



Ricerca di Sistema elettrico

Simulazione termo-fluidodinamica di un sistema di accumulo del freddo basato sull'impiego di acqua e un materiale a cambiamento di fase macro-incapsulato in moduli cilindrici di alluminio: analisi di sensitività effettuata al variare delle dimensioni dei moduli

A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano, M. Iasiello

SIMULAZIONE TERMO-FLUIDODINAMICA DI UN SISTEMA DI ACCUMULO DEL FREDDO BASATO SULL'IMPIEGO DI ACQUA E UN MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE MACRO-INCAPSULATO IN MODULI CILINDRICI DI ALLUMINIO: ANALISI DI SENSITIVITÀ EFFETTUATA AL VARIARE DELLE DIMENSIONI DEI MODULI

A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano, M. Iasiello
(Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: B. Reti termiche distribuite

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Simulazione termo-fluidodinamica di un sistema di accumulo del freddo basato sull'impiego di acqua e un materiale a cambiamento di fase macro-incapsulato in moduli cilindrici di alluminio: analisi di sensitività effettuata al variare delle dimensioni dei moduli*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Giorgio Graditi

Responsabile scientifico Università di Napoli Federico II: Prof. Nicola Bianco

Indice

SOMMARIO.....	4
1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	5
2 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE I.....	6
2.1 CASI ANALIZZATI.....	6
2.1.1 Caso base – contenitori da 1L.....	6
2.1.2 Caso 1: contenitori da ½ L.....	7
2.1.3 Caso 2: contenitori da ¼ L.....	8
2.1.4 Caso 3: contenitori da 1/10 L.....	8
2.1.5 Caso 4: contenitori da 1/636,6 L.....	8
3 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE II.....	9
3.1 RISULTATI.....	9
3.1.1 Andamento della temperatura dell’acqua nel serbatoio.....	9
3.1.2 Andamento della temperatura nel PCM e della frazione fusa.....	11
3.1.3 Andamento dell’energia accumulata e rilasciata dal modulo di PCM.....	14
4 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE III.....	17
5 CONCLUSIONI.....	18
CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	19

Sommario

Nel presente rapporto tecnico sono descritte le attività di ricerca svolte nel periodo ottobre – dicembre 2018 relativamente all'estensione del terzo anno dell'Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione: *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un sistema di accumulo del freddo basato sull'impiego di acqua e un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material) macro-incapsulato come materiali di accumulo: analisi di sensitività effettuata al variare della quantità di PCM utilizzato”* stipulato tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

L'attività di ricerca svolta dal DII dell'Università di Napoli Federico II nel corso della terza annualità del PAR 2017, ha previsto la realizzazione e annessa validazione sperimentale di un modello non stazionario per la simulazione numerica di un sistema di accumulo del freddo innovativo basato sull'impiego, come materiali di accumulo, di acqua fredda e un PCM macro-incapsulato all'interno di contenitori cilindrici di alluminio. Tale attività ha previsto lo sviluppo di un modello monodimensionale per la simulazione termo-fluidodinamica del sistema di accumulo del freddo contenente solo acqua, e successivamente l'accoppiamento dello stesso al modello sviluppato in ambiente Comsol Multyphysics nel corso del PAR 2016, per la simulazione di un'unità cilindrica di accumulo del freddo contenente un PCM. Gli applicativi sono stati implementati sulla base delle caratteristiche geometriche e termo-fisiche del prototipo di serbatoio di accumulo del freddo per uso residenziale realizzato da ENEA ed, infine, è stata effettuata la validazione sperimentale del modello proposto. I principali risultati ottenuti nel PAR 2017 sono riportati nel report tecnico *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un sistema di accumulo del freddo basato sull'impiego di acqua e un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material) macro-incapsulato come materiali di accumulo”* elaborato dal medesimo dipartimento.

Partendo dall'attività svolta nel corso del PAR 2017, sopra brevemente descritta, l'attività svolta nel periodo ottobre – dicembre 2018, ha riguardato la realizzazione di un'analisi parametrica finalizzata alla valutazione delle performance energetiche del sistema di accumulo del freddo oggetto di studio, al variare del numero di contenitori di PCM. Lo scopo di tale analisi è stato quello di identificare la migliore configurazione, in termini di dimensione e numero di contenitori contenenti PCM, da utilizzare al fine di massimizzare le performance di scambio termico del sistema considerato, a servizio dell'utenza selezionata per lo specifico caso studio individuato. Tale attività ha richiesto, quindi, l'aggiornamento dell'applicativo sviluppato precedentemente, in modo da poter considerare le diverse configurazioni del sistema di accumulo oggetto di studio. L'attività, inoltre, ha previsto un ulteriore confronto con i dati sperimentali forniti da ENEA.

1 Descrizione delle attività svolte

Di seguito sono descritte nel dettaglio le attività svolte nel periodo di estensione (ottobre – dicembre 2018) della III annualità dell'Accordo di Programma. Il lavoro di questo periodo è stato articolato in tre fasi, relative agli step di seguito riportati.

- I. La prima attività ha previsto l'aggiornamento del modello termo-fluidodinamico relativo al sistema di accumulo del freddo composto da un serbatoio ad acqua e PCM macro-incapsulato all'interno di contenitori cilindrici di alluminio, sviluppato nel corso della III annualità PAR 2017 sulla base delle caratteristiche geometriche e termo-fisiche del prototipo di serbatoio di accumulo del freddo per uso residenziale realizzato da ENEA.
In questa fase sono state analizzate diverse configurazioni del sistema, in termini di dimensioni e numero dei contenitori contenenti il PCM. A tale scopo, definito il caso base in funzione delle prove sperimentali svolte da ENEA, sono stati selezionati altri quattro tipi di contenitori, contenenti PCM, di dimensioni diverse e, per ciascuno di essi, è stata calcolata la quantità di PCM ivi contenuta.
- II. La seconda attività ha previsto l'analisi e il confronto dei risultati ottenuti nei diversi casi numerici, al fine di individuare, tra quelle analizzate, la configurazione in grado di massimizzare le performance energetiche del sistema. Tale attività è stata effettuata in termini di confronto tra i vari casi dell'andamento della temperatura dell'acqua nel serbatoio, della temperatura del PCM all'interno dei contenitori, dell'andamento della frazione fusa di PCM e dell'energia accumulata/rilasciata dai moduli di PCM.
- III. La terza attività ha previsto un ulteriore confronto dei risultati numerici ottenuti con quelli sperimentali forniti da ENEA. Tale confronto è stato effettuato per un unico caso studiato, ovvero quello analizzato sperimentalmente da ENEA.

2 Attività svolte nella Fase I

Di seguito è descritta l'attività di aggiornamento del modello. Nel dettaglio, sono riportate le caratteristiche geometriche del serbatoio ad acqua utilizzato e le varie configurazioni studiate. In tutti i casi analizzati, la durata delle simulazioni è stata impostata a 48h con passo temporale pari a 100 s. Solo per il caso utilizzato per il confronto sperimentale, la durata della simulazione è stata impostata a 72h.

