



## Ricerca di Sistema elettrico

Analisi sperimentale delle performance di scambio termico di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di materiale a cambiamento di fase al variare dei parametri d'impianto e della tipologia e quantità di additivo nel materiale di accumulo

Luigi Mongibello

Report RdS/PTR2021/155

ANALISI SPERIMENTALE DELLE PERFORMANCE DI SCAMBIO TERMICO DI SISTEMI DI ACCUMULO DEL FREDDO BASATI SULL'UTILIZZO DI MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE AL VARIARE DEI PARAMETRI D'IMPIANTO E DELLA TIPOLOGIA E QUANTITÀ DI ADDITIVO NEL MATERIALE DI ACCUMULO

Luigi Mongibello (ENEA)

Con il contributo di: A. D'Angelo, V. Capaldo, C. Diletto, S. Fabozzi, G. Fiorenza, D. Mele, A. Ricca, V. Sorrentino (ENEA); A. Ribezzo (POLITO)

Dicembre 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 - III 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: *LA4.24 - Incremento delle performance di scambio termico di sistemi di accumulo del freddo basati su PCM e acqua e PCM (3 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 ANALISI SPERIMENTALE DEL PCM CON ADDITIVI .....	5
2.1 STRUMENTAZIONE E MATERIALI UTILIZZATI .....	5
2.2 MISURE SPERIMENTALI.....	7
2.2.1 <i>Procedura per la misura della conducibilità termica</i> .....	7
2.3 RISULTATI .....	9
2.3.1 <i>Caratteristiche delle prove sperimentali</i> .....	9
2.3.2 <i>Risultati con PT15 + GNP25</i> .....	11
2.3.3 <i>Risultati con PT15 + GNP15</i> .....	14
2.3.4 <i>Risultati con PT15 + GNP5</i> .....	16
3 TEST SPERIMENTALI CON IL SERBATOIO DI ACCUMULO CON SOLO PCM .....	18
3.1 IMPIANTO PROVA ACCUMULO FREDDO .....	18
3.2 RISULTATI DEL TEST SPERIMENTALE .....	20
4 CONCLUSIONI.....	21

## Sommario

In questo rapporto tecnico sono descritte le attività sperimentali realizzate nel corso del terzo anno del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, riguardanti la ricerca e la caratterizzazione 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, e quelle realizzate nella seconda annualità, in cui sono state testate sperimentalmente due soluzioni tecniche per incrementare lo scambio termico nei PCM, con la prima tecnica che consiste nell'aggiunta di un additivo al PCM, mentre la seconda consiste nell'impiego di PCM micro-incapsulato, con o senza l'aggiunta di un additivo.

Nel corso della terza annualità è stata effettuata la caratterizzazione della conducibilità termica di un PCM commerciale in presenza di additivi costituiti da nano-piastrelle di grafene (GNPs), analizzando varie soluzioni sia in termini di concentrazione che di dimensioni delle nano-piastrelle, e sono stati effettuati dei test sperimentali utilizzando l'impianto prova accumulo freddo e il serbatoio con mantello in plexiglass isolato termicamente contenente il PCM commerciale citato sopra, presente presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici, al variare dei principali parametri d'impianto che incidono sulle performance del sistema di accumulo. Tali attività sono state effettuate al fine di ottenere dati sperimentali per la validazione dei modelli e delle soluzioni numeriche ottimizzate per i sistemi di accumulo del laboratorio LPSAT individuate dai partner universitari UNINA e POLITO, che nella terza annualità si sono occupati dell'ottimizzazione delle performance dei suddetti sistemi di accumulo, utilizzando i modelli numerici sviluppati nel corso della seconda annualità.

Il report è diviso in quattro capitoli. Il primo capitolo presenta una descrizione sintetica di tutte le attività svolte nella terza annualità relativamente alla presente linea di attività, e l'ordine cronologico in cui sono state svolte. Nel secondo capitolo vengono dettagliati la strumentazione, le procedure, e i risultati delle prove sperimentali relative alle misure di conducibilità. Nel capitolo 3 sono riportati i risultati del test sperimentale realizzato con l'impianto prova accumulo freddo e il serbatoio di accumulo con mantello in plexiglass. Infine, nel capitolo 4 sono riportate e discusse le principali conclusioni.

## 1 Descrizione delle attività svolte

Relativamente alla presente linea di attività, le attività svolte nel corso della terza annualità possono essere divise in due sub-attività principali, realizzate una dopo l'altra.

La prima sub-attività ad essere stata realizzata è quella relativa alla caratterizzazione sperimentale della conducibilità termica del PCM commerciale PT15 della ditta PureTemp in presenza di additivi costituiti da nano-piastrene di grafene (GNPs), analizzando varie soluzioni sia in termini di concentrazione che di dimensioni delle nano-piastrene. Per ognuna delle varie combinazioni tra concentrazione e dimensione delle GNPs testate sperimentalmente, viene descritto il setup della prova sperimentale effettuata per valutare la dipendenza della conducibilità termica dal tipo e dalla quantità di GNPs, e vengono riportati i risultati ottenuti sia con il PCM in fase liquida che in fase solida. Questi risultati sperimentali sono stati trasmessi al gruppo di lavoro del POLITO che li ha utilizzati nell'ambito della linea di attività LA 4.31 per validare il modello sviluppato per calcolare la conducibilità termica in funzione della percentuale in peso dell'additivo, e per effettuare uno studio di ottimizzazione finalizzato ad individuare le soluzioni ottimali per quanto concerne l'impiego di additivi per i sistemi di accumulo sperimentali basati sull'impiego di PCM del laboratorio LPSAT di Enea Portici.

La seconda sub-attività è quella relativa alla realizzazione dei test sperimentali utilizzando l'impianto prova accumulo freddo e il serbatoio con mantello in plexiglass isolato termicamente contenente il PCM commerciale PT15, presente presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici, al variare dei principali parametri d'impianto che incidono sulle performance del sistema di accumulo. I risultati sperimentali mostrati nel terzo capitolo di questo report si riferiscono al test in cui sono stati implementati i parametri di impianto relativi alla soluzione ottimizzata risultante dall'analisi numerica effettuata dal partner UNINA, nell'ambito della linea di attività LA 4.29, realizzato allo scopo di validare sperimentalmente la soluzione numerica ottimizzata.

Infine, si precisa che nel corso della presente annualità non sono stati realizzati test sperimentali con il serbatoio di accumulo del freddo con acqua e PCM micro-incapsulato. Invero, le attività relative all'impiego del serbatoio con acqua e PCM micro-incapsulato che sono state realizzate nella presente annualità sono soltanto quelle realizzate dal partner UNINA, nell'ambito della LA 4.29, che ha effettuato uno studio di ottimizzazione utilizzando il modello per la simulazione numerica del suddetto serbatoio sviluppato nel corso della seconda annualità, e validato con i dati sperimentali ottenuti dal gruppo di lavoro ENEA sempre nel corso della seconda annualità.

## 2 Analisi sperimentale del PCM con additivi

In questo capitolo vengono descritti dapprima la strumentazione, i materiali, e le procedure utilizzate per la caratterizzazione della conducibilità termica di un PCM in presenza di additivi costituiti da nano-piastrene di grafene (GNPs) in varie concentrazioni e dimensioni, e successivamente tutti i risultati ottenuti.

### 2.1 *Strumentazione e materiali utilizzati*

La Figura 1 e la Figura 2 mostrano rispettivamente il modello di sonicatore e l'agitatore magnetico utilizzati per districare le nano-piastrene di grafene e per rendere uniforme la loro distribuzione nel PCM, mentre la Figura 3 il modello di bilancia analitica utilizzato per pesare il PCM e i quantitativi di GNPs al fine di calcolare le concentrazioni, nei vari contenitori utilizzati. Infine, la Figura 4 mostra lo strumento impiegato per misurare la conducibilità termica dei vari composti, ovvero l'analizzatore TCi della ditta canadese C-THERM, mentre la Figura 5 mostra la camera termica utilizzata per effettuare misure di conducibilità a temperature differenti rispetto a quella dell'ambiente. Ulteriori dettagli sulla strumentazione utilizzata possono essere trovati nel report relativo all'annualità 2020.



