

Ricerca di Sistema elettrico



Simulazione e ottimizzazione di sistemi di accumulo del
freddo basati sull'utilizzo di più PCM a cascata (LA5.7)

A. Andreozzi, A. Ascione, N. Bianco, M. Di Somma, A. Fragnito, M. Iasiello, G.M. Mauro

Simulazione e ottimizzazione di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di più PCM a cascata (LA5.7)

A. Andreozzi, A. Ascione, N. Bianco, M. Di Somma, A. Fragnito, M. Iasiello, G.M. Mauro (UNINA_DII_3)

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: 5.7

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Luigi Mongibello, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UNINA_DII_3

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36 Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
2.1	Risultati Subtask 1	6
2.2	Risultati Subtask 2.....	6
2.3	Risultati Subtask 3.....	7
3	Prodotti attesi	8
4	Prodotti sviluppati	9
4.1	Dettaglio modelli sviluppati.....	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte	11
7	Dettaglio delle attività svolte.....	12
7.1	Subtask 1: ottimizzazione del sistema di accumulo "cascade" non alettato	12
7.1.1	Classificazione dei PCM.....	13
7.1.2	Risultati dell'ottimizzazione multi-obiettivo	15
7.1.3	Post-process	17
7.2	Subtask 2: valutazione delle performance del sistema di accumulo "cascade" alettato 18	
7.2.1	Configurazione del sistema alettato	18
7.2.2	Analisi energetica.....	18
7.2.3	Analisi exergetica	21
7.3	Subtask 3: analisi parametrica del sistema di accumulo con PCM macro-incapsulato 22	
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	26
9	Pubblicazioni scientifiche.....	27
10	Eventi di disseminazione	28

Indice delle figure

Figura 1 – Rappresentazione del singolo tubo – caratterizzante il sistema di accumulo – nelle differenti combinazioni	12
Figura 2 – Risultati delle prove sperimentali mediante DSC dei PCM RT 10, RT 10HC, RT12 ed RT 18HC	15
Figura 3 – Andamento della viscosità dinamica del PCM RT 10 al variare della temperatura	15
Figura 4 – Risultato ottimizzazione multi-obiettivo: soluzioni esplorate dal GA e fronte di Pareto	16
Figura 5 – Frequenza delle tipologie di PCM rispetto a tutte le soluzioni analizzate dal GA e rispetto alle soluzioni sul fronte di Pareto evidenziato in Fig. 4.....	17
Figura 6 – Andamento temporale dell'energia accumulata/rilasciata dal sistema di accumulo, nei differenti moduli, a partire dal secondo giorno di simulazione	17
Figura 7 – Rappresentazione del sistema modulare “cascade” alettato (a sinistra) e vista in sezione del tubo alettato (a destra).....	18
Figura 8 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione per la configurazione 18	19
Figura 9 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione per la configurazione 19	19
Figura 10 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione per la configurazione 20	20
Figura 11 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione	20
Figura 12 – Verifica della generazione entropica globale sulla base dei risultati in letteratura [1]	21
Figura 13 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione	22
Figura 14 – Configurazione geometrica serbatoio a letto fisso.....	23
Figura 15 – Schema accoppiamento 3 serbatoi in serie.....	24
Figura 16 – Andamento della temperatura all'interno dei moduli cilindrici: termocoppia centrale (sx) e termocoppia laterale (dx).....	24
Figura 17 – Energia accumulata/rilasciata per ciascun serbatoio.....	25
Figura 18 – Energia accumulata/rilasciata dall'intero sistema.....	25

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Possibili permutazioni dei moduli che caratterizzano il serbatoio di accumulo (P = posizione, H = altezza).....	13
Tabella 2 - Valori delle variabili di design per le soluzioni ottimali evidenziate sul fronte di Pareto	16

1 Risultati attesi

Nel presente rapporto tecnico sono descritte le attività di ricerca svolte durante il terzo anno dell'Accordo di Programma 2022-2024 sulla Ricerca di Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione: *"Simulazione e ottimizzazione di sistemi di accumulo del freddo basati sull'utilizzo di più PCM a cascata"* stipulato tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. I risultati attesi sono di seguito elencati: sviluppo di modelli non stazionari per la simulazione termo-fluidodinamica di tre differenti soluzioni con PCM a cascata per l'accumulo del freddo; analisi numerica di tre serbatoi con PCM a cascata per l'accumulo del freddo, per un caso studio; individuazione dei parametri che maggiormente influiscono sulle prestazioni dei sistemi di accumulo del freddo con PCM a cascata per il caso studio selezionato, in termini di efficienza energetica, efficienza exergetica, e capacità di accumulo; tuning dei modelli per la simulazione numerica dei serbatoi; individuazione di configurazioni ottimizzate per i serbatoi.

2 Risultati ottenuti

Nel presente report le attività di ricerca si sono focalizzate sul miglioramento delle performance dei sistemi di accumulo dell'energia termica a calore latente (LHTES), basati sull'impiego di materiali a cambiamento di fase (PCM) con configurazione *shell and tube*. Tali sistemi rappresentano soluzioni innovative ed efficaci per l'accumulo di energia termica, ma presentano sfide significative legate alla non uniformità dello scambio termico tra il PCM e il fluido termovettore, come evidenziato dai risultati del Piano Triennale di Realizzazione (PTR 19-21). Questa non uniformità porta a una distribuzione irregolare della transizione di fase del PCM, con parti del materiale che subiscono la transizione di fase e altre che non la completano, influenzando negativamente l'efficienza del sistema. Al fine di migliorare le prestazioni dei sistemi di accumulo e ottenere una maggiore densità di energia accumulata, la presente attività prevede la simulazione numerica di diversi serbatoi di accumulo del freddo, utilizzando il software Comsol Multiphysics®. Le attività sono state organizzate in 3 Subtask, di seguito dettagliate:

- Subtask 1: ottimizzazione del serbatoio di accumulo "shell and tube" con PCM multipli a cascata.
- Subtask 2: incremento delle performance del serbatoio di accumulo "shell and tube" mediante alettatura integrata sui tubi.
- Subtask 3: analisi delle performance del sistema a letto fisso con PCM macro-incapsulato.

Le simulazioni hanno esplorato varie configurazioni, modificando le tipologie di PCM, integrando le proprietà termo-fisiche attuali dei PCM, e definendo la disposizione dei PCM nella configurazioni a cascata e i parametri operativi come la temperatura e la portata del fluido termovettore.

2.1 Risultati Subtask 1

L'ottimizzazione del sistema ha mirato a massimizzare l'energia rilasciata e minimizzare il tempo di scarica, equivalente a massimizzare la potenza termica durante la fase di scarica. Tre soluzioni ottimali, P_1 , P_2 e P_{ott} , mostrano una disposizione "equi corrente" dei PCM rispetto al fluido, con temperature di fusione crescenti in altezza, riducendo la generazione di entropia ma con una potenza termica scambiata inferiore. Il PCM RT12 emerge come candidato ottimale, garantendo un buon compromesso tra carica e scarica. Per la soluzione P_{ott} , l'energia rilasciata dai PCM varia tra 0.40 kWh e 1.58 kWh, con un totale di 3.76 kWh, confermando l'efficacia del sistema. L'analisi temporale evidenzia che RT12, nel secondo modulo, è il più performante. La lieve discrepanza tra i valori simulati e ottimizzati (3.76 vs 3.73 kWh) è attribuita alla griglia di calcolo. I risultati sono coerenti con studi precedenti.

2.2 Risultati Subtask 2

L'aggiunta di alettature longitudinali nei tubi accelera il transitorio termico durante la fusione e solidificazione dei PCM, migliorando la diffusività termica e favorendo il ricircolo grazie ai moti convettivi. La configurazione 18, utilizzando PCM RT11, RT12 e RT18HC, risulta la più

efficace. I PCM con temperature di fusione più basse fondono e solidificano quasi completamente, mentre il PCM RT18HC, pur fondendo solo parzialmente (50%), garantisce un'elevata efficienza di accumulo grazie al suo elevato calore latente. Le configurazioni 19 e 20, sebbene parzialmente efficaci, non consentono una completa fusione o solidificazione dei PCM, limitando l'efficienza energetica. L'energia accumulata/rilasciata conferma questi risultati: il PCM RT12 accumula e rilascia 4.10 kWh, superando RT11 (1.38 kWh) e RT18HC (2.54 kWh). Complessivamente, l'efficienza di accumulo dipende dalla tipologia di PCM e dalla tipologia di configurazione, come mostrato nei grafici analizzati.

2.3 Risultati Subtask 3

I 3 serbatoi contengono 396 moduli cilindrici PCM, ognuno con capacità di mezzo litro e un riempimento dell'80% per tenere conto dell'espansione del PCM durante il passaggio di fase. La simulazione è stata sviluppata in MATLAB® con il modello 1D a volumi finiti, con l'interconnessione tra MATLAB® e COMSOL. I dati evidenziano un comportamento termico coerente con il graduale riscaldamento del fluido termovettore nella configurazione a cascata dei tre serbatoi, ottimizzando la capacità di accumulo. Tuttavia, il PCM 18HC ha mostrato un punto di fusione oltre le temperature dell'applicazione in esame, compromettendo l'efficacia del rilascio di energia termica. La simulazione ha permesso di calcolare l'energia accumulata e rilasciata in 24 ore, pari a 2.5 kWh.

3 Prodotti attesi

Come da capitolato del progetto in esame, i prodotti attesi coincidono con il presente report tecnico, che riassume le attività inerenti alla simulazione numerica di tre differenti serbatoi di accumulo del freddo con PCM a cascata.

