

Ricerca di Sistema elettrico



**Caratterizzazione sperimentale del sistema di
raffrescamento per il personal cooling con PCM
integrato realizzato nel corso del PTR 19-21 (LA5.5)**

Luigi Mongibello, Carmine Cancro, Gabriele Ciniglio

RdS_PTR 22-24_PR 1.5_LA5.5_090

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO PER IL PERSONAL COOLING CON PCM INTEGRATO REALIZZATO NEL CORSO DEL PTR 19-21 (LA5.5)

Luigi Mongibello (ENEA), Carmine Cancro (ENEA), Gabriele Ciniglio

con la collaborazione di Francesco Miccoli (UNINA), Domenico Mele (ENEA), Francesco Pascarella (ENEA), e Aniello Borriello (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *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

Linea di attività: LA 5.5

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi (ENEA)

Responsabile del Work Package: Luigi Mongibello (ENEA)

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
➤	CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO PER IL PERSONAL COOLING CON PCM INTEGRATO REALIZZATO NEL CORSO DEL PTR 19-21 CONSIDERANDO DIVERSE CONFIGURAZIONI;.....	3
➤	INDIVIDUAZIONE DI UNA SPECIFICA APPLICAZIONE DEL SISTEMA PER IL PERSONAL COOLING;	3
➤	SELEZIONE DEI PCM COMMERCIALI.....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
➤	SELEZIONE DEL PCM COMMERCIALE DA UTILIZZARE SIA PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA DA LABORATORIO CHE PER IL DIMOSTRATORE PER IL PERSONAL COOLING;.....	3
➤	CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL SISTEMA INTEGRATO REFRIGERATORE-PCM REALIZZATO NEL CORSO DEL PTR 19-21 CONSIDERANDO DIVERSE CONFIGURAZIONI;	3
➤	INDIVIDUAZIONE DI UNA SPECIFICA APPLICAZIONE DEL SISTEMA PER IL PERSONAL COOLING;	3
3	PRODOTTI ATTESI	3
4	PRODOTTI SVILUPPATI	3
5	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	3
6	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	4

1 Risultati attesi

- Caratterizzazione sperimentale del sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato realizzato nel corso del PTR 19-21 considerando diverse configurazioni;
- Individuazione di una specifica applicazione del sistema per il personal cooling;
- Selezione dei PCM commerciali.

2 Risultati ottenuti

- Selezione del PCM commerciale da utilizzare sia per la caratterizzazione del sistema da laboratorio che per il dimostratore per il personal cooling;
- Caratterizzazione sperimentale del sistema integrato refrigeratore-PCM realizzato nel corso del PTR 19-21 considerando diverse configurazioni;
- Individuazione di una specifica applicazione del sistema per il personal cooling;

3 Prodotti attesi

- Report tecnico dal titolo “Caratterizzazione sperimentale del sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato realizzato nel corso del PTR 19-21”;

4 Prodotti sviluppati

- Report tecnico dal titolo “Caratterizzazione sperimentale del sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato realizzato nel corso del PTR 19-21”.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per quanto concerne le attività e i risultati, non ci sono stati scostamenti rilevanti rispetto a quanto preventivato, mentre, relativamente alla parte economica, c'è uno scostamento in positivo di 3.399,83 € (costi rendicontati maggiori rispetto a quelli preventivati) dovuto al passaggio di livello di uno dei ricercatori impegnati nella linea di attività.

6 Sintesi delle attività svolte

L'obiettivo principale delle attività è stata la caratterizzazione sperimentale, considerando varie condizioni di funzionamento, del sistema integrato refrigeratore-PCM realizzato nel corso del triennio precedente per validare sperimentalmente un modello non stazionario per la simulazione numerica della termofluidodinamica relativa al PCM integrato nel condensatore. Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti da tale attività di caratterizzazione, saranno dimensionati i componenti principali del dimostratore che dovrà essere realizzato nella parte finale del triennio, nonché i parametri fondamentali del ciclo inverso che sarà implementato nel circuito refrigerante, in cui si utilizzerà il refrigerante R134a, come previsto dall'attività di pre-design realizzata nel corso del triennio precedente. A tale scopo, nel corso della presente linea di attività è stata anche realizzata un'attività di caratterizzazione termofisica finalizzata a selezionare, tra due possibili candidati, il materiale a cambiamento di fase che sarà impiegato nel dimostratore.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Risultati dell'analisi calorimetrica

Nella prima parte sono stati effettuati dei test sperimentali di calorimetria a scansione differenziale su due diversi PCM commerciali selezionati, sulla base delle loro schede tecniche, come potenziali candidati per essere impiegati nel dimostratore di refrigeratore portatile, ovvero il Rubitherm RT35HC e il Rubitherm RT35.

Per la realizzazione delle varie prove è stato utilizzato il calorimetro a scansione differenziale DSC 250 della TA Instruments (Waters Corporation), mostrato in Figura 1.



Figura 1. DSC 250 della TA Instruments.

Le schede tecniche del produttore del Rubitherm RT35HC e del Rubitherm RT35 sono riportate, rispettivamente, in Figura 2 e Figura 3.

The most important data:	Typical Values	
Melting area	34-36	[°C]
	main peak: 35	
Congeealing area	36-34	[°C]
	main peak: 35	
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 27°C to 42°C.	240	[kJ/kg]*
Specific heat capacity	67	[Wh/kg]*
Density solid at 25°C	2	[kJ/kg·K]
Density liquid at 40°C	0,88	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,77	[kg/l]
Volume expansion	0,2	[W/(m·K)]
Flash point	12	[%]
Max. operation temperature	177	[°C]
	70	[°C]



Figura 2. Scheda tecnica del Rubitherm RT35HC.

The most important data:	Typical Values	
Melting area	32-38	[°C] main peak: 35
Congeaing area	38-32	[°C] main peak: 35
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 26°C to 41°C.	160	[kJ/kg]*
Specific heat capacity	45	[Wh/kg]*
Density solid at 15°C	2	[kJ/kg·K]
Density liquid at 45°C	0,86	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,77	[kg/l]
Volume expansion	0,2	[W/(m·K)]
Flash point	12,5	[%]
Max. operation temperature	170	[°C]
	65	[°C]



Figura 3. Scheda tecnica del Rubitherm RT35.

I primi test eseguiti riguardano l'RT35HC. Per la caratterizzazione, è stato preparato un campione contenente 8,13 mg di materiale e con l'obiettivo di determinare il suo calore latente di fusione, ed è stato sottoposto alle seguenti sequenze termiche, a partire da una temperatura iniziale di 40°C:

- Rampa dai 40 °C fino ai 15°C a 5 °C/min
- Isoterma di 10,0 min
- Rampa a X °C/min fino a 55 °C
- Isoterma di 5 min
- Rampa a X °C/min fino a 15 °C
- Isoterma di 5,0 min

dove con la X si indica la velocità di salita o discesa in rampa che è stata fatta variare tra le varie prove e il cui valore verrà in seguito specificato di volta in volta.

Nel primo test la X è stata fissata pari ad 1 in modo che le rampe di salita e discesa centrali avvenissero con un tasso pari ad 1 °C/min. Il flusso termico normalizzato assorbito/rilasciato dal campione in funzione della temperatura è mostrato in Figura 4. In Figura 4 si può notare la presenza di sotto-raffreddamento e di doppi picchi nella fase di solidificazione, e di un flusso termico che esibisce un comportamento anomalo, quasi discontinuo a un certo punto, con valori che prima calano, poi di poco crescono, e poi ricalano.