Figura 1. Sonicatore GTSONIC-GT3.



Figura 2. Agitatore magnetico Orma AG5D.



Figura 3. Bilancia analitica RADWAG 220/C/2.

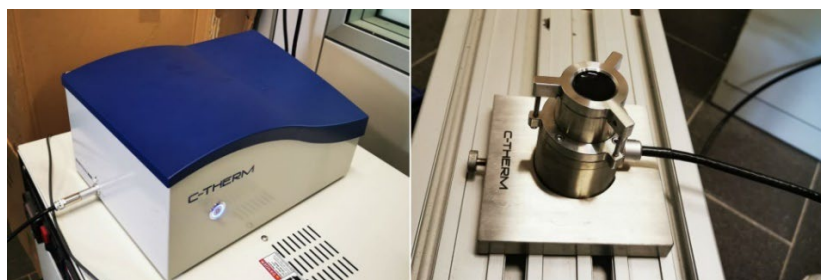


Figura 4. Misuratore di conducibilità termica C-THERM TCi.



Figura 5. Camera termica Tenney TPS Junior.

Relativamente ai materiali utilizzati nei test sperimentali, come già anticipato in precedenza il PCM è costituito dal materiale commerciale PT15 della ditta americana PureTemp, con temperatura di transizione solido-liquido pari a 15°C, le cui caratteristiche sono elencate nella Tabella 1

**Tabella 1. Proprietà termo-fisiche del PCM.**

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

Relativamente ai GNPs, ne sono stati testati tre della Sigma-Aldrich con stesso spessore di 6-8 nm ma grandezza differente, ovvero:

- GNP25, dimensione particelle 25 µm, area superficiale 120-150 m<sup>2</sup>/g;
- GNP15, dimensione particelle 15 µm, area superficiale 120-150 m<sup>2</sup>/g;
- GNP5, dimensione particelle 5 µm, area superficiale 120-150 m<sup>2</sup>/g.

## 2.2 Misure sperimentali

In questo paragrafo vengono descritte le procedure, le apparecchiature, e i materiali utilizzati per la caratterizzazione della conducibilità termica del PCM in presenza delle nano-piastrine di grafene, analizzando varie soluzioni sia in termini di concentrazione che di dimensioni delle nano-piastrine.

### 2.2.1 Procedura per la misura della conducibilità termica

La caratterizzazione sperimentale dell'effetto dei nano-additivi nel PCM è stata effettuata al variare del tipo e della percentuale in peso degli additivi. Prima di procedere con gli additivi, sono state effettuate alcune misurazioni preliminari utilizzando o acqua oppure soltanto il PCM, al fine di effettuare un controllo della funzionalità del sensore, essendo già nota la conducibilità termica dei suddetti materiali in caso di assenza di additivi. Per ciascun tipo di additivo, la procedura per la misura della conducibilità termica del PCM in presenza di nano-additivi, al variare della percentuale in peso degli additivi, è schematizzata in Figura 6 e consiste nei seguenti step:

1. Calcolo del peso del flacone vuoto come valore medio di cinque pesature indipendenti dello stesso flacone;
2. Aggiunta del PCM nel flacone e calcolo del peso del PCM per differenza;
3. Aggiunta di una quantità di GNPs e calcolo della frazione in massa delle GNPs, ovvero del peso delle GNPs per differenza.
4. Mescolamento magnetico e sonicazione. La Figura 7 e la Figura 8 mostrano, rispettivamente, il composto prima e dopo il mixing mediante mescolamento e sonicazione;
5. Una parte del composto viene prelevato e inserita nella test section del sensore;
6. Misurazione della conducibilità termica del campione prelevato in fase liquida allal temperatura ambiente del laboratorio (23°C);

7. Misurazione della conducibilità termica del campione in fase solida, ovvero in camera termica a una temperatura ambiente di 5°C;
8. Nuova pesatura del composto per differenza;
9. Ripartenza dallo step 3, oppure fine misure sperimentali.

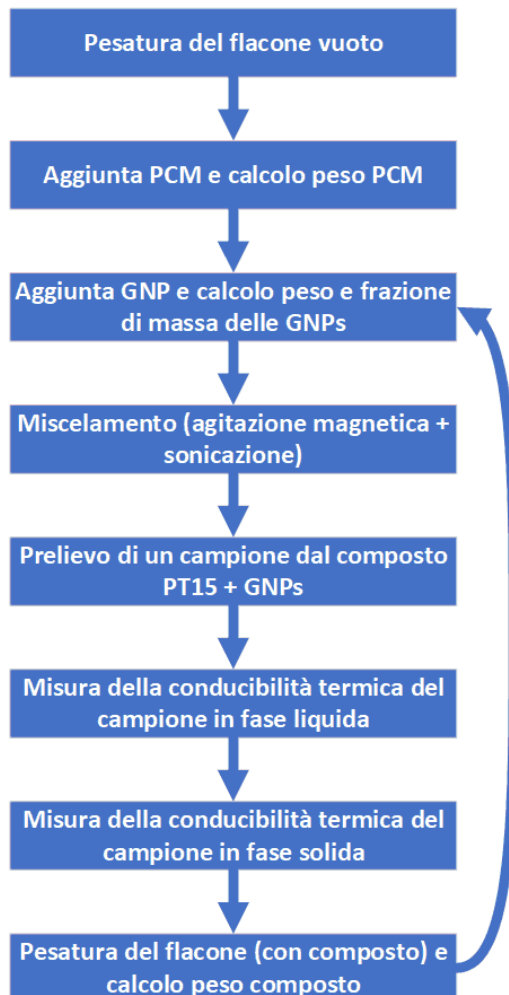


Figura 6. Procedura per la misura della conducibilità termica a differenti concentrazioni di GNPs nel PCM.



Figura 7. PT15 con GNP25 prima del mixing.





Figura 8. PT15 con GNP25 dopo il mixing.

## 2.3 Risultati

Nella prima parte di questo capitolo vengono descritti i setup di tutte le prove sperimentali effettuate per valutare la dipendenza della conducibilità termica dal tipo e dalla quantità di GNPs tra quelle disponibili. Successivamente, per ognuna delle GNPs si riportano i risultati ottenuti sia con il PCM in fase liquida che in fase solida, utilizzando il sensore TCi e la camera termica.

### 2.3.1 Caratteristiche delle prove sperimentali

La Tabella 2 riporta le caratteristiche di tutte le prove sperimentali effettuate per la misura della conducibilità termica del PCM PT15, sia in fase solida che in quella liquida, al variare del tipo di additivo, e, per ogni tipo di additivo al variare della quantità. L'ultima colonna riporta il nome con cui viene richiamata nel prosieguo la prova sperimentale relativa alla riga corrispondente.

