

Ricerca di Sistema elettrico



Realizzazione e caratterizzazione sperimentale di un sistema integrato refrigeratore-PCM di piccola taglia: caratterizzazione dei PCM, e progettazione, realizzazione, e analisi sperimentale del dimostratore (LA5.6)

L. Mongibello, A. Macaluso

Realizzazione e caratterizzazione sperimentale di un sistema integrato refrigeratore-PCM di piccola taglia: caratterizzazione dei PCM, e progettazione, realizzazione, e analisi sperimentale del dimostratore (LA5.6)

L. Mongibello (ENEA), A. Macaluso (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 5.6

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Luigi Mongibello, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
6.1	Caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei PCM selezionati.	10
6.2	Progettazione di un sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato	10
6.3	Realizzazione e analisi sperimentale del dimostratore in ambiente (industrialmente) rilevante.....	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei PCM selezionati	11
7.2	Progettazione di un sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato	13
7.2.1	Risultati salienti	2
7.2.1.1	Confronto prova Sg vs Sgs.....	2
7.2.1.2	Confronto Sgs vs Sps	2
7.3	Realizzazione e analisi sperimentale del dimostratore in ambiente (industrialmente) rilevante.....	2
7.4	Riferimenti bibliografici	2
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	3
9	Pubblicazioni scientifiche	4
10	Eventi di disseminazione	5

Indice delle figure

Figura 1 Capacità termica effettiva del PCM RT35H misurata con il calorimetro DSC 250 della TA Instruments (Waters).....	12
Figura 2 Viscosità dinamica del PCM RT35HC misurata con il reometro Discovery HR20 della Waters.....	12
Figura 3 a) Calorimetro DSC 250 della TA Instruments (Waters); b) Reometro Discovery HR20 della Waters.....	13
Figura 4 Apparato sperimentale	2
Figura 5 Layout	3
Figura 6 Diagramma T-s del ciclo termodinamico teorico.....	2
Figura 7 Immagini termografiche: a) valvola di espansione; b) misuratore di portata a effetto Coriolis; c) particolare della sezione di uscita del misuratore di portata; d) compressore.....	2
Figura 8 Particolare dei moduli del condensatore: a) senza schiuma metallica; b) con schiuma metallica	2
Figura 9 Andamento temporale delle pressioni del ciclo: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps	2
Figura 10 Andamento temporale delle temperature del ciclo: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps.....	3
Figura 11 Andamento temporale delle temperature all'interno dei moduli del condensatore durante la fase utile: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps.....	4
Figura 12 Andamento temporale delle temperature all'interno dei moduli del condensatore durante la fase di scarica: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps.....	5
Figura 13 Andamento temporale delle temperature dell'aria a monte e valle dell'evaporatore: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps	6
Figura 14 Vista d'insieme del prototipo e progetto del telaio in plexigas.....	2
Figura 15 Alcune delle fasi del montaggio e inserimento in camera climatica (da in alto a sinistra in senso orario).....	2
Figura 16 Fasi della prova in camera climatica; da in alto a sinistra in senso orario: prototipo in camera climatica; acquisizione dati durante la prova; prototipo in camera climatica durante la prova.	3
Figura 17 Grafici caratteristici della prova in camera climatica; a) andamento temporale delle pressioni; b) andamento temporale delle temperature del ciclo; c) andamento temporale del salto termico dell'aria e relative temperature.....	2

Indice delle tabelle

Tabella 1 Proprietà termodinamiche dei punti salienti del ciclo termodinamico	2
Tabella 2 Parametri prestazionali del ciclo termodinamico teorico.....	3

Tabella 3 Parametri di caratterizzazione del condensatore	3
Tabella 4 Misure e stime di caratterizzazione dell'evaporatore e del condensatore sia del rilevamento tipo che dell'intera prova	3

1 Risultati attesi

Caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei PCM selezionati;

Progettazione di un sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato;

Realizzazione e analisi sperimentale del dimostratore in ambiente (industrialmente) rilevante.

2 Risultati ottenuti

I risultati attesi elencati nella sezione precedente sono stati tutti ottenuti

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico intitolato "Realizzazione e caratterizzazione sperimentale di un sistema integrato refrigeratore-PCM di piccola taglia: caratterizzazione dei PCM, e progettazione, realizzazione, e analisi sperimentale del dimostratore"

4 Prodotti sviluppati

Rapporto tecnico intitolato "Realizzazione e caratterizzazione sperimentale di un sistema integrato refrigeratore-PCM di piccola taglia: caratterizzazione dei PCM, e progettazione, realizzazione, e analisi sperimentale del dimostratore"

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nel corso della presente attività non ci sono stati rilevanti scostamenti rispetto a quanto previsto

6 Sintesi delle attività svolte

La linea di attività è stata composta da tre fasi.

6.1 Caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei PCM selezionati.

Sono stati eseguiti ulteriori test PCM RT35HC per completarne la caratterizzazione termofisica: si sono misurati la capacità termica effettiva del PCM e la viscosità dinamica.

6.2 Progettazione di un sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato

Dopo migliorie al prototipo, si è proceduto con test utilizzando alternativamente due differenti tipologie di serpentine di scambio termico al condensatore e schiuma metallica commerciale immersa nel PCM.

6.3 Realizzazione e analisi sperimentale del dimostratore in ambiente (industrialmente) rilevante.

La configurazione finale dei moduli ha previsto l'utilizzo di schiuma metallica e serpentino piccolo; l'apparato è stato ricompattato per le prove in camera climatica, imponendo 26 °C e 50% U.R e simulando un funzionamento volutamente "on-off".

Il sistema si porta in condizioni stazionarie dopo 5 min con resa frigorifera inclusa tra 110 e 122 W; si è imposta successivamente una condizione gravosa di raffreddamento (30 °C e 75% U.R).

7 Dettaglio delle attività svolte

Si descrivono di seguito le attività realizzate e i risultati ottenuti nel corso del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico nel corso della linea di attività LA5.6, dal mese 19 al mese 36, riguardante lo sviluppo e l'analisi sperimentale di un dimostratore di refrigeratore portatile per applicazioni nell'ambito del personal cooling, basato sull'impiego di materiale a cambiamento di fase (PCM – Phase Change Material).

I titoli dei paragrafi che seguono rispecchiano quelli che sono i risultati attesi, ovvero:

1. Caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei PCM selezionati;
2. Progettazione di un sistema di raffrescamento per il personal cooling con PCM integrato;
3. Realizzazione e analisi sperimentale del dimostratore in ambiente (industrialmente) rilevante.

7.1 Caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei PCM selezionati

A completamento dell'analisi termofisica dei PCM commerciali avviata nel corso della LA 5.5, nella presente linea di attività sono state fatti ulteriori test, finalizzati a ottenere una completa caratterizzazione termofisica del materiale commerciale selezionato per il prototipo, ovvero il PCM RT35HC. In particolare, i test sono stati effettuati per misurare la capacità termica effettiva del PCM, ovvero quella che include anche il contributo del calore latente a cavallo dell'intervallo di transizione, e la viscosità dinamica, necessari per calcolare la capacità totale di accumulo del PCM integrato nel condensatore, e per stimare lo scambio termico tra il PCM e il fluido refrigerante tramite simulazioni numeriche.

Si riportano in Figura 1 e Figura 2 rispettivamente gli andamenti con la temperatura della capacità termica effettiva, misurata con il calorimetro DSC 250 della TA Instruments (Waters) mostrato in figura 3, e della viscosità dinamica, misurata con il reometro Discovery HR20 della Waters mostrato in figura 4. In entrambi i casi riportati la velocità di variazione della temperatura implementata è di $0,5^{\circ}\text{C}$ al minuto.

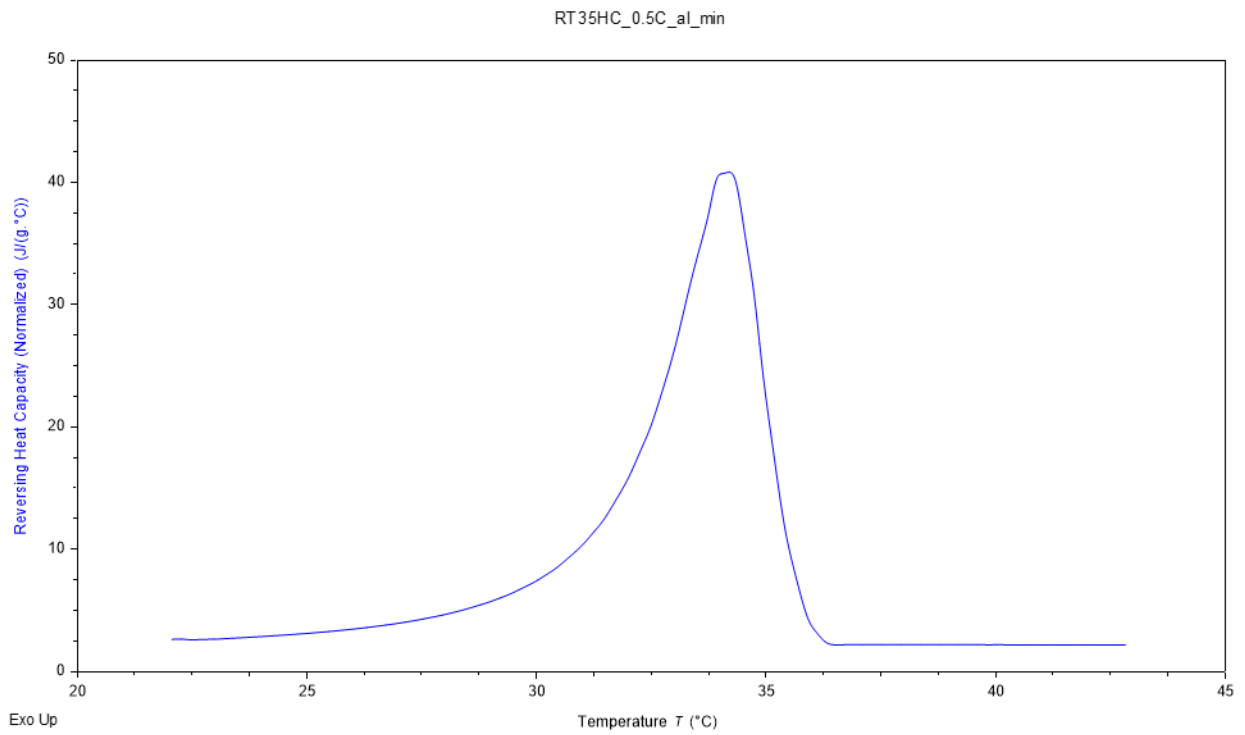


Figura 1 Capacità termica effettiva del PCM RT35H misurata con il calorimetro DSC 250 della TA Instruments (Waters).