2.1 Casi analizzati

2.1.1 Caso base – contenitori da 1L

I diversi casi studiati nell'analisi parametrica sono stati selezionati a partire dal caso analizzato sperimentalmente da ENEA, caratterizzato da un serbatoio ad acqua di 423L in acciaio inox (Figura 1), con all'interno alloggiati 119 contenitori di alluminio da 1L con altezza pari a 20,0 cm e diametro interno pari a 8,8 cm, ciascuno riempito parzialmente con 817 g di PCM. In fase sperimentale, a 54 di questi contenitori sono stati aggiunti dei pesi metallici, al fine di garantire che si posizionassero sul fondo del serbatoio, mentre gli altri 65 sono stati lasciati a galleggiare in superficie. Il modello è stato impostato considerando l'effettivo posizionamento dei contenitori all'interno del serbatoio, pertanto, il serbatoio è stato suddiviso in 6 strati d'acqua, ognuno occupato da:

Partendo dal fondo del serbatoio (totale 54 contenitori):

- 25 contenitori nel 1° strato;
- 19 contenitori nel 2° strato;
- 10 contenitori nel 3° strato.

Partendo dalla superficie superiore del serbatoio (totale 65 contenitori):

- 25 contenitori nel 1° strato;
- 25 contenitori nel 2° strato;
- 15 contenitori nel 3° strato.

Partendo da tali dati, è stata calcolata l'altezza del PCM all'interno di ciascun contenitore, ovvero pari a 14,3 cm, necessaria ai fini della simulazione numerica.

Partendo dalle caratteristiche del caso base, ai fini dell'analisi parametrica, sono stati selezionati altri quattro casi, di seguito indicati come caso 1, caso 2, caso 3 e caso 4. Le dimensioni fissate nell'analisi sono relative a contenitori commerciali.

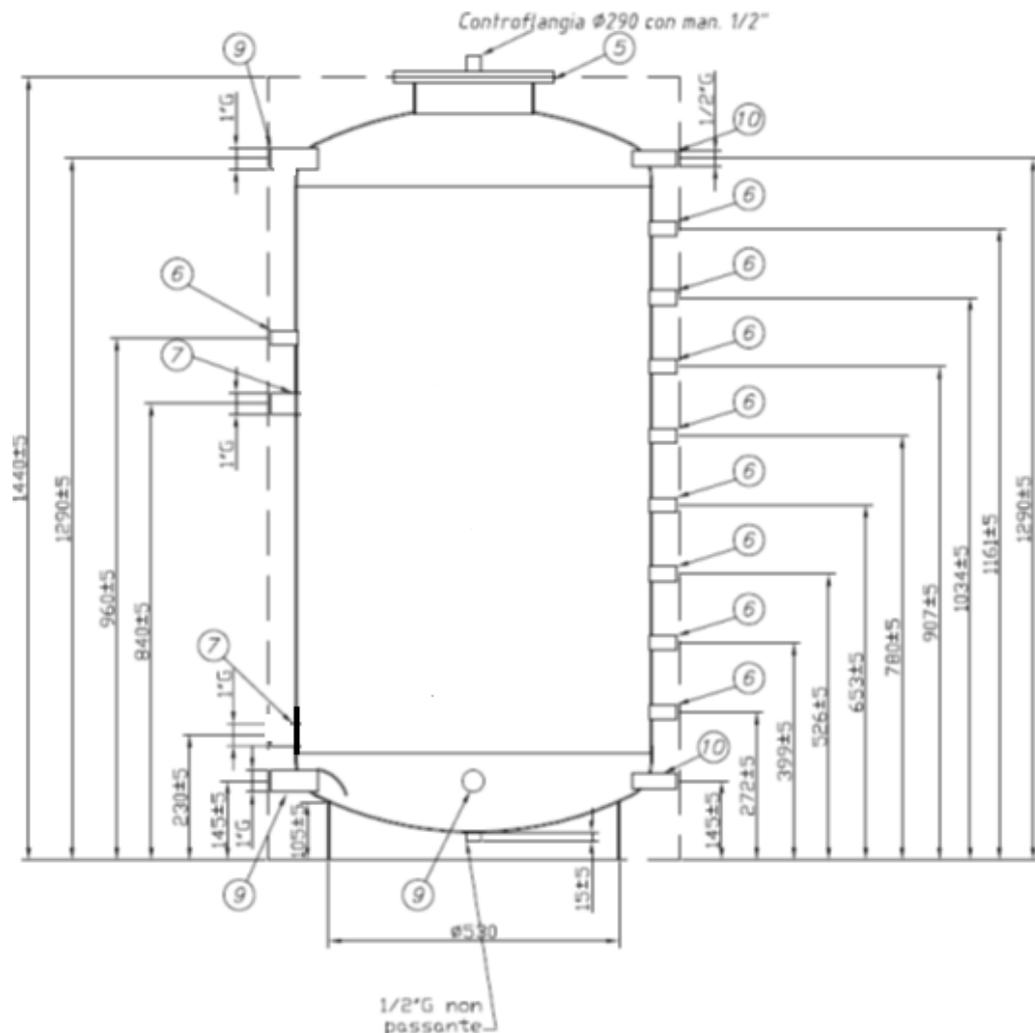


Figura 1. Serbatoio di accumulo ad acqua fredda.

2.1.2 Caso 1: contenitori da $\frac{1}{2}$ L

Nel caso di utilizzo di contenitori con volume pari a $\frac{1}{2}$ L, è stato considerato che all'interno del serbatoio fossero alloggiati 238 contenitori di alluminio con altezza pari a 20,0 cm e diametro interno pari a 6,5 cm, ciascuno riempito parzialmente con 408 g di PCM, in modo da garantire che la quantità totale di PCM introdotta nel serbatoio fosse la stessa del caso base, per un'altezza calcolata del PCM in ciascun contenitore pari a 13,6 cm. Il serbatoio è stato, quindi, suddiviso in 6 strati d'acqua, ognuno di essi occupato da:

Partendo dal fondo del serbatoio (totale 108 contenitori):

- 50 contenitori nel 1° strato;
- 38 contenitori nel 2° strato;
- 20 contenitori nel 3° strato.

Partendo dalla superficie superiore del serbatoio (totale 130 contenitori):

- 50 contenitori nel 1° strato;
- 50 contenitori nel 2° strato;
- 30 contenitori nel 3° strato.

2.1.3 Caso 2: contenitori da $\frac{1}{4}$ L

Nel caso di utilizzo di contenitori con volume pari a $\frac{1}{4}$ L, è stato considerato che all'interno del serbatoio fossero alloggiati 476 contenitori di alluminio con altezza pari a 17,0 cm e diametro interno a 5,2 cm, ciascuno riempito parzialmente con 204 g di PCM, in modo da garantire che la quantità totale di PCM introdotta nel serbatoio fosse la stessa del caso base, per un'altezza calcolata del PCM in ciascun contenitore pari a 10,6 cm. Il serbatoio, in questo caso, è stato suddiviso in 7 strati d'acqua, così composti:

Partendo dal fondo del serbatoio (totale 216 contenitori):

- 100 contenitori nel 1° strato;
- 76 contenitori nel 2° strato;
- 40 contenitori nel 3° strato;
- nessun contenitore del 4° strato.

Partendo dalla superficie superiore del serbatoio (totale 260 contenitori):

- 100 contenitori nel 1° strato;
- 100 contenitori nel 2° strato;
- 60 contenitori nel 3° strato.

