



## Ricerca di Sistema elettrico

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

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

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

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

(Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II)

Settembre 2018

## Rapporto Ricerca di Sistema Elettrico

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: D.1 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 *“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”*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Giorgio Graditi

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

## Indice

SOMMARIO.....	4
NOMENCLATURA.....	6
1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	7
2 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE I.....	9
2.1 MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO DEL FREDDO AD ACQUA CON SCAMBIATORE DI CALORE.....	9
2.1.1 <i>Modello per lo scambiatore a serpentina</i> .....	10
2.1.1.1 Input e Output del modello.....	11
2.1.2 <i>Modello per il serbatoio</i> .....	12
2.1.2.1 Input e Output del modello.....	12
2.1.3 <i>Accoppiamento tra i modelli</i> .....	12
2.2 MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO DEL FREDDO AD ACQUA SPROVVISTO DI SERPENTINO.....	12
2.2.1 <i>Input e Output del modello</i> .....	14
3 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE II.....	15
3.1 AGGIORNAMENTO CODICE MATLAB.....	15
3.2 AGGIORNAMENTO CODICE COMSOL.....	16
3.3 ACCOPPIAMENTO DEI MODELLI.....	17
3.4 RISULTATI.....	18
4 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE III.....	28
4.1 VALIDAZIONE DEI MODELLI.....	28
4.1.1 <i>Serbatoio ad acqua con scambiatore di calore immerso</i> .....	28
4.1.2 <i>Serbatoio ad acqua con scambiatore di calore immerso</i> .....	33
4.1.3 <i>Serbatoio ad acqua e PCM</i> .....	35
5 CONCLUSIONI.....	36
CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	38

## Sommario

Nel presente rapporto tecnico sono descritte le attività di ricerca svolte durante il 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”* stipulato tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Tali attività hanno riguardato la realizzazione di un modello dinamico per la simulazione del comportamento termo-fluidodinamico di un sistema di accumulo del freddo ad acqua contenente al suo interno un PCM macro-incapsulato all'interno di moduli cilindrici di alluminio.

Tale attività ha richiesto lo sviluppo di tre modelli dinamici differenti, ciascuno necessario alla simulazione dinamica di un determinato sistema di accumulo del freddo; ovvero: un serbatoio ad acqua con scambiatore di calore immerso, un serbatoio ad acqua sprovvisto di scambiatore interno ed, infine, il modello, oggetto dell'accordo, di serbatoio ad acqua con PCM macro-incapsulato. Nel dettaglio, i primi due modelli sono stati sviluppati in ambiente Matlab. Poi, il modello di serbatoio ad acqua senza serpentino interno è stato accoppiato con il codice COMSOL per la simulazione dei moduli cilindrici contenenti PCM, al fine di simulare lo scambio termico tra l'acqua contenuta nel serbatoio ed i moduli stessi.

Il codice COMSOL cui si fa riferimento, è quello relativo alla simulazione termo-fluidodinamica di un materiale a cambiamento di fase impiegato per l'accumulo del freddo, macro-incapsulato all'interno di un contenitore cilindrico di alluminio soggetto a flussi termici entranti e uscenti attraverso la sua superficie esterna, sviluppato dal DII dell'Università degli Studi di Napoli Federico II nel corso della precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, nell'ambito dell'Accordo di Programma *“Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo”*, riportato nel relativo report tecnico elaborato dal medesimo Dipartimento.

Al fine di poter effettuare l'accoppiamento tra i suddetti modelli, è stato necessario, inoltre, procedere con l'aggiornamento del codice Matlab relativo al caso di sistema di accumulo del freddo ad acqua sprovvisto di scambiatore interno e del codice COMSOL sviluppato durante la precedente annualità, in modo da poter permettere la comunicazione dell'interfaccia Matlab-COMSOL utilizzata per la simulazione del modello completo.

Tutti gli applicativi di sistema di accumulo del freddo analizzati sono stati realizzati in conformità ai sistemi di accumulo del freddo in dotazione del Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici. I dati di input necessari all'implementazione dei casi sono stati, infatti, forniti dal suddetto Laboratorio ENEA in base alle prove sperimentali svolte. Nel dettaglio, le prove sperimentali relative al sistema di accumulo del freddo ad acqua senza scambiatore di calore e quelle relative al sistema di accumulo del freddo ad acqua e PCM sono riportate nel report *“Analisi sperimentale di sistemi di accumulo del freddo innovativi per applicazioni residenziali”* elaborato da ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

In tutti i casi, il principale parametro analizzato è stato il campo di temperatura dell'acqua all'interno dei serbatoi. Nel caso del primo sistema, ovvero quello dotato di scambiatore interno, è stata valutata anche la temperatura del fluido termo-vettore circolante all'interno dello scambiatore stesso; nel caso di sistema con PCM, sono stati valutati, inoltre, la frazione solida/liquida e la variazione di temperatura del PCM durante tutto il ciclo. Inoltre, in tutti i casi, è stato valutato e discusso il tempo di caricamento e scaricamento del sistema.