In letteratura è possibile trovare un'adeguata e dettagliata spiegazione a tutto ciò. È stato spesso osservato che tale processo di separazione in multi-picco è esibito dal materiale in fase di congelamento mentre è raro nella fase di fusione a meno che non si scelgano delle velocità di riscaldamento/raffreddamento estremamente piccole. La motivazione di tutto ciò risiede nel fatto che molti PCM commerciali sono miscele con bassa purezza, soprattutto le cere di paraffina (come nel nostro caso) che sono costituite da vari tipi di alcani. Ciò comporta che in virtù delle interazioni molecolari tra i vari componenti aventi pesi molecolari diversi, le miscele sperimentino un processo di fusione congruente eccezion fatta per i casi in cui i pesi molecolari sono nettamente diversi. Tutt'altro invece accade durante la fase di solidificazione dove saranno presenti diversi picchi a causa dei diversi meccanismi di passaggio di fase: maggiore è il peso molecolare del componente, maggiore è il suo punto di congelamento.

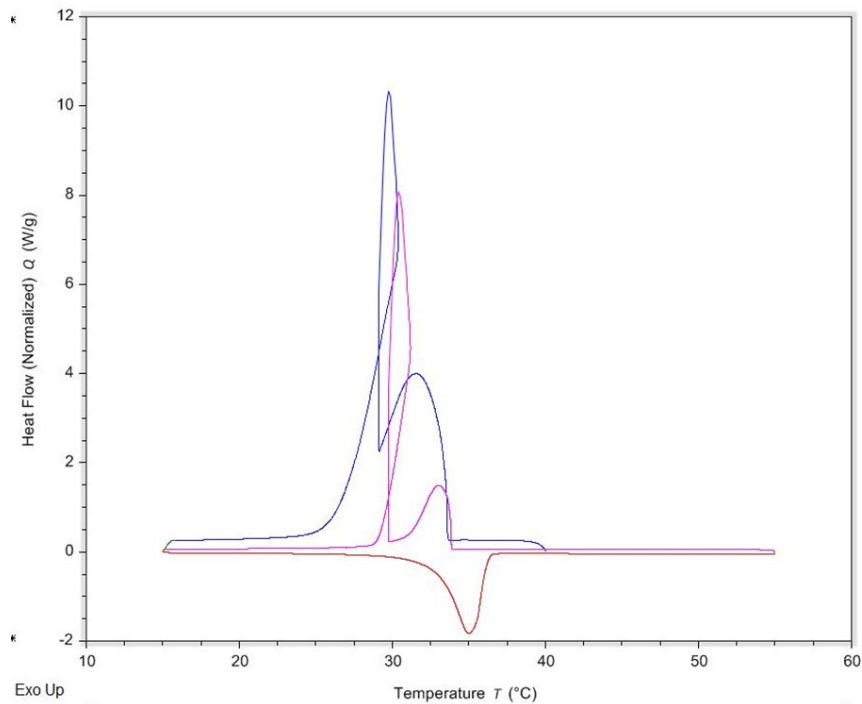


Figura 4. Grafico T-Flusso termico normalizzato per un campione di 8,13 mg di Rubitherm RT35HC con tasso di 1 °C/min.

Per quanto concerne la discontinuità invece, tramite applicazione di un microscopio con possibilità di registrazione video, è stato notato che in corrispondenza della rapida salita del flusso termico presente nel grafico, il materiale esibiva un'istantanea redistribuzione spaziale. In particolare, il PCM quando era tutto fuso ricopriva l'intero volume del pan sottostante, iniziata la fase di raffreddamento incominciava a solidificare ai bordi creando molteplici corone circolari concentriche in cui si addensavano i nuclei di solidificazione. Il processo avviene gradualmente fino ad un momento in cui perentoriamente il PCM si stacca dai bordi e solidificava tutto compatto al centro. Ciò corrisponde alla presenza della discontinuità osservabile nel grafico (Figura 4), la quale dunque trova giustificazione in un meccanismo di redistribuzione spaziale del materiale sull'area di calcolo che induce un'instabilità nella misurazione, che come ricordiamo si avvale dell'intera superficie del pan come base di calcolo, e che potrebbe venir fisicamente giustificata in una liberazione di energia da parte del PCM connessa alla formazione di legami intermolecolari talmente grande da superare per qualche istante la sottrazione energetica eseguita dal macchinario per la conduzione della fase di congelamento con conseguente aumento temporaneo della temperatura.

Ritornando all'esito del primo test, la Figura 5 mostra anche i risultati del post-processing realizzato dallo stesso software che si utilizza per la programmazione del DSC (TRIOS).

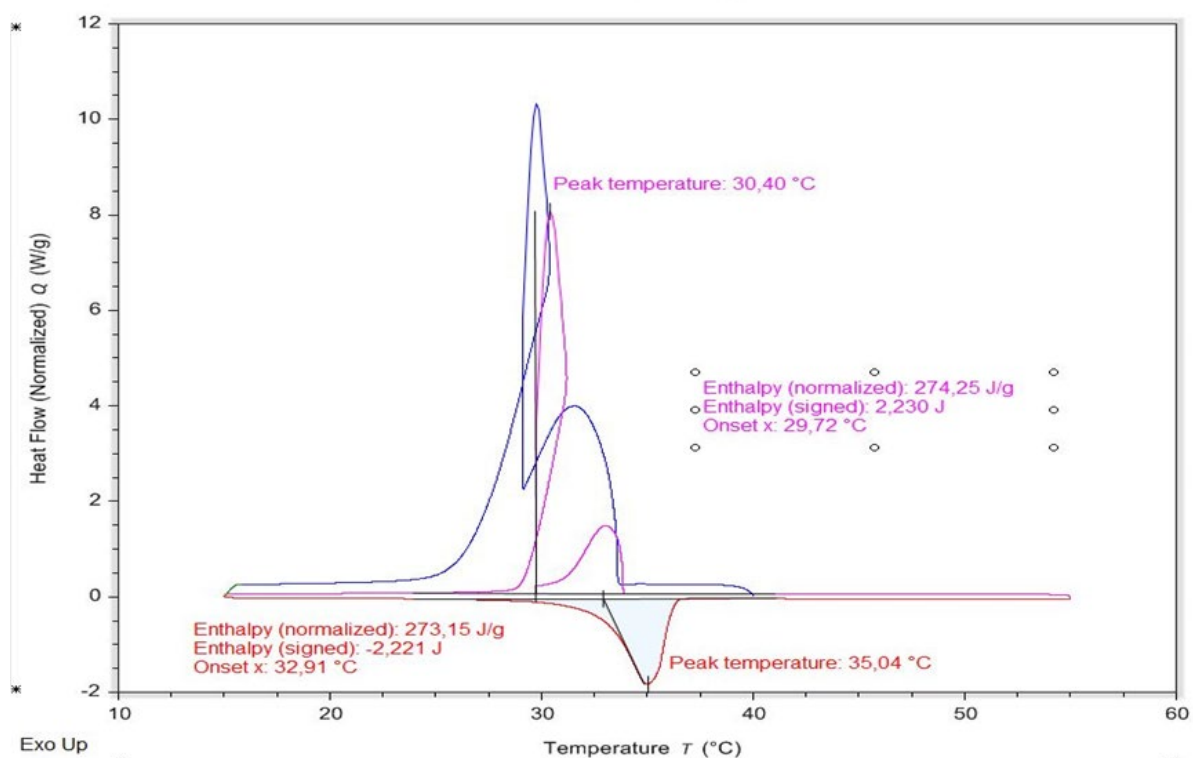


Figura 5. Grafico T-Flusso termico normalizzato per un campione di 8,13 mg di Rubitherm RT35HC con tasso di 1 °C/min con analisi.