2.1.4 Caso 3: contenitori da $\frac{1}{10}$ L

Nel caso di utilizzo di contenitori con volume pari a $\frac{1}{10}$ L, è stato considerato che all'interno del serbatoio fossero alloggiati 1190 contenitori di alluminio con altezza pari a 10,1 cm e diametro interno a 4,4 cm, ciascuno riempito parzialmente con 82 g di PCM, in modo da garantire che la quantità totale di PCM introdotta nel serbatoio fosse la stessa del caso base, per un'altezza calcolata del PCM in ciascun contenitore pari a 6,6 cm. Il serbatoio, in questo caso, è stato suddiviso in 12 strati, così composti:

Partendo dal fondo del serbatoio (totale 540 contenitori):

- 150 contenitori nel 1° strato;
- 150 contenitori nel 2° strato;
- 150 contenitori nel 3° strato;
- 90 contenitori nel 4° strato;
- nessun contenitore nel 5°, 6° e 7° strato.

Partendo dalla superficie superiore del serbatoio (totale 650 contenitori):

- 150 contenitori nel 1° strato;
- 150 contenitori nel 2° strato;
- 150 contenitori nel 3° strato;
- 150 contenitori nel 4° strato;
- 50 contenitori nel 5° strato.

2.1.5 Caso 4: contenitori da $\frac{1}{636,6}$ L

Nel caso di utilizzo di contenitori con volume pari a $\frac{1}{636,6}$ L, è stato considerato che all'interno del serbatoio fossero alloggiati 75803 contenitori di alluminio con altezza pari a 2,0 cm e diametro interno a 1,0 cm, ciascuno riempito parzialmente con 1,28 g di PCM, in modo da garantire che la quantità totale di PCM introdotta nel serbatoio fosse la stessa del caso base, per un'altezza calcolata del PCM in ciascun contenitore pari a 1,8 cm. Il serbatoio, in questo caso, è stato suddiviso in 60 strati, così composti:

Partendo dal fondo del serbatoio:

- 2900 contenitori per strato dal 1° al 12° strato;
- 235 contenitori nel 13° strato;
- nessun contenitore dal 14° al 45° strato;
- 168 contenitori nel 46° strato;
- 2900 contenitori per strato dal 47° al 60° strato.

3 Attività svolte nella Fase II

Di seguito è descritta l'attività di analisi dei risultati. Nel dettaglio, è riportato il confronto tra tutti i casi analizzati in termini di: (i) andamento della temperatura dell'acqua nel serbatoio; (ii) andamento della temperatura media nel PCM; (iii) andamento della frazione solida/fusa del PCM; (iv) andamento dell'energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM. Al fine di non appesantire la trattazione, tali risultati sono mostrati solo per alcuni strati di serbatoio contenenti i contenitori di PCM, ovvero quelli più significativi. In particolare, per ciascun caso, sono mostrati i risultati ottenuti nel 1° e nell'ultimo strato, e in almeno uno degli strati intermedi. Solo per i risultati relativi all'energia accumulata/rilasciata dai moduli è riportato l'andamento in un unico strato posto in posizione centrale. Nei risultati che seguono ci si riferirà agli strati del serbatoio partendo dal fondo, ovvero il 1° strato è quello posizionato sulla superficie inferiore del serbatoio, mentre l'ultimo strato è quello posizionato più in alto.

3.1 Risultati

3.1.1 Andamento della temperatura dell'acqua nel serbatoio

Le figure 2, 3, 4, 5 e 6 mostrano l'andamento della temperatura dell'acqua contenuta nel serbatoio per tutti i casi analizzati. Come già detto, solo il caso base è stato simulato considerando un tempo di simulazione pari a 72 h, mentre gli altri casi sono stati simulati utilizzando un tempo di simulazione pari a 48 h, e in tutti i casi il time-step utilizzato è di 100s. Da tali figure si può notare che, sebbene gli andamenti di temperatura siano pressoché simili in tutti gli strati e in tutti i casi, in generale, gli strati d'acqua posti più in alto presentano valori di temperatura più elevati. Questo, ovviamente dipendente dal fatto che le zone di serbatoio poste più in alto risultano essere più calde delle zone poste in basso, è particolarmente visibile nel caso 4, in cui l'ultimo strato, il 60°, presenta un chiaro aumento della temperatura dell'acqua rispetto agli altri strati e agli altri casi.

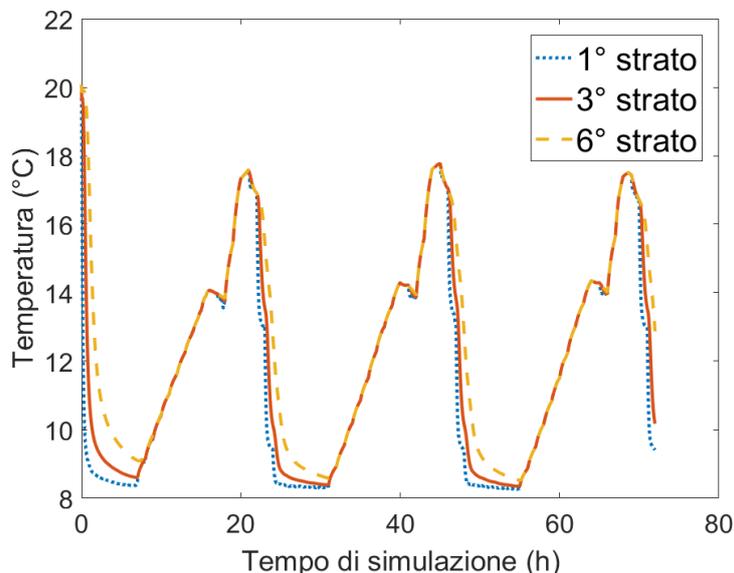


Figura 2. Temperatura dell'acqua nel serbatoio: Caso base ($V_{cont} = 1 L$).

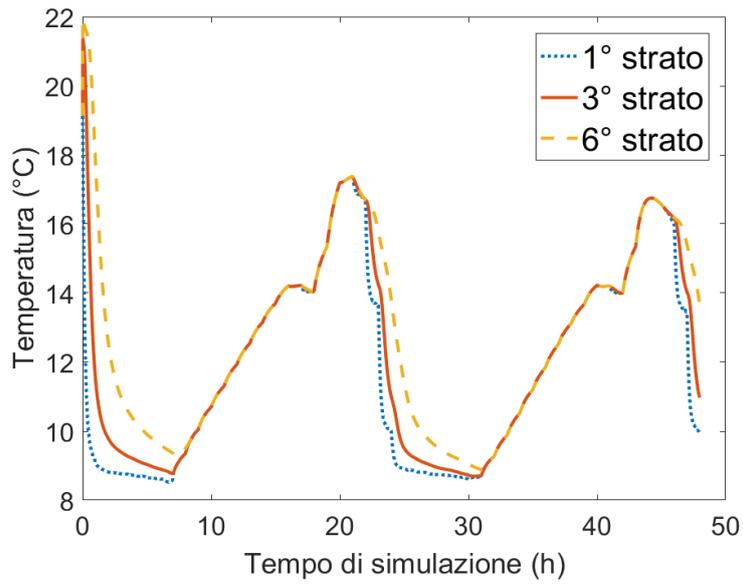


Figura 3. Temperatura dell'acqua nel serbatoio: Caso 1 ($V_{cont} = \frac{1}{2} L$).