Tabella 2. prove sperimentali effettuate per la misura della conducibilità termica del PCM PT15

PCM	GNPs	Percentuale peso (%)	Tempo di mescolamento (minuti)	Tempo di sonicazione (minuti)	Nome prova
PT15	GNP25	0,266	20	30	25-0,266
		0,619	10	20	25-0,619
		1,36	10	20	25-1,36
		3,53	10	20	25-3,53
		3,53	-	60	25-3,53-S
		*3,53	-	-	25-3,53-P
	GNP15	0,132	10	15	15-0,132
		0,533	10	20	15-0,533
		1,11	10	50	15-1,11
		2,92	10	20	15-2,92
		2,92	-	60	15-2,92-S
		*2,92	-	-	15-2,92-P
		5,09	15	15	15-5,09-P-B
		5,37	15	15 int	15-5,09-P-A
		5,37	15x2	15x2 int	15-5,09-P-Ax2
		GNP5	0,213	10	20
	0,808		10	20	5-0,808
	1,79		10+10	50+20	5-1,79-S
	2,68		10	20	5-2,68
	*2,68		-	-	5-2,68-P
	GNP5+GNP15	11,138 (6,045+5,09)	10	20	Hyb-5-15
	GNP15+GNP25	9,535 (4,163+5,37)	10	20	Hyb-15-25

La Tabella 3 riporta le prove sperimentali effettuate al fine di valutare gli effetti del tipo e della quantità di GNPs sulla conducibilità termica del PCM, mentre la Tabella 4, la Tabella 5, e la Tabella 6 riportano i dettagli delle prove sperimentali effettuate per valutare gli effetti del tempo di sonicazione, della precipitazione, e del tempo di mescolamento sulle misure di conducibilità termica, rispettivamente. In particolare, per quanto riguarda le prove indicate nella Tabella 4 e relative alla valutazione degli effetti della sonicazione sulle misure di conducibilità termica, queste sono state effettuate prendendo ognuno dei campioni a valle delle prove sperimentali effettuate per valutare gli effetti del tipo e della quantità di GNPs sulla conducibilità termica, come da Tabella 3, e sottoponendolo a un'ulteriore ora di sonicazione. Relativamente alle prove in Tabella 5 per valutare gli effetti della precipitazione delle GNPs nel PCM, queste sono state fatte a valle delle prove di Tabella 3 e Tabella 4, e dopo aver fatto riposare il campione per circa ventiquattro ore. Infine, le prove in Tabella 6 sono state fatte per valutare gli effetti di una sonicazione intermittente sulle misure di conducibilità termica, utilizzando due campioni (A e B) con più o meno la stessa quantità GNP15. Per il campione A è stata una sonicazione intermittente (6 s ON, 2s OFF), mentre per il campione B è stata realizzata una sonicazione continua.

**Tabella 3. Prove sperimentali realizzate per valutare la conducibilità termica al variare del tipo e della quantità di GNPs.**

PCM	GNPs	Percentuale peso (%)	Tempo di mescolamento (minuti)	Tempo di sonicazione (minuti)	Nome prova
PT15	GNP25	0,266	20	30	25-0,266
		0,619	10	20	25-0,619
		1,36	10	20	25-1,36
		3,53	10	20	25-3,53
	GNP15	0,132	10	15	15-0,132
		0,533	10	20	15-0,533
		1,11	10	50	15-1,11
		2,92	10	20	15-2,92
	GNP5	0,213	10	20	5-0,213
		0,808	10	20	5-0,808
		2,68	10	20	5-2,68

**Tabella 4. Prove sperimentali realizzate per valutare l'effetto del tempo di sonicazione sulle misure di conducibilità termica.**

PCM	GNPs	Percentuale peso (%)	Tempo di mescolamento (minuti)	Tempo di sonicazione (minuti)	Nome prova
PT15	GNP25	3,53	-	60	25-3,53-S
	GNP15	2,92	-	60	15-2,92-S
	GNP5	1,79	10+10	50+20	5-1,79-S

**Tabella 5. Prove sperimentali realizzate per valutare l'effetto della precipitazione sulle misure di conducibilità termica.**

PCM	GNPs	Percentuale peso (%)	Tempo di mescolamento (minuti)	Tempo di sonicazione (minuti)	Nome prova
PT15	GNP25	*3,53	-	-	25-3,53-P
	GNP15	*2,92	-	-	15-2,92-P
	GNP5	*2,68	-	-	5-2,68-P

**Tabella 6. Prove sperimentali realizzate per valutare l'effetto del tempo di mescolamento sulle misure di conducibilità termica.**

PCM	GNPs	Percentuale peso (%)	Tempo di mescolamento (minuti)	Tempo di sonicazione (minuti)	Nome prova
PT15	GNP15	5,09	15	15	15-5,09-P-B
		5,37	15	15 int	15-5,09-P-A

### 2.3.2 Risultati con PT15 + GNP25

La Figura 9 mostra l'andamento della conducibilità termica del PCM con una percentuale in peso del GNP25 pari a 0,266%, misurata dal sensore TCi al variare della temperatura del campione, con il sensore inserito nella camera termica. Si tenga presente che il sensore è inserito in camera termica quando con il PCM in fase liquida, e che successivamente la temperatura viene abbassata per effettuare la misura della temperatura quando il PCM è in fase solida. Pertanto, le prime misure effettuate sono quelle relative ai valori più alti della temperatura del campione. Si ricorda che la temperatura di transizione solidificazione del PCM è 15°C. In Figura 9 si può notare che, al diminuire della temperatura, si ha un picco anomalo della conducibilità termica a cavallo della temperatura di solidificazione. Questi valori non vanno considerati poiché lo strumento, le cui misure di conducibilità termica si basano sulla velocità con cui varia la temperatura del campione, non prevede che si possa scambiare energia termica con il campione sotto forma di calore latente, ma soltanto sotto forma di calore sensibile. Simili considerazioni possono essere fatte per la Figura 10 e per la Figura 11, che mostrano rispettivamente i risultati delle prove effettuate con il 0,619% e l'1.36% in peso di GNP25 nel PCM. Infine, la Figura 12 mostra la leggera variazione della conducibilità termica del composto quando il PCM è allo stato liquido, nel caso in cui la percentuale in peso del GNP25 è del 3,53%. Questa variazione può essere spiegata considerando una minima precipitazione dell'additivo nel PCM. In tal caso, la precipitazione del PCM potrebbe condizionare in maniera ancora meno trascurabile le misure effettuate con il PCM in fase solida, che sono le ultime effettuate in camera climatica.

In Tabella 7 sono riportati i valori misurati della conducibilità termica sia con il PCM in fase liquida che in fase solida. Nel caso con PCM liquido, ovvero subito dopo che il campione viene inserito nella test section dello strumento di misura, la misura riportata è la prima misura effettuata dallo strumento, mentre la misura relativa al caso con PCM allo stato solido è l'ultima misura effettuata in camera termica prima di prelevare lo strumento dalla camera termica. Le percentuali riportate tra parentesi rappresentano l'aumento della conducibilità termica del PCM rispetto a quelle senza additivi, che sono 0,155 in fase liquida e 0,247 in quella solida.

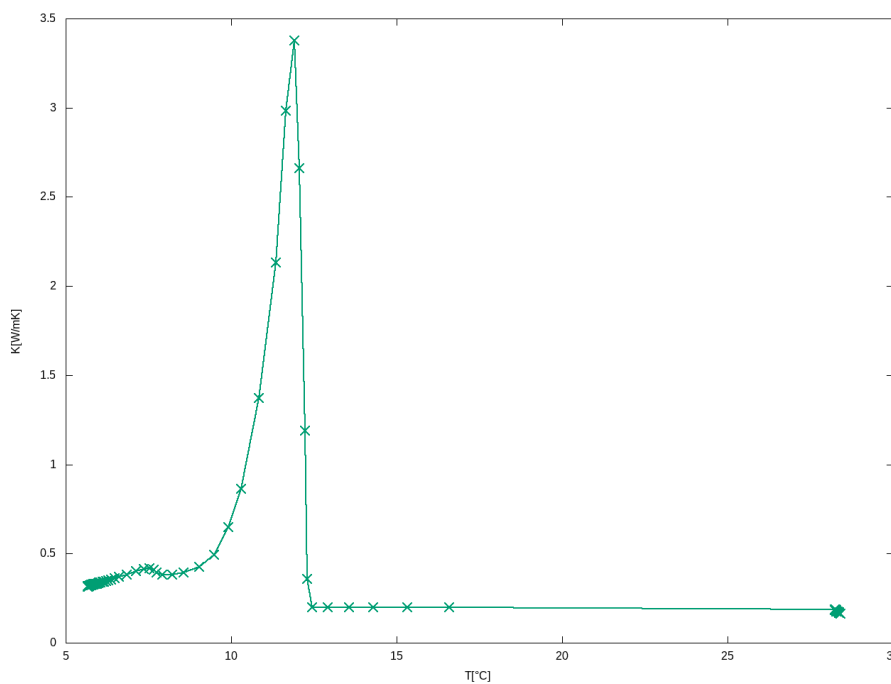


Figura 9. Conducibilità termica del composto PT15+GNP25 con una percentuale in peso pari a 0,266 %.

