della conducibilità del PCM senza grafite

La Figura 16 mostra il sensore con all'interno 1.27 g di PCM, e la tabella di output del software di gestione del sensore. Come già precisato in precedenza, il peso del PCM è misurato utilizzando la bilancia RADWAG. In particolare, tutte le pesate del PCM sono state realizzate inserendo il PCM in fase liquida in un flaconcino da 2 ml, e sono state ricavate per differenza tra il peso lordo del flaconcino con il PCM e la tara misurata a valle del versamento del PCM nel volume di test del sensore. In maniera del tutto analoga sono state effettuate le pesate della grafite, utilizzando però la bilancia e il crogiolo dell'analizzatore STA 6000. Nella Figura 16 si può notare che il valore misurato della conducibilità termica del PT15 in fase liquida, riportato nella colonna E, si aggira intorno a 0.155 W/m/K, e pertanto è in accordo con quello della scheda tecnica del materiale in Tabella 1.

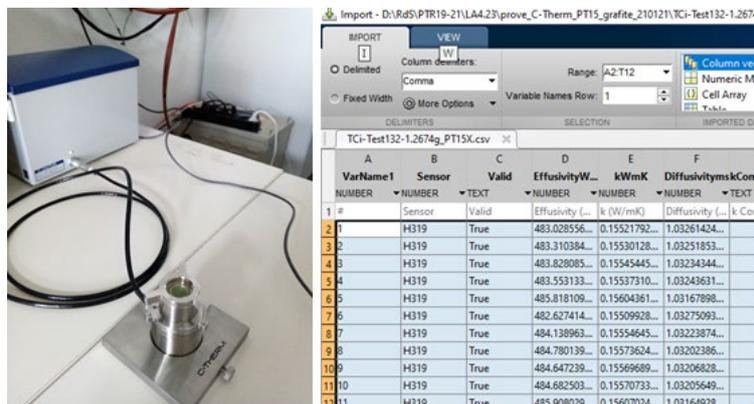


Figura 16. Sensore TCi con PT15 senza grafite e tabella di output del software di gestione del sensore.

La misura della conducibilità del PCM nello stato solido è stata effettuata utilizzando la camera termica Tenney TPS Junior. La Figura 17 mostra l'andamento temporale della temperatura ambiente nella camera termica, mentre la Figura 18 mostra quello della conducibilità termica del PT15. La parte centrale della curva in Figura 18 è relativa agli istanti in cui il PCM solidifica, e non rappresenta valori reali della conducibilità. Questo perché il sensore opera attraverso l'applicazione di un flusso termico al campione, ed effettua la misura della conducibilità in funzione della variazione della temperatura del campione da misurare, supponendo che il campione accumuli calore sotto forma di energia sensibile, e non come calore latente come nel caso del PCM in quel lasso temporale. I valori misurati della conducibilità del PCM in fase liquida e solida sono rispettivamente 0.155 e 0.247 W/m/K. Anche in questo caso, i valori misurati della conducibilità sono in accordo con quelli della scheda tecnica riportati in Tabella 1.

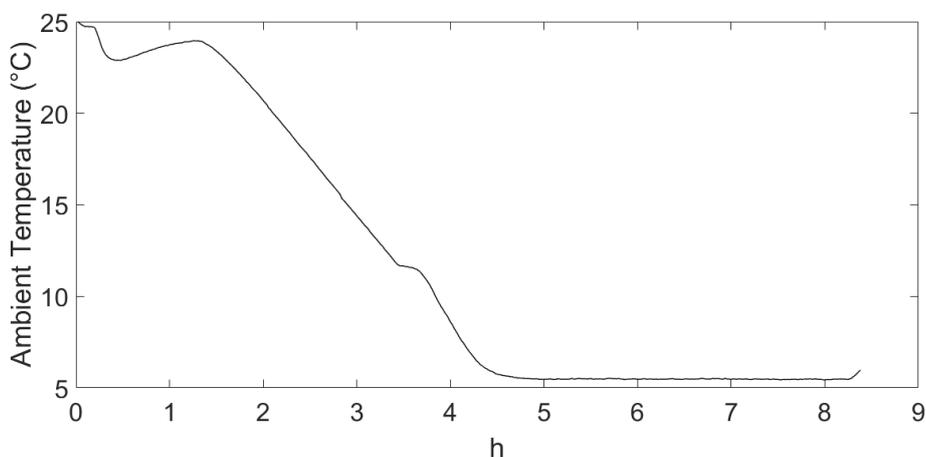


Figura 17. Temperatura ambiente all'interno della camera termica.