Il valore cumulativo tra calore latente e sensibile nell'intervallo di 24-41 °C risulta pari a 274,25 J/g in solidificazione e di 273,15 J/g in fusione.

Oltre a questo test, sono stati effettuati altri test, con velocità di variazione della temperatura e quantità di PCM differenti, i cui risultato sono riportati nell'allegato.

I test effettuati con il Rubitherm RT35 sono più o meno gli stessi effettuati con il Rubitherm RT35HC, considerando ovviamente che non è stato possibile avere campioni aventi esattamente la stessa massa rispetto ai campioni Rubitherm RT35HC.

Le prime analisi sono state realizzate con un campione di 4,10 mg, e con una velocità di variazione della temperatura fissata a 1°C/min. La Figura 6 e la Figura 7 mostrano i risultati ottenuti in questo caso. Si è ottenuto che nell'intervallo di 17-43°C il latente più sensibile è pari a 168,16 J/g in solidificazione, e 161,67 J/g in fusione. In questo caso, la densità di energia accumulabile è risultata sensibilmente più bassa rispetto al Rubitherm RT35HC, tuttavia si può notare un sotto-raffreddamento meno marcato, e che non è più presente il doppio picco in solidificazione.

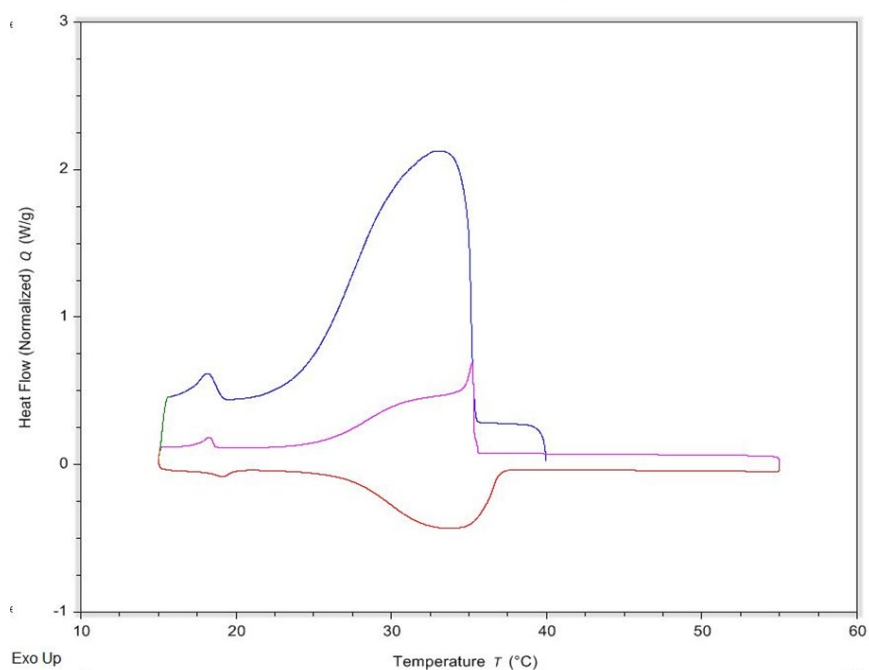


Figura 6. Grafico T-Flusso termico normalizzato per un campione di 4,10 mg di Rubitherm RT35 con tasso di 1 °C/min.

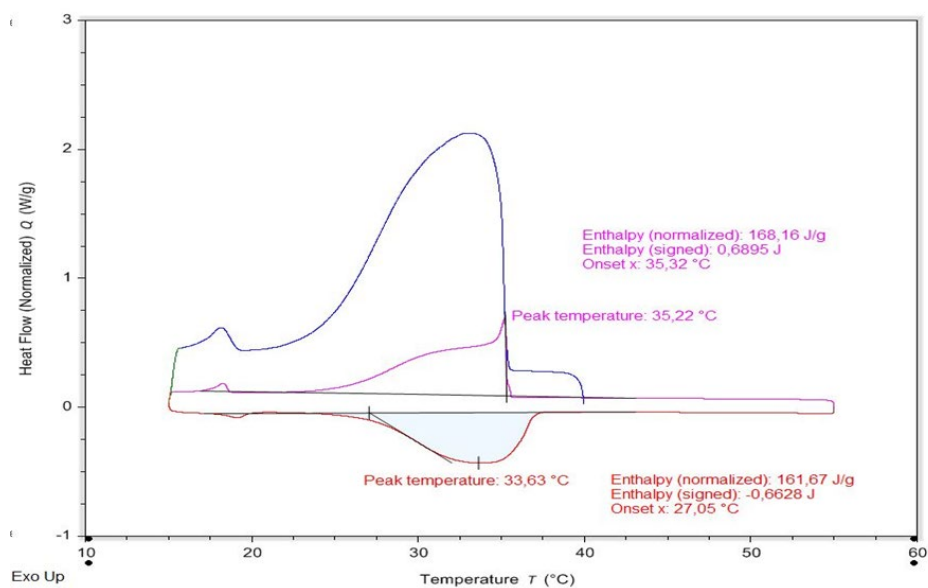


Figura 7. Grafico T-Flusso termico normalizzato per un campione di 4,10 mg di Rubitherm RT35 con tasso di 1 °C/min con analisi.

Anche per il Rubitherm RT35 sono state effettuate altre prove con velocità di variazione della temperatura e quantitativi di materiale differenti. Tutti i risultati ottenuti in queste ulteriori prove sono inseriti nell'allegato.

Tabella 1 include tutti i valori misurati del calore latente per il Rubitherm RT35HC. Per questo materiale, il valore del calore latente dichiarato su scheda tecnica è pari a pari a 211'200 J/kg, e quindi si può concludere che ci sia un buon accordo tra quanto valutato sperimentalmente e quanto riportato sulla documentazione fornita dal produttore, cosa che non sempre scontata per questa tipologia di materiale.

Tabella 1. Calore latente in fusione e solidificazione per i vari test sperimentali eseguiti sul Rubitherm RT35HC.

Rubitherm RT35HC			
Massa campione	Velocità di riscaldamento raffreddamento	Calore latente in solidificazione	Calore latente in fusione
3,59 mg	1 °C/min	219'330 J/kg	216'420 J/kg
3,59 mg	10 °C/min	209'720 J/kg	213'000 J/kg
8,13 mg	1 °C/min	238'250 J/kg	237'150 J/kg
8,13 mg	2,5 °C/min	225'180 J/kg	228'110 J/kg
8,13 mg	10 °C/min	215'190 J/kg	224'370 J/kg

Analogamente, la Tabella 2 include tutti i valori misurati del calore latente per il Rubitherm RT35. Dato che su scheda tecnica viene riportato il valore di 132'000 J/kg, possiamo concludere che anche per questo materiale vi è grossomodo congruenza con i quantitativi risultanti da analisi sperimentale.