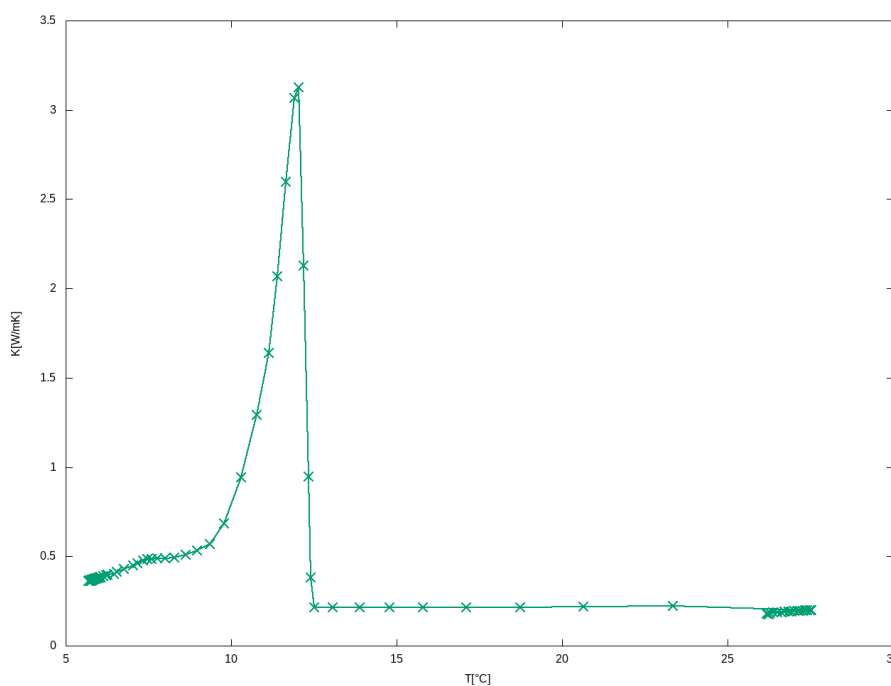


Figura 10. Conducibilità termica del composto PT15+GNP25 con una percentuale in peso pari a 0,619 %.

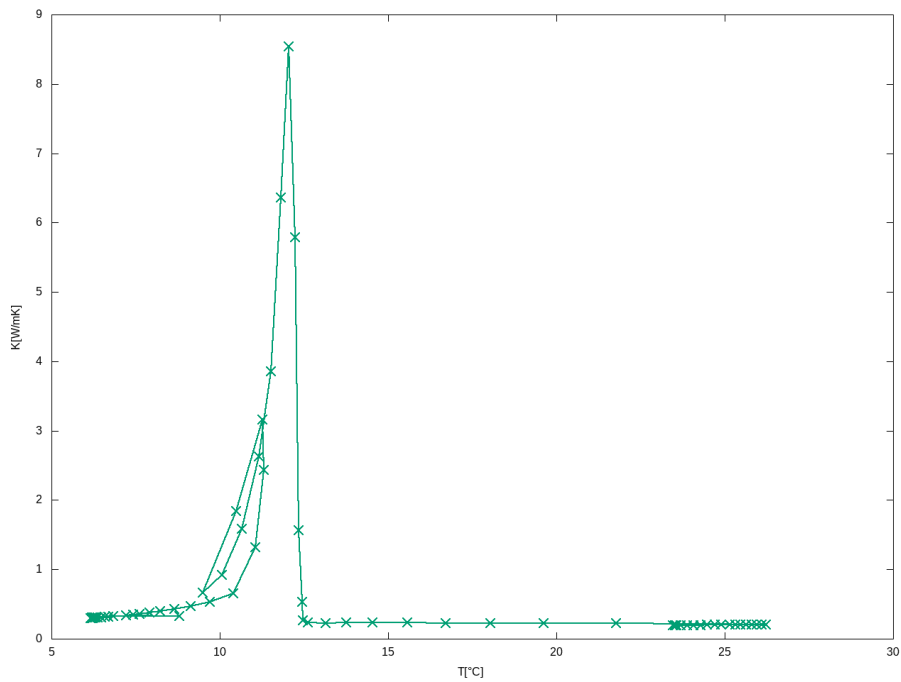


Figura 11. Conducibilità termica del composto PT15+GNP25 con una percentuale in peso pari a 1,36 %.

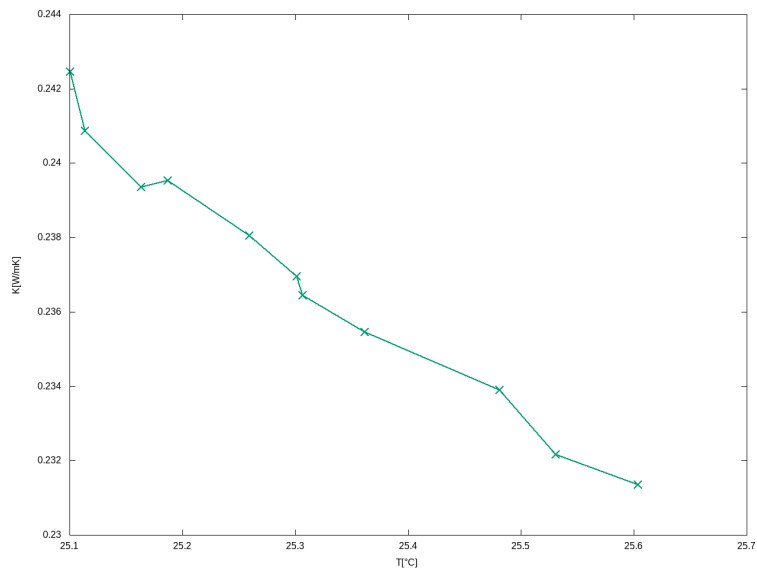


Figura 12. Conducibilità termica del composto PT15+GNP25 con una percentuale in peso pari a 3,53 %.

Tabella 7. Valori misurati della conducibilità termica del PT15 con GNP25.

Percentuale in peso (%)	Conducibilità termica in fase liquida (W/m/K)	Conducibilità termica in fase solida (W/m/K)
0,266	0,18 (15%)	0,34 (32%)
0,619	0,19 (20%)	0,40 (47%)
1,36	0,20 (25%)	-
3,53	0,24 (43%)	-

### 2.3.3 Risultati con PT15 + GNP15

La Figura 13 mostra l'andamento della conducibilità termica del PCM con una percentuale in peso delle GNP15 pari a 0,132%, misurata dal sensore TCi al variare della temperatura del campione, con il sensore inserito nella camera termica. Si tenga presente che, anche in questo caso, il sensore è inserito in camera termica quando con il PCM in fase liquida, e che successivamente la temperatura viene abbassata per effettuare la misura della temperatura quando il PCM è in fase solida. Pertanto, le prime misure effettuate sono quelle relative ai valori più alti della temperatura del campione. Riguardo ai picchi anomali di conducibilità termica, valgono le stesse considerazioni fatte nel paragrafo precedente. La Figura 14 mostra l'andamento della conducibilità termica con la percentuale di GNP15 pari all'1,11%, mentre la Figura 15 mostra la variazione della conducibilità termica del composto quando il PCM è allo stato liquido, nel caso in cui la percentuale in peso delle GNP15 è del 2,92%.

In Tabella 8 sono riportati i valori misurati della conducibilità termica sia con il PCM in fase liquida che in fase solida. Anche con le GNP15, nel caso con PCM liquido, ovvero subito dopo che il campione viene inserito nella test section dello strumento di misura, la misura riportata è la prima misura effettuata dallo strumento, mentre la misura relativa al caso con PCM allo stato solido è l'ultima misura effettuata in camera termica prima di prelevare lo strumento dalla camera termica, e le percentuali riportate tra parentesi rappresentano l'aumento della conducibilità termica del PCM rispetto a quelle senza additivi, che sono 0,155 in fase liquida e 0,247 in quella solida. Confrontando la Tabella 8 con la Tabella 7 si può notare come, a parità di percentuale in peso, l'aumento della conducibilità termica che si ottiene con le GNP15 è più basso rispetto a quello che si ottiene con le GNP25.