Infine, il lavoro ha previsto la validazione sperimentale di tutti i modelli sviluppati, mediante il confronto tra i risultati numerici ottenuti e i dati sperimentali forniti da ENEA. A tale scopo, sono state analizzate diverse soluzioni, sia per quanto riguarda la correlazione relativa alle condizioni al contorno, che per i coefficienti semi-empirici all'interno delle equazioni del bilancio, al fine di ottenere la migliore sovrapposizione possibile tra i risultati numerici e i dati sperimentali.

## Nomenclatura

$A$	superficie (m <sup>2</sup> )
$C$	costante utilizzata nell'equazione (14)
$c_p$	calore specifico a pressione costante (kJ/kg/K)
$D$	diametro (m)
$E$	energia termica (Wh)
$g$	accelerazione di gravità (m/s <sup>2</sup> )
$h$	conduttanza convettiva (W/m <sup>2</sup> /K)
$k$	conducibilità termica (W/m/K)
$L$	lunghezza caratteristica (m)
$p$	pressione (Pa)
$Q$	potenza termica (W)
$R$	resistenza (K/W)
$T$	temperatura (°C)
$t$	tempo (s)
$v$	velocità (m/s)
$V$	volume (m <sup>3</sup> )

### Simboli greci

$\mu$	viscosità dinamica (Pa s)
$\beta$	coefficiente di espansione termica (K <sup>-1</sup> )
$\delta$	costante utilizzata nell'equazione (14)
$\Delta$	intervallo
$\rho$	densità (kg/m <sup>3</sup> )
$\varphi$	frazione liquida/solida

### Simboli

$\nabla$	operatore differenziale
----------	-------------------------

### Pedici e Apici

<i>amb</i>	ambiente
<i>cond</i>	conduzione
<i>conv</i>	convezione
<i>HEX</i>	riferito allo scambiatore di calore
<i>HTF</i>	fluido termovettore
<i>in</i>	sezione di ingresso
<i>M</i>	fusione
<i>out</i>	sezione di uscita
<i>PCM</i>	materiale a cambiamento di fase
<i>tank</i>	serbatoio
<i>w</i>	acqua

### Abbreviazioni

PCM	Phase Change Material – Materiale a Cambiamento di Fase
HTF	Heat Transfer Fluid – Fluido Termovettore

## 1 Descrizione delle attività svolte

Di seguito sono descritte nel dettaglio le attività svolte nella terza annualità dell'Accordo di Programma. Il lavoro di questo periodo è stato articolato in tre macrofasi, finalizzate: (i) allo sviluppo dei due modelli computazionali relativi al caso di sistema di accumulo del freddo contenenti solo acqua (caso di serbatoio con scambiatore di calore immerso e caso di serbatoio senza scambiatore); (ii) all'accoppiamento del modello di serbatoio di accumulo del freddo ad acqua senza scambiatore, con il modello, sviluppato nella precedente annualità, relativo alla simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico contenente un PCM per l'accumulo del freddo; (iii) alla validazione sperimentale di tutti i modelli sviluppati.

- I. Le attività del primo periodo hanno riguardato lo sviluppo dei modelli di simulazione relativi ai sistemi di accumulo del freddo contenenti solo acqua. Nel dettaglio, sono stati sviluppati due modelli, uno relativo al caso di serbatoio di accumulo dotato di uno scambiatore di calore immerso, per la circolazione di un fluido termovettore, l'altro relativo al caso di sistema di accumulo sprovvisto di scambiatore; ciascuno necessario alla simulazione termo-fluidodinamica dei serbatoi di accumulo del freddo ad acqua in dotazione del Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici. In entrambi i casi, è stato sviluppato un modello monodimensionale, al fine di effettuare la simulazione dinamica del serbatoio, ed effettuare, quindi, la simulazione numerica non stazionaria del campo di temperature dell'acqua all'interno del serbatoio stesso. Nel caso di sistema di accumulo dotato di scambiatore interno, è stato, inoltre, sviluppato un modello monodimensionale per la simulazione dinamica dello scambiatore di calore immerso, al fine di effettuare la simulazione numerica non stazionaria del fluido termovettore circolante nello scambiatore di calore. In entrambi i casi, sono state ricercate e vagliate le correlazioni semi-empiriche più idonee per il calcolo dei flussi termici attraverso le pareti interne ed esterne del serbatoio (lato acqua e lato aria), e nel caso di sistema dotato di scambiatore, anche delle correlazioni per il calcolo del flusso termico attraverso le pareti interne ed esterne dello scambiatore (lato fluido termovettore e lato acqua). I dati geometrici, le condizioni iniziali e le condizioni al contorno sono stati settati, per ciascun applicativo, in base ai dati sperimentali forniti da ENEA, e i due modelli proposti sono stati sviluppati in ambiente Matlab. Le attività della fase I sono state, quindi, così suddivise:
  - a. sviluppo del modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica del serbatoio di accumulo del freddo con scambiatore di calore immerso;
  - b. sviluppo del modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica del serbatoio di accumulo del freddo non dotato di scambiatore di calore interno.
- II. L'attività del secondo periodo ha riguardato l'accoppiamento del modello dinamico per la simulazione del serbatoio ad acqua per l'accumulo del freddo sprovvisto di serpentina con il modello sviluppato, in ambiente COMSOL Multiphysics, durante la precedente annualità nell'ambito dell'Accordo di programma *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico per l'accumulo del freddo, contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material), con e senza la presenza di una schiuma metallica immersa nel PCM atta a favorire la trasmissione del calore”* stipulato tra ENEA e DII, relativo alla modellazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico contenente un PCM per l'accumulo del freddo. Tale accoppiamento ha previsto una fase di aggiornamento del codice Matlab