Tabella 2. Calore latente in fusione e solidificazione per i vari test sperimentali eseguiti sul Rubitherm RT35.

Rubitherm RT35			
Massa campione	Velocità di riscaldamento raffreddamento	Calore latente in solidificazione	Calore latente in fusione
3,89 mg	1 °C/min	136'550 J/kg	130'330 J/kg
3,89 mg	10 °C/min	126'110 J/kg	122'280 J/kg
4,10 mg	1 °C/min	114'160 J/kg	107'670 J/kg
4,10 mg	10 °C/min	112'240 J/kg	108'230 J/kg

Infine, anche se il Rubitherm RT35 presenta un livello di sotto-raffreddamento nettamente inferiore rispetto al Rubitherm RT35HC, quest'ultimo presenta una densità di energia accumulabile nettamente superiore, ed è per questo motivo che si è deciso di utilizzare il Rubitherm RT35HC sia per il sistema integrato refrigeratore-PCM per i test in laboratorio, che per il dimostratore che sarà realizzato nella seconda parte del triennio.

7.2 Caratterizzazione sperimentale del sistema integrato refrigeratore-PCM

In questa sezione viene inizialmente fatta una descrizione del sistema integrato e dell'apparato sperimentale per la sua caratterizzazione, e successivamente vengono riportati i risultati di uno solo dei test sperimentali che sono stati effettuati.

I componenti principali del sistema integrato refrigeratore-PCM sono: il compressore, il condensatore contenente il materiale a cambiamento di fase, il ricevitore di liquido, l'organo di laminazione (in questo caso costituito da tre serie di tubi capillari) e l'evaporatore. Per quanto concerne il condensatore, esso può costituito da uno, due, o a tre moduli composti ognuno da un cubo di plexiglass di 17 cm di lato (Figura 8), contenente il materiale a cambiamento di fase, ovvero il Rubitherm RT35HC con temperatura di fusione pari a 35 °C, ed isolato termicamente mediante pannelli rigidi di polistirene (trasmissione termica $\lambda \cong 0.035$ W/mK) spessi 30mm. Il refrigerante, l'R134a, scorre all'interno di serpentine di rame immerse nel PCM, per una lunghezza complessiva di circa 5,13 metri per modulo.

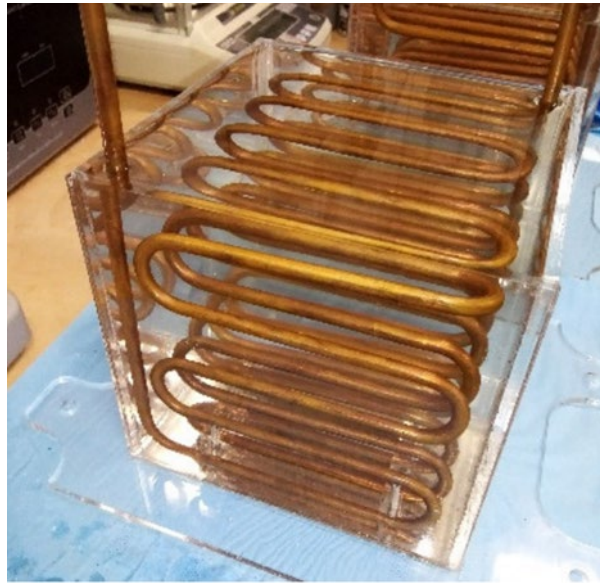


Figura 8. Modulo del condensatore senza isolamento termico.

Il diametro nominale delle linee di collegamento tra i componenti principali del circuito frigorifero è il DN4, e i flessibili di collegamento sono realizzati attraverso l'utilizzo di tubi co-estrusi in treccia tessile con interno liscio. Il compressore è il Danfoss BD50F mentre l'evaporatore è il RIVACOLD RS1040.

Per quanto riguarda i dispositivi di misura e controllo utilizzati, per il monitoraggio della temperatura del refrigerante nei punti caratteristici del ciclo termodinamico sono utilizzate 4 termoresistenze PT100 classe A. Per la misura della temperatura PCM ci si avvale di 6 termoresistenze PT100 classe A, due per ciascuno dei tre moduli che compongono il condensatore, poste una a 4,2 cm di altezza e l'altra a 9 cm. Anche per la misura della temperatura dell'aria all'ingresso e all'uscita dell'evaporatore vengono impiegate due termoresistenze PT100. Tali sensori sono caratterizzati da un'accuratezza di ± 0.15 °C (IEC 751). Per la misura della pressione assoluta sono stati scelti due sensori Danfoss AKS 32, con un'accuratezza del circa il 5% dalla misura rilevata, posizionati a monte e a valle del compressore, per misurare rispettivamente la bassa e l'alta pressione nel circuito. L'acquisizione dati è avvenuta tramite il controller NI cRIO-9053 e il software Labview.

L'apparato sperimentale complessivo è mostrato in Figura 9.



Figura 9. Sistema integrato refrigeratore-PCM realizzato in laboratorio.

Nell'allegato vengono mostrati i risultati di sei test, considerando sia i dati relativi al processo di fusione che di solidificazione del materiale a cambiamento di fase presente all'interno dei moduli del condensatore, indagando le possibili configurazioni ottenibili implementando prima un solo modulo, poi due, e infine tutti e tre. Tre delle sei prove sperimentali sono state effettuate a valle della sostituzione della serpentina prima presentata, con un'altra caratterizzata da una lunghezza minore, e pertanto con una superficie di scambio termico inferiore.

Nel seguito si riportano soltanto i risultati relativi a un solo dei test effettuati, ovvero i risultati di uno dei casi in cui condensatore è costituito da tre moduli contenenti il serpentino con la superficie di scambio termico più bassa. In questo caso, il compressore è settato alla velocità massima, ovvero 3500 giri al minuto, la girante dell'evaporatore è impostata al 50% della potenza nominale, e la temperatura dell'aria esterna (del laboratorio) con cui interagisce l'evaporatore è di circa 24 °C, così come la temperatura iniziale del PCM.

La Figura 10 mostra l'andamento delle pressioni, che si stabilizzano ai seguenti valori: 12,82 bar per l'alta pressione e 4,05 bar per la bassa pressione.