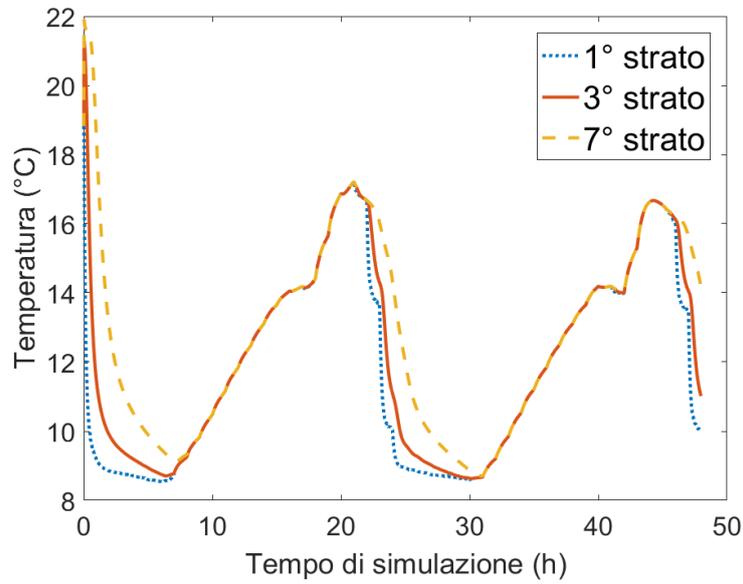


Figura 4. Temperatura dell'acqua nel serbatoio: Caso 2 ($V_{cont} = \frac{1}{4} L$).

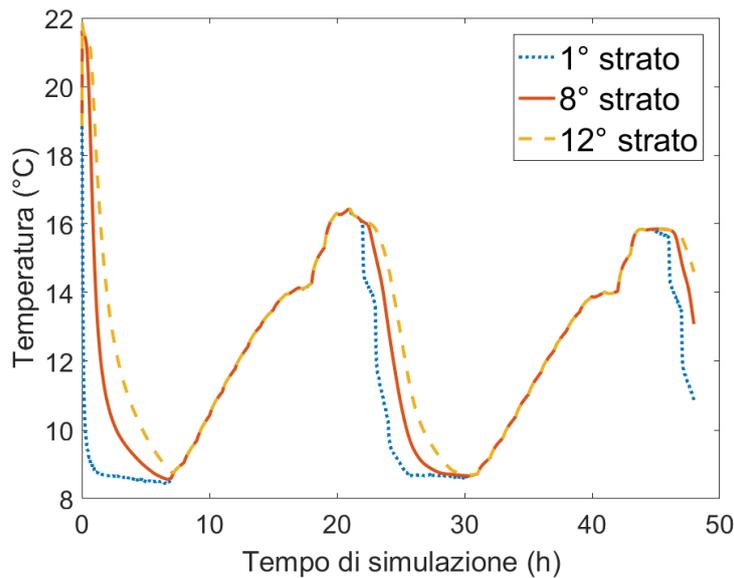


Figura 5. Temperatura dell'acqua nel serbatoio: Caso 3 ($V_{cont} = 1/10$ L).

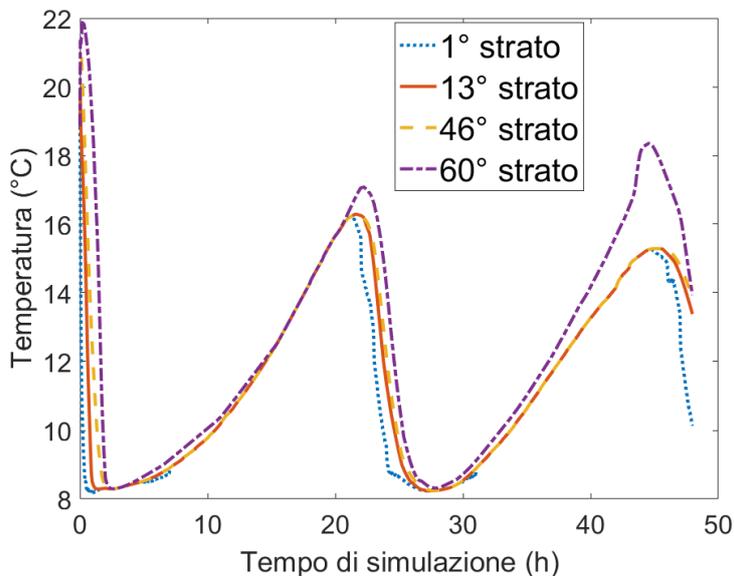


Figura 6. Temperatura dell'acqua nel serbatoio: Caso 4 ($V_{cont} = 1/636,6$ L).

3.1.2 Andamento della temperatura nel PCM e della frazione fusa

Le figure 7, 8, 9, 10 e 11 (A) e (B) presentano, rispettivamente, gli andamenti della temperatura media nel modulo di PCM e quello della frazione fusa/solida del PCM in diversi strati del serbatoio. Come già osservato per l'andamento della temperatura dell'acqua, gli andamenti sono molto simili per tutti gli strati e in tutti i casi; tuttavia, da tali figure, si può osservare che al ridursi delle dimensioni dei moduli, anche la temperatura minima dei moduli di PCM si riduce, passando da un valore minimo di circa 10°C nel caso base ad un valore minimo di circa 8°C nel caso 4. Inoltre, tale riduzione di temperatura è tanto più veloce quanto minore è la dimensione dei moduli. Come conseguenza di ciò, man mano che le dimensioni del modulo si riducono, una maggiore quantità di PCM subisce il passaggio di fase solidificando. Infatti, nel caso base, la frazione solida assume valore 0 solo intorno alla 11a ora del secondo giorno; nel caso 1, essa diventa 0 intorno alla 10a ora del secondo giorno, ma quasi 0 nel primo strato di PCM alla 10a ora del primo giorno; nel caso 2, essa diventa 0 già intorno alla 9a ora del primo giorno; nel caso 3 essa diventa 0 intorno alla 7a ora del primo giorno; infine, nel caso 4 diventa 0 intorno alla 5a ora del primo giorno.

Analogamente alla fase di solidificazione, durante lo scaricamento, ovvero durante la fusione del materiale, al ridursi delle dimensioni dei moduli, la massima temperatura raggiunta nel modulo stesso aumenta, passando da un valore massimo di circa 14°C nel caso base ad un valore massimo di circa 18°C nel caso 4. Come accadeva per la solidificazione, ciò determina che una maggior quantità di PCM riesca a fondere; infatti, in questa fase, la frazione fusa nell'ultimo strato di PCM (quello posto più in alto) assume valori pari a circa 0,4, 0,42, 0,57, 0,58 e 0,87, rispettivamente nel caso base e nei casi 1,2,3 e 4. In tutti i casi analizzati, gli strati di PCM posti più in alto nel serbatoio sono caratterizzati da temperature maggiori e, quindi, sono soggetti ad una solidificazione più lenta e ad una fusione più veloce. In generale, si evince che i moduli non risultano mai completamente carichi e/o scarichi.