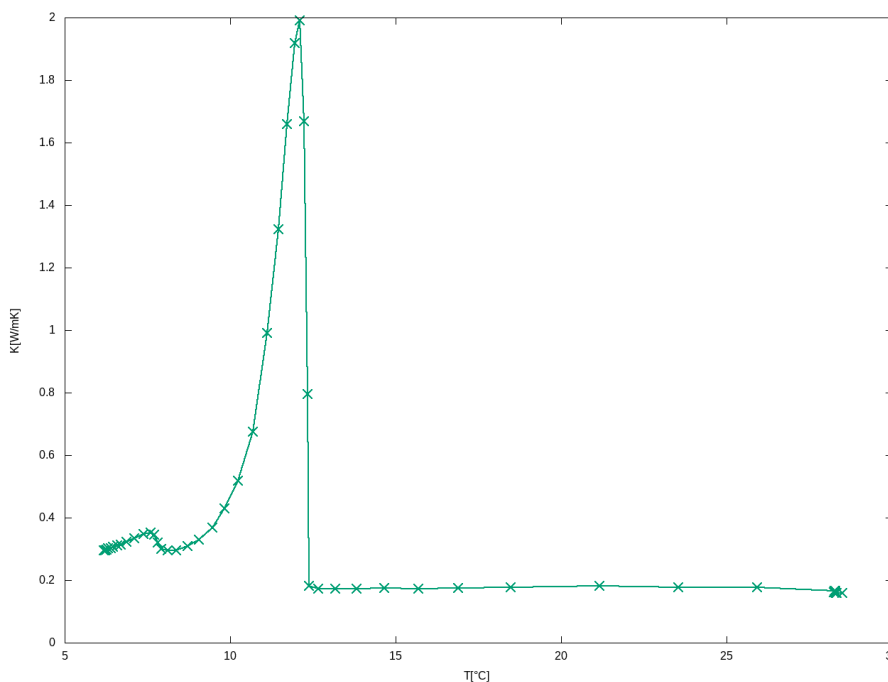


Figura 13. Conducibilità termica del composto PT15+GNP15 con una percentuale in peso pari a 0,132 %.

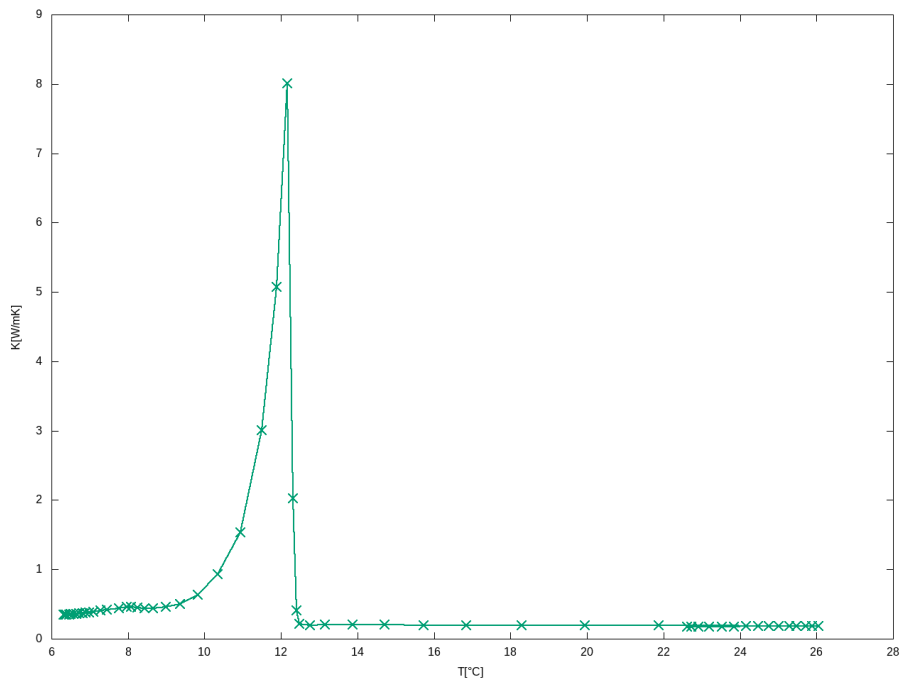


Figura 14. Conducibilità termica del composto PT15+GNP15 con una percentuale in peso pari a 1,11 %.

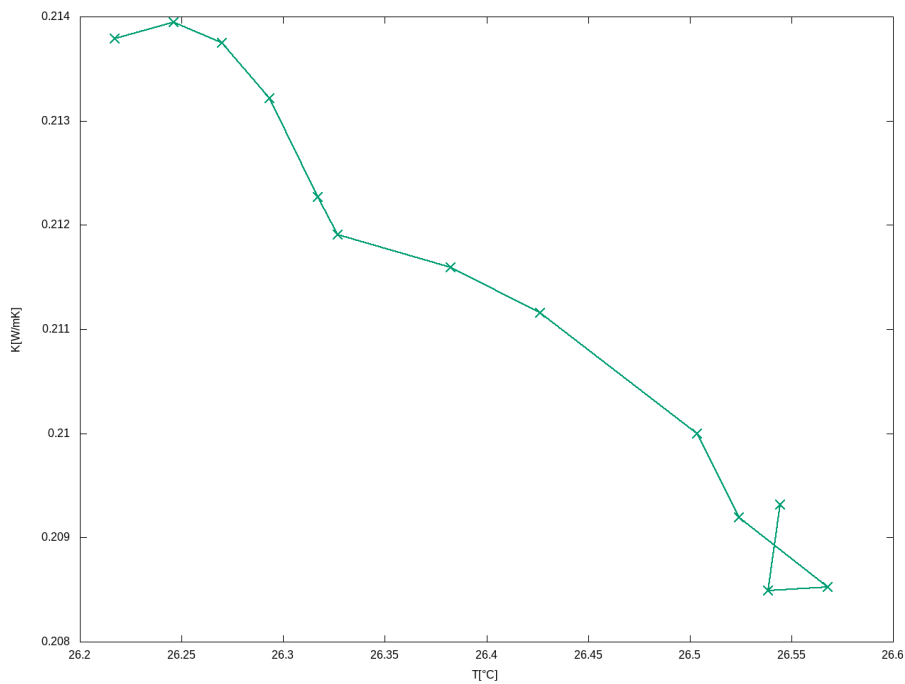


Figura 15. Conducibilità termica del composto PT15+GNP15 con una percentuale in peso pari a 2,92 %.

Tabella 8. Valori misurati della conducibilità termica del PT15 con GNP15.

Percentuale in peso (%)	Conducibilità termica in fase liquida (W/m/K)	Conducibilità termica in fase solida (W/m/K)
0,132	0,16 (3%)	0,31 (23%)
0,533	0,16 (3%)	0,29 (16%)
1,11	0,18 (15%)	0,37 (40%)
2,92	0,21 (30%)	-

### 2.3.4 Risultati con PT15 + GNP5

La Figura 16, la Figura 17, e la Figura 18 mostrano, rispettivamente, gli andamenti della conducibilità termica relativi alle percentuali in peso delle GNP5 pari a 0.213%, 0.808%, e 1,79%. La Figura 19 mostra la variazione della conducibilità termica del composto quando il PCM è allo stato liquido, nel caso in cui la percentuale in peso delle GNP5 è del 2,68%.

Infine, in Tabella 9 sono riportati i valori misurati della conducibilità termica sia con il PCM in fase liquida che in fase solida, con le diverse percentuali di GNP5. Confrontando la Tabella 9 le tabelle relative alle altre GNP5 testate, si può notare che l'aumento della conducibilità termica che si ottiene con le GNP15 è abbastanza simile rispetto a quello che si ottiene con le GNP15.