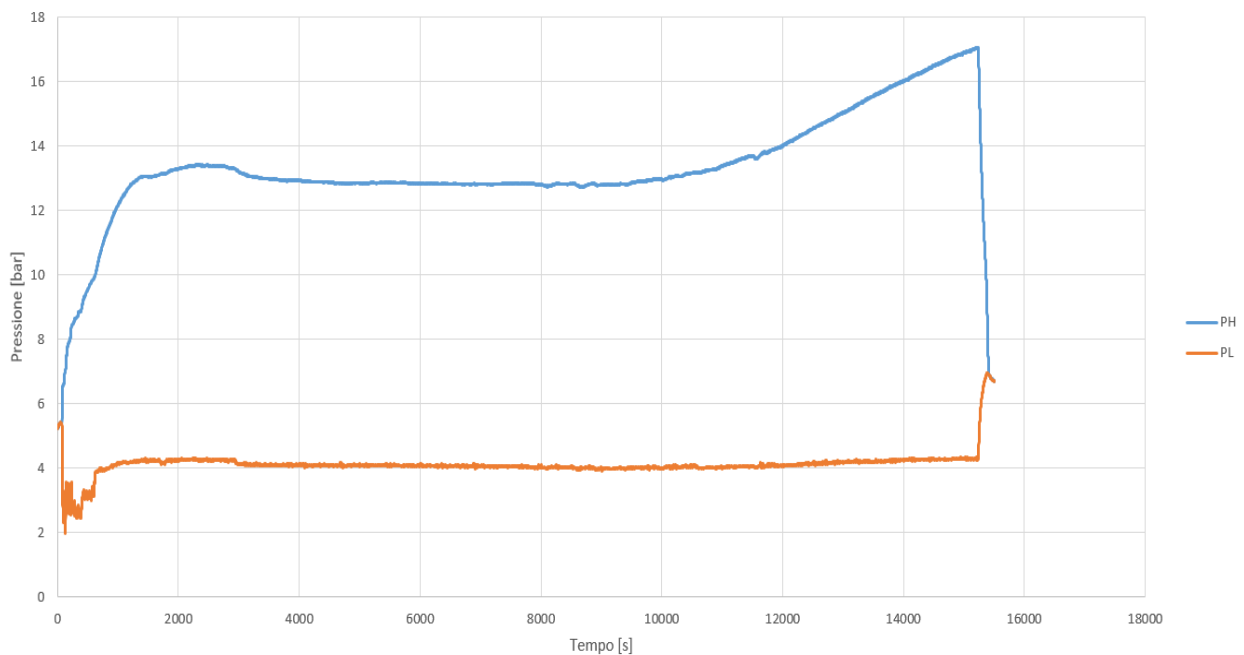


Figura 10. Andamento delle pressioni.

La Figura 11 mostra la temperatura del refrigerante nei punti caratteristici del ciclo termodinamico, che si stabilizzano a regime ai seguenti valori: $T2^*=50,4$ °C, $T3=48,5$ °C, $T4=12,18$ °C e $T1=11,64$ °C. Si può notare che, verso il finire del test, quando il materiale a cambiamento di fase è ormai completamente liquido, le temperature nel condensatore aumentano in maniera repentina e così fa anche la pressione, il cui massimo arriva a toccare i 17 bar.

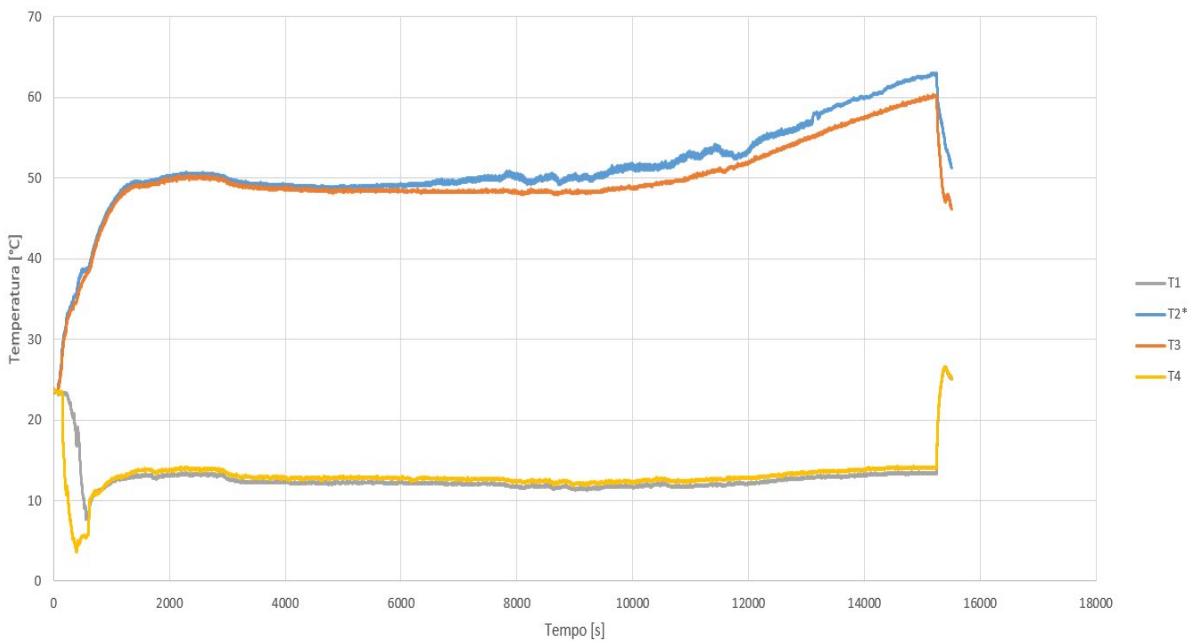


Figura 11. Andamento delle temperature dei punti caratteristici del ciclo termodinamico.

La Figura 12 mostra una rappresentazione grafica del ciclo termodinamico. Si può notare come il sotto-raffreddamento in questo caso sia quasi trascurabile (valore inferiore a 2 °C).

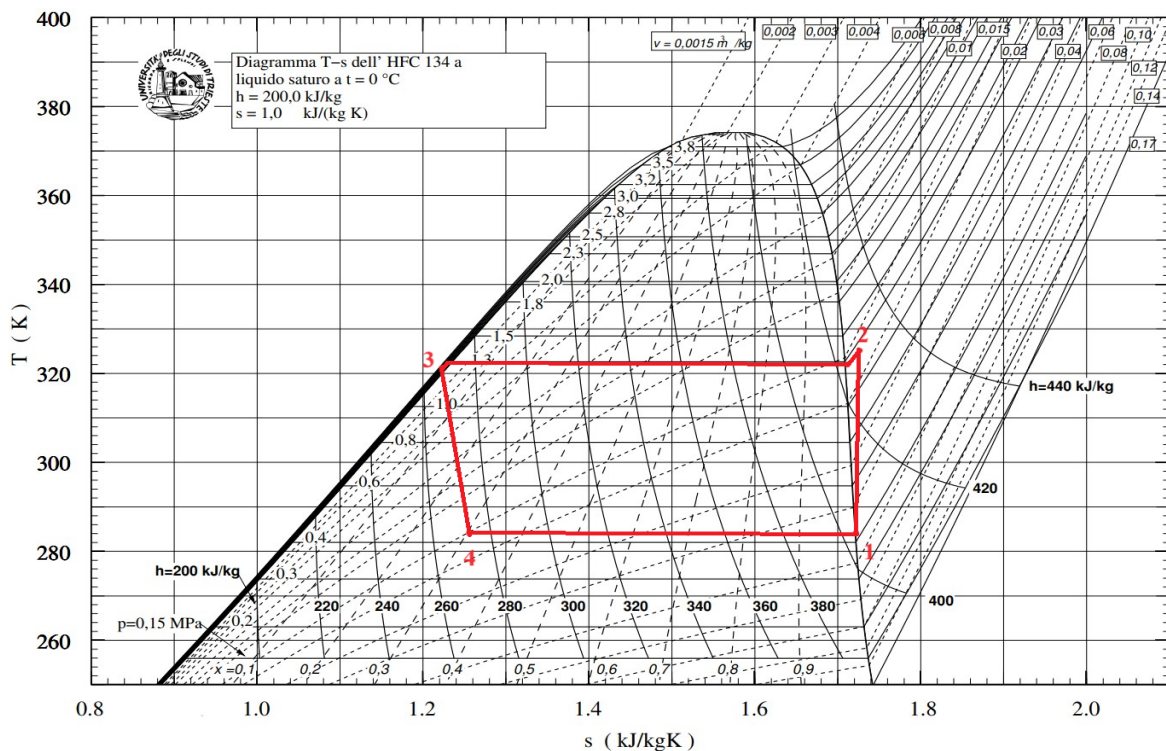


Figura 12. Ciclo termodinamico reale sul piano T-s.