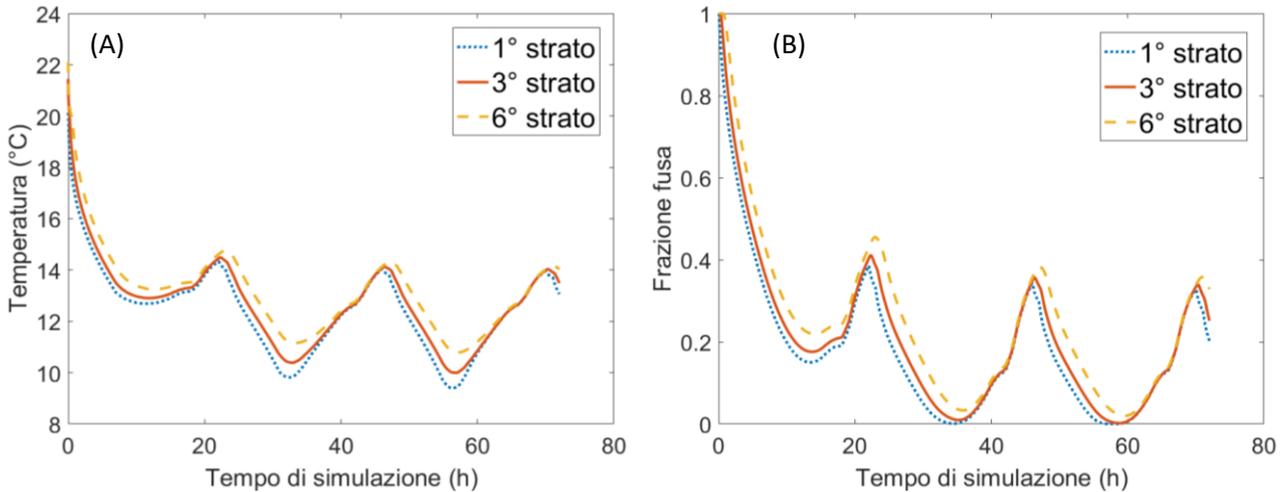


Figura 7. (A) Temperatura nel PCM, (B) Frazione fusa del PCM: Caso base.

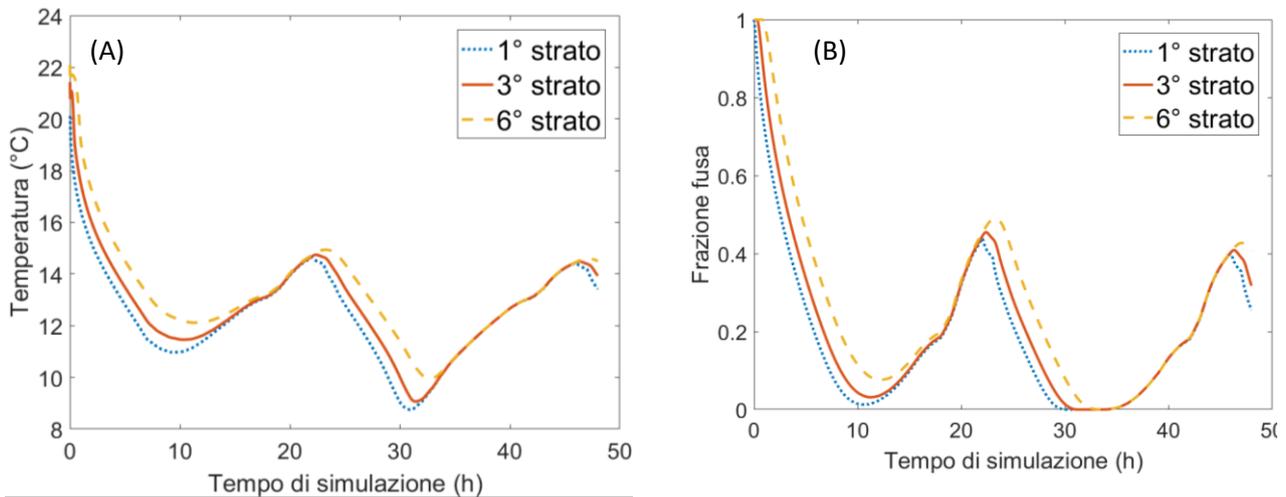


Figura 8. (A) Temperatura nel PCM, (B) Frazione fusa del PCM: Caso 1.

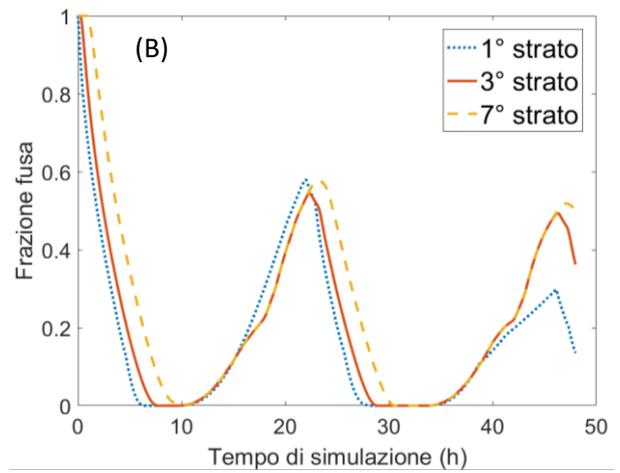
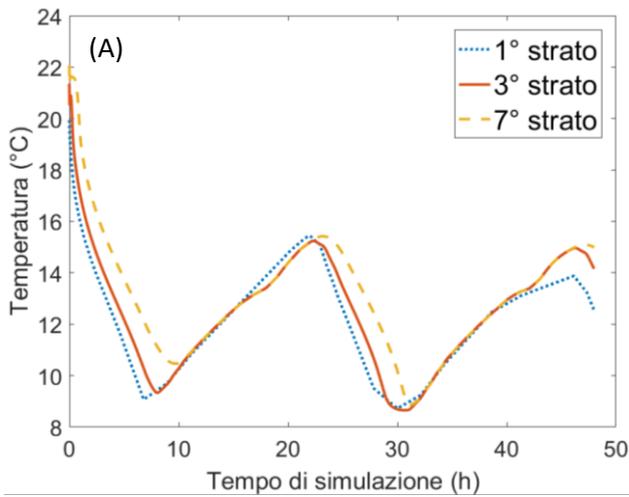


Figura 9. (A) Temperatura nel PCM, (B) Frazione fusa del PCM: Caso 2.

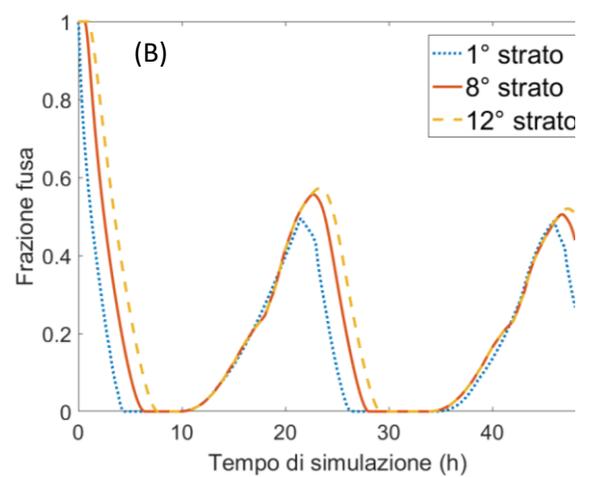
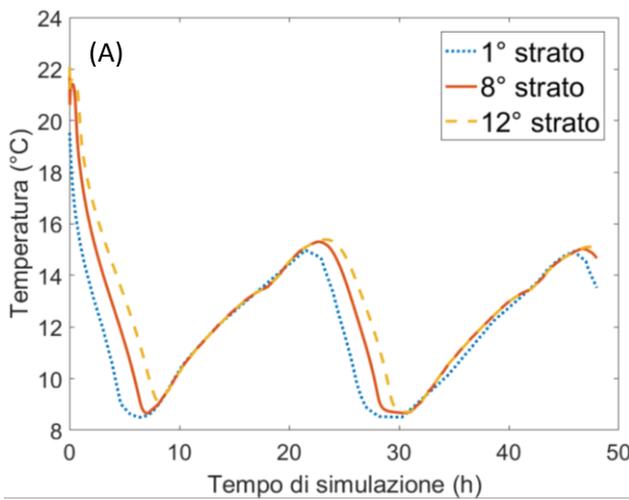


Figura 10. (A) Temperatura nel PCM, (B) Frazione fusa del PCM: Caso 3.