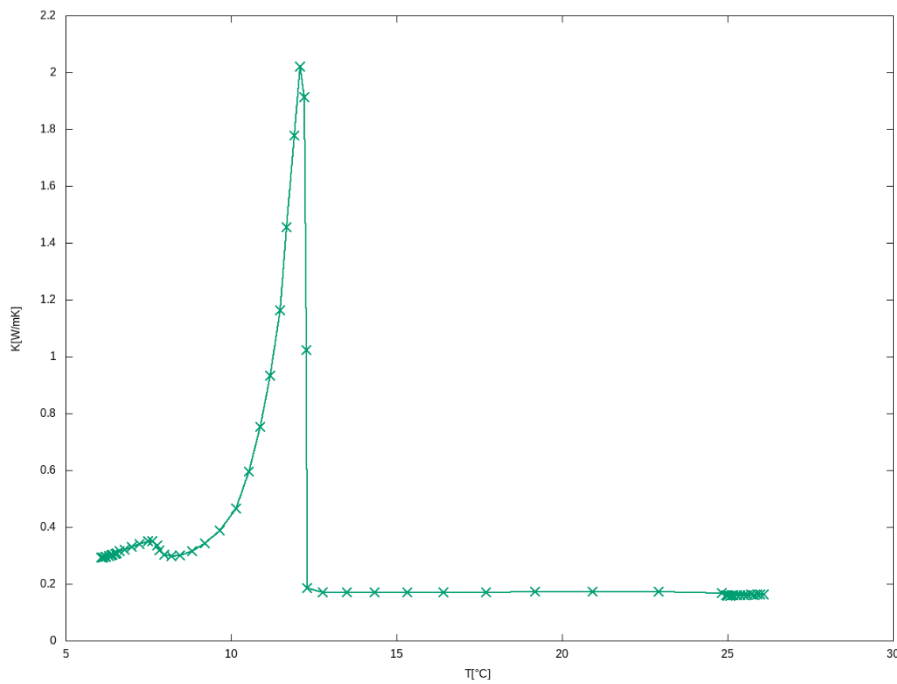


Figura 16. Conducibilità termica del composto PT15+GNP5 con una percentuale in peso pari a 0,213 %.



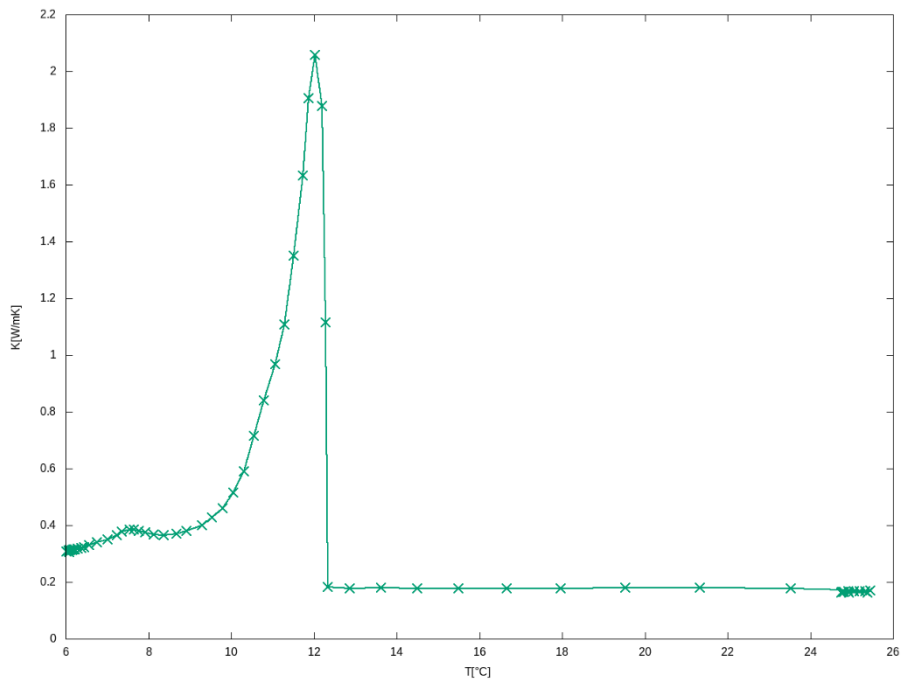


Figura 17. Conducibilità termica del composto PT15+GNP5 con una percentuale in peso pari a 0,808 %.

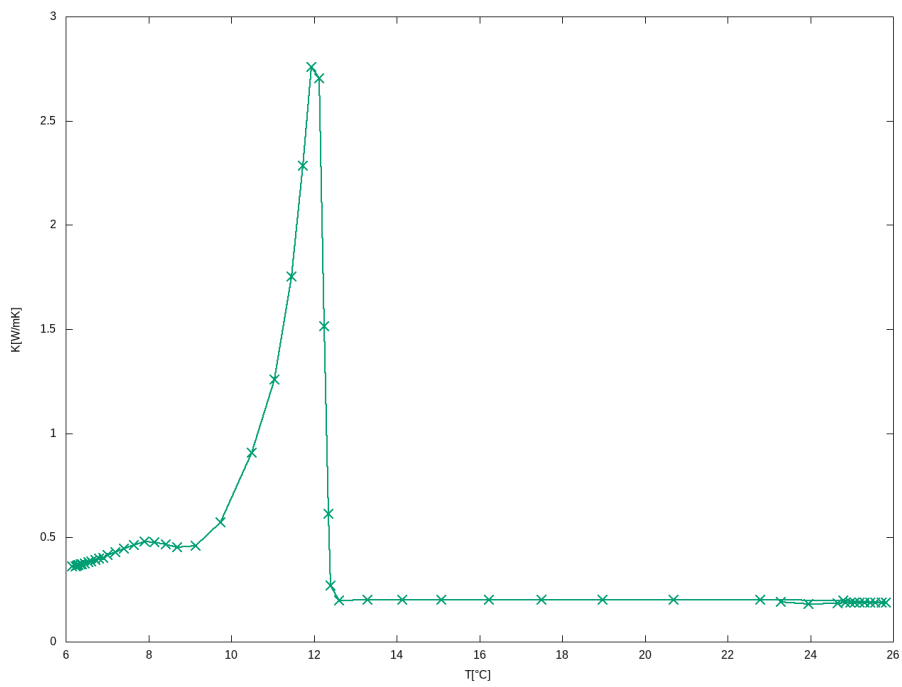


Figura 18. Conducibilità termica del composto PT15+GNP5 con una percentuale in peso pari a 1,79 %.

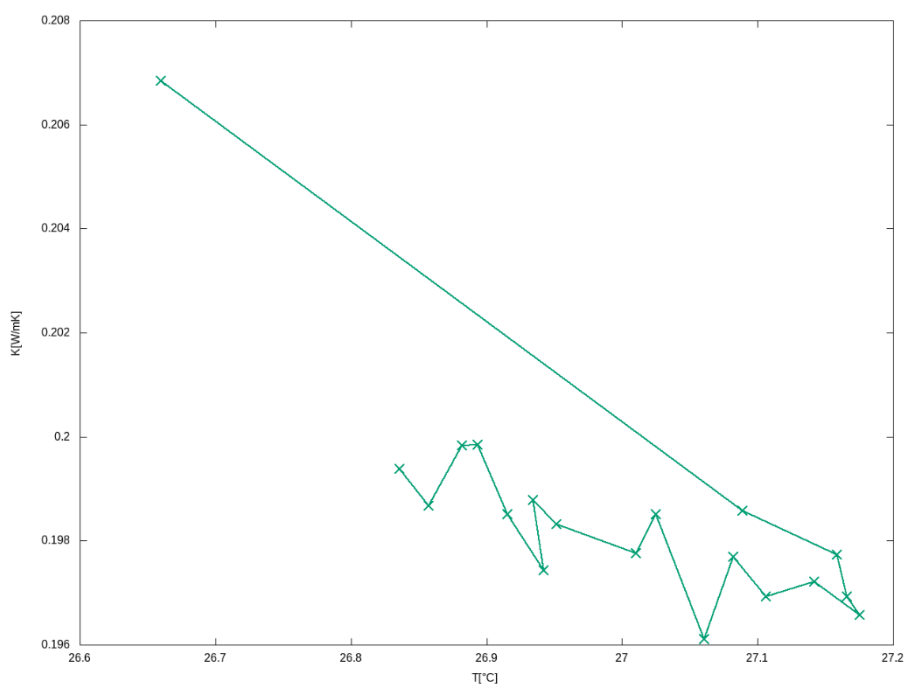


Figura 19. Conducibilità termica del composto PT15+GNP5 con una percentuale in peso pari a 2,68 %.