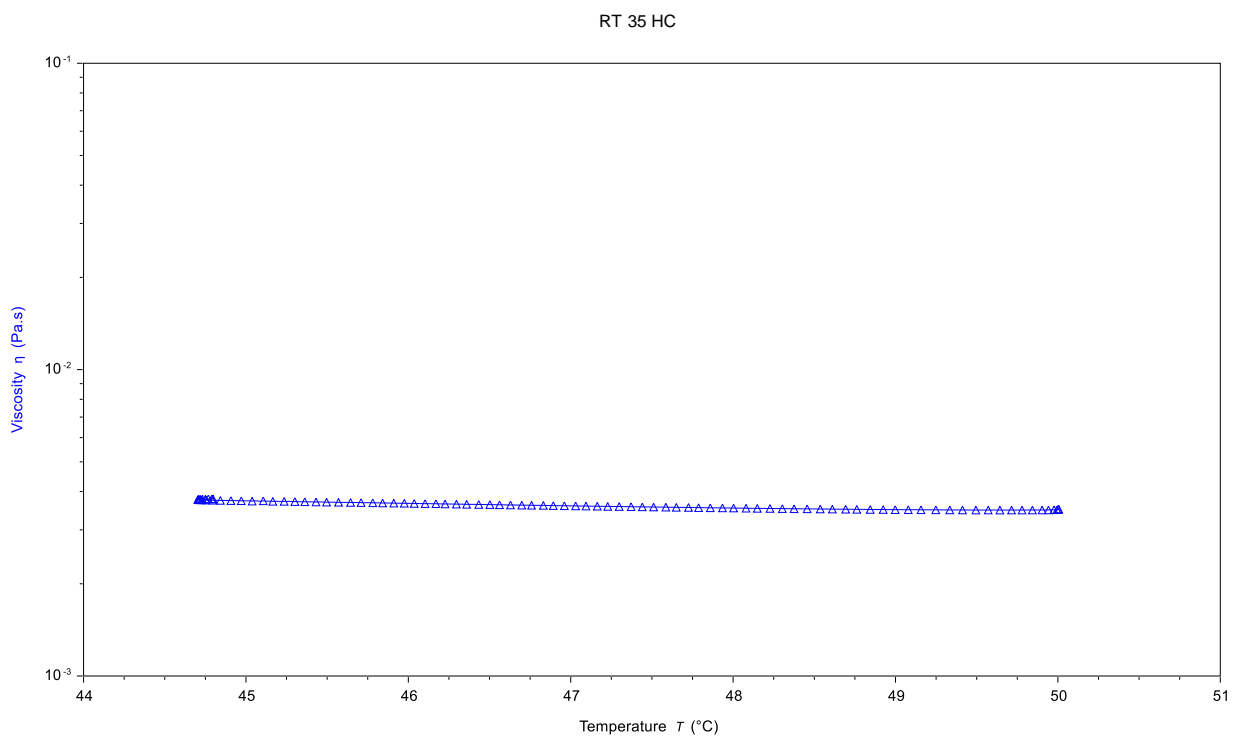


Figura 2 Viscosità dinamica del PCM RT35HC misurata con il reometro Discovery HR20 della Waters.



a)



b)

Figura 3 a) Calorimetro DSC 250 della TA Instruments (Waters); b) Reometro Discovery HR20 della Waters.

7.2 Progettazione di un sistema di raffreddamento per il personal cooling con PCM integrato

In Figura 4 e Figura 5 si riportano rispettivamente alcune immagini dell'apparato sperimentale e relativo layout, composto da:

- valvola di espansione elettronica modello CAREL E2V, con driver di comando Carel EVD;
- compressore, modello Danfoss BD50F;
- condensatore, costituito da tre moduli composti ognuno da: un cubo di plexiglass di 17 cm di lato, contenente il materiale a cambiamento di fase Rubitherm RT35HC; isolamento termico in pannelli da 3 cm in polistirene; serpentina di rame immersa nel PCM (due modelli utilizzati, da 5,13 m e da 3,75 m);
- evaporatore RIVACOLD RS1040;
- ricevitore di liquido;
- linee del circuito frigorifero costituite da tubi flessibili co-estrusi in treccia tessile ZEC FRST270N DN4 con interno liscio.

Rispetto la versione precedente del prototipo, si è operata la sostituzione del tubo capillare con la valvola di espansione elettronica.

La sensoristica e l'apparato di controllo sono stati costituiti da:

- termoresistenze PT100 classe A (accuratezza di ± 0.15 °C (IEC 751)); 4 per il ciclo; 2 ciascuno per i moduli del condensatore, poste una a 4,2 cm di altezza e l'altra a 9 cm; 2 per l'aria a monte e a valle dell'evaporatore;
- due sensori di pressione Danfoss AKS 32 (accuratezza 5% dalla misura) posti a valle del compressore e a valle della valvola di laminazione;
- due misuratori di portata a effetto Coriolis modello Micro Motion Model 2400S; uno per la misura della carica introdotta; l'altro per la misura istantanea della portata di fluido evolvente;
- controller NI cRIO-9053 e il software Labview per acquisizione dati.

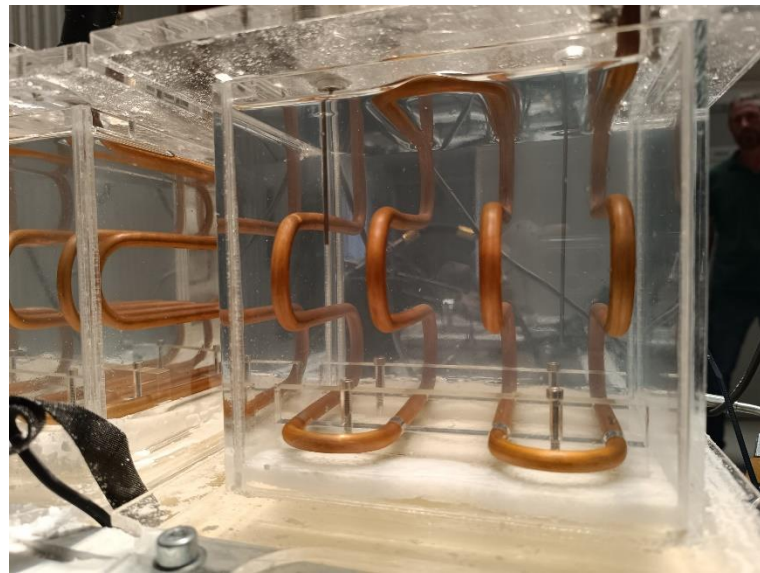
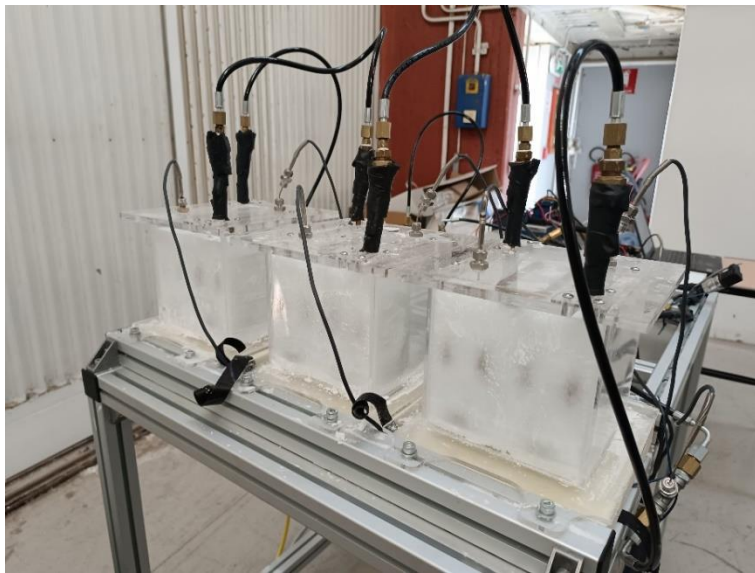
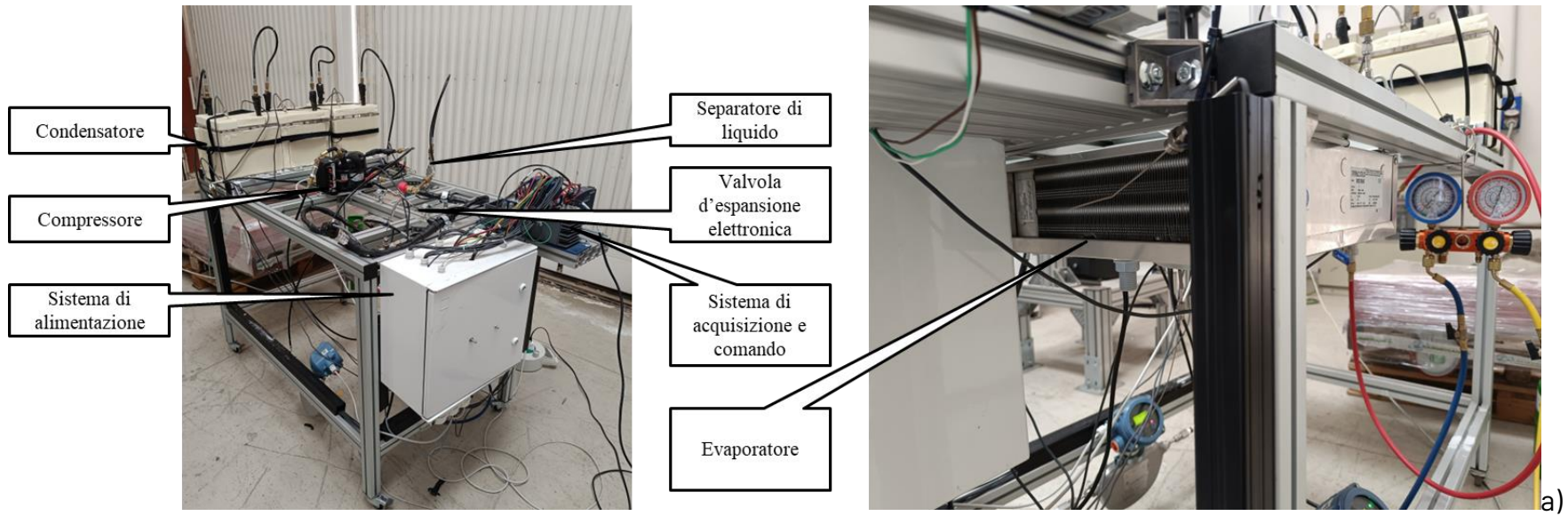