sviluppato nel corso della Fase I, al fine di poter permettere la comunicazione tra i codici di calcolo utilizzati e l'inserimento, quindi, del modulo di accumulo a PCM all'interno del serbatoio; inoltre, è stato necessario effettuare un aggiornamento del codice COMSOL sviluppato durante la scorsa annualità. Anche in questo caso, il modello risultante e l'applicativo sono stati sviluppati in base ai dati geometrici, le condizioni iniziali e le condizioni al contorno fornite dal Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici in seguito alla esecuzione delle prove sperimentali. Le attività della Fase II sono state, quindi, così suddivise:

- a. aggiornamento del codice sviluppato nella Fase I relativo al caso di sistema di accumulo del freddo ad acqua sprovvisto di serpentina, per l'inserimento del modulo a PCM;
  - b. aggiornamento del modello COMSOL sviluppato durante la precedente annualità;
  - c. accoppiamento dei modelli;
- III. L'attività del terzo periodo ha riguardato la validazione sperimentale di tutti i modelli sviluppati nelle fasi precedenti, mediante il confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali forniti da ENEA.

## 2 Attività svolte nella Fase I

Di seguito è descritta l'attività di modellazione svolta nel primo periodo della corrente annualità. Nel dettaglio, è prima riportato il modello sviluppato per la simulazione termo-fluidodinamica del serbatoio di accumulo del freddo ad acqua dotato di serpentina interna, successivamente è riportato il modello sviluppato per la simulazione del sistema di accumulo del freddo ad acqua sprovvisto di serpentina. L'attività di seguito presentata è stata realizzata sulla base delle caratteristiche geometriche e termo-fisiche dei prototipi di serbatoio di accumulo del freddo ad acqua per uso residenziale realizzati dal Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici. In entrambi i casi, i modelli proposti sono stati sviluppati in ambiente Matlab, la durata delle simulazioni è stata impostata a 24h, e il passo temporale usato è stato di 100 s.

### *2.1 Modellazione del sistema di accumulo del freddo ad acqua con scambiatore di calore*

Di seguito, è riportato il modello sviluppato per la modellazione del sistema di accumulo del freddo ad acqua dotato di scambiatore di calore immerso.

La modellazione è stata effettuata considerando il serbatoio mostrato in Figura 1. Esso consiste in un serbatoio di 300 litri in acciaio inox, caratterizzato dalla presenza di uno scambiatore di calore a serpentina immerso nel serbatoio stesso, con superficie di scambio pari a  $4 \text{ m}^2$ . Al fine di valutare il campo di temperatura dell'acqua contenuta nel serbatoio, del fluido termovettore circolante nella serpentina e dei vari componenti del serbatoio, sono stati sviluppati due differenti modelli monodimensionali, di seguito riportati.