Tabella 9. Valori misurati della conducibilità termica del PT15 con GNP5.

Percentuale in peso (%)	Conducibilità termica in fase liquida (W/m/K)	Conducibilità termica in fase solida (W/m/K)
0,213	0,16 (3%)	0,31 (23%)
0,808	0,17 (9%)	0,35 (35%)
1,79	0,19 (20%)	0,41 (50%)
2,68	0,20 (25%)	-

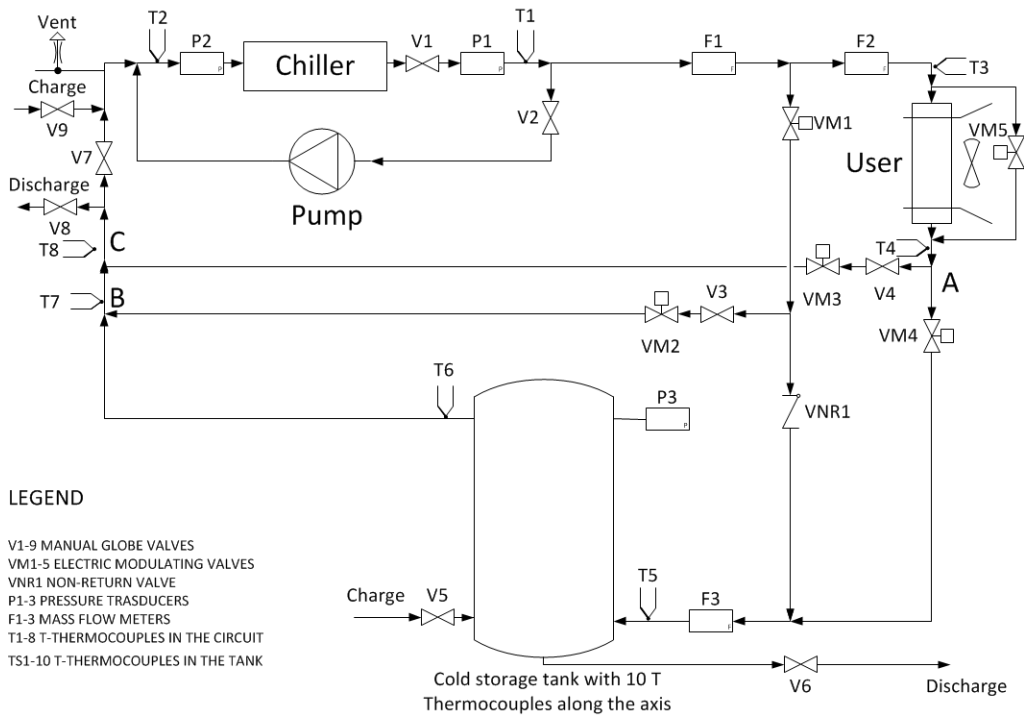
### 3 Test sperimentali con il serbatoio di accumulo con solo PCM

In questo capitolo sono riportati i risultati del test sperimentale realizzato utilizzando l’impianto prova accumulo freddo e il serbatoio con mantello in plexiglass isolato termicamente contenente il PCM PT15, presente presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici. In particolare, dopo una breve descrizione dell’impianto prova accumulo freddo e del serbatoio di accumulo con PCM, sono mostrati i profili di temperatura nel PCM misurati utilizzando 17 delle 25 termocoppie montate sul mantello, e ottenuti implementando la soluzione ottimizzata risultante dall’analisi numerica effettuata dal partner UNINA, nell’ambito della linea di attività LA 4.29, al fine di validare sperimentalmente la soluzione numerica ottimizzata. Tale soluzione prescrive l’utilizzo di una portata d’acqua pari a 0.095 kg/s, e una temperatura in uscita dal chiller pari a 5.5°C

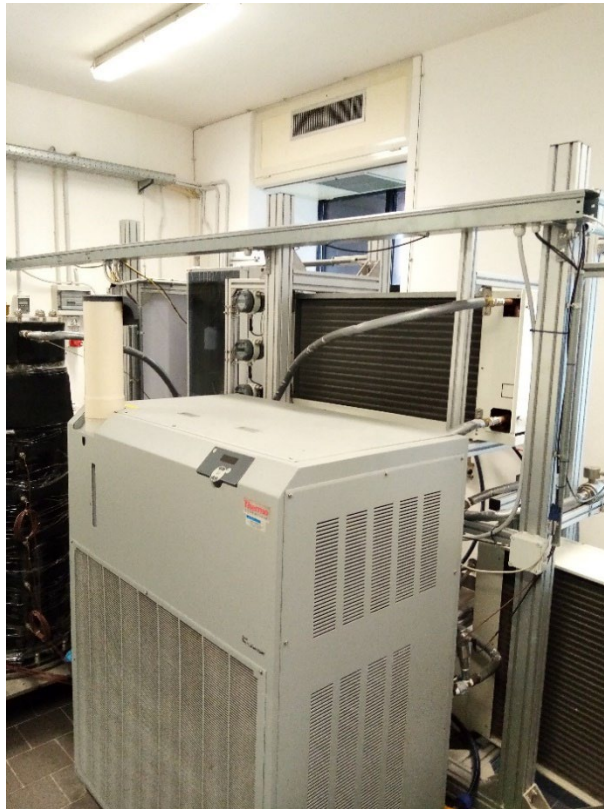
#### 3.1 Impianto prova accumulo freddo

La Figura 20 e la Figura 21 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. La Figura 22 mostra il serbatoio con mantello in plexiglass, con e senza isolamento termico, utilizzato per effettuare il test con soltanto PCM come materiale

di accumulo. Per ulteriori dettagli sull'impianto prova accumulo freddo e sui suoi componenti si rimanda al report della linea di attività LA 4.23, relativa alla seconda annualità del presente piano triennale.



**Figura 20. Layout dell'impianto prova accumulo freddo.**



**Figura 21. Impianto prova accumulo freddo presso il CR Enea Portici.**



Figura 22. Serbatoio di accumulo con PCM e mantello in plexiglass con e senza isolamento termico.

### 3.2 Risultati del test sperimentale

La Figura 23 e la Figura 24 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. Le altre tre colonne di termocoppie ai semi-raggi danno profili di temperatura sovrapponibili a quelli di Figura 24, a dimostrazione della distribuzione uniforme del fluido termovettore nel fascio tubiero, che pertanto non sono riportati.