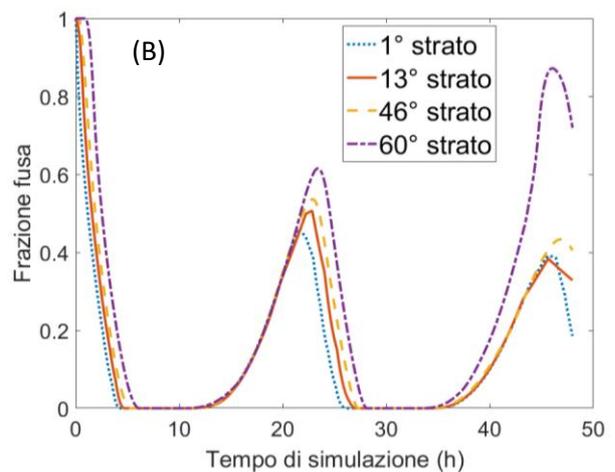
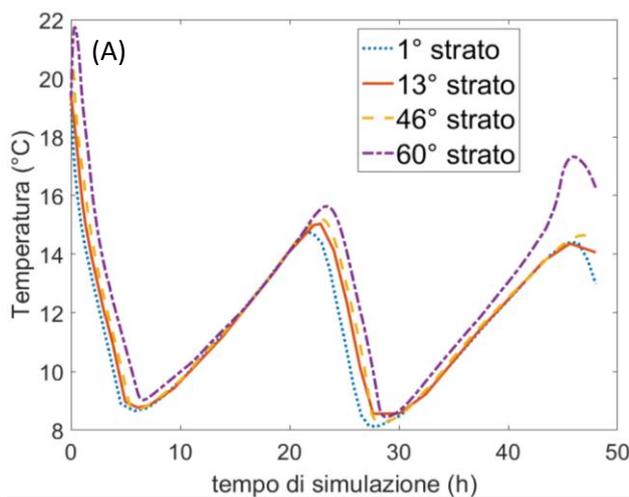


Figura 11. (A) Temperatura nel PCM, (B) Frazione fusa del PCM: Caso 4.

3.1.3 Andamento dell'energia accumulata e rilasciata dal modulo di PCM

Le figure 12, 13, 14, 15 e 16 mostrano l'andamento dell'energia accumulata e rilasciata dal singolo modulo di PCM nello strato più centrale. Tale andamento consiste nella somma dei contributi energetici in ciascun istante temporale considerato. Pertanto, il modulo di PCM risulta completamente scarico quando l'energia accumulata/rilasciata è pari a zero. Da tali figure si evince che, man mano che le dimensioni dei moduli si riducono, riducendosi la quantità di PCM utilizzato nel singolo modulo, l'energia accumulata e rilasciata dal modulo stesso si riduce. L'energia totalmente accumulata e rilasciata dai moduli a fine periodo di osservazione, per ciascun caso, ammonta rispettivamente a circa:

- Caso base:
 - 158kJ accumulati, di cui 149kJ sotto forma di calore latente e 9kJ sotto forma di calore sensibile;
 - 63kJ rilasciati.
- Caso 1:
 - 81kJ accumulati, di cui 74kJ sotto forma di calore latente e 7kJ sotto forma di calore sensibile;
 - 38kJ rilasciati.
- Caso 2:
 - 40kJ accumulati, di cui 37kJ sotto forma di calore latente e 3kJ sotto forma di calore sensibile;
 - 21kJ rilasciati.
- Caso 3:
 - 15,4kJ accumulati, di cui 14,8kJ sotto forma di calore latente e 0,6kJ sotto forma di calore sensibile;
 - 8,4kJ rilasciati.
- Caso 4:
 - 0,29kJ, di cui 0,23kJ sotto forma di calore latente e 0,06kJ sotto forma di calore sensibile;
 - 0,14kJ rilasciati.

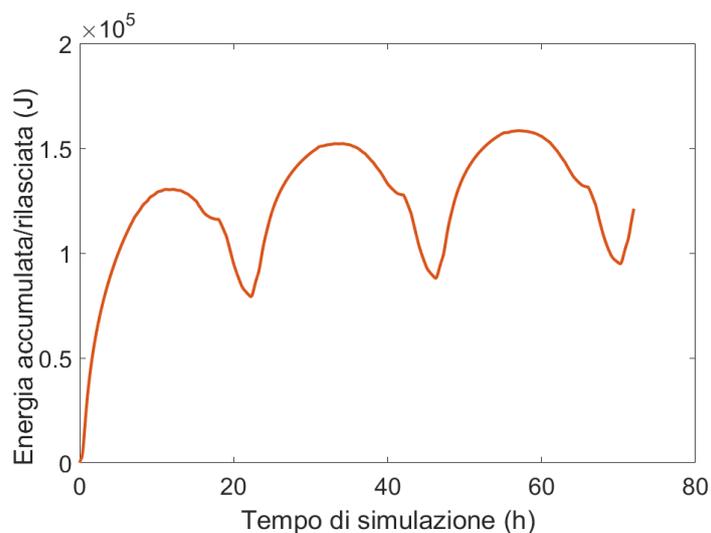


Figura 12. Energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM: Caso base.

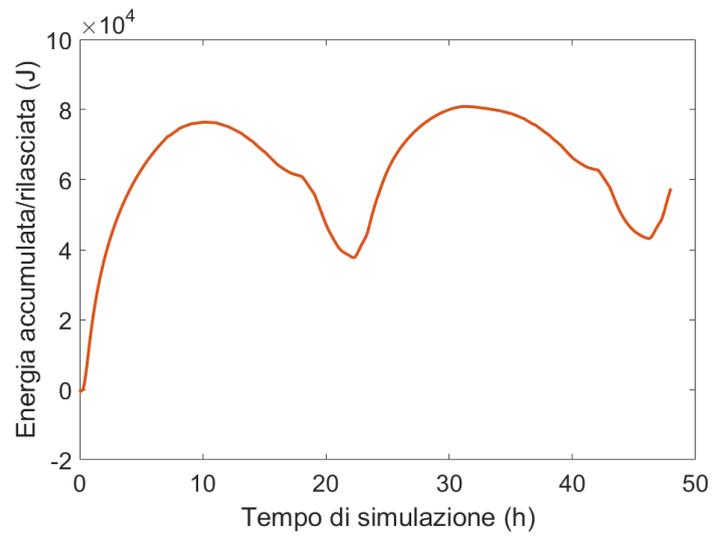


Figura 13. Energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM: Caso 1.