Figura 4 Apparato sperimentale

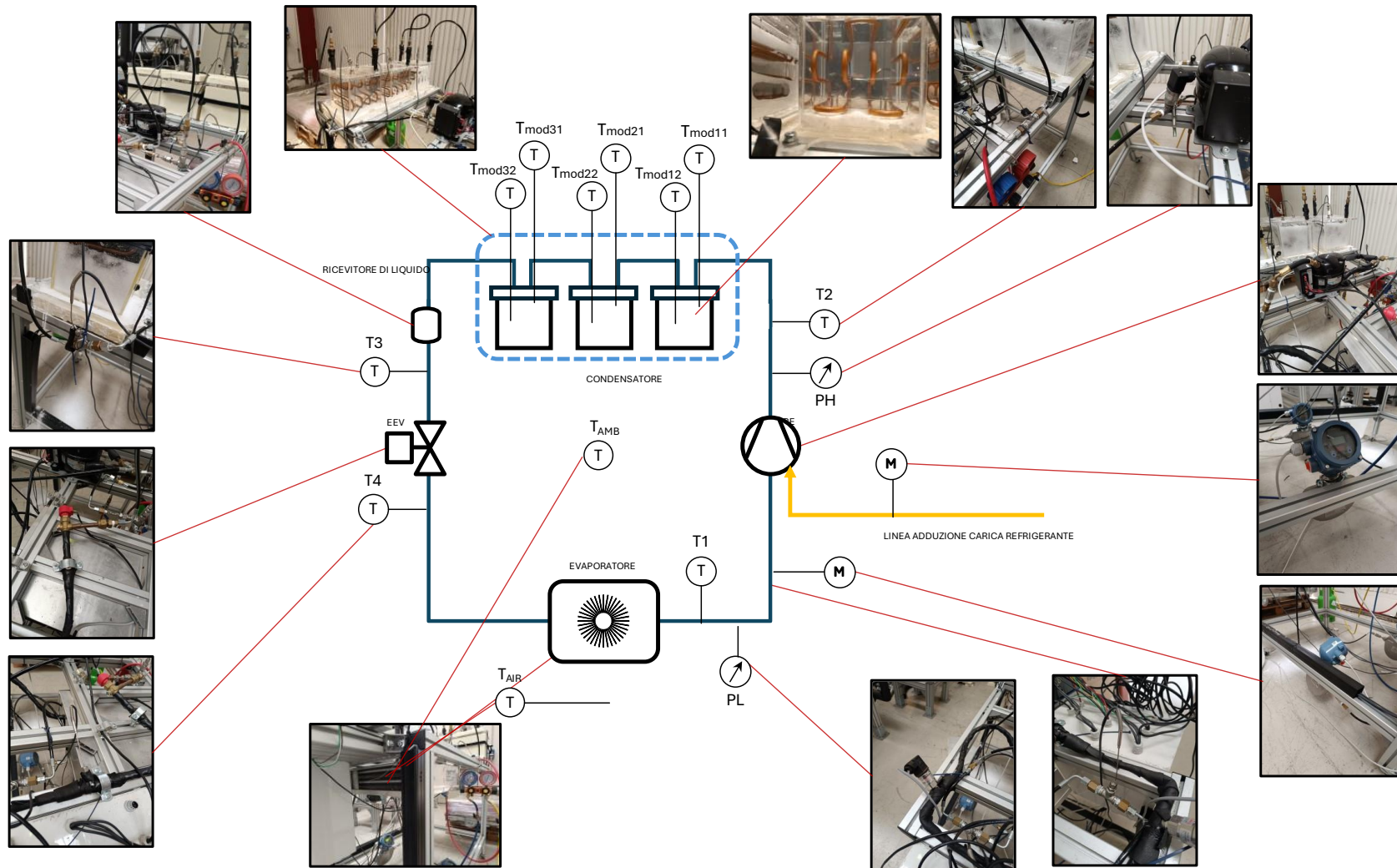


Figura 5 Layout

Rispetto la versione precedente del prototipo si sono aggiunti i due sensori di portata.

Tutto il sistema è stato progettato e dimensionato sulla base del ciclo termodinamico teorico del fluido refrigerante R134a mostrato nel diagramma temperatura-entropia di Figura 6; nella Tabella 1 sono riportate le proprietà termodinamiche del ciclo e nella Tabella 2 i principali parametri di lavoro.

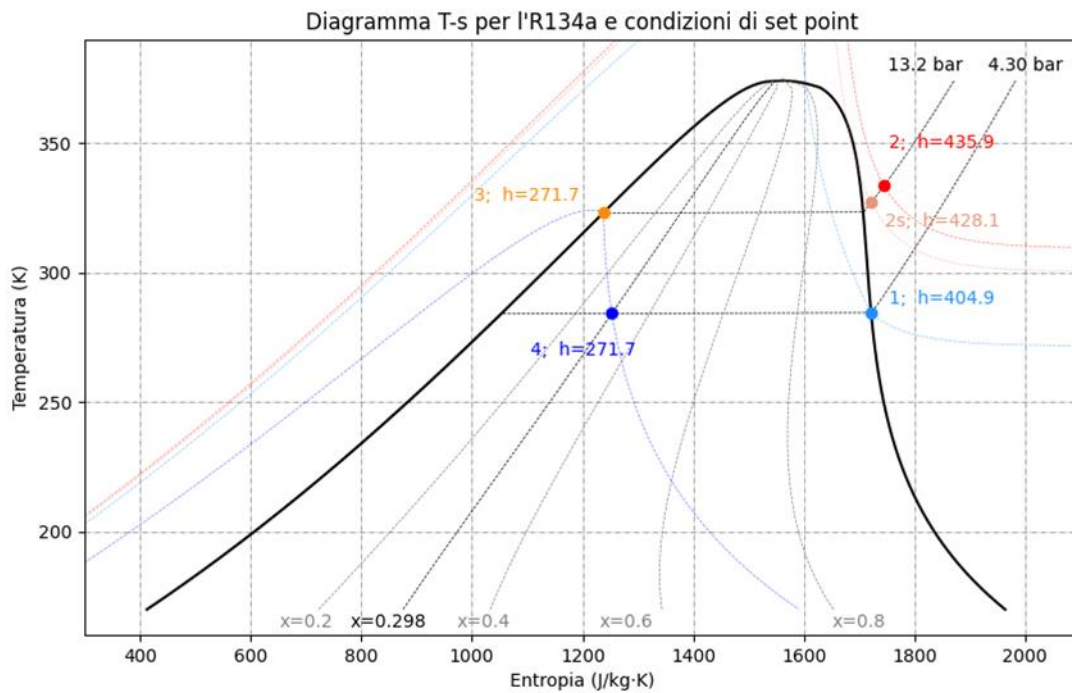


Figura 6 Diagramma T-s del ciclo termodinamico teorico

Tabella 1 Proprietà termodinamiche dei punti salienti del ciclo termodinamico

Stato termodinamico	T (C)	P (bar)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	x (-)
1	11.10	4.30	0.0477	404.9	1722	1.000
2s	53.89	13.20	0.0155	428.1	1722	
2	60.46	13.20	0.0163	435.9	1745	
3	50.06	13.20	0.00091	217.7	1.328	0.000
4	11.10	4.30	0.148	271.7	1253	0.298

Tabella 2 Parametri prestazionali del ciclo termodinamico teorico

Parametro	
Portata massica fluido di lavoro m_{wf}	$7.5 \cdot 10^{-4}$ (kg/s)
Rendimento isoentropico di compressione η_{comp}	0.75
Resa frigorifera	100 W
Lavoro di compressione	23.5 W
Potenza termica al condensatore	123.5 W
COP	4.3

Parte delle attività hanno riguardato l'installazione e configurazione dei misuratori di portata ad effetto Coriolis e della valvola di espansione elettronica.