4 Prodotti sviluppati

Le attività svolte hanno portato alla realizzazione del presente rapporto tecnico, che sintetizza i risultati ottenuti, sia sperimentali (ottenuti dal gruppo di ricerca del C.R. ENEA Portici) che numerici, relativi ai tre differenti serbatoi di accumulo del freddo con PCM a cascata. L'analisi condotta ha permesso di verificare la conformità dei prodotti sviluppati rispetto alle specifiche tecniche definite nel capitolato. Di seguito vengono illustrati nel dettaglio i modelli numerici adottati.

4.1 Dettaglio modelli sviluppati

I modelli sviluppati sono sintetizzati di seguito:

- *Modelli numerici per la simulazione termo-fluidodinamica dei sistemi di accumulo termico con PCM in configurazione "cascade"*: questi modelli descrivono in dettaglio i processi di scambio termico e moto dei fluidi all'interno dei sistemi di accumulo termico. Consentono di analizzare campi di temperatura, velocità dei fluidi, e profili di solidificazione e fusione di più PCM in serie, fornendo una rappresentazione accurata del comportamento del sistema in termini di energia accumulata/rilasciata
- *Modelli numerici per l'accoppiamento dei solutori termo-fluidodinamici e gli algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo*: questi modelli integrano le equazioni termo-fluidodinamiche con algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo, e.g., algoritmo genetico. Permettono di bilanciare parametri come capacità di accumulo ed efficienza energetica. L'accoppiamento tra simulazioni termo-fluidodinamiche e algoritmi ottimizzativi identifica configurazioni operative ottimali, adattandole a condizioni specifiche. In tale prospetto è inclusa l'introduzione di superfici alettate che incrementano la diffusività termica nel PCM.
- *Modelli numerici per l'accoppiamento tra la risoluzione di sistema del serbatoio di accumulo e l'analisi locale dello scambio termico sul PCM-macro-incapsulato*: questi modelli combinano la risoluzione globale del comportamento del serbatoio con un'analisi dettagliata dello scambio termico a livello locale. Analizzano i fenomeni di conduzione e convezione nel PCM macro-incapsulato, collegandoli al comportamento complessivo del sistema. Ciò consente una maggiore precisione nella progettazione e un miglior sfruttamento delle proprietà termiche del PCM. Tale approccio garantisce un approccio multi-scale, in cui si accoppia l'analisi del sistema a quella del componente su scala inferiore.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

In termini computazionali, gli unici scostamenti hanno riguardato il processo di ottimizzazione del serbatoio di accumulo "cascade" alettato. In particolare, a causa degli elevati oneri computazionali delle simulazioni numeriche tridimensionali, si è optato per la simulazione CFD delle soluzioni ottenute nel precedente run di ottimizzazione con tubi non alettati. Così facendo, è stato possibile avvalersi dell'informazione sulla tipologia dei moduli, la loro disposizione e la tipologia di PCM ottimali da utilizzare, evidenziando gli scostamenti in termini di velocità di accumulo ed efficienza exergetica nelle due configurazioni.

La validazione del modello "cascade PCM senza sistema alettato" per la predizione delle performance di accumulo del materiale a cambiamento di fase è stata effettuata sulla base dei risultati sperimentali delle precedenti annualità. La struttura del serbatoio differisce solo per la divisione in moduli cilindrici. Le fisiche coinvolte restano invariate. L'analisi exergetica è stata effettuata mediante approccio numerico - modello CFD validato - e opportunamente verificata utilizzando riferimenti presenti in letteratura (pubblicazioni scientifiche). Infine, la validazione del modello per la simulazione del serbatoio di accumulo con PCM macro-incapsulato è stata effettuata mediante i risultati sperimentali delle precedenti annualità. Tale modello infatti differisce dal precedente per la tipologia di PCM (percentuale di micro-capsule pari a zero) e per la variazione del coefficiente di scambio termico lato acqua (differisce di poco in virtù delle portate massiche limitate e dei piani di appoggio dei moduli cilindrici che riducono localmente la velocità dell'acqua).

6 Sintesi delle attività svolte

Il report affronta le criticità legate alla non uniformità dello scambio termico, che riduce l'efficienza dei sistemi di accumulo termico. Sono state simulate diverse configurazioni di serbatoi, tra cui PCM a cascata, alette integrate e sistemi a letto fisso con PCM macro-incapsulato, analizzando geometrie, materiali e parametri operativi tramite accoppiamento di MATLAB e Comsol Multiphysics®. Le attività sono state suddivise in 3 subtask. L'obiettivo principale è stato di identificare i parametri che influenzano maggiormente le prestazioni dei sistemi in termini di efficienza energetica ed exergetica, nonché la capacità di accumulo. In entrambi i casi, gli applicativi sono stati implementati sulla base delle caratteristiche geometriche e termo-fisiche dei prototipi di serbatoi di accumulo del freddo per uso residenziale realizzati da ENEA. I risultati derivanti dai processi di ottimizzazione sono stati validati sulla base dei modelli precedentemente validati e sulla base di riferimenti bibliografici.

7 Dettaglio delle attività svolte

Nella presente sezione sono riportati i dettagli delle attività precedentemente elencate, ripartiti in tre sotto paragrafi, ciascuno riferito alla subtask di pertinenza.

7.1 Subtask 1: ottimizzazione del sistema di accumulo "cascade" non alettato

Il sistema di accumulo – dalle caratteristiche generali analoghe a quello analizzato nella precedente annualità – è della tipologia shell-and-tube. L'altezza del serbatoio è pari ad $H = 1350$ mm. Il serbatoio è stato reso modulare, mediante la realizzazione di 3 moduli con altezza pari a $1.350/3 = 0.450$ m, 3 moduli con altezza pari a $1.350/2 = 0.650$ m, 3 moduli con altezza pari a $1.350/6 = 0.225$ m. Dunque, i moduli utilizzabili sono pari a $H/2$, $H/3$, ed $H/6$. Nonostante ciò, in fase di ottimizzazione sono state considerate tutte le possibili permutazioni dei moduli al fine di analizzare uno spettro di soluzioni più ampie. La Fig. 1 mostra le configurazioni caratteristiche ottenibili (non vengono rappresentate tutte le possibili disposizioni). In ogni caso viene considerato un fattore di riempimento del PCM pari al 90% del volume complessivo (motivo per il quale in figura è possibile apprezzare delle porzioni di tubo non circondate da PCM).

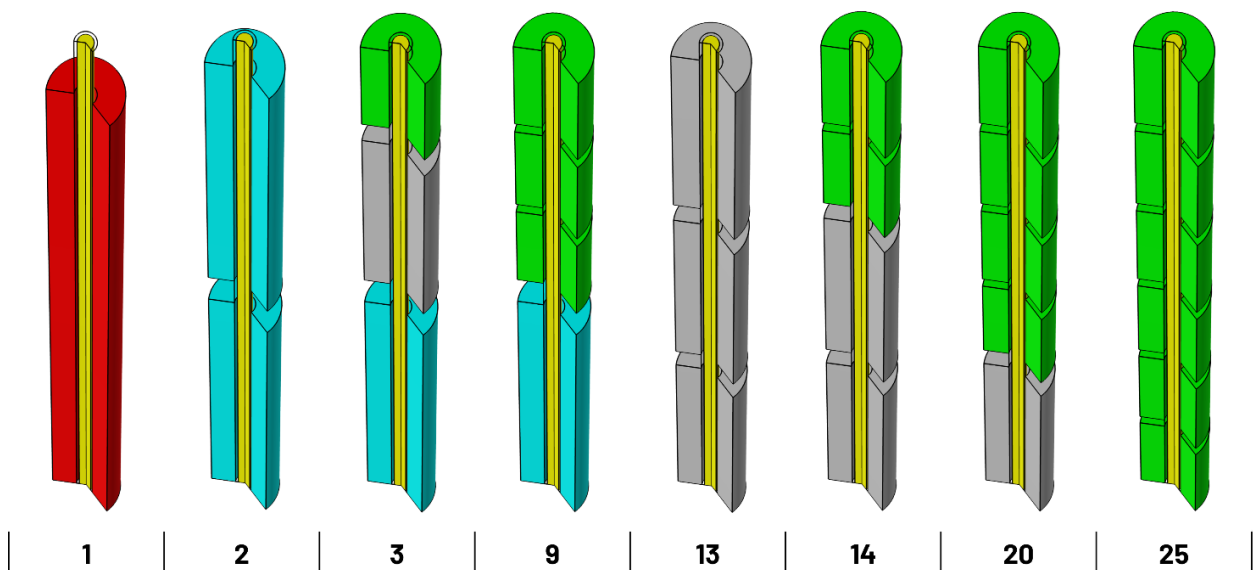


Figura 1 – Rappresentazione del singolo tubo – caratterizzante il sistema di accumulo – nelle differenti combinazioni

Il resoconto complessivo di tutte le possibili permutazioni è riportato in Tab. 1. In particolare, sono state individuate 25 possibili configurazioni. La tipologia di configurazione è stata utilizzata come variabile di design nel problema di ottimizzazione, risolto mediante utilizzo dell'algoritmo genetico.