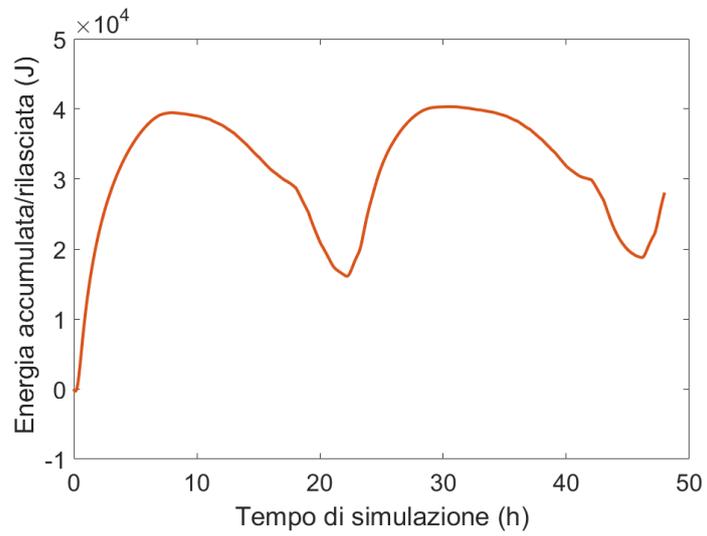


Figura 14. Energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM: Caso 2.

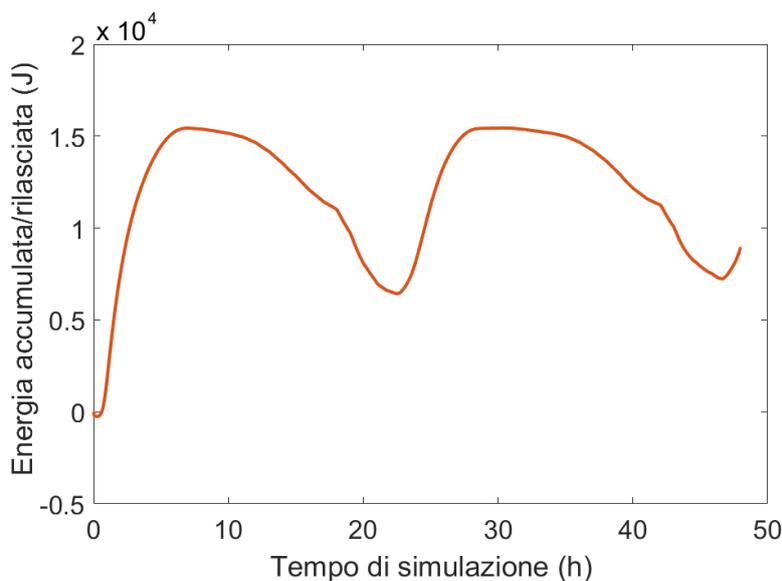


Figura 15. Energia accumulata/riuscita dal modulo di PCM: Caso 3.

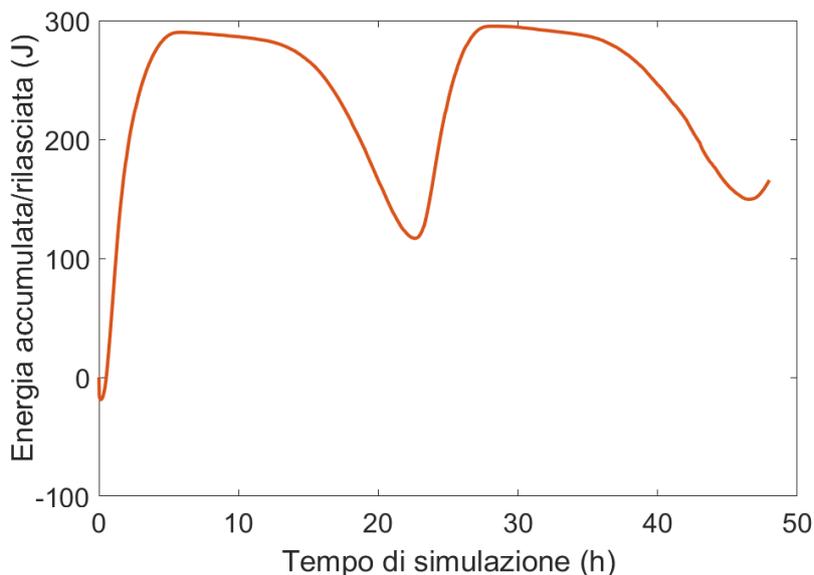


Figura 16. Energia accumulata/riuscita dal modulo di PCM: Caso 4.

Dai risultati appena visti, risulta evidente che le migliori performance energetiche siano offerte dai moduli più piccoli, riuscendo questi a caricarsi e scaricarsi maggiormente. Tuttavia, la quantità di PCM totalmente introdotta all'interno del serbatoio è la medesima in tutti i casi, inoltre l'analisi di mercato condotta da ENEA, relativamente al costo dei contenitori di PCM, ha mostrato che il prezzo dei contenitori tende ad aumentare al ridursi delle dimensioni dei contenitori stessi. Alla luce di ciò, risulta evidente che il miglior caso in termini di compromesso tra miglior performance energetica e minor costo è proprio quello base individuato sperimentalmente.

4 Attività svolte nella Fase III

L'attività del terzo periodo ha previsto un'ulteriore validazione sperimentale del modello sviluppato. Le prove sperimentali sono state svolte dal Laboratorio Prove Accumulo Termico del centro ENEA Portici relativamente al sistema di accumulo del freddo ad acqua con contenitori di PCM da 1L e hanno avuto una durata di 3 giorni. La validazione del modello è stata effettuata confrontando l'andamento dell'acqua in uscita dal serbatoio ottenuta nel caso numerico con quello ottenuto nel caso sperimentale ed è mostrato in Figura 17. Da tale figura, si evince un'ottima sovrapposizione dei risultati numerici con quelli sperimentali, ottenuta con una deviazione massima inferiore a 1°C misurata in corrispondenza dei picchi di temperatura.

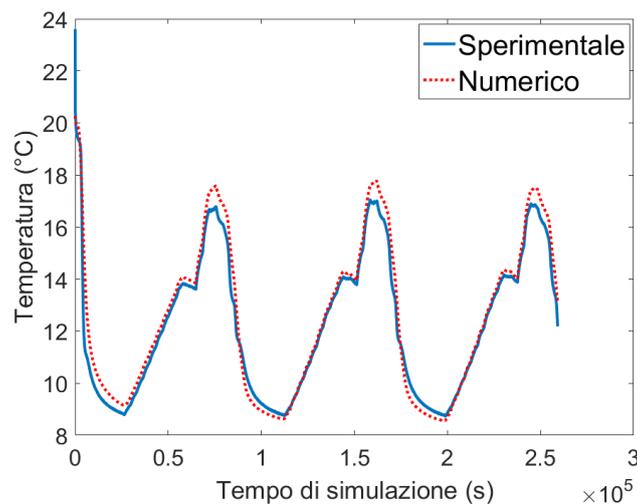


Figura 17. Confronto tra i risultati numerici e sperimentali relativamente alla simulazione del caso base.

5 Conclusioni

Nel presente documento sono descritte le attività di ricerca svolte dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II nel periodo ottobre – dicembre 2018 relativamente all'estensione del terzo anno dell'Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione: *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un sistema di accumulo del freddo basato sull'impiego di acqua e un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material) macro-incapsulato come materiali di accumulo: analisi di sensitività effettuata al variare della quantità di PCM utilizzato”* stipulato tra ENEA e DII. Tale attività ha riguardato la realizzazione di un'analisi parametrica finalizzata alla valutazione delle performance energetiche di un sistema di accumulo del freddo composto da acqua e PCM macro-incapsulato in contenitori cilindrici di alluminio, al variare del numero di contenitori di PCM. Lo scopo di tale analisi è stato quello di identificare la migliore configurazione, in termini di dimensione e numero di contenitori contenenti PCM, da utilizzare al fine di massimizzare le performance di scambio termico del sistema considerato, a servizio dell'utenza selezionata per lo specifico caso studio individuato.