A seguito della fase di installazione e configurazione, si è proceduto con ulteriori prove mirate a:

- verifica del corretto funzionamento dei componenti e caratterizzazione del ciclo sia in fase operativa (da qui in poi "fase utile") sia durante la fase di raffreddamento del condensatore a ciclo fermo (da qui in poi "fase di scarica"); i parametri principali sono stati mediati su rilevamenti temporali di 60 secondi; la fase di post elaborazione è stata implementata utilizzando il software open source Python [1], con librerie correlate, tra cui CoolProp [2]
- individuare la carica di refrigerante più opportuna;
- calibrare il controllo della valvola di espansione elettronica in termini di K_p del controllo proporzionale e grado minimo di apertura consentita;
- definire la configurazione del condensatore per il prototipo finale tramite confronti tra utilizzo o meno di schiuma metallica commerciale immersa nel PCM e serpentina di scambio da 3,75 m (da qui in poi "piccola") o da 5,13 m (da qui in poi "grande");

Nelle prove iniziali si sono riscontrati valori di bassa pressione a valle della valvola più inferiori del normale, dovuti anche a consistenti perdite di carico causate dal misuratore di portata a effetto Coriolis posto proprio a valle della valvola per la misura della portata massica di fluido evolvente; quanto riportato è stato effettivamente confermato da apposita analisi con termocamera.

In Figura 7a si riporta un'immagine termografica della valvola di espansione, in cui si evincono chiaramente le sezioni di ingresso e uscita dal componente. A seguire nel circuito, vi era posto il misuratore di portata a effetto Coriolis. È interessante notare, in Figura 7b, come la sezione di uscita del misuratore (a destra) abbia esternamente una temperatura minore della sezione di ingresso (a sinistra): il fluido, bifasico in uscita dalla valvola, continuava ulteriormente ad espandere per via delle perdite di carico del circuito interno del misuratore, diminuendo ulteriormente la temperatura (ulteriore particolare in Figura 7c)

Aspetto ancora interessante è che l'espansione per perdita di carico continua nel circuito fino a monte del compressore; in Figura 7d si riporta un'immagine termografica del compressore in cui si distingue chiaramente la sezione di aspirazione (in colore scuro) caratterizzata da una temperatura ancora minore della sezione di uscita del misuratore.

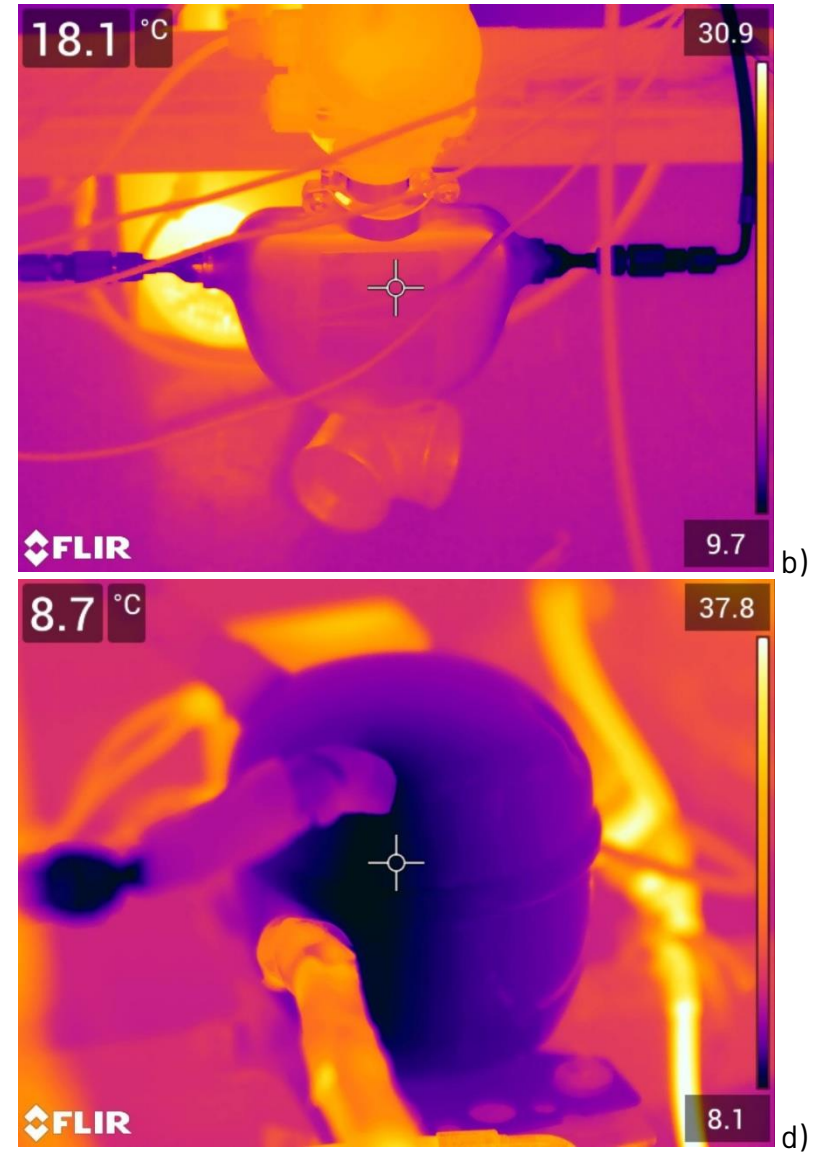
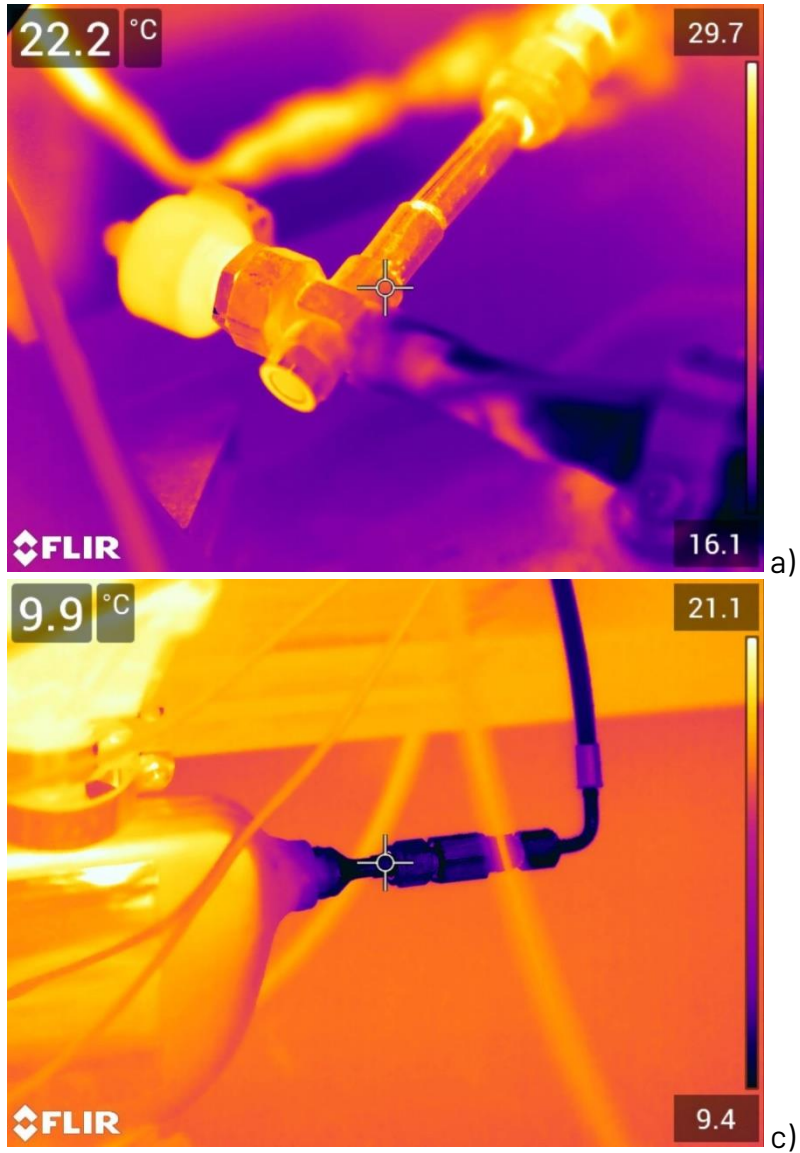


Figura 7 Immagini termografiche: a) valvola di espansione; b) misuratore di portata a effetto Coriolis; c) particolare della sezione di uscita del misuratore di portata; d) compressore

Nelle prove successive si è pertanto deciso di togliere dal circuito il misuratore di portata.

Nei paragrafi a seguire si mostrano i risultati salienti concentrandosi sulla caratterizzazione della resa frigorifera e del condensatore.

7.2.1 Risultati salienti

Sono state condotte ulteriori prove utilizzando alternativamente: (i) due differenti tipologie di serpentine di scambio termico utilizzate in ciascun dei tre moduli del condensatore; (ii) schiuma metallica commerciale immersa nel PCM, per verificare eventuali benefici derivanti dall'utilizzo (in Figura 8 a-b).