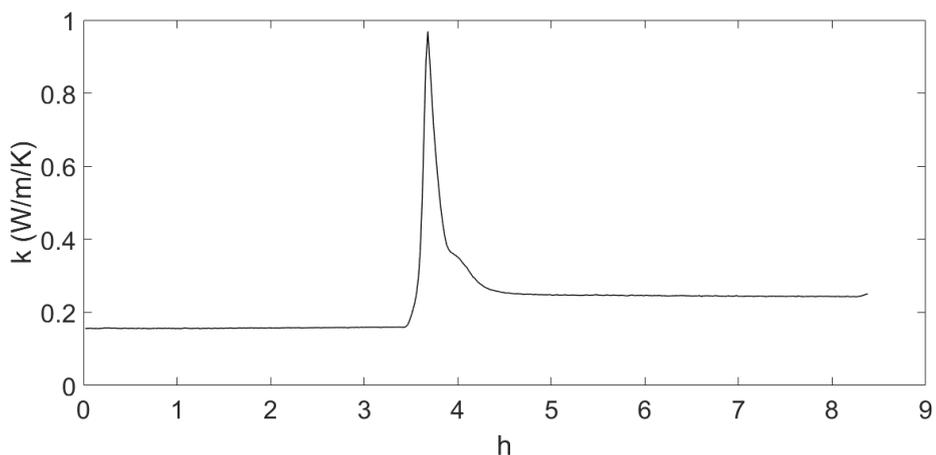


Figura 18. Andamento temporale della conducibilità del PT15 in camera termica.

3.2.2 Misura della conducibilità del PCM con grafite

La Figura 19 mostra il sensore TCi in tre diversi test realizzati con la stessa quantità di PT15, allo stato liquido, e con differenti quantità di grafite. In totale, sono stati effettuati nove test, incluso quello senza grafite, i cui risultati sono mostrati in Figura 20 assieme alla curva di fitting conducibilità termica-percentuale

di grafite in peso, per basse percentuali di grafite, ricavata mediante un fitting con curva di tipo lineare. Si può notare come la conducibilità termica raddoppi con una percentuale in peso di grafite del 10% circa.

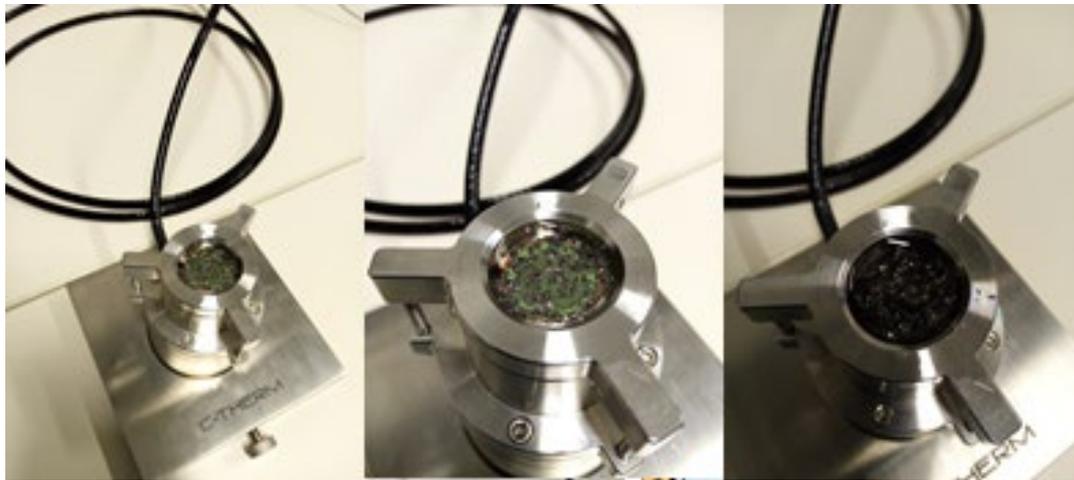


Figura 19. Sensore TCI con PT15 e varie percentuali in peso di grafite.