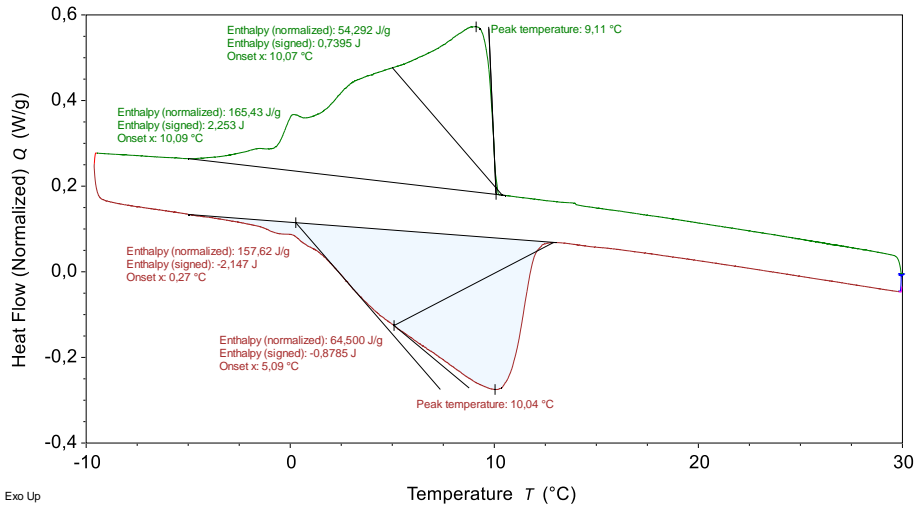
Tabella 1 - Possibili permutazioni dei moduli che caratterizzano il serbatoio di accumulo (P = posizione, H = altezza)

Permutazioni	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
1	H	0	0	0	0	0
2	H/2	H/2	0	0	0	0
3	H/2	H/3	H/6	0	0	0
4	H/2	H/6	H/3	0	0	0
5	H/3	H/2	H/6	0	0	0
6	H/3	H/6	H/2	0	0	0
7	H/6	H/2	H/3	0	0	0
8	H/6	H/3	H/2	0	0	0
9	H/2	H/6	H/6	H/6	0	0
10	H/6	H/2	H/6	H/6	0	0
11	H/6	H/6	H/2	H/6	0	0
12	H/6	H/6	H/6	H/2	0	0
13	H/3	H/3	H/3	0	0	0
14	H/3	H/3	H/6	H/6	0	0
15	H/3	H/6	H/3	H/6	0	0
16	H/3	H/6	H/6	H/3	0	0
17	H/6	H/3	H/3	H/6	0	0
18	H/6	H/3	H/6	H/3	0	0
19	H/6	H/6	H/3	H/3	0	0
20	H/3	H/6	H/6	H/6	H/6	0
21	H/6	H/3	H/6	H/6	H/6	0
22	H/6	H/6	H/3	H/6	H/6	0
23	H/6	H/6	H/6	H/3	H/6	0
24	H/6	H/6	H/6	H/6	H/3	0
25	H/6	H/6	H/6	H/6	H/6	H/6

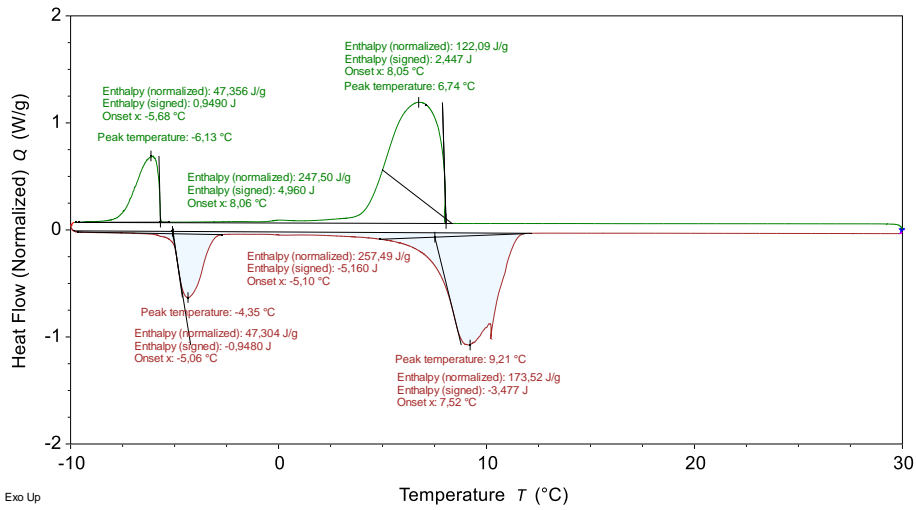
7.1.1 Classificazione dei PCM

L'algoritmo di ottimizzazione - oltre alla tipologia di configurazione - richiede come input la tipologia di PCM e dunque le sue proprietà termofisiche. In dettaglio, le proprietà di maggiore interesse sono il calore latente, la conducibilità termica e la viscosità dinamica. Tali proprietà - per i PCM di maggiore interesse - sono state misurate sperimentalmente ed i risultati sono riportati in Fig. 2. In particolare, il calore latente per ciascun PCM, ottenibile mediante integrazione dell'area sottesa alle curve rappresentate, conferma con buona approssimazione quanto riportato da catalogo. Al contrario, le differenze di temperatura entro cui avviene il passaggio di fase risultano maggiori rispetto a quelle da catalogo. Dall'analisi di Fig. 2 è infatti possibile notare come, sebbene i valori di picco siano in prossimità delle denominazioni dei PCM stessi, i range di temperatura entro i quali è possibile usufruire del calore latente dei PCM sia molto esteso e spesso al di fuori delle temperature caratteristiche dell'applicazione in esame.

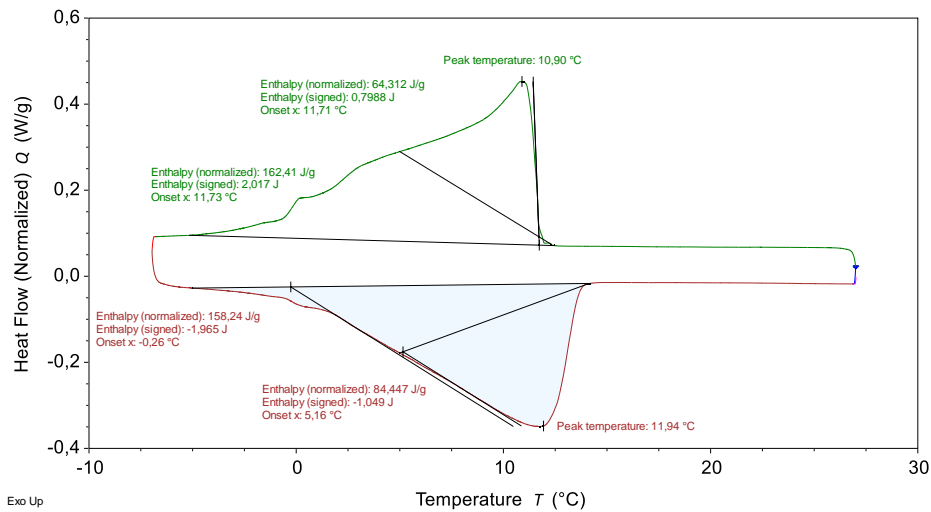
RT 10 - 11092024



RT 10 HC



RT 12



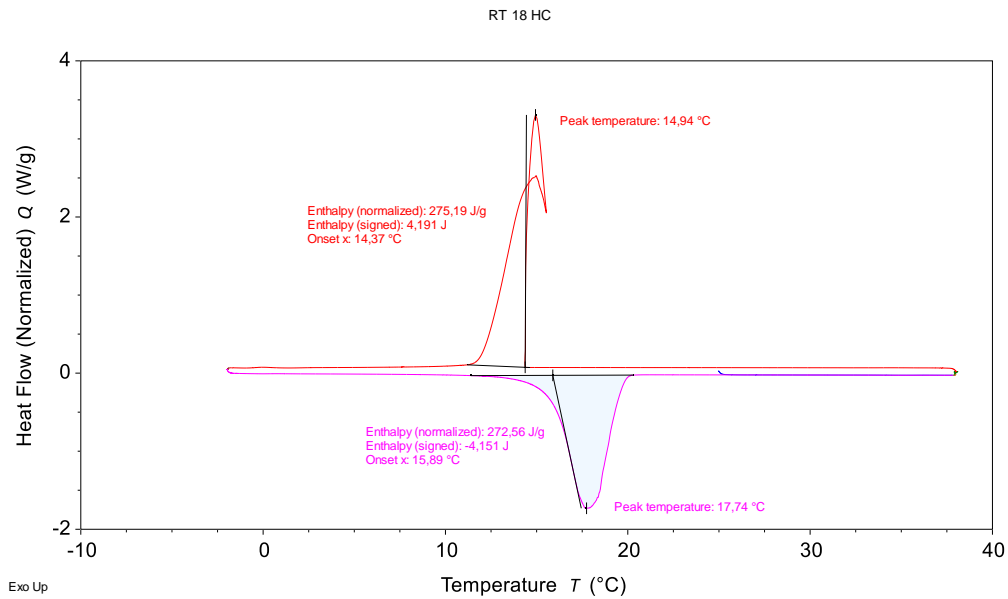


Figura 2 – Risultati delle prove sperimentali mediante DSC dei PCM RT 10, RT 10HC, RT12 ed RT 18HC

Di seguito in Fig. 3 sono riportati anche i valori della viscosità dinamica, per il PCM RT 10, ottenuti mediante lo strumento TA DSC 250. Come è possibile notare, il valore della viscosità nella fase liquida è pressoché costante nel range di interesse dell'applicazione in esame. Valori simili sono stati rilevati anche per i restanti PCM.