Figura 8 Particolare dei moduli del condensatore: a) senza schiuma metallica; b) con schiuma metallica

Si riportano nelle tabelle a seguire i risultati principali delle prove, le quali sono distinte per brevità in base ai seguenti acronimi:

- Sps: prova con serpentino piccolo con schiuma metallica;
- Sg: prova con serpentino grande senza schiuma metallica;
- Sgs: prova con serpentino grande con schiuma metallica;

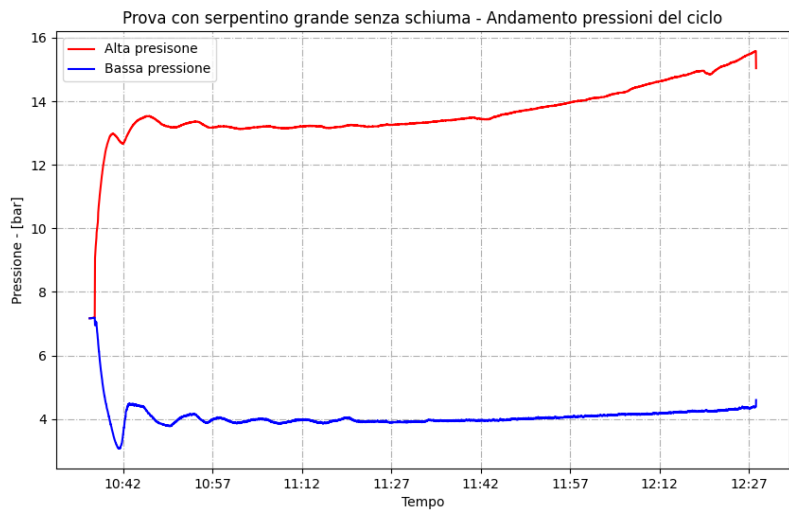
A seguire si commentano gli aspetti più interessanti concentrandosi sul paragone tra Sg vs Sgs e paragone tra SpS e Sgs

Tabella 3 Parametri di caratterizzazione del condensatore

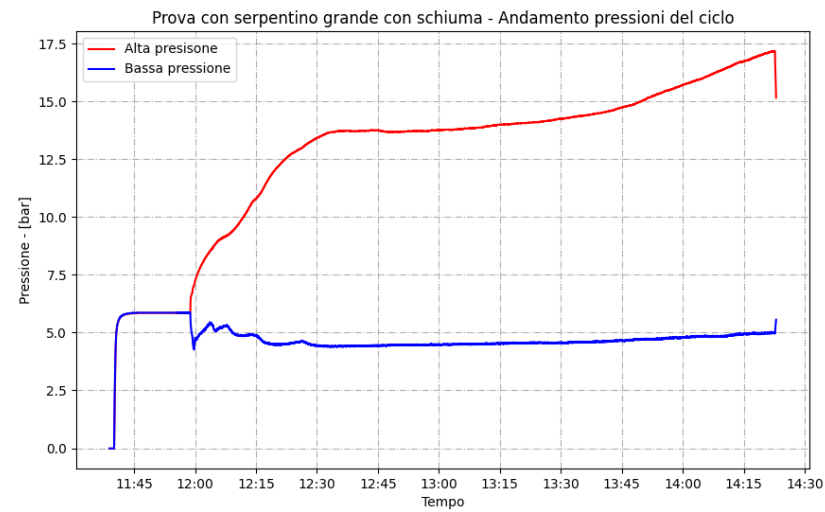
Misure e stime con serpentina grande	
Lunghezza serpentina grande	5,130 m
Frazione volumetrica della schiuma metallica	1,41%
Frazione massica della schiuma metallica	11,378%
Misure e stime con serpentina piccola	
Lunghezza serpentina piccola	3,750 m
Frazione volumetrica della schiuma metallica	1,38%
Frazione massica della schiuma metallica	11,127%

Tabella 4 Misure e stime di caratterizzazione dell'evaporatore e del condensatore sia del rilevamento tipo che dell'intera prova

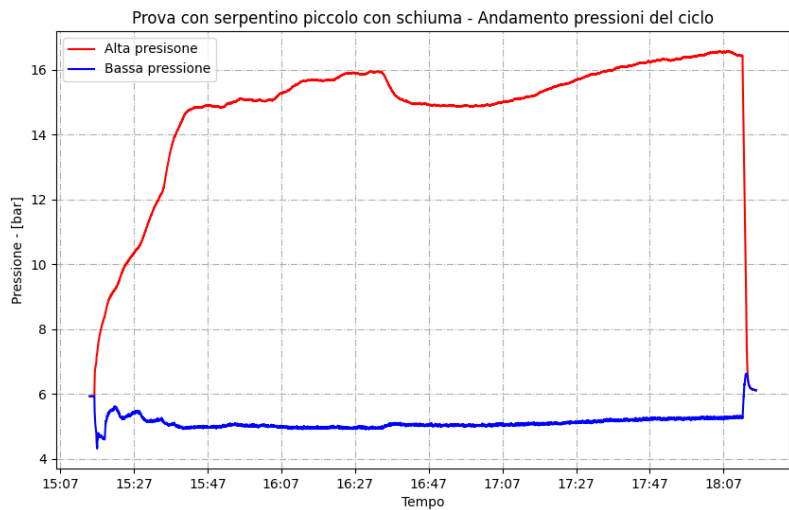
	Sg	Sgs	Sps
Portata aria	0.08538 kg/s	0.0873 kg/s	0.0873 kg/s
Salto termico aria	-3.29 °C	-4.37 °C	-2.94 °C
Resa frigorifera	281 W	392 W	264 W
Durata fase utile	01:50:58	02:23:52	02:55:54
Durata fase di scarica	40 h ca.	13 h ca.	11 h ca.
Energia termica accumulata al condensatore	2582,68 kJ	2892,86 kJ	2755,49 kJ



a)

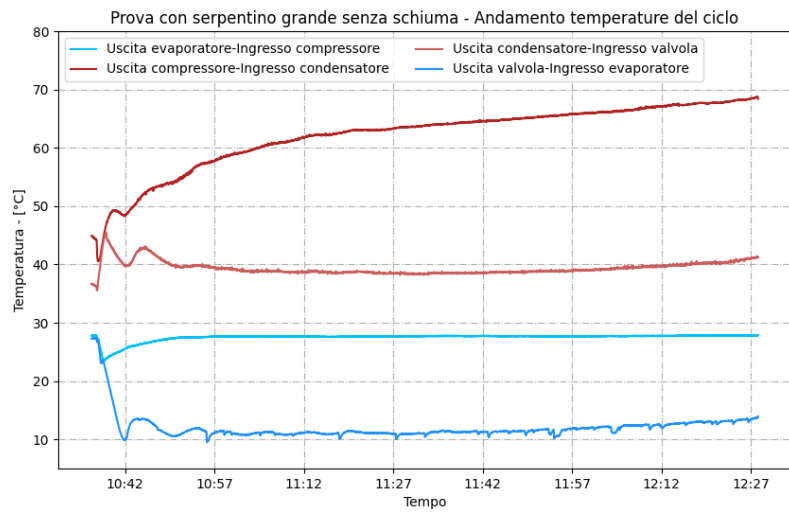


b)

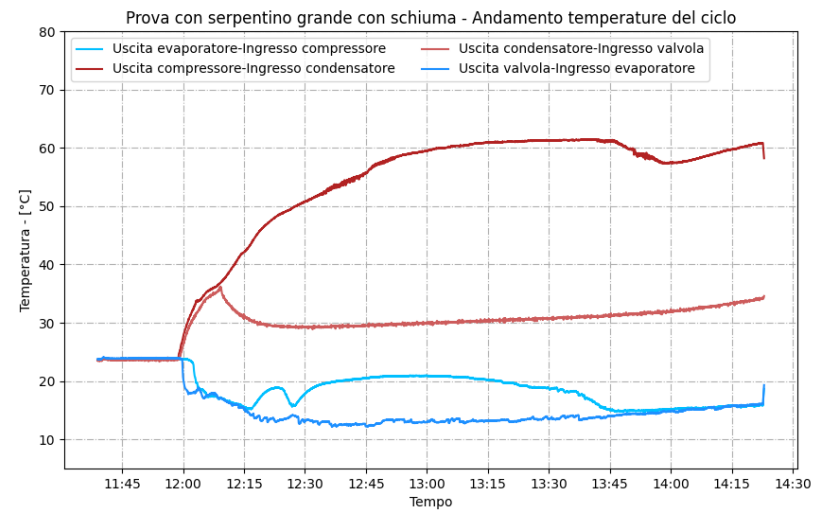


c)

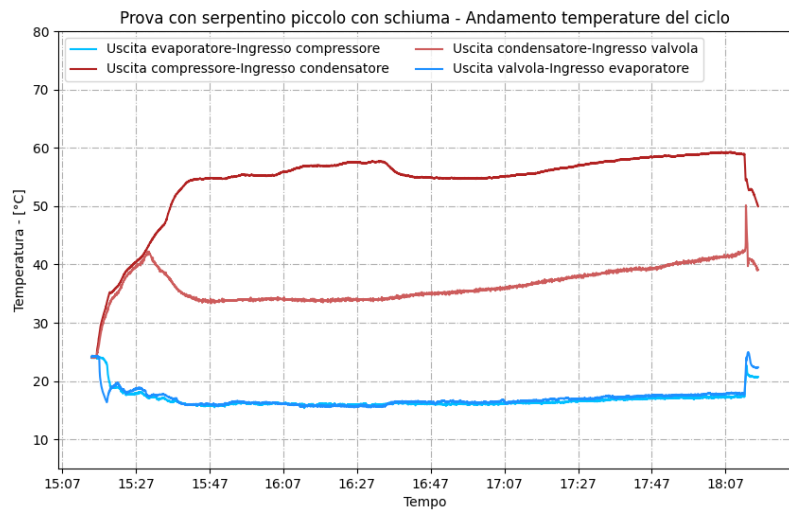
Figura 9 Andamento temporale delle pressioni del ciclo: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps



a)