Passando ad analizzare ciò che accade al PCM, le Figure 13, 14 e 15 mostrano rispettivamente le temperature del PCM nel primo, secondo e terzo modulo, mentre la Figura 16 mostra tutte le temperature nel PCM nello stesso grafico. Con tutti i profili di temperatura dei tre moduli su di un unico grafico si può notare come essi siano simili tra di loro con un graduale abbassamento del potenziale di scambio termico

procedendo in direzione del fluido refrigerante (ovvero dal primo al terzo modulo). Con riferimento alla Figura 16, si può affermare che il PCM è quasi del tutto sciolto dopo 12000 s. In Figura 17 possiamo vedere come appare il materiale a cambiamento di fase a termine di questa prova sperimentale.

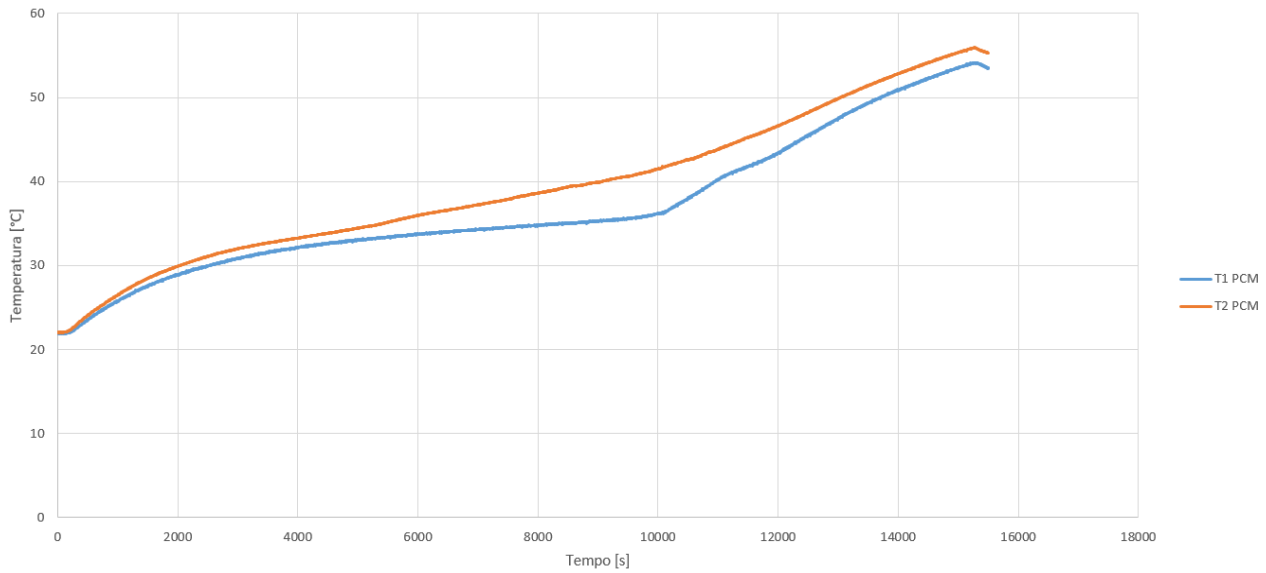


Figura 13. Temperature del PCM all'interno del primo modulo.

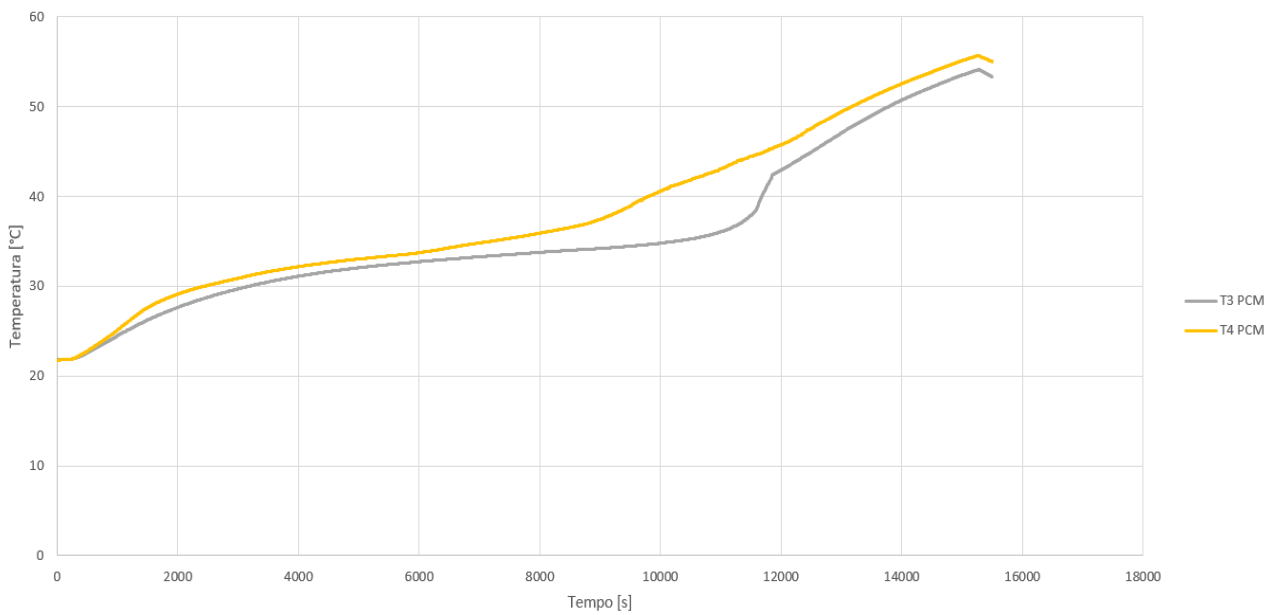


Figura 14. Temperature del PCM all'interno del secondo modulo.