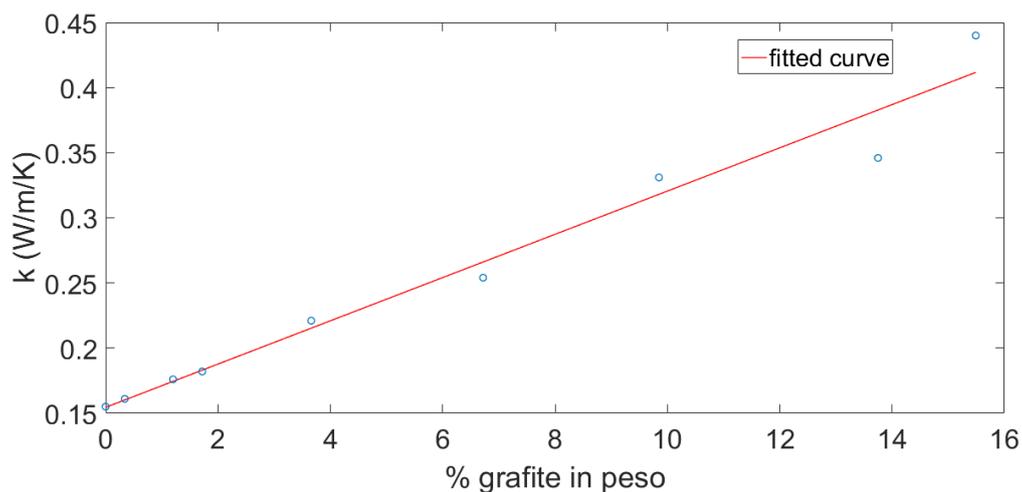


Figura 20. Curva di fitting conducibilità termica-percentuale in peso di grafite.

Come nel caso senza grafite, a valle delle misure di conducibilità realizzate con il PCM in fase liquida, si è proceduto con l'utilizzo della camera termica per misurare la conducibilità termica del PCM in fase solida, con varie percentuali di grafite in fiocchi mesh 100. La Figura 21 mostra l'andamento temporale della temperatura ambiente nella camera termica relativo a uno dei suddetti test, mentre la Figura 22 mostra tre immagini del sensore subito dopo il test in camera termica, con il PCM ancora in fase solida. Con riferimento alla Figura 22, l'immagine a sinistra mostra l'intero sensore, mentre quella al centro e quella a destra mostrano soltanto l'accessorio del sensore TCI per effettuare test con liquidi o polveri, a cui è rimasto attaccato il PCM solidificato. In particolare, l'immagine al centro mostra la parte superiore del volume di test, mentre quella a destra, in cui è visibile anche l'o-ring rosso di tenuta, mostra la parte inferiore, ovvero quella a contatto con il fornellino del sensore. Queste immagini dimostrano la precipitazione della grafite in fiocchi mesh 100 avvenuta prima della completa solidificazione del PCM.

Come passo successivo, avendo presente il problema della precipitazione della grafite mesh 100 in basse percentuali nel PCM, si è pensato di analizzare la situazione in cui ci sia saturazione tra la grafite in fiocchi mesh 100 e il PCM, ovvero quello che si potrebbe definire come un letto fisso di grafite saturo di PCM. La

Figura 23 mostra alcune immagini relative ai casi analizzati con letto fisso di grafite e PCM. Il rapporto di saturazione in termini di peso è stato valutato utilizzando più contenitori di diversa grandezza, e considerando per lo stesso contenitore differenti quantità di grafite, al fine di verificare l'indipendenza del rapporto di saturazione dal rapporto superficie/volume del contenitore, ovvero dalle interazioni tra la superficie del contenitore, la grafite e il PCM. In tutte le configurazioni analizzate, il rapporto di saturazione è risultato pari a circa 0,93 (peso PCM/peso grafite). Con i risultati ottenuti per la valutazione del rapporto di saturazione si è potuto stimare anche la frazione in termini di volume, ovvero la frazione di vuoto del letto fisso di grafite, stimata pari al 72%, e la densità della grafite in fiocchi mesh 100, stimata pari a $2,33 \text{ g/cm}^3$, valore quest'ultimo sovrapponibile a quelli riportati in letteratura. Infine, la misura della conducibilità termica in saturazione realizzata con il TCI ha dato un valore pari a $0,61 \text{ W/m/K}$. Tale valore rappresenta il valore asintotico a cui tende la curva di fitting di Figura 20.