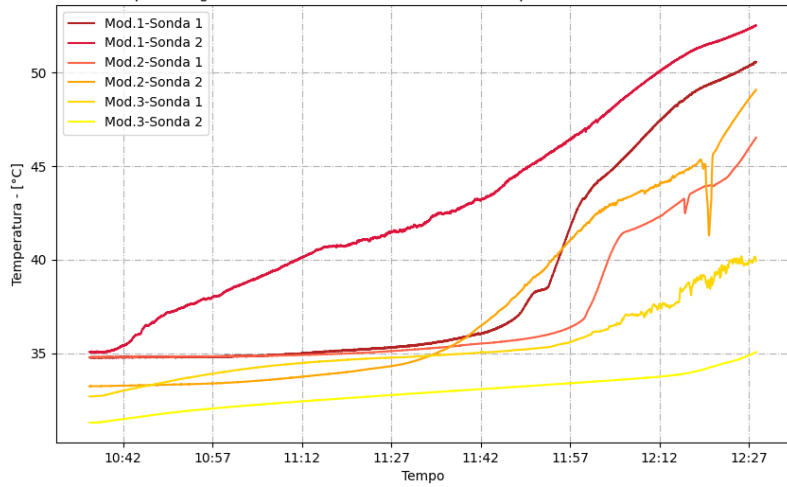
b)



c)

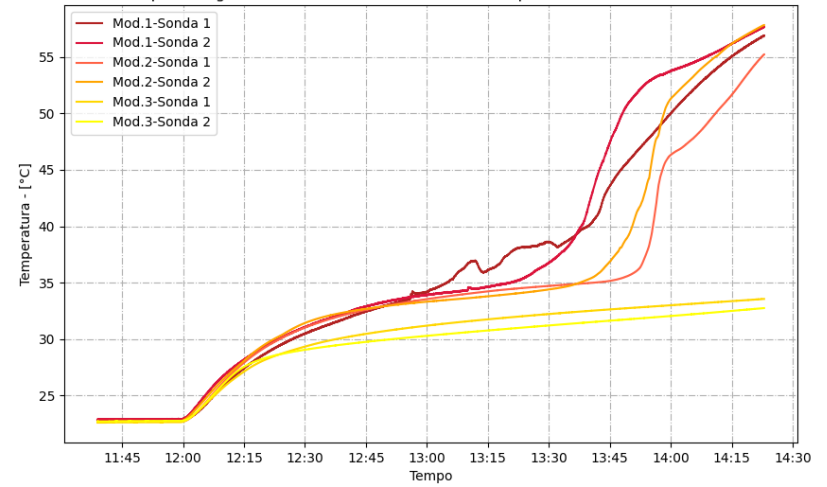
Figura 10 Andamento temporale delle temperature del ciclo: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps

Prova con serpentino grande senza schiuma - Andamento temperature del PCM durante la fase utile



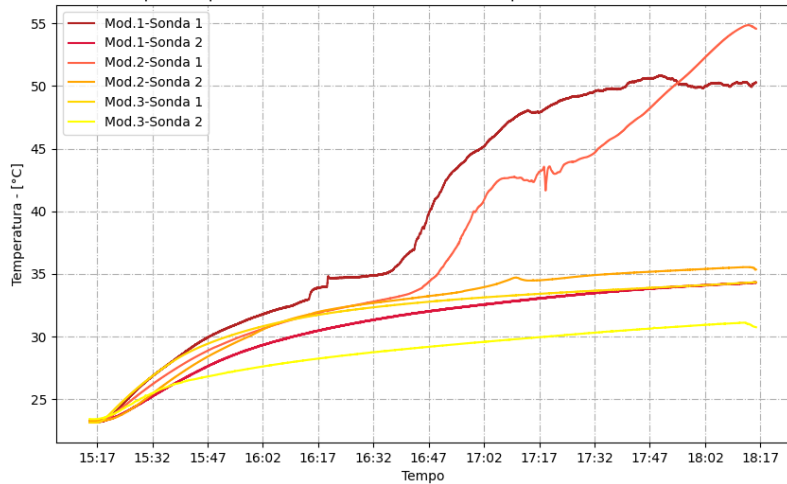
a)

Prova con serpentino grande con schiuma - Andamento temperature del PCM durante la fase utile



b)

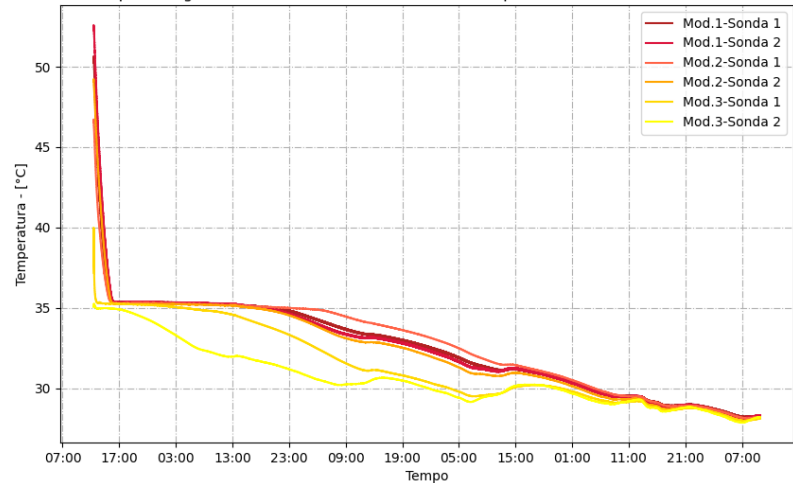
Prova con serpentino piccolo con schiuma - Andamento temperature del PCM durante la fase utile



c)

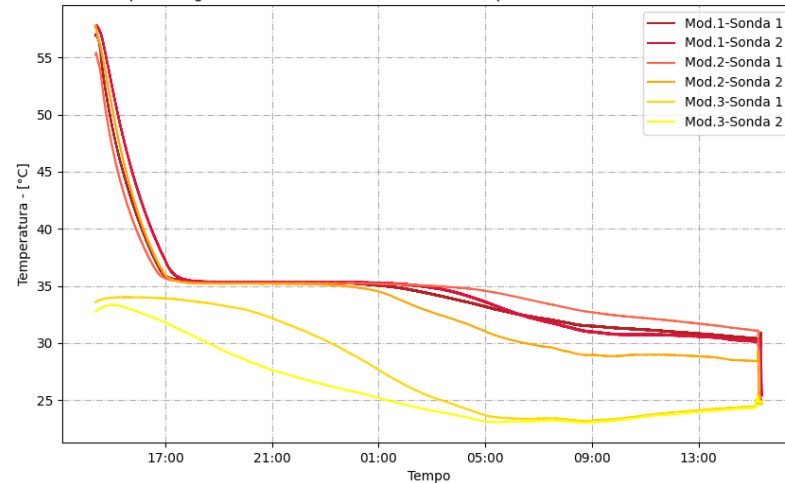
Figura 11 Andamento temporale delle temperature all'interno dei moduli del condensatore durante la fase utile: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps

Prova con serpentino grande senza schiuma - Andamento temperature del PCM durante la fase di scarica



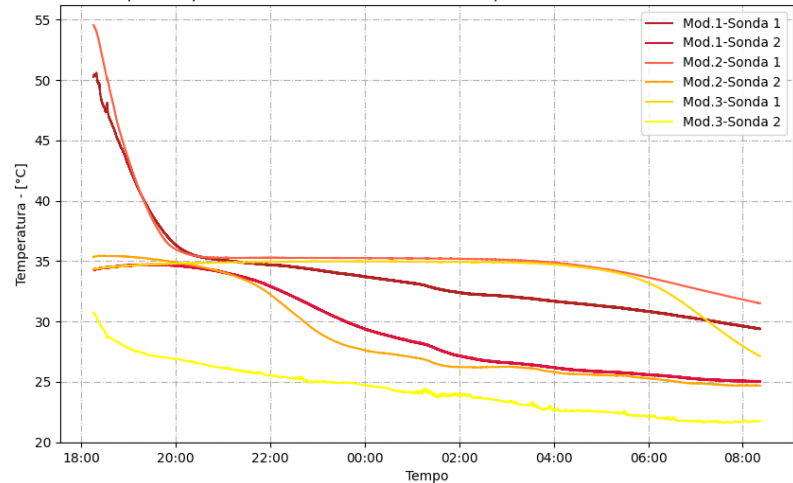
a)

Prova con serpentino grande con schiuma - Andamento temperature del PCM durante la fase di scarica