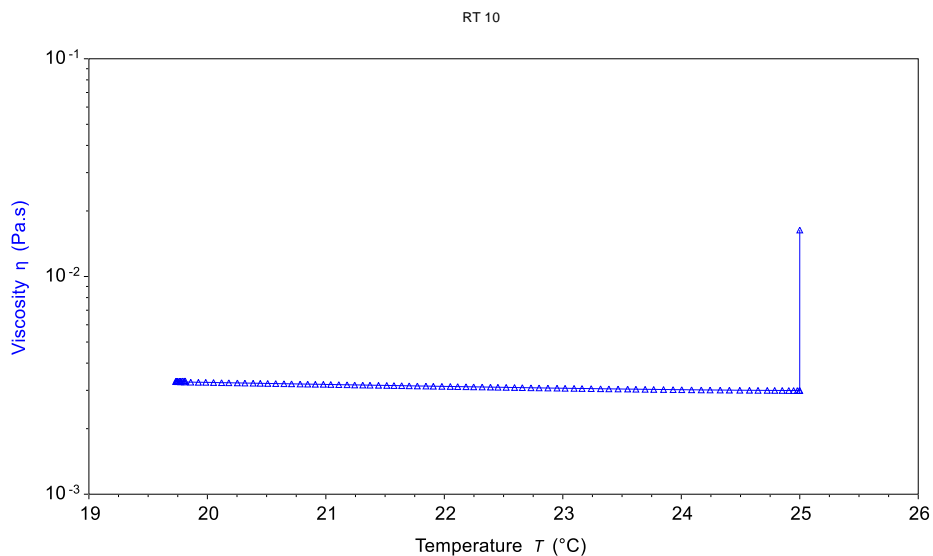


Figura 3 – Andamento della viscosità dinamica del PCM RT 10 al variare della temperatura

7.1.2 Risultati dell'ottimizzazione multi-obiettivo

L'obiettivo dell'ottimizzazione è stato di incrementare le performance di accumulo del sistema. Al contempo, in conformità con quanto valutato nelle annualità precedenti, è stato necessario definire un problema di ottimizzazione che fosse in grado di tener conto della velocità del trasferimento di calore, onde evitare che il transitorio termico si estingua senza permettere che il PCM fonda. Dunque, per far sì che il serbatoio sia in grado di incrementare l'energia accumulata e rilasciate, in un intervallo di tempo limitate, sono state individuate due funzioni

obiettivo, tra di loro contrastanti: l'energia rilasciata dal PCM ed il tempo di scarica. Tale problema di ottimizzazione equivale a massimizzare la potenza termica scambiata (energia per unità di tempo), con riferimento alla fase di scarica. I risultati sono mostrati in Fig. 4.

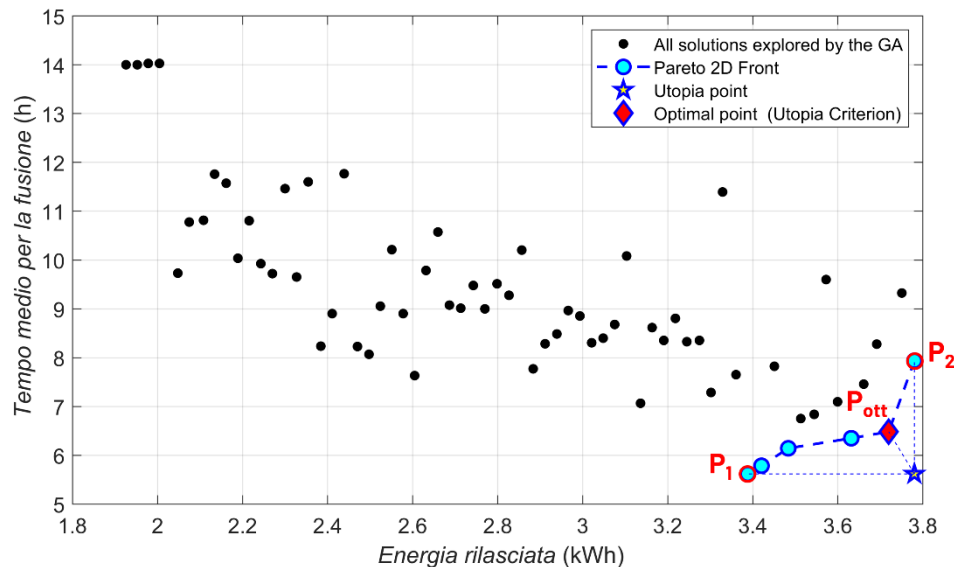


Figura 4 – Risultato ottimizzazione multi-obiettivo: soluzioni esplorate dal GA e fronte di Pareto

In Tab. 2 sono riportati i valori delle variabili di design del problema di ottimizzazione, riportati in riferimento alle soluzioni ottimali evidenziate in Fig. 4, *i.e.*, P_1 , P_2 , e P_{ott} . È possibile notare che le tre soluzioni prevedono nelle posizioni iniziali (da 1 a 2) dei PCM a bassa temperatura di fusione. Man mano che si sale di quota, la temperatura di fusione tende a salire, ad eccezione del caso P_1 , per il quale il PCM in ultima posizione ha una temperatura di fusione intermedia. Dunque, facendo un'analogia con i profili di scambio termico di un tradizionale scambiatore di calore, la disposizione dei PCM è "equicorrente" al fluido. Via via che il fluido termovettore si riscalda, così i PCM presentano una temperatura di fusione superiore. Così facendo, la differenza di temperatura media tra il fluido ed i PCM è limitata, il che porta ad una riduzione della generazione di entropia, ma al contempo, a parità di trasmittanza globale, implica una potenza termica scambiata ridotta.

Tabella 2 – Valori delle variabili di design per le soluzioni ottimali evidenziate sul fronte di Pareto

Soluzioni	PCM ₁	PCM ₂	PCM ₃	PCM ₄	PCM ₅	PCM ₆	N° configurazione
P_1	RT 10	RT 12	RT 18	RT 18	RT 15	/	20
P_2	RT 10HC	RT 11HC	RT 18HC	RT 18	/	/	19
P_{ott}	RT 11	RT 12	RT 12	RT 18HC	/	/	18

Di seguito sono riportate le frequenze dei valori di ciascuna variabile di design, sia con riferimento a tutte le soluzioni esplorate dall'algoritmo, sia in riferimento alle soluzioni ottimali evidenziate nel fronte di Pareto. In particolare, Fig. 5 mostra sia le tipologie di PCM selezionate con più frequenza dall'algoritmo, sia la tipologia di configurazione (tipo di moduli e disposizione) più ricercata. Nel primo caso si può notare come il PCM RT 12 sia uno dei candidati più papabili per l'applicazione in esame, in quanto la temperatura di fusione è tale da garantire un buon compromesso tra la fase di carica e scarica. Tale risultato conferma quanto già ottenuto nelle precedenti annualità.

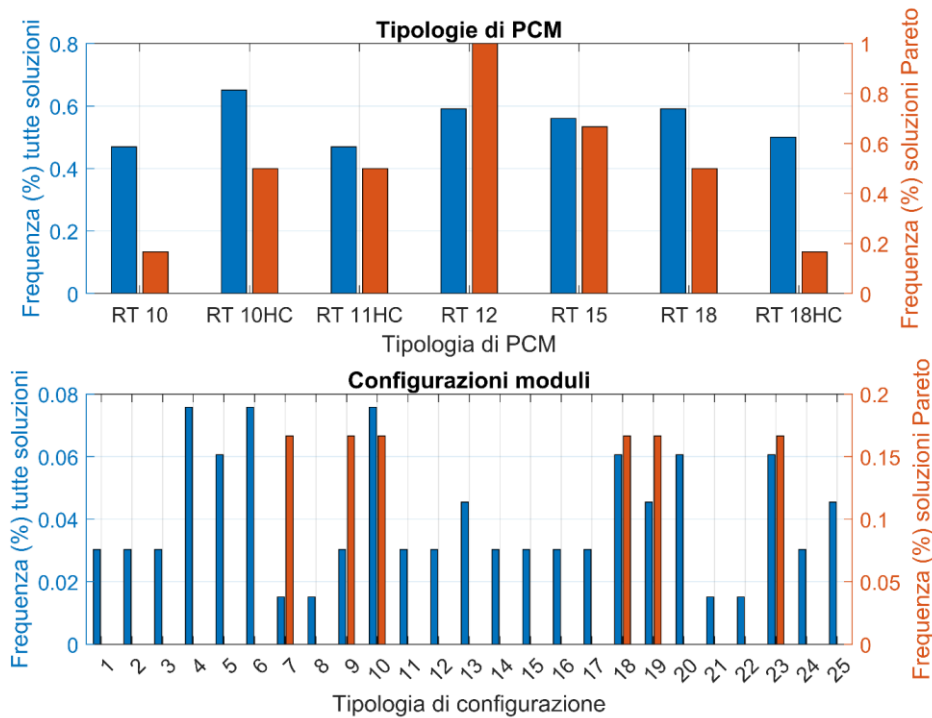


Figura 5 – Frequenza delle tipologie di PCM rispetto a tutte le soluzioni analizzate dal GA e rispetto alle soluzioni sul fronte di Pareto evidenziato in Fig. 4

7.1.3 Post-process

In tale sezione sono riportati gli andamenti temporali dell'energia accumulata/rilasciata dal sistema di accumulo (valori già moltiplicati per il totale dei tubi), con riferimento alla soluzione ottimale P_{ott} e per un intervallo temporale riferito al secondo giorno di simulazione (per evitare dipendenza dalla condizione iniziale del transitorio termico). Tale operazione ha permesso anche di monitorare la bontà dei risultati derivanti dall'ottimizzazione. Fig. 6 mostra, dunque, la differente predisposizione di vari PCM ad accumulare/rilasciare energia.