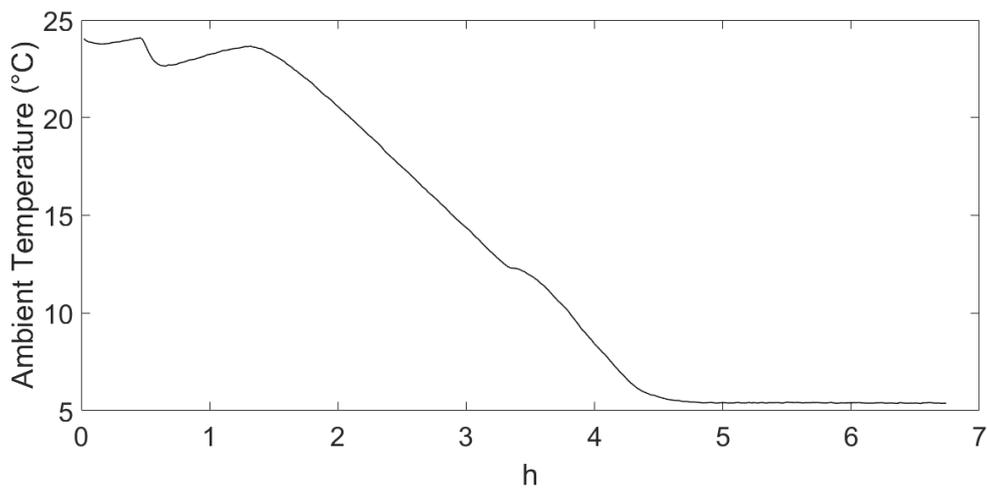


Figura 21. Temperatura ambiente camera termica nel caso con PT15 e grafite.



Figura 22. Sensore TCi con PT15 e grafite all'uscita della camera termica.



Figura 23. Immagini relative ai casi analizzati con PT15 e letto fisso di grafite.

Infine, alla luce dei risultati ottenuti sugli effetti della presenza di grafite in fiocchi mesh 100 nel PCM, si è deciso di utilizzare come caso base per lo studio di ottimizzazione che sarà svolto nel corso della terza annualità quello con una percentuale di grafite pari al 10%, a cui la conducibilità termica del PCM additivato è pari praticamente al doppio di quella senza grafite. Chiaramente, per un fissato sistema di accumulo del freddo, l'aggiunta di grafite comporta anche uno svantaggio, ovvero la diminuzione della quantità di PCM, e di conseguenza una minore densità di energia refrigerante accumulabile per il sistema di accumulo. Lo studio di ottimizzazione che sarà condotto nella terza annualità, in collaborazione con i partner UNINA e POLITO, sarà volto alla massimizzazione dei vantaggi derivanti dall'aumento della conducibilità termica nel PCM, anche al variare dei parametri di funzionamento del sistema di accumulo descritti nella sezione 3.1, relativi a un'utenza domestica reale.

Inoltre, considerando la precipitazione della grafite in fiocchi mesh 100 nel PCM, piuttosto rapida rispetto ai tempi caratteristici di caricamento e scaricamento termico del PCM per il sistema con serbatoio in plexiglass, nel corso della terza annualità saranno anche analizzate soluzioni differenti con diversi additivi meno inclini a precipitare, in particolare nanoplatelets di grafene (GNPs) di diverse dimensioni.

4 Test sperimentali con il PCM micro-incapsulato

In questo capitolo sono descritte le attività sperimentali realizzate utilizzando il PCM micro-incapsulato in soluzione acquosa e sono mostrati i risultati ottenuti. Il capitolo si divide in due parti principali. La prima parte riguarda le prove effettuate in camera termica per la validazione sperimentale del modello sviluppato dal partner UNINA, nell'ambito della LA 4.28, per la simulazione numerica di moduli di accumulo del freddo con PCM micro-incapsulato. Nella seconda parte vengono descritte le attività relative alle misure della conducibilità termica del PCM micro-incapsulato, con e senza grafite in fiocchi mesh 100, e viene riportato il caso base, ovvero la configurazione di riferimento per le attività di ottimizzazione che saranno svolte nel

corso della terza annualità. Si precisa che la grafite mesh 100 è stata aggiunta all'intero composto, e non soltanto al PCM, e pertanto le percentuali in peso sono riferite al peso dell'intero composto.