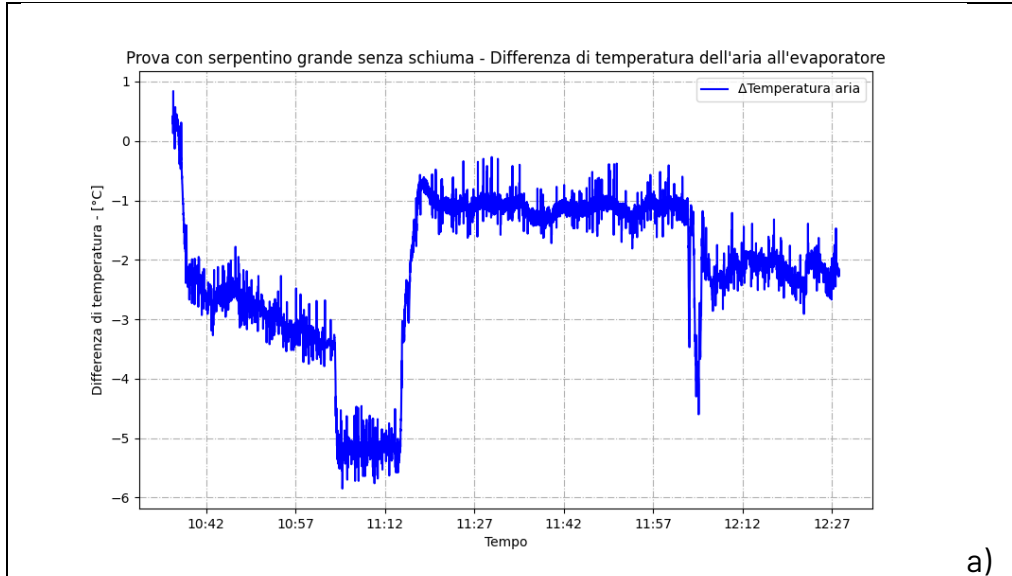
b)

Prova con serpentino piccolo con schiuma - Andamento temperature del PCM durante la fase di scarica

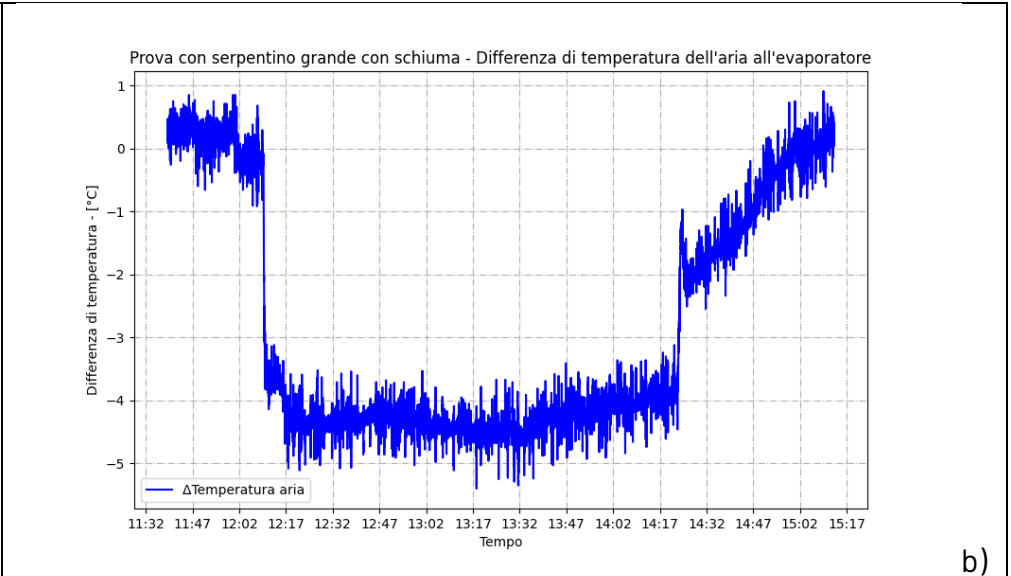


c)

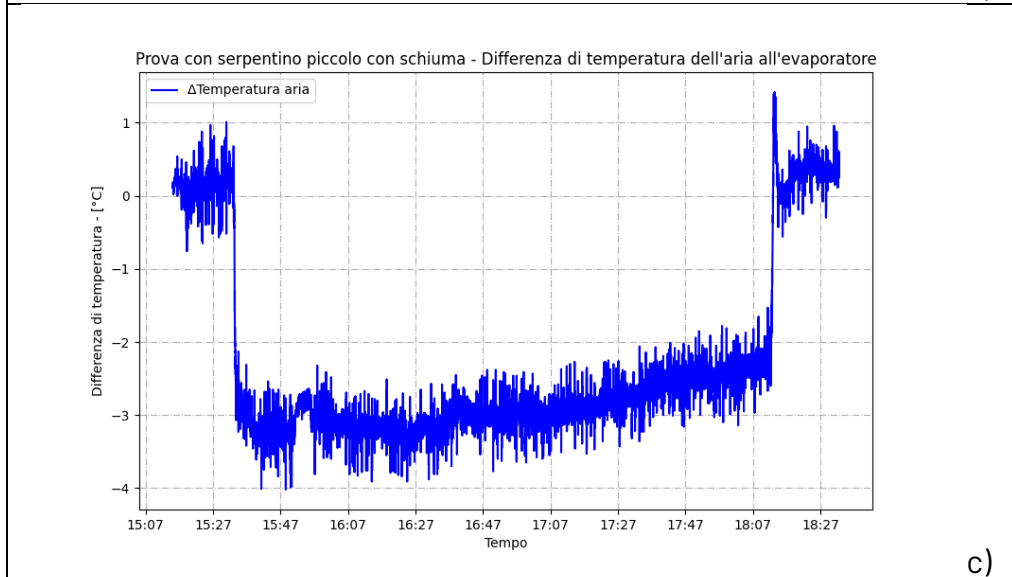
Figura 12 Andamento temporale delle temperature all'interno dei moduli del condensatore durante la fase di scarica: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps



a)



b)



c)

Figura 13 Andamento temporale delle temperature dell'aria a monte e valle dell'evaporatore: a) prova Sg; b) prova Sgs; c) prova Sps

7.2.1.1 Confronto prova Sg vs Sgs

Si riportano di seguito gli aspetti salienti del confronto.

- Nel caso della prova Sgs la resa frigorifera è risultata maggiore (Figura 13 a-b e Tabella 4), cioè rispettivamente 392 W della prova Sgs contro i 281 W della prova Sg.
- Nella prova Sgs (Figura 11a-b) le temperature del PCM raggiungono e oltrepassano i 35 °C più rapidamente grazie al maggiore scambio termico; inoltre, i primi due moduli raggiungono temperature più elevate rispetto al terzo modulo che non raggiunge i 35 °C: ciò è indicativo di uno scambio termico molto più marcato (e ivi si esaurisce) nei primi due moduli.
- Nel caso della prova Sgs la fase di solidificazione (fase di scarica) è marcatamente più rapida (Figura 12°-b): 13 h della prova Sgs contro le 40 circa della Sg.
- Nonostante la diversa durata dei test l'energia termica accumulata dal condensatore durante il funzionamento è perfettamente paragonabile nei due casi (Tabella 4), inclusa tra 2600 e 2900 kJ.

7.2.1.2 Confronto Sgs vs Sps

Gli aspetti più interessanti da sottolineare sono riportati di seguito per punti.

- Nel caso della prova Sgs il maggior scambio termico dato dalla serpentina grande porta più velocemente i moduli del condensatore a temperature più elevate (Figura 11 b-c).
- La resa frigorifera è mediamente maggiore nel caso della prova Sgs (Figura 13 b-c e Tabella 4): 392 W della prova Sgs contro 264 W della Sps.
- Lo scambio termico ridotto nel caso della serpentina "piccola" si evince dall'andamento delle temperature all'interno dei moduli (Figura 11 c); infatti, nella prova Sps solo il primo modulo va completamente a fusione e in successivo riscaldamento, mentre gli altri due, a fine prova, si trovano ancora in fase di liquefazione; nel caso della prova Sgs (Figura 11 b), sono due (e non uno) i moduli che completano la fusione. Occorre però evidenziare che l'energia termica accumulata è perfettamente analoga (Tabella 4) (inclusa tra 2750 kJ e 2900 kJ), per cui è interessante notare come, se da un lato la resa frigorifera sia minore, dall'altro l'utilizzo della serpentina "piccola" induca l'accumulo di calore più concentrato nella transizione di fase del PCM.
- La durata del raffreddamento (Tabella 4) sia perfettamente paragonabile, paria a 13 nel caso Sgs e 11 h nella caso Sps: piccola differenza (inferiore a 2h) è dovuta alla contenuta differenza di energia termica accumulata. Come ci si aspettava, l'utilizzo di serpentini di scambio differenti influenza solamente il ciclo termodinamico in fase di operazione; il raffreddamento più che altro influenzato dall'utilizzo o meno della schiuma metallica.

7.3 Realizzazione e analisi sperimentale del dimostratore in ambiente (industrialmente) rilevante.

Sulla base dei risultati ottenuti, si è decisa la configurazione finale dei moduli del condensatore, cioè con utilizzo di schiuma metallica e serpentino piccolo; l'apparato è stato ricompattato all'interno di un telaio in plexiglas per le prove in camera climatica.

Nelle figure a seguire si riporta, a titolo d'esempio, uno sketch del progetto per i telai e alcune fasi del montaggio e inserimento in camera climatica.



Figura 15 Alcune delle fasi del montaggio e inserimento in camera climatica (da in alto a sinistra in senso orario)

Rispetto il modello precedente: (i) si è sostituito l'evaporatore con un modello di potenzialità ridotta; (ii) si è sostituito il compressore con il modello BD50F.

In Figura 16 si riportano alcune immagini della porva in camera climatica e della modalità di acquisizione dati al computer.