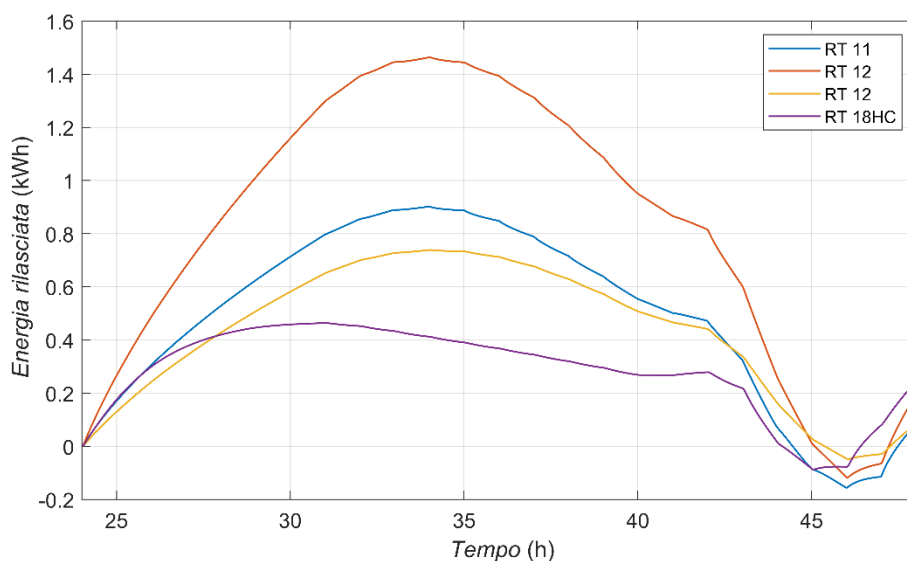


Figura 6 – Andamento temporale dell'energia accumulata/rilasciata dal sistema di accumulo, nei differenti moduli, a partire dal secondo giorno di simulazione

L'efficacia del sistema di accumulo è determinata dalla differenza tra il valore massimo e quello minimo per ciascuno profilo mostrato in Fig. 6. Dunque, si può notare come il PCM nel secondo modulo a partire dal basso - PCM RT 12 - risulti essere il più performante, con una differenza di 1.58 kWh. In generale, partendo dal modulo inferiore l'energia effettivamente rilasciata è pari a 1.05 kWh, 1.56 kWh, 0.75 kWh e 0.40 kWh, rispettivamente per i PCM RT11, RT12, RT12 ed RT18HC. Complessivamente si registra un valore di energia rilasciata pari a 3.76 kWh. Tale valore di discosta lievemente da quello indicato sul fronte, *i.e.*, 3.73 kWh, a causa di un lieve infittimento della griglia di calcolo utilizzata.

7.2 Subtask 2: valutazione delle performance del sistema di accumulo "cascade" alettato

Lo step di ottimizzazione precedentemente mostrato è stato propedeutico alla valutazione dell'incremento delle performance di accumulo dello scambiatore shell-and-tube con parete alettata. In dettaglio, le soluzioni ottimali riportate in Tab. 2 sono state simulate anche per il caso alettato, al fine di effettuare un paragone tra le due configurazioni. In tal senso è stato possibile definire il beneficio legato alla superficie alettata.

7.2.1 Configurazione del sistema alettato

La superficie alettata consiste nel posizionamento di 3 lamine di acciaio AISI 316, di spessore 1 mm, saldate sulla parete del tubo ed equidistribuite lungo la circonferenza (sfasate ogni 120°). Tale lamine formano dunque sei alette che si diramano dalla superficie del tubo in direzione radiale. La vista in sezione del tubo alettato con i dettagli della geometria implementata è presentata in Fig. 7. Per semplicità - avvalendosi della simmetria geometrica e termica - è stato simulato solo il volume di un settore circolare pari a 1/6 della geometria.

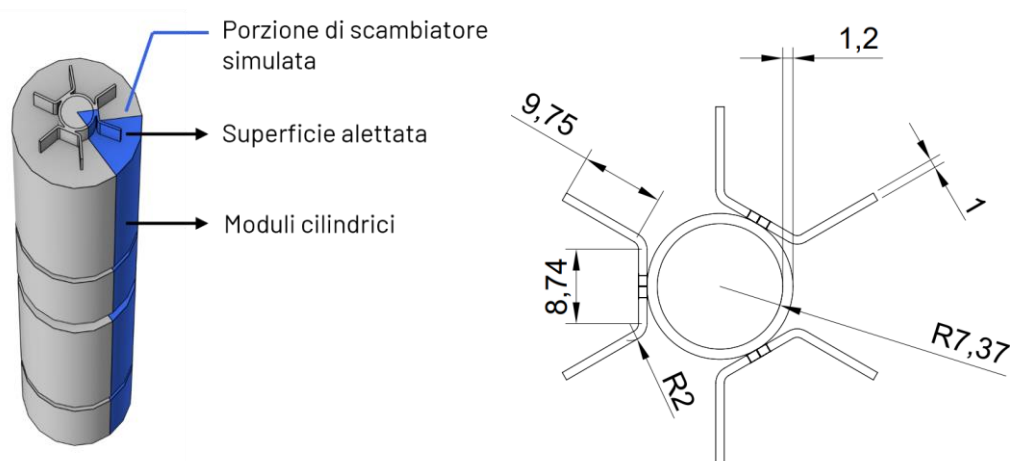


Figura 7 - Rappresentazione del sistema modulare "cascade" alettato (a sinistra) e vista in sezione del tubo alettato (a destra)

7.2.2 Analisi energetica

La presenza dell'alettatura longitudinale ai tubi fa sì che il transitorio termico relativo alla solidificazione/fusione del PCM si riduca drasticamente. In particolare, la conformazione delle

alette permette un elevato ricircolo nel PCM, non inibendo i moti convettivi, e favorisce la conduzione incrementando la diffusività termica. Fig. 8-10 mostrano l'andamento della frazione di PCM fuso per differenti configurazioni analizzate, in presenza di alette. In particolare, tali andamenti sono riportati con riferimento al secondo giorno di simulazione così da rendere le soluzioni indipendenti dalla condizione iniziale.

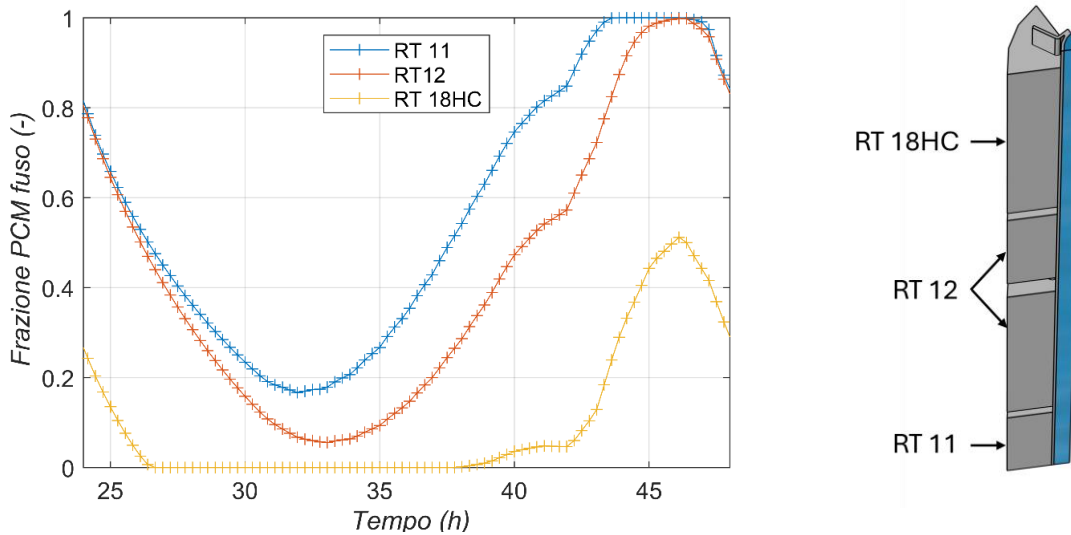


Figura 8 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione per la configurazione 18

La configurazione 18, che prevede i PCM RT11, RT 12 ed RT 18HC si conferma la soluzione più efficace. Infatti, come si può notare dalle Fig. 8-10, i PCM con temperatura fusione inferiore riescono a fondere completamente e a raggiungere una solidificazione pressoché completa.