La Figura 24 mostra alcune delle caratteristiche termo-fisiche del PCM utilizzato. Nella figura è possibile notare che la ditta MikroCaps non ha fornito alcun dato sulla conducibilità termica del PCM micro-incapsulato, ma soltanto la conducibilità termica del PCM, riportata in Figura 24 nella tabella a destra.

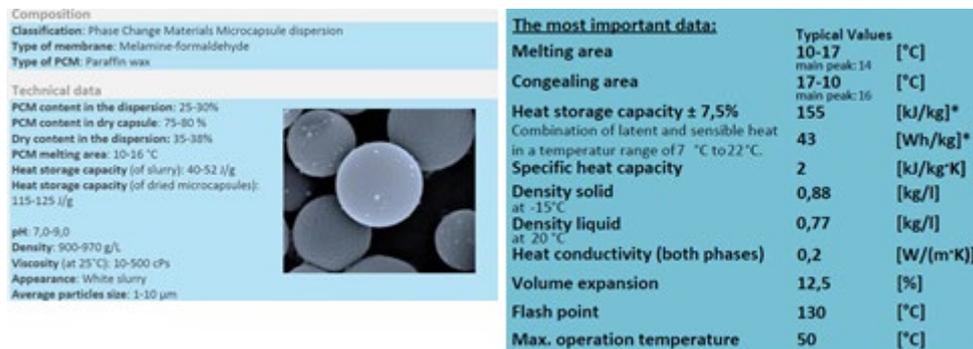


Figura 24. Caratteristiche del PCM micro-incapsulato commerciale utilizzato.

Anche in questo caso, il valore del calore latente e quello del calore specifico del PCM sono stati confermati utilizzando l'analizzatore STA 6000.

4.1 Test in camera termica con un modulo di accumulo del freddo in scala ridotta

La Figura 25 mostra alcune immagini relative al test in camera termica di cui si riportano i risultati. Per il test è stato utilizzato un modulo cilindrico di alluminio di altezza 25 cm e diametro 13,8 cm, provvisto di 5 termocoppie tipo T classe 1 montate ognuna con un raccordo a compressione sul tappo del modulo a formare una croce, con una sull'asse e le quattro laterali a metà raggio, e tutte aventi la sonda a 9 cm dal fondo del modulo. Il test stato fatto inserendo 2,4 kg di PCM micro-incapsulato nel modulo, e utilizzando il seguente programma per la temperatura interna della camera termica: (step 1) rampa di un'ora dalla temperatura iniziale fino a 7°C; (2) 72 ore a 7°C; (3) rampa di un'ora fino a 23°C; (4) 22 ore a 23°C. Nell'immagine di sinistra della Figura 25 si può notare il modulo cilindrico contenente il PCM micro-incapsulato in forma liquida, che si presenta come un liquido opaco, di colore bianco, e con un'elevata viscosità dovuta alla resina melamminica di cui sono fatte le membrane delle micro-capsule.

La Figura 26 mostra l'evoluzione temporale della temperatura sull'asse, della media delle quattro temperature laterali, e della temperatura ambiente interna alla camera termica misurate nel corso della prova. L'acquisizione dei dati di temperatura è stata effettuata con un controller NI cRIO-9066. Sia nella rampa discendente che in quella ascendente, si può notare un cambio di pendenza della curva relativa alla termocoppia assiale attorno ai 17°C, che corrisponde alla temperatura a cui inizia la fase di solidificazione del PCM, nel caso della rampa discendente, e a quella in cui termina la fusione del PCM lungo la rampa ascendente.