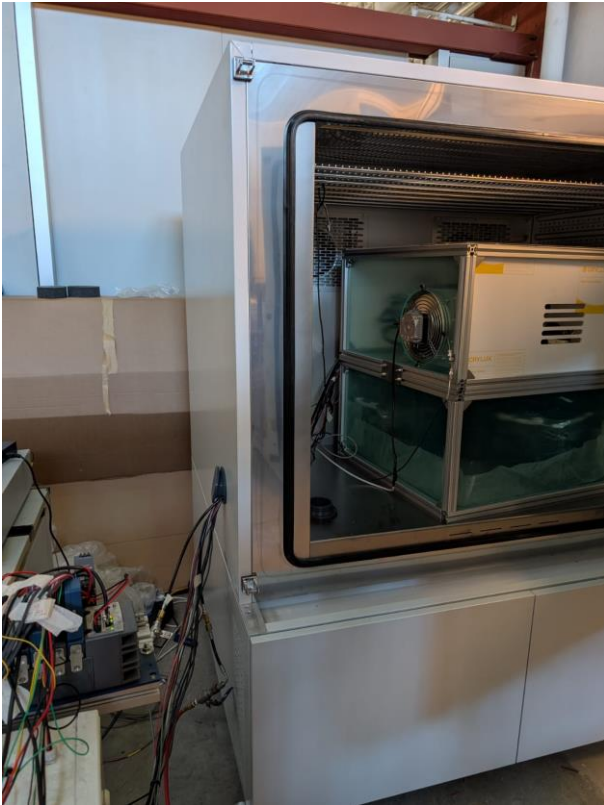


Figura 16 Fasi della prova in camera climatica; da in alto a sinistra in senso orario: prototipo in camera climatica; acquisizione dati durante la prova; prototipo in camera climatica durante la prova.

Si è deciso di operare la prova in camera climatica con temperatura pari a 26 °C e umidità al 60% e simulando un funzionamento intenzionalmente intermittente con lo scopo di simulare un utilizzo "on-off" da parte dell'operatore; la durata utile è stata inclusa tra 40 e 45 minuti.

La carica è stata effettuata a compressore acceso al minimo della potenza con apertura valvola al 100% temperatura di set point di ingresso all'evaporatore pari a 15 °C; una volta effettuata la carica, pari a 450 g, è stata impostata l'apertura valvola al 15% e Kp del PID a 0,1, con temperatura di set point di ingresso all'evaporatore a 11 °C.

L'intera prova è stata caratterizzata da 7 cicli di accensione/spegnimento forzati; ogni prova ha ciclo di accensione ha avuto una durata tra 30 e 45 minuti; mentre il periodo di spegnimento ha avuto durata variabile tra 5 e 30 minuti; la durata totale della fase utile è stata di circa 6 ore inclusa la carica, 4:30 circa di fase operativa vera e propria.

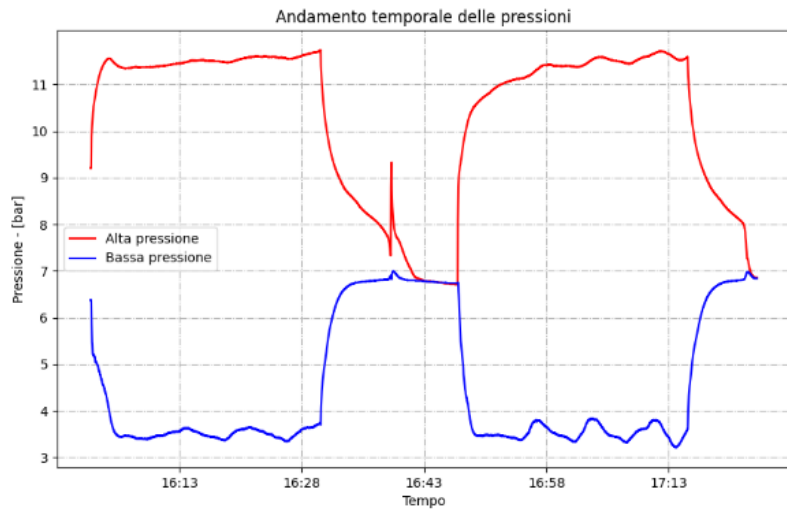
Si riportano in Figura 17, a titolo d'esempio, i grafici caratteristici della prova di due cicli accensione-spegnimento.

È interessante notare come il sistema, dopo un transitorio di 5 minuti circa, si porta in condizioni pressoché costanti; l'alta pressione si attesta a circa 12 bar, mentre quella bassa a circa 3,5 bar; dagli andamenti della bassa pressione e della temperatura in ingresso all'evaporatore si evince chiaramente il continuo controllo esercitato della valvola elettronica.

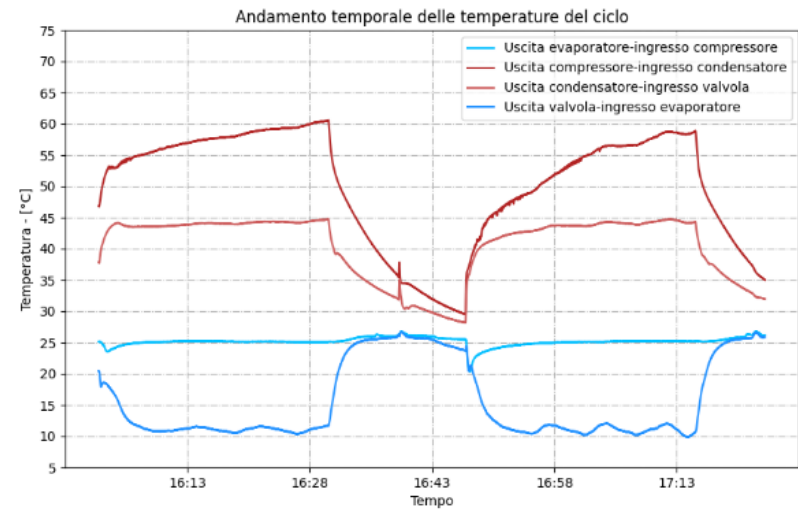
Man mano che il ciclo opera, si nota un lento innalzamento dell'alta pressione e della temperatura in uscita dal compressore e, conseguentemente, della temperatura in uscita del condensatore, per quanto non si nota lo stesso fenomeno a monte e a valle dell'evaporatore grazie al controllo della valvola elettronica.

La temperatura della camera si attesta costantemente a 26.7/26.8 °C; in condizioni a pieno regime il salto termico si attesta a poco più 1°C, corrispondente ad una resa frigorifera inclusa tra 110 e 122 W con una portata volumetrica di aria pari a circa 352 mc/h.

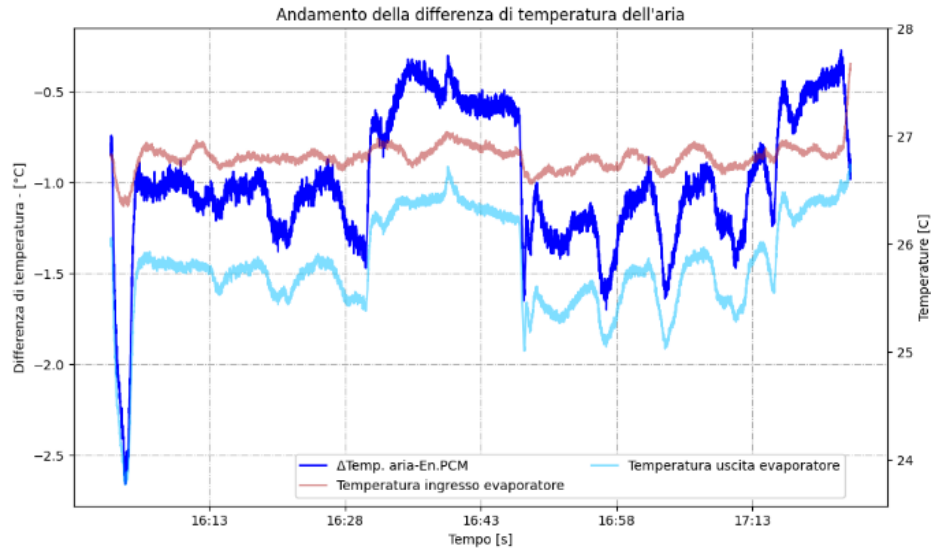
Una volta terminata la fase utile, si è spento l'impianto per procedere alla fase di scarica, impostando in camera climatica condizioni gravose di raffreddamento (30 °C e 75% U.R) con l'intenzione di emulare un raffreddamento del modulo in ambiente esterno in periodo estivo.



a)



b)



c)

Figura 17 Grafici caratteristici della prova in camera climatica; a) andamento temporale delle pressioni; b) andamento temporale delle temperature del ciclo; c) andamento temporale del salto termico dell'aria e relative temperature.

7.4 Riferimenti bibliografici

- [1] «Python software Foundation. Python Language Reference (Version 3.11) [Software],» 2020. [Online]. Available: <https://www.python.org>.
- [2] I. W. J. Q. s. L. V. Bell, «“Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp”,» *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 53, n. 6, pp. 2498-2508, 2014. doi: 10.1021/ie4033999.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza

9 Pubblicazioni scientifiche

- Miccoli, F.; Cavargna, A.; Mongibello, L.; Iasiello, M.; Bianco, N. Experimental Characterization and Numerical Simulation of a Low-Scale Personal Cooling System with Integrated PCM, *Energies*, 2024, 17(5), 1118.

10 Eventi di disseminazione

- Il lavoro dal titolo "Experimental characterization of a low-scale cooling system with integrated PCM", con autori Luigi Mongibello, Augusto Cavargna, Marcello Iasiello e Nicola Bianco, è stato presentato alla conferenza "18th SDEWES Conference 2023", tenutasi a Dubrovnik (Croazia), dal 24 al 29 settembre 2023.
- Il lavoro dal titolo "EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PCM BASED LOW-SCALE PORTABLE REFRIGERATION SYSTEM", con autori Luigi Mongibello e Adriano Macaluso, è stato presentato alla conferenza "The Third Pacific Rim Thermal Engineering Conference December", tenutasi a Honolulu (Hawaii, USA) dal 15 al 19 dicembre 2024.