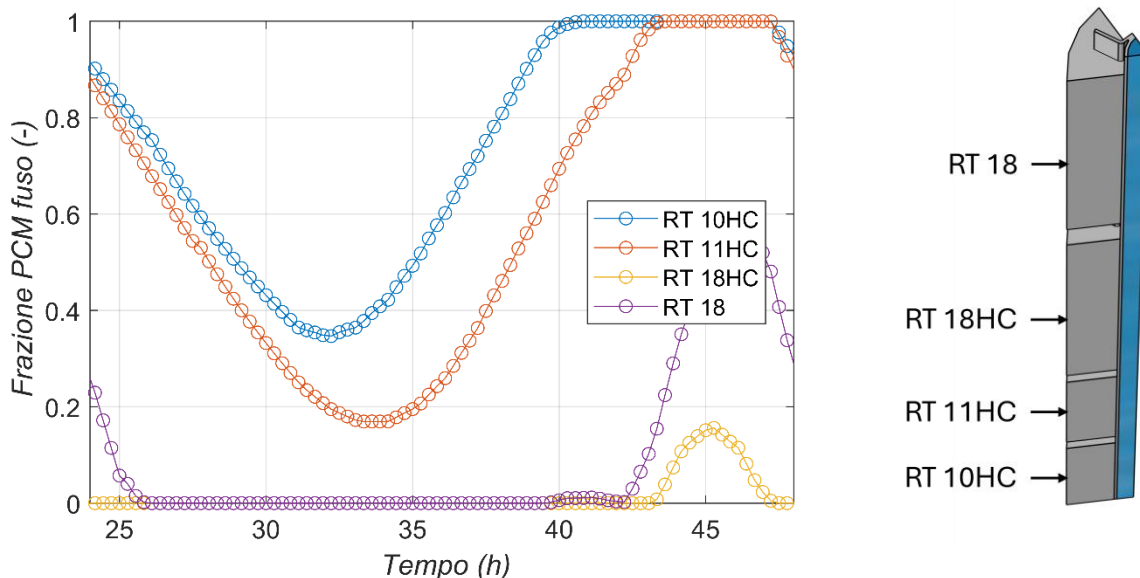


Figura 9 – Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione per la configurazione 19

Il PCM RT 18HC, al contrario, pur solidificando per un intervallo orario prolungato, subisce solo parzialmente il processo di fusione (circa il 50%). Nonostante ciò, a causa dell'elevato calore latente, garantisce un'efficienza di accumulo elevata.

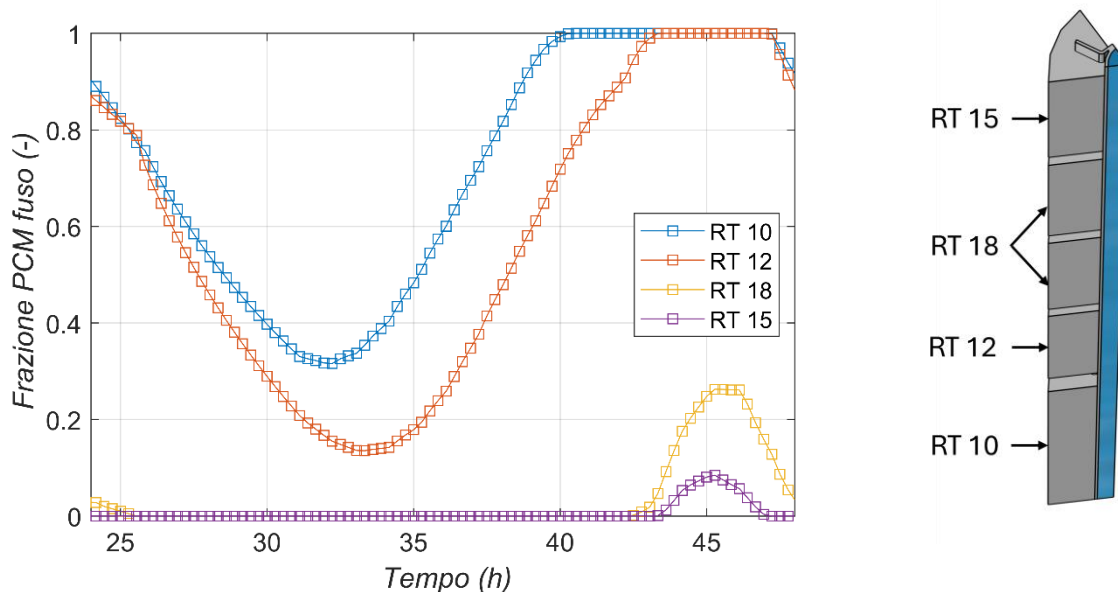


Figura 10 - Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione per la configurazione 20

Le restanti soluzioni - configurazione 19 e configurazione 20 - garantiscono un ciclo di carica e scarica parziale per i PCM impiegati. La configurazione 19 predilige l'uso di PCM di tipologia HC - caratterizzate da un calore latente mediamente superiore - ma non ne garantisce l'uso completo. I PCM a temperatura di solidificazione bassa non riescono a solidificare completamente a causa della limitata differenza di temperatura con il fluido termovettore, mentre quelli a temperatura di fusione più alta non riescono a fondere completamente a causa dell'intervallo di tempo limitato in cui il fluido termovettore ha temperatura maggiore di quella di fusione dei PCM stessi. I risultati mostrati trovano riscontro nell'analisi dell'energia accumulata/rilasciata dal PCM, mostrata in Fig. 11.

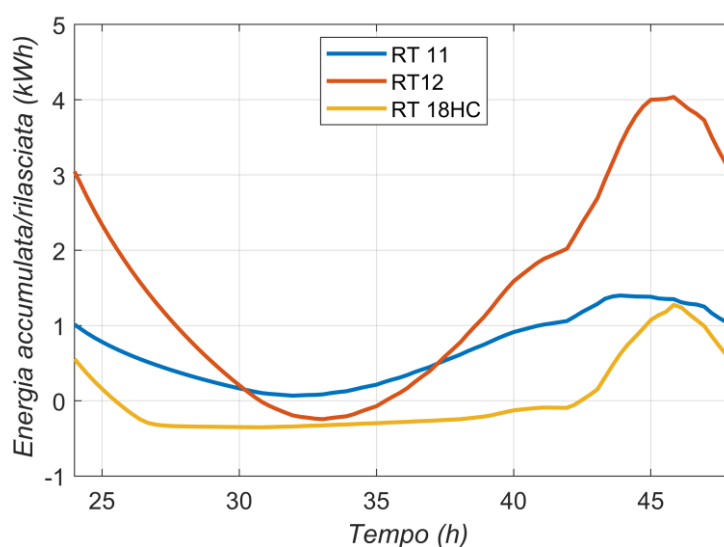


Figura 11 - Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione

In particolare, lo scostamento tra i valori massimi e minimi per ciascun PCM definisce l'effettiva energia netta che il sistema di accumulo garantisce al chiller cui esso è collegato. Tale valore fornisce un'indicazione fondamentale in quanto, rispetto alla frazione di PCM fusa, è scalata sul quantitativo di PCM e dunque sulla tipologia di modulo. Tra i 3 PCM impiegati, il PCM 12 garantisce un valore netto di 4.10 kWh, mentre il PCM 11 e il PCM 18HC accumulano e rilasciano 1.38 e 2.54 kWh, rispettivamente.

7.2.3 Analisi exergetica

L'analisi exergetica – strettamente connessa a quella entropica – è stata realizzata mediante approccio CFD. La verifica è stata realizzata usando come riferimento la solidificazione del PCM attorno ad un tubo verticale (Verda *et al.* [1]). La generazione entropica globale è stata dunque utilizzata per valutare la qualità dello scambio termico:

$$S_p = \int s_p dV = \int \frac{-\dot{q} \cdot \nabla T}{T^2} + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV \quad (1)$$

Tale parametro è strettamente correlato all'efficienza exergetica del sistema. Riducendo la generazione di entropia a flusso termico costante, si migliorano le prestazioni termodinamiche del sistema. L'analisi consente di ottimizzare la configurazione dell'unità LHTES riducendo i picchi locali di entropia, uniformandone la distribuzione. Il risultato della verifica, effettuata confrontando i valori della generazione entropica nell'intervallo di tempo della solidificazione è mostrato in Fig. 12. Da tale figura è possibile notare come i due andamenti siano pressoché uguali, mostrando scostamenti trascurabili.

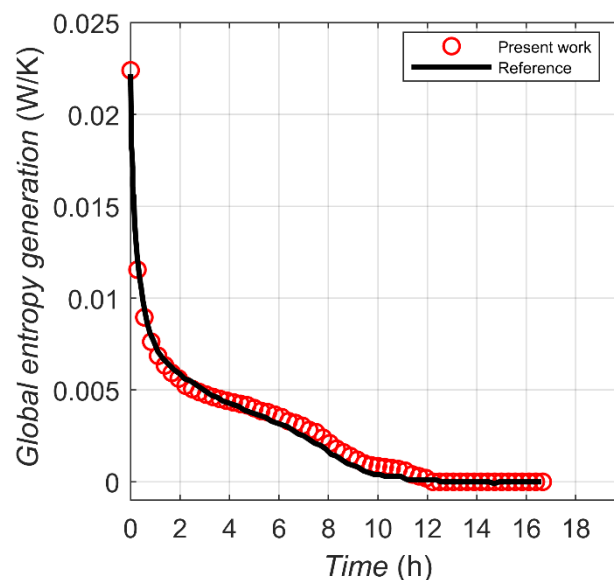


Figura 12 – Verifica della generazione entropica globale sulla base dei risultati in letteratura [1]

Una volta appurata la bontà della metodologia utilizzata per la valutazione della generazione entropica nel processo di carica/scarica del sistema di accumulo, si è proceduto alla valutazione delle performance del sistema con alettatura, nella configurazione dei moduli precedentemente elencata in Tab. 2. In dettaglio, Fig. 13 mostra la differenza negli andamenti della generazione entropica per le 3 configurazioni analizzate. La configurazione 18, precedentemente evidenziata come soluzione ottimale in quanto trade-off tra tempi di scarica

ed energia accumulata, in questo contesto presenta un picco di generazione entropica verso la diciannovesima ora del transitorio. Tale picco è dovuto alla differenza di temperatura tra il PCM contenuto nell'ultimo modulo - di altezza $H/3$ - ed il fluido termovettore. Nonostante tale picco, la configurazione 18 risulta essere quella con generazione entropica media inferiore.