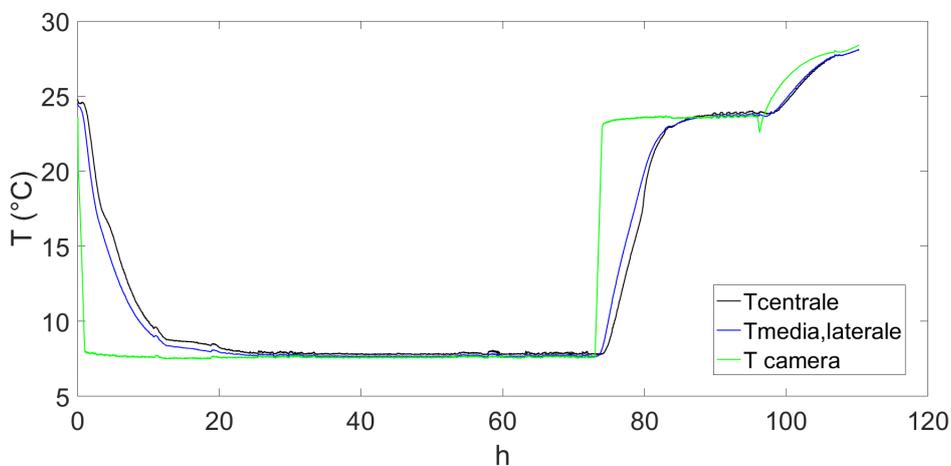


Figura 26. Evoluzione temporale delle temperature nel PCM micro-incapsulato durante il test in camera termica.

4.2 Misure di conducibilità termica

Anche per il PCM micro-incapsulato i test per misurare la conducibilità termica sono stati effettuati sia con che senza additivo per aumentare lo scambio termico conduttivo, e l'additivo utilizzato è polvere di grafite in fiocchi mesh 100. I risultati ottenuti sono mostrati separatamente nei due paragrafi che seguono.

4.2.1 Misura della conducibilità del PCM micro-incapsulato senza grafite

La Figura 27 mostra il sensore TCi con all'interno il PCM micro-incapsulato commerciale impiegato nei test sperimentali, mentre la figura Figura 28 e la Figura 29 mostrano rispettivamente l'andamento della temperatura dell'ambiente interno alla camera termica e della conducibilità termica. Analogamente a quanto osservato in precedenza nel caso del PCM non incapsulato, i valori misurati dal sensore TCi corrispondenti alla parte centrale della curva in Figura 29 non rappresentano valori realistici della conducibilità del PCM micro-incapsulato, poiché tali valori sono relativi al range di temperatura di transizione liquido-solido del PCM, ovvero sono stati misurati durante la transizione di fase del PCM. I valori misurati della conducibilità termica del PCM micro-incapsulato con il PCM in fase liquida e in fase solida sono rispettivamente 0.37 e 0.44 W/m/K, più o meno il doppio rispetto alla conducibilità termica del PCM presente nelle micro-capsule riportata in Figura 24.



Figura 27. Sensore TCi C-THERM con PCM micro-incapsulato.

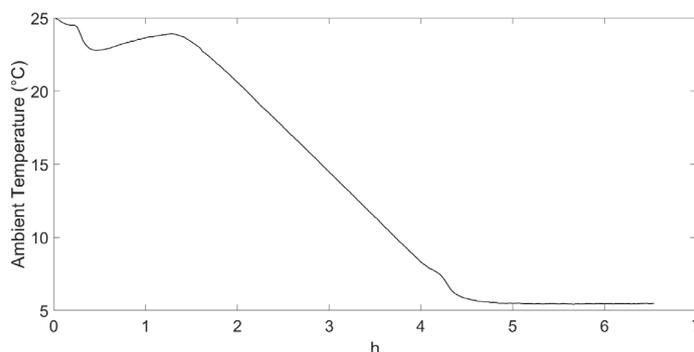


Figura 28. Andamento temporale della temperatura ambiente in camera termica.

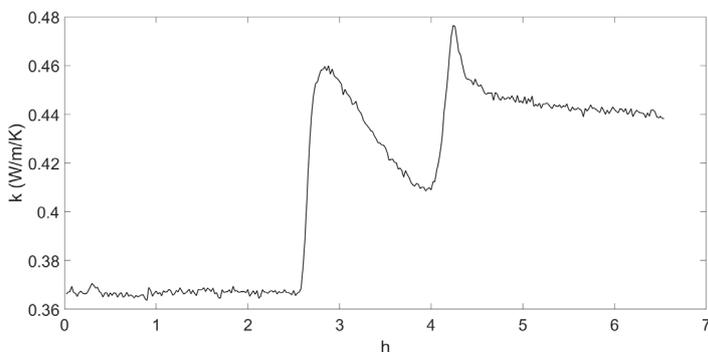


Figura 29. Andamento temporale della conducibilità termica del PCM micro-incapsulato.