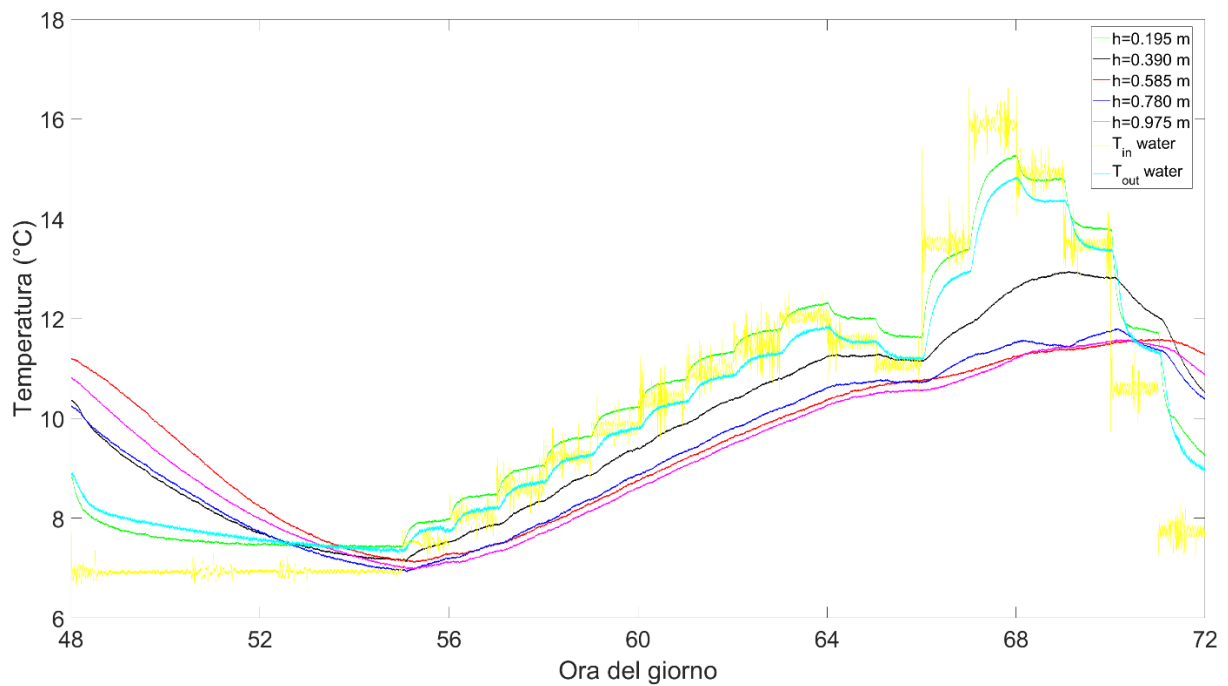
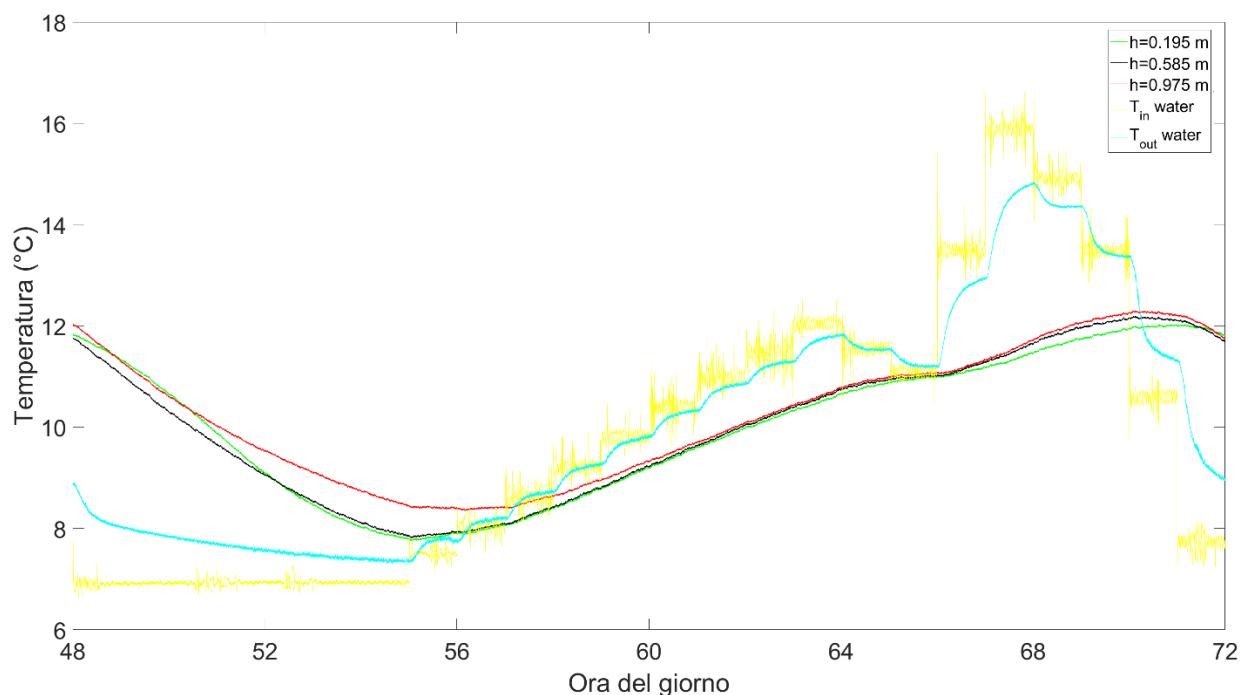


Figura 23. Temperature termocoppie colonna assiale.



**Figura 24. Temperature termocoppie colonna verticale dei semi-raggi.**

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 20, 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 5°C, quello della portata massica è costante nelle 24 ore e pari a 0.095 kg/s, mentre il set-point della T4 varia di ora in ora in funzione del carico termico simulato dagli scambiatori di calore. In questo documento sono stati omessi i dettagli relativi alla simulazione sperimentale del carico termico, rappresentato da un'utenza residenziale monofamiliare, che tuttavia possono essere trovati nel report della linea di attività LA 4.23, relativa alla seconda annualità. I suddetti set-point per la temperatura e la portata sono quelli forniti dal partner UNINA e rappresentano uno degli output dell'attività di ottimizzazione svolta nell'ambito della LA 4.29.

## 4 Conclusioni

In questo documento sono descritte le attività sperimentali realizzate nel corso del terzo anno del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, riguardanti la ricerca e la caratterizzazione 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. In particolare, nella terza annualità è stata

effettuata la caratterizzazione della conducibilità termica di un PCM commerciale in presenza di additivi costituiti da nano-piastrine di grafene (GNPs), analizzando varie soluzioni sia in termini di concentrazione che di dimensioni delle nano-piastrine, e sono stati effettuati dei test sperimentali utilizzando l'impianto prova accumulo freddo e il serbatoio con mantello in plexiglass isolato termicamente contenente il PCM commerciale citato sopra, presente presso il laboratorio LPSAT del CR Enea Portici, al variare dei principali parametri d'impianto che incidono sulle performance del sistema di accumulo. Tali attività sono state effettuate al fine di ottenere dati sperimentali per la validazione dei modelli e delle soluzioni numeriche ottimizzate per i sistemi di accumulo del laboratorio LPSAT individuate dai partner universitari UNINA e POLITO, che nella terza annualità si sono occupati dell'ottimizzazione delle performance dei suddetti sistemi di accumulo, utilizzando i modelli numerici sviluppati nel corso della seconda annualità.

In chiusura del triennio, considerando anche i risultati economici e lo studio dell'impatto ambientale del partner UNISI nelle linee di attività LA 4.32 e 4.33, è possibile definire un quadro conclusivo per quanto concerne la possibilità di utilizzare sistemi di accumulo del freddo basati su PCM della stessa tipologia di quelli analizzati sperimentalmente nel laboratorio LPSAT, in sostituzione dei classici sistemi di accumulo ad acqua, per applicazioni di tipo residenziale. Partendo proprio dallo studio di UNISI, i risultati ottenuti nella LA 4.33 hanno evidenziato la maggiore convenienza economica e sostenibilità ambientale dell'accumulo convenzionale ad acqua rispetto ai sistemi con PCM presenti e testati nel laboratorio LPSAT, considerando per questi ultimi gli stessi materiali e le stesse dimensioni di quelli LPSAT. Questo risultato acquista ancora più valore se si considerano anche le conclusioni delle analisi effettuate dai partner UNINA e POLITO, rispettivamente nelle linee LA 4.29 e LA 4.31, secondo cui nei sistemi LPSAT è necessario aumentare lo scambio termico tra PCM e fluido termovettore al fine di riuscire a sfruttare il 100% del potenziale di accumulo del PCM. Nel sistema shell and tube ciò può essere ottenuto, ad esempio, aumentando l'aria di scambio dello scambiatore, oppure aggiungendo additivi per aumentare la conducibilità dei PCM, in ogni caso con un ulteriore aggravio sul costo e sull'impatto ambientale dei sistemi con PCM.