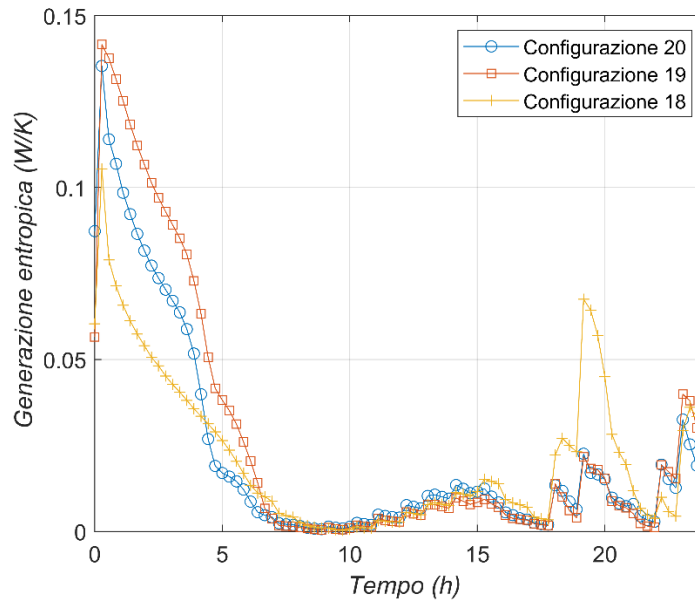


Figura 13 - Andamento della frazione di PCM liquido nel tempo, con riferimento al secondo giorno di simulazione

7.3 Subtask 3: analisi parametrica del sistema di accumulo con PCM macro-incapsulato

La Figura 14 mostra un disegno tecnico del serbatoio in esame. In dettaglio, il serbatoio - disponibile in commercio - è coibentato ed ha una forma cilindrica verticale, un'altezza di 1,00 m, un diametro interno di 0,5 m. Il sistema di accumulo è dotato di sei fori passanti per il posizionamento delle termocoppie, poste sull'asse centrale del serbatoio per misurare la temperatura a diverse altezze, *i.e.*, i fori sono equidistanti di 0,15 m a partire da una quota di 0,125 m fino a 0,875 m. La carica del sistema di accumulo è realizzata mediante un circuito collegato al sistema stesso, mentre lo scarico termico avviene mediante un'elettrovalvola modulante che permette di regolare il set-point della portata massica dell'acqua. Le sezioni di ingresso e uscita dello scambiatore di calore sono poste sul fondo e all'apice del serbatoio - rispettivamente - ed in corrispondenza dell'asse del serbatoio stesso. Ciascun serbatoio è provvisto di quattro ripiani estraibili dall'alto, sui quali vengono collocati i moduli cilindrici. Ciascuno dei moduli ha una capacità di mezzo litro, con diametro di 6,5 cm e altezza 20 cm. Ogni ripiano - a cui viene associato un livello del serbatoio - può contenere 33 moduli. Considerando tre serbatoi, con quattro livelli ognuno, il totale dei moduli corrisponde a 396. Per ciascun modulo viene considerata una percentuale di riempimento dell'80%, valore verosimile per tener conto dell'espansione del PCM durante il passaggio di fase.

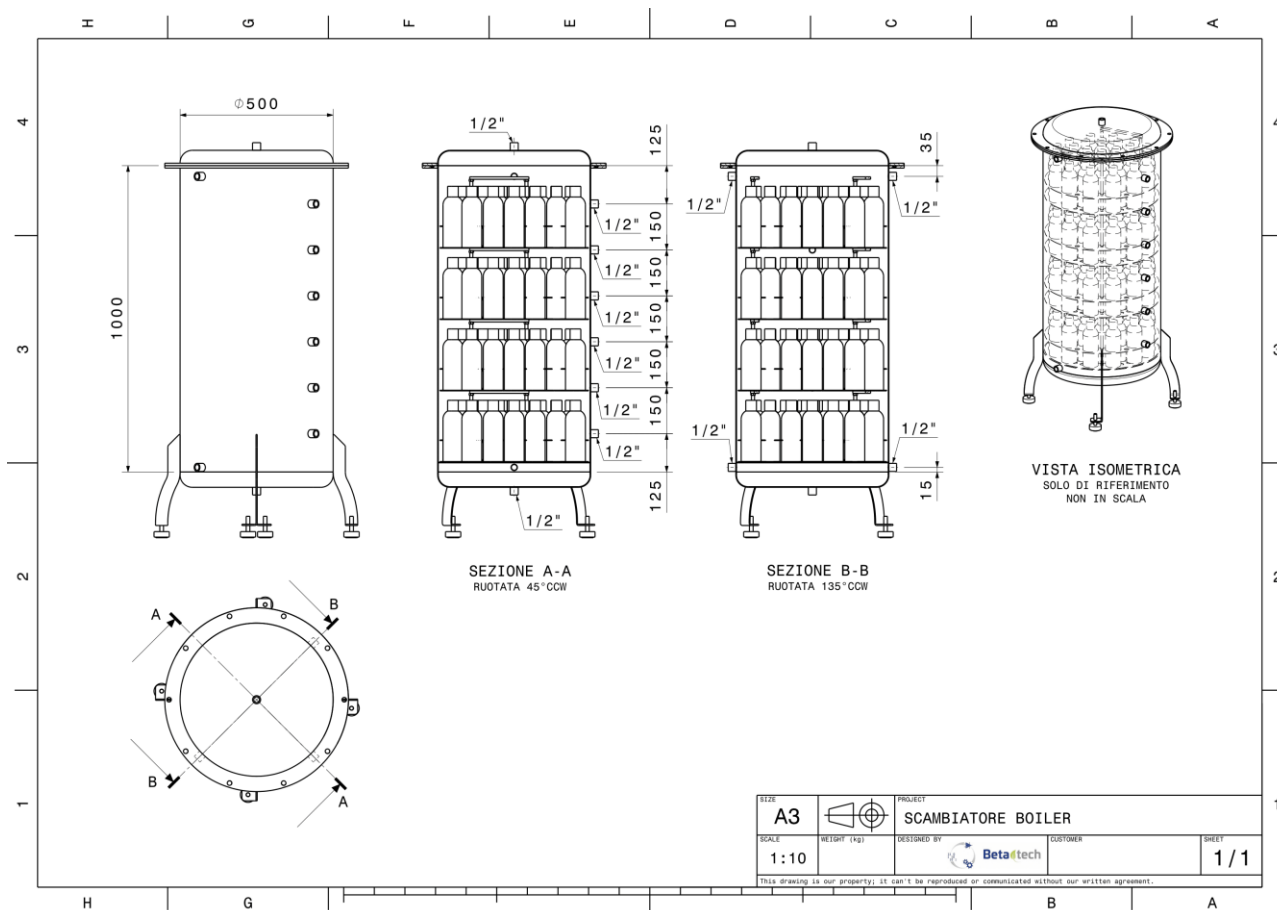


Figura 14 – Configurazione geometrica serbatoio a letto fisso

Per la simulazione del serbatoio di accumulo è stato sviluppato e implementato un modello numerico in ambiente MATLAB®. In dettaglio, la discretizzazione spaziale per l'implementazione del metodo dei volumi finiti 1D è stata eseguita lungo la direzione verticale. Lo sviluppo del codice completo (serbatoio dell'acqua + moduli PCM) richiede il collegamento tra i codici COMSOL Multiphysics® e MATLAB®. In dettaglio, un passaggio cruciale consiste nello sviluppo di una parte di codice per simulare lo scambio termico tra i moduli di PCM – introdotti nel serbatoio – e l'acqua contenuta all'interno del serbatoio stesso. Sulla base delle indicazioni ricavate per i serbatoi precedenti, di seguito si analizzano i risultati ottenuti ponendo in configurazione a cascata 3 serbatoi, ciascuno con PCM differenti, i.e., RT 11, RT 12, RT 18HC. Il modello sviluppato in ambiente MATLAB – simile a quello definito nelle precedenti annualità – ha previsto l'aggiornamento delle condizioni relative alla periodicità dei sistemi di accumulo, le differenti correlazioni per la simulazione delle resistenze convettive all'esterno dei moduli cilindrici e l'introduzione di più PCM.