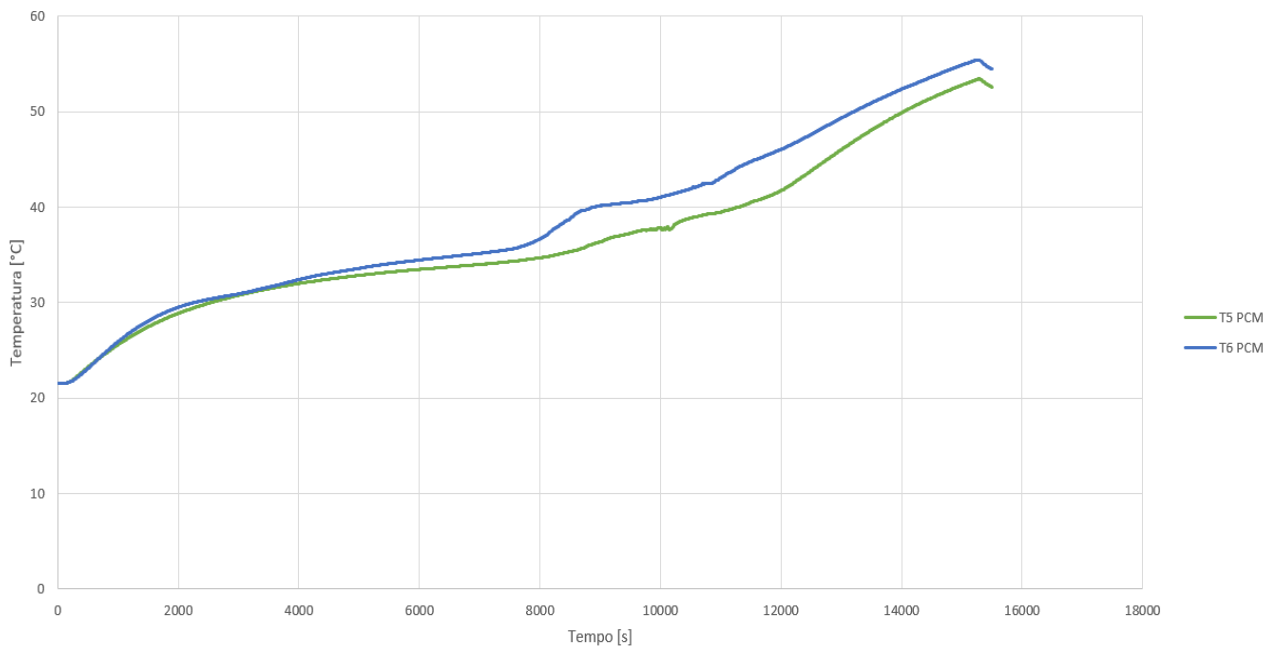


Figura 15. Temperature del PCM all'interno del terzo modulo.

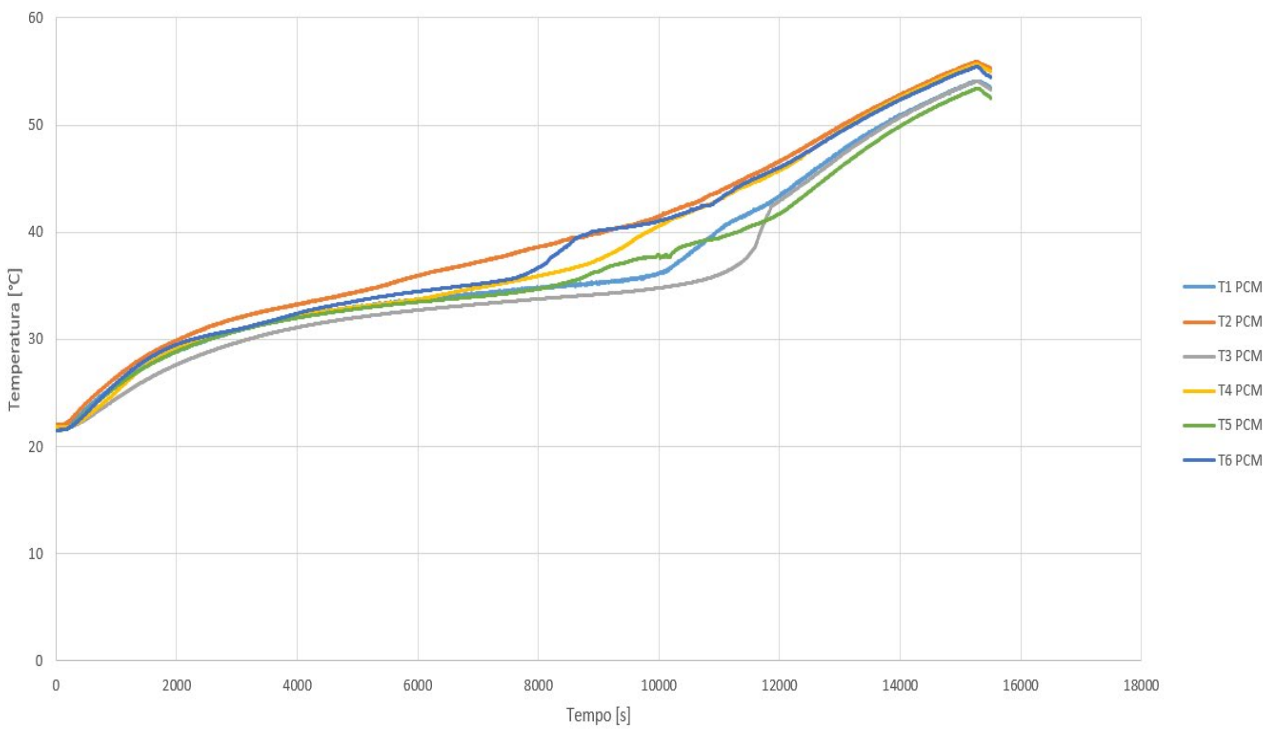


Figura 16. Temperature del PCM all'interno dei tre moduli.