Il lavoro è stato articolato in tre macrofasi, finalizzate all'aggiornamento del modello computazionale sviluppato nel corso della III annualità dell'Accordo di Programma, PAR 2017; all'analisi dei risultati mediante confronto tra tutti i casi analizzati; alla validazione sperimentale del caso base individuato.

Le attività della prima fase, riportate nel capitolo 2, hanno riguardato l'aggiornamento del modello termo-fluidodinamico sviluppato nel corso della III annualità PAR 2017 sulla base delle caratteristiche geometriche e termo-fisiche del prototipo di serbatoio di accumulo del freddo per uso residenziale realizzato da ENEA. Definito il caso base in funzione delle prove sperimentali svolte da ENEA, sono state analizzate altre quattro diverse configurazioni del sistema, in termini di dimensioni e numero dei contenitori contenenti il PCM.

Le attività della seconda fase, riportate nel capitolo 3, hanno, invece, riguardato l'analisi e il confronto dei risultati ottenuti nei diversi casi numerici. Tale attività è stata effettuata in termini di confronto tra i vari casi dell'andamento della temperatura dell'acqua nel serbatoio, della temperatura del PCM all'interno dei contenitori, dell'andamento della frazione fusa di PCM e dell'energia accumulata/rilasciata dai moduli di PCM, al fine di individuare, tra quelle analizzate, la configurazione in grado di massimizzare le performance energetiche del sistema.

L'ultima fase, descritta nel capitolo 4, riporta, infine, l'attività di validazione sperimentale del modello aggiornato relativamente al caso base individuato, mostrando un'ottima sovrapposizione tra i dati numerici e quelli sperimentali.

Curricula del gruppo di lavoro

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Nicola Bianco è Professore Associato di Fisica Tecnica Industriale (SSD ING-IND/10) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, presso la quale si è laureato in Ingegneria Meccanica, con lode. Precedentemente, presso il medesimo Ateneo ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei sistemi termo-meccanici ed ha svolto servizio come Ricercatore universitario a tempo indeterminato. E' coordinatore del corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente.

E' stato Responsabile Scientifico o componente del gruppo di lavoro nell'ambito di convenzioni di Ricerca Scientifica con l'ENEA, il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, la Regione Campania, il Ministero della Giustizia.

Relativamente alle tematiche di ricerca, negli anni scorsi ed attualmente è coinvolto in studi di Trasmissione del Calore (convezione naturale e mista in canali e cavità, conduzione termica in solidi con variabile generazione interna), Energia Solare (progettazione termo-energetica di sistemi solari), Termo-fisica dell'involucro edilizio (sistemi solari passivi e soluzioni di architettura bioclimatica). Svolge la funzione di revisore per riviste internazionali e conferenze internazionali. E' autore di oltre 180 pubblicazioni, pubblicate presso sedi editoriali internazionali e nazionali.

GRUPPO DI LAVORO

Assunta Andreozzi è Professore Associato di Fisica Tecnica Ambientale (SSD ING-IND/11) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. Si è laureata in Ingegneria Aerospaziale con voto 110/110 e lode presso la Seconda Università degli Studi di Napoli, presso cui ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in "Scienze e Tecnologie Aerospaziali" e le è stato conferito un assegno per la collaborazione ad attività di ricerca, cofinanziato dal Fondo Sociale Europeo per la Regione Campania sul P.O. "Ricerca, Sviluppo Tecnologico ed Alta Formazione 1994/99" e inquadrato nel progetto di ricerca dal titolo: "Metodologie di ottimizzazione strutturale basato su tecniche avanzate, orientate ad un uso razionale dell'energia" – settore disciplinare I02B.

Ha svolto servizio come Ricercatore universitario a tempo indeterminato presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II dal 2002 al 2011.

Svolge attività di ricerca in Trasmissione del calore, in particolare nella convezione naturale e mista in canali e cavità, scambio termico in mezzi porosi, termofluidodinamica dell'incendio e bio heat transfer. È autore di circa 100 lavori scientifici la maggior parte dei quali pubblicati su riviste internazionali o su atti di congressi internazionali. È stato ed è inserito in progetti di ricerca nazionali finanziati dal Ministero dell'Università e convenzioni di ricerca con enti pubblici e privati.

È stato responsabile scientifico del progetto di Ricerca: "Analisi e progetto termofluidodinamico dei processi di lavorazione continui dei materiali" finanziato dalla Regione Campania.

Fabrizio Ascione è Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale, in servizio presso il Dipartimento di ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico. Ha conseguito, con lode e dignità di stampa, la laurea in Architettura presso la Facoltà di Architettura dello stesso ateneo. Nel Dicembre del 2009 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. Da Marzo 2010 a Giugno 2012 è stato Assegnista di Ricerca presso l'Università degli Studi del Sannio in Benevento. Ad oggi, svolge attività di ricerca nell'ambito della Tecnica del Controllo Ambientale, con particolare riferimento alle tematiche del "passive and low-energy heating and cooling" per il settore civile.

E' docente in supplenza di insegnamenti afferenti al SSD ING-IND/11. Svolge la funzione di revisore per riviste internazionali. E' autore di circa 80 pubblicazioni, pubblicate presso sedi editoriali internazionali e nazionali.

Marcello Iasiello è Ricercatore di Fisica Tecnica Industriale (ING-IND/10) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II dal mese di dicembre del 2017. Si è laureato in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente con lode presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II nel mese di dicembre del 2012. Ha

conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici presso la stessa università nel mese di maggio del 2016. Svolge attività di ricerca su tematiche come l'analisi dei fenomeni di trasporto in mezzi porosi con approcci analitici, numerici e sperimentali, con particolare riferimento alle schiume a celle aperte ed ai sistemi biologici. Egli si occupa anche di studi su sistemi di accumulo termico con materiali a cambiamento di fase attraverso approcci numerici. E' co-autore di circa 20 pubblicazioni su riviste internazionali. E' titolare del corso di Heat Transfer per il corso di laurea magistrale in Mathematical Engineering presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Martina Caliano è titolare di un Assegno di Ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, i cui campi di ricerca riguardano: l'analisi CFD e analisi sperimentali di sistemi di accumulo termico; lo scambio termico in sistemi di accumulo termico a calore sensibile e a calore latente; lo scambio termico in sistemi combinati PCM-mezzi porosi. Presso la medesima Università, nel Giugno 2017, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Industriale, e precedentemente, nel Luglio 2013, ha conseguito con lode, la laurea in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente. Da Novembre 2013 a Ottobre 2014 è stata Assegnista di ricerca presso l'Università della Calabria, nell'ambito dell'AR – "CONDIZIONAMENTO INNOVATIVO, MATERIALI DI INVOLUCRO ED USO DEI PCM" del progetto nazionale RES NOVAE. Collabora con il centro ricerche ENEA di Portici dal 2012, nell'ambito delle tematiche di ricerca relative ai sistemi di accumulo dell'energia termica (a calore sensibile e con materiali a cambiamento di fase), a sistemi per l'efficientamento di infrastrutture energetiche e all'ottimizzazione di sistemi di poligenerazione distribuita.