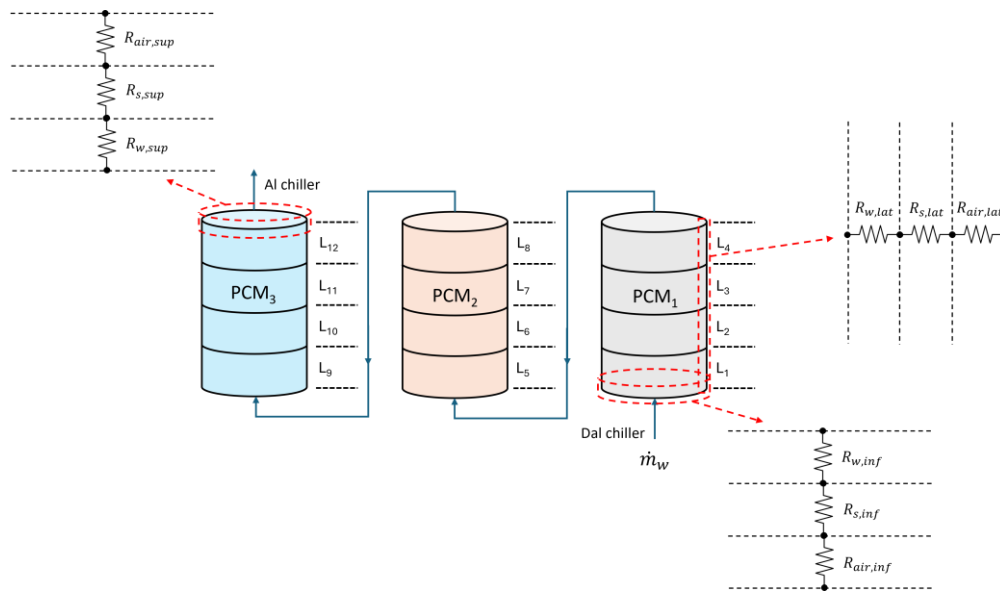


Figura 15 - Schema accoppiamento 3 serbatoi in serie

I risultati in termini di temperatura registrata all'interno dei moduli cilindrici sono mostrati in Fig. 16. In particolare, tale figura mostra le temperature sull'asse del modulo (termocoppia centrale) e in prossimità della parete (termocoppia laterale), per moduli posti sul terzo livello di ciascun serbatoio.

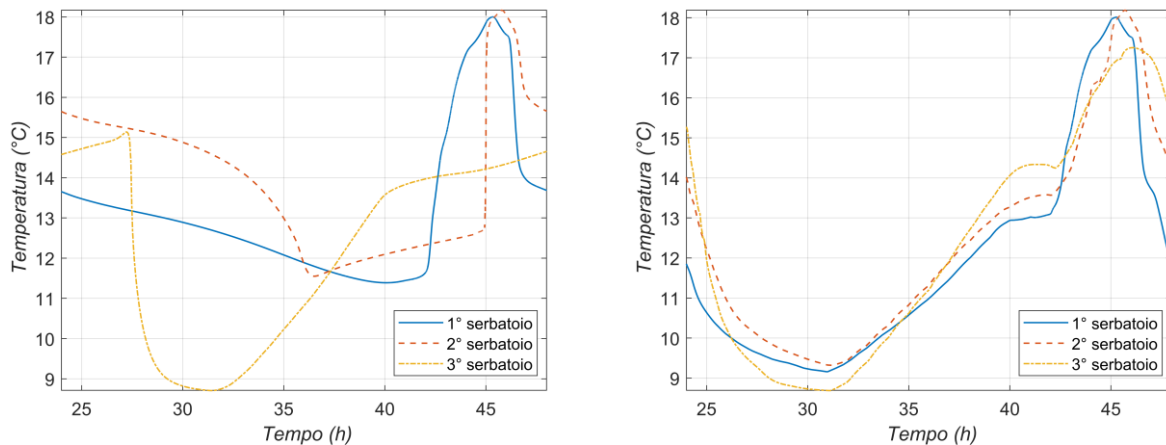


Figura 16 - Andamento della temperatura all'interno dei moduli cilindrici: termocoppia centrale (sx) e termocoppia laterale (dx)

La configurazione a cascata permette di sfruttare al meglio la capacità di accumulo di ciascun serbatoio, riuscendo a seguire il graduale riscaldamento del fluido termovettore. Nonostante ciò, si evidenzia come il PCM 18HC presenti un punto di fusione troppo alto, rendendo inefficace la scarica.

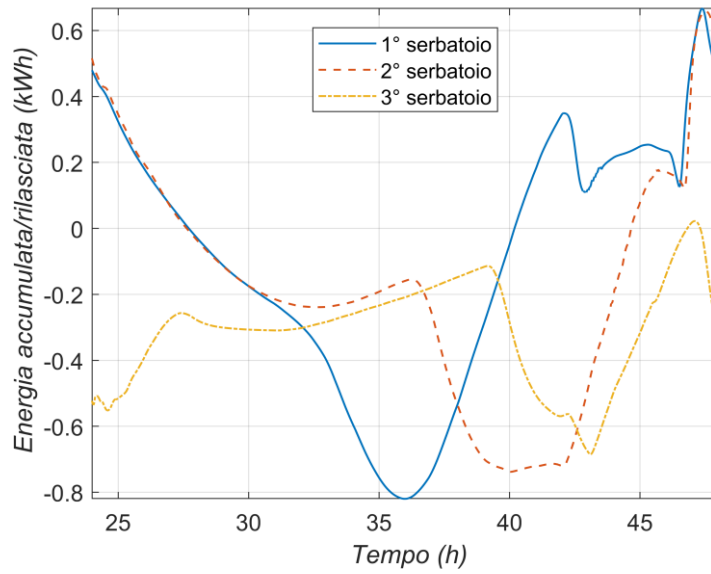


Figura 17 – Energia accumulata/rilasciata per ciascun serbatoio

Sommando i contributi di ciascun serbatoio, è possibile ricavare l'energia effettivamente accumulata e rilasciata durante le 24 h, che ammonta a 2.5 kWh.

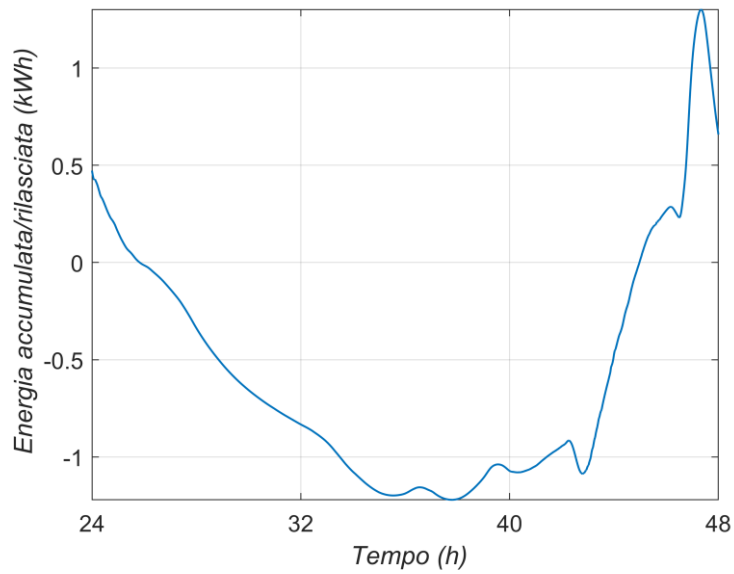


Figura 18 – Energia accumulata/rilasciata dall'intero sistema

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

In relazione ad aspetti fondamentali per le attività presentate nel presente report, sono state realizzate le seguenti pubblicazioni:

- Bianco, N., Caliano, M., Fragnito, A., Iasiello, M., Mauro, G. M., & Mongibello, L. (2023). Thermal analysis of micro-encapsulated phase change material (MEPCM)-based units integrated into a commercial water tank for cold thermal energy storage. *Energy*, 266, 126479.
- Bianco, N., Fragnito, A., Iasiello, M., Mauro, G. M., & Mongibello, L. (2023). Subcooling Effect on PCM Solidification: A Thermostat-like Approach to Thermal Energy Storage. *Energies*, 16(12), 4834.

La prima relativa alla definizione dell'accoppiamento tra il modello MATLAB del sistema di accumulo commerciale a letto fisso e il modello CFD per la simulazione di PCM micro-incapsulati. La seconda relativa all'inclusione del fenomeno del subcooling nel PCM. Tale fenomeno, che ritarda la solidificazione del PCM, può rivelarsi critico in applicazioni come quella esaminata. In particolare, la variazione oraria del carico dell'utenza richiede una risposta tempestiva del PCM in termini di potenza termica scambiata. Di conseguenza, fenomeni come il subcooling possono compromettere l'efficacia dell'accumulo termico.

Inoltre, i risultati numerici delle attività realizzate nel presente report verranno confrontati con i risultati sperimentali degli analoghi sistemi di accumulo al fine di ottenere un quadro completo delle performance dei sistemi in esame. Le informazioni ottenute saranno disseminate mediante ulteriori pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali (e.g., Applied Energy, Applied Thermal Engineering, Journal of Energy Storage) open access. In particolare, si prevedono le seguenti pubblicazioni, associate a ciascuna Subtask dettagliata nel presente report:

- Performance evaluation of cascaded solutions to optimize PCM-based shell and tube thermal energy storage for residential use.
- Experimental and numerical investigations on energy and exergy performance of finned-tube cascade latent heat thermal storage for residential applications.
- Enhancing energy storage efficiency via macro-encapsulated PCM cylindrical modules in cascade configurations within commercial water tanks.

10 Eventi di disseminazione

La disseminazione dei risultati ottenuti è avvenuta nella seguente modalità:

- Nell'ambito della conferenza TFEC2023, è stata effettuata una invited talk in sessione plenaria sull'ottimizzazione multi-obiettivo applicata a problemi di scambio termico. In particolare, sono stati illustrati i risultati ottenuti sia per quanto riguarda la modellazione del sistema di accumulo del freddo shell-and-tube di riferimento, che per quanto riguarda la procedura di ottimizzazione multi-obiettivo sia dei parametri operazionali che della geometria del sistema di accumulo (presentazione non indicizzata).

Inoltre, avverrà mediante:

- Partecipazione alla conferenza internazionale "10TH Thermal and Fluids Engineering Conference (Hybrid), TFEC2025" mediante il lavoro intitolato: A simplified reduced order model to predict phase change materials heat transfer including natural convection. Tale conferenza si svolgerà nel mese di marzo 2025.