4.2.2 Misura della conducibilità del PCM micro-incapsulato con l’aggiunta di grafite

L’ultima parte delle attività ha riguardato la misura della conducibilità termica del PCM micro-incapsulato nel caso di aggiunta di grafite in fiocchi mesh 100. La Figura 30 mostra delle immagini del sensore TCi con PCM micro-incapsulato e grafite relative ad alcune delle prove realizzate in cui sono state utilizzate diverse percentuali in peso di grafite, mentre la Figura 31 mostra le coppie conducibilità termica-percentuale in peso di grafite misurate e la curva di fitting lineare. Infine, la Figura 32 mostra due immagini relative al test effettuato per verificare l’eventuale precipitazione della grafite anche con il PCM micro-incapsulato. Come è evidente dalle immagini riportate, dopo una settimana, non c’è stata la precipitazione della grafite, e ciò è stato confermato attraverso delle misure della conducibilità termica.

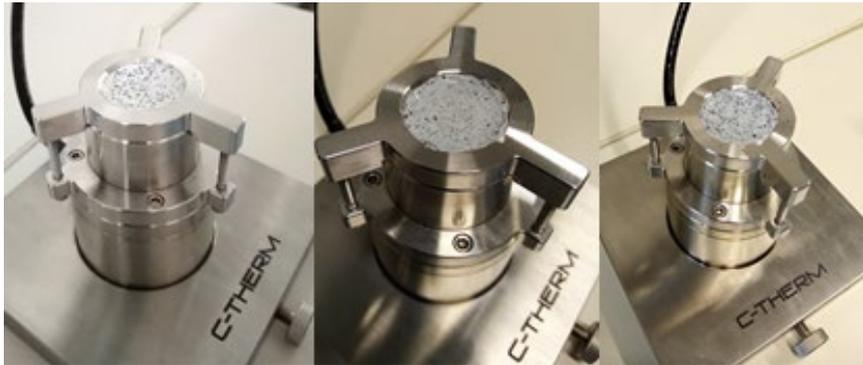


Figura 30. Immagini relative alle misure della conducibilità con varie percentuali di grafite.

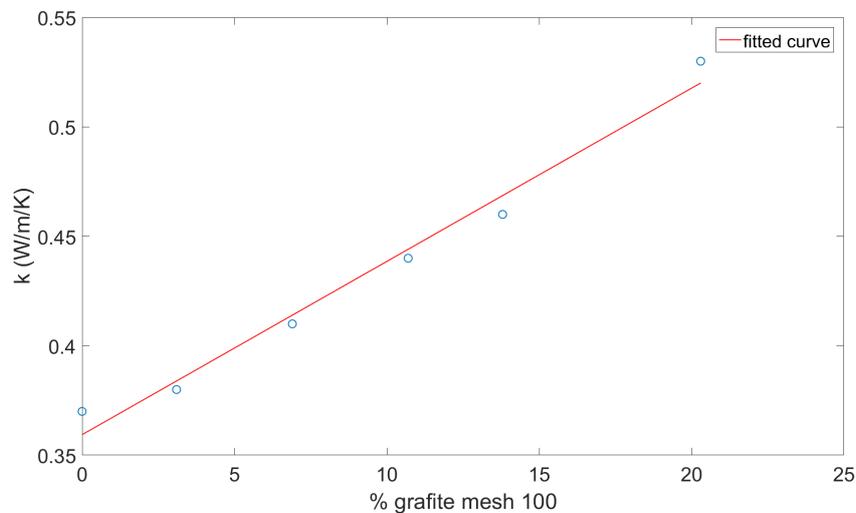


Figura 31. Curva di fitting conducibilità termica-percentuale in peso di grafite nel caso di PCM micro-incapsulato.



Figura 32. Immagini relative al test per la valutazione della precipitazione della grafite in fiocchi mesh 100 nel PCM micro-incapsulato.