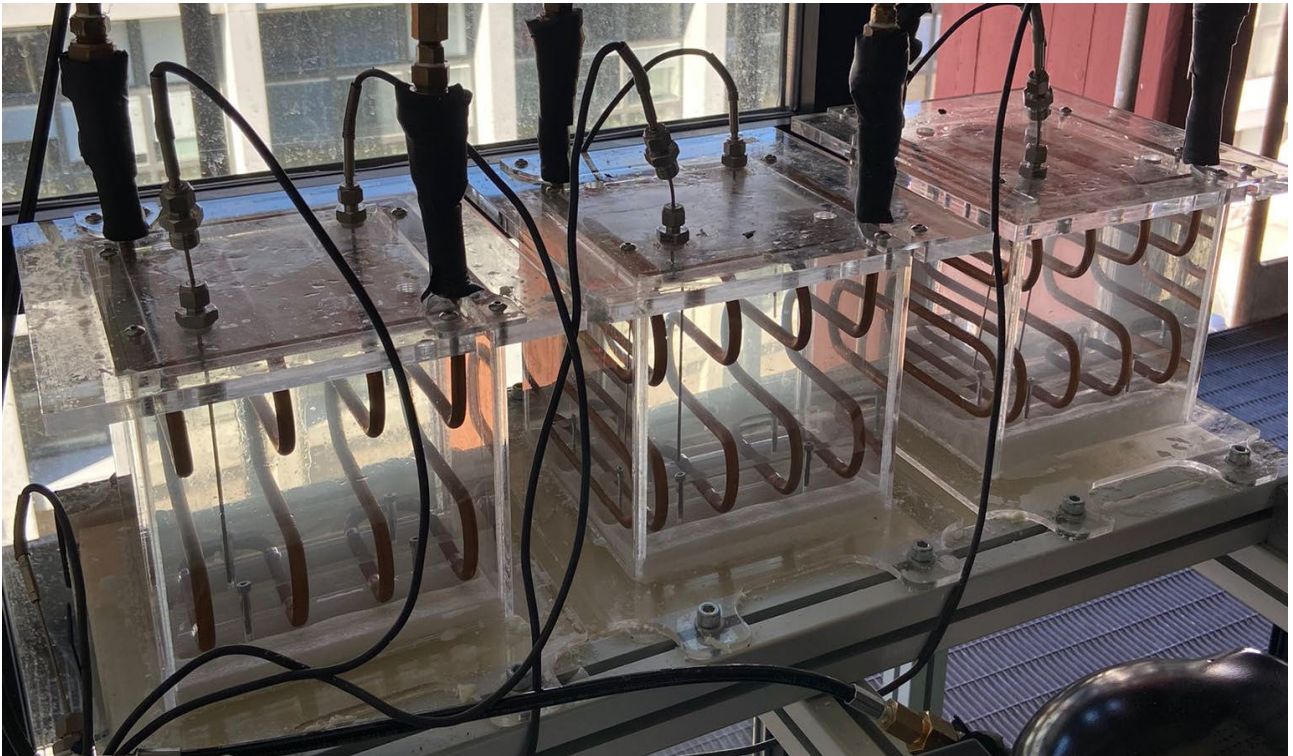


Figura 17. PCM ormai fuso all'interno dei tre moduli.

La Figura 18 mostra l'andamento della differenza tra la temperatura ambiente e la temperatura dell'aria in uscita dall'evaporatore, mentre la Figura 19 mostra l'andamento della temperatura media del refrigerante nell'evaporatore. Si può notare come la differenza di temperature si assesti sui 3°C, e che tale valore venga mantenuto per più di 15000 s, indicando un'autonomia del sistema integrato superiore alle 4 ore

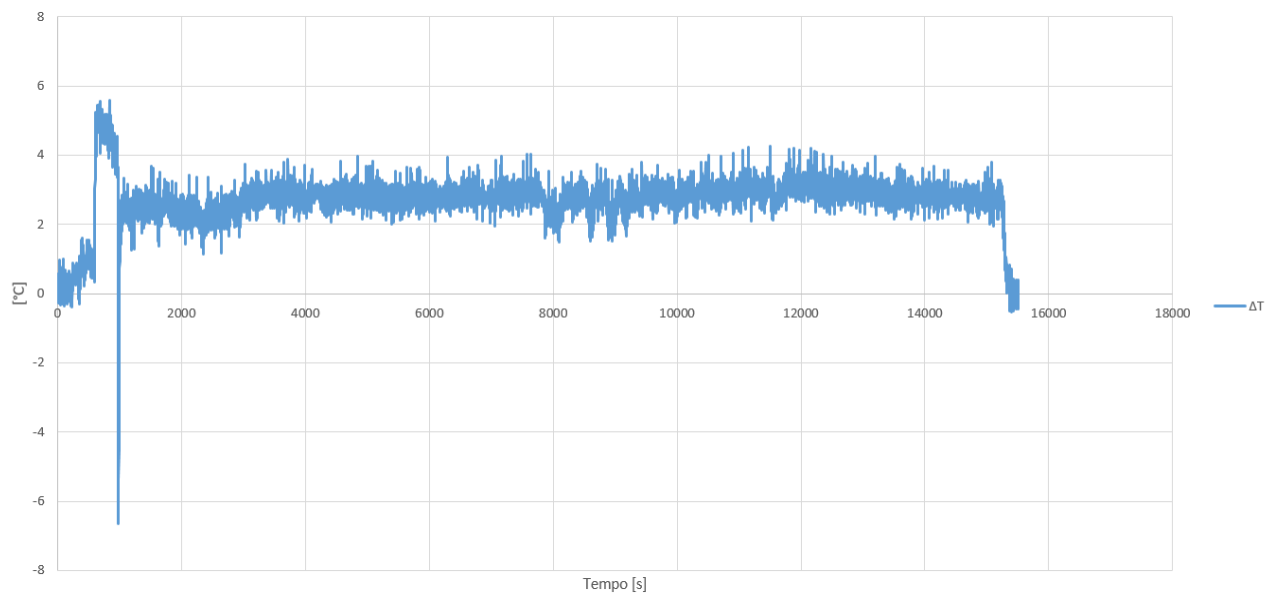


Figura 18. Differenza tra la T ambiente e la T aria fredda.

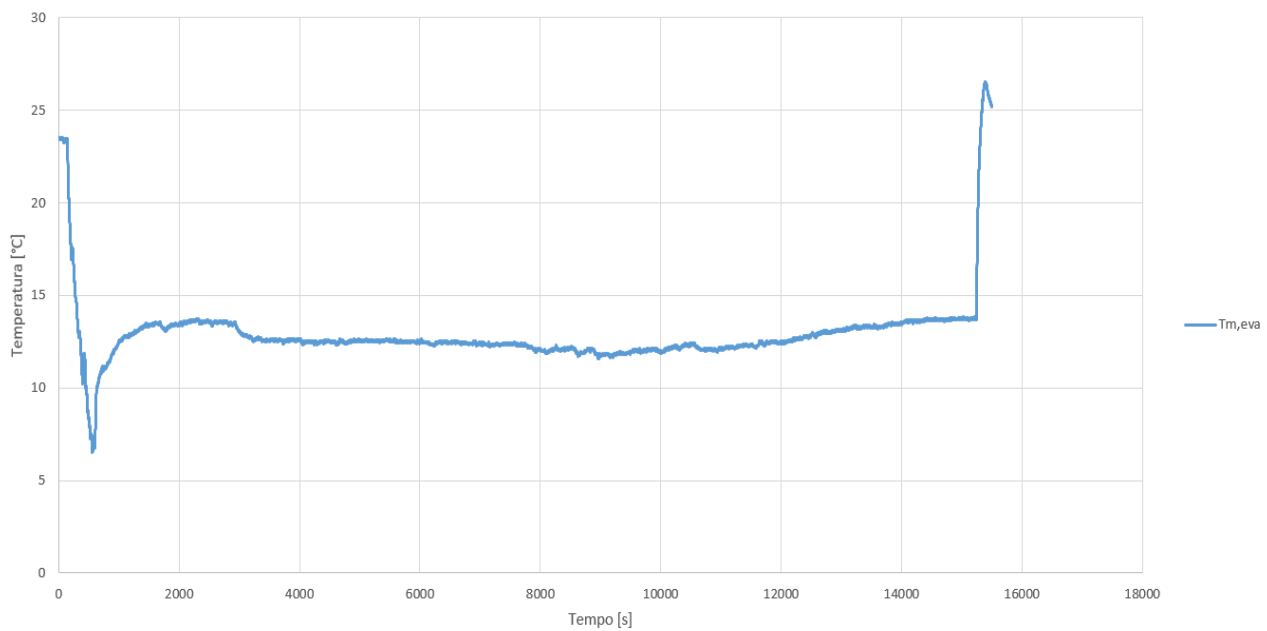


Figura 19. Temperatura media all'evaporatore.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non erano previste consulenze per la presente linea di attività.

9 Pubblicazioni scientifiche

Per questa linea di attività non era prevista la realizzazione di pubblicazioni scientifiche.

10 Eventi di disseminazione

Per questa linea di attività non era prevista l'organizzazione/partecipazione a eventi di disseminazione.