I valori della conducibilità termica del PCM micro-incapsulato additivato con grafite mesh 100 di Figura 31 indicano che, a differenza del caso con PCM non incapsulato, l'aggiunta di grafite non comporta un sensibile aumento della conducibilità termica del composto. Inoltre, l'aggiunta di grafite fa ulteriormente diminuire la già relativamente bassa percentuale in peso del PCM nel composto. Pertanto, lo studio di ottimizzazione che sarà condotto nella terza annualità sarà focalizzato principalmente sull'ottimizzazione di uno o più parametri di funzionamento del serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM micro-incapsulato.

5 Conclusioni

Questo documento descrive le attività svolte e i risultati ottenuti durante il secondo anno del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, per quanto concerne l'identificazione di soluzioni tecniche finalizzate a incrementare le performance di scambio termico dei due prototipi di sistemi di accumulo del freddo con materiale a cambiamento di fase (PCM) realizzati presso il laboratorio LPSAT del Centro Ricerche Enea di Portici nel corso del precedente Piano Triennale di Realizzazione 2015-2017 della Ricerca di Sistema Elettrico.

Sono state analizzate due soluzioni tecniche per incrementare lo scambio termico nei sistemi di accumulo di energia refrigerante basati sull'utilizzo di PCM. La prima consiste nell'aggiunta di un additivo nel PCM, mentre la seconda consiste nell'impiego di PCM micro-incapsulato. All'uopo, sono state realizzate varie misure di conducibilità termica utilizzando il sensore TCi della C-Therm, anche in temperatura grazie alla camera termica Tenney TPS Junior. I risultati ottenuti sono serviti anche per la validazione sperimentale del modello sviluppato dal POLITO per la simulazione numerica degli effetti dovuti alla presenza di additivi ad alta conducibilità nei PCM. Inoltre, sono state effettuate tre prove sperimentali in laboratorio, due con il sistema di accumulo del freddo con mantello in plexiglass, e l'altra utilizzando un modulo con PCM micro-incapsulato, al fine di validare sperimentalmente il modello sviluppato dal partner UNINA per la simulazione numerica di tali sistemi di accumulo del freddo.

Per quanto riguarda le attività finalizzate alla individuazione degli effetti dell'aggiunta di additivi nei PCM, è stato analizzato il PCM commerciale PT 15 della ditta PureTemp, che è lo stesso PCM utilizzato nel serbatoio di accumulo del freddo con mantello in plexiglass, additivato con grafite in fiocchi mesh 100. Sono state fatte diverse misure della conducibilità termica considerando varie percentuali in peso della grafite nel PCM, ed è stata ricavata la curva di fitting conducibilità termica-percentuale di grafite in peso, per basse percentuali di grafite. È stato, altresì, evidenziato il problema legato alla precipitazione della grafite. Alla luce dei risultati ottenuti, si è deciso di utilizzare come caso base per lo studio di ottimizzazione che sarà svolto nel corso della terza annualità quello con una percentuale di grafite pari al 10%, a cui la conducibilità termica del PCM additivato è pari praticamente al doppio di quella senza grafite. Inoltre, considerando il problema della precipitazione della grafite in fiocchi mesh 100 nel PCM, nel corso della terza annualità saranno anche analizzate soluzioni differenti con diversi additivi meno inclini a precipitare, in particolare nanoplatelets di grafene (GNPss) di diverse dimensioni.

Infine, per quanto concerne l'analisi di soluzioni micro-incapsulate, è stato analizzato il PCM micro-incapsulato "MikroCapsPCM15-slurry", prodotto dalla ditta slovena MikroCaps, con o senza l'aggiunta di un additivo, anche in questo caso rappresentato da grafite in fiocchi mesh 100. In questo caso l'aggiunta di grafite non comporta un sensibile aumento della conducibilità termica del composto e pertanto, lo studio di ottimizzazione che sarà condotto nella terza annualità sarà focalizzato principalmente sull'ottimizzazione di uno o più parametri di funzionamento del serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM micro-incapsulato.

6 Bibliografia

- [1] Mongibello L, Bianco N, Caliano M, Graditi G, Influence of heat dumping on the operation of residential micro-CHP, Applied Energy 160 (2015) 206-220.