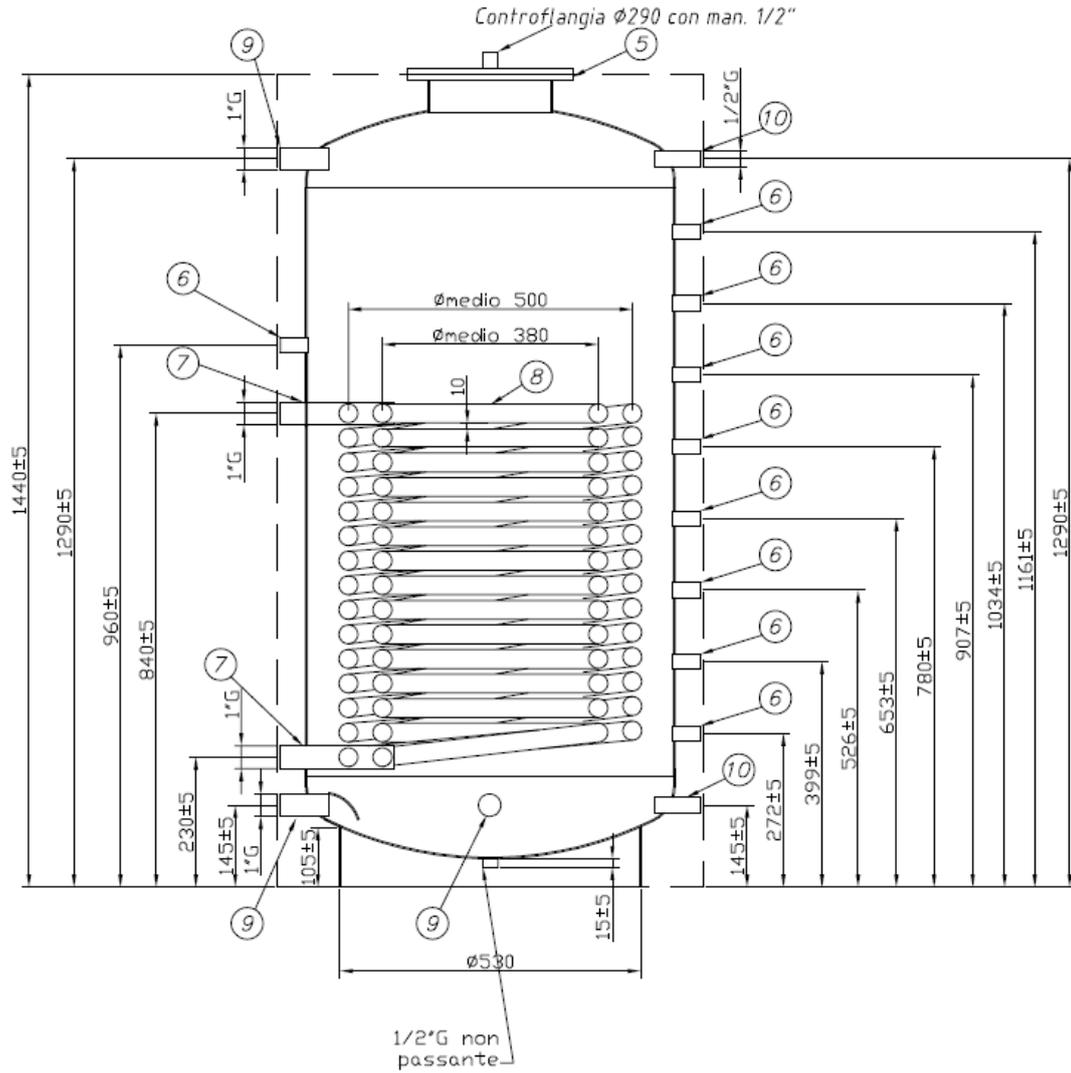


Figura 1. Serbatoio di accumulo con scambiatore immerso.

### 2.1.1 Modello per lo scambiatore a serpentina

La discretizzazione spaziale dello scambiatore di calore è strettamente connessa a quella del serbatoio. Infatti, noto il volume del serbatoio e quindi il numero di nodi di cui è composto, il serpentino è stato suddiviso a sua volta in un dato numero di nodi ciascuno dei quali interseca un solo nodo del serbatoio. Per ciascun nodo del serpentino, quindi, è stata scritta la seguente equazione di bilancio in regime transitorio:

$$\rho_{HTF} c_{HTF} V_{HTF} \frac{dT_{HTF}}{dt} = \frac{T_{w,tank} - T_{HTF}}{R_{hex}} + \rho_{HTF} c_{HTF} \dot{V}_{HTF} (T_{HTF}^{in} - T_{HTF}^{out}) \quad (1)$$

In cui  $\rho_{HTF}$  e  $c_{HTF}$  sono rispettivamente la densità ed il calore specifico del fluido termovettore,  $V_{HTF}$  è il volume,  $T_{HTF}$  è la temperatura,  $T_{w,tank}$  è la temperatura dell'acqua nel corrispondente nodo del serbatoio,  $\dot{V}_{HTF}$  è la portata volumetrica,  $T_{HTF}^{in}$  e  $T_{HTF}^{out}$  sono rispettivamente la temperatura del fluido termovettore in ingresso e in uscita dal nodo, e  $R_{hex}$  è la resistenza termica totale tra il fluido termovettore nello scambiatore e l'acqua nel corrispondente nodo del serbatoio. Quest'ultima è stata calcolata come segue:

$$R_{HEX} = R_{HEX,conv}^i + R_{HEX,conv}^e + R_{HEX,cond} \quad (2)$$

La resistenza termica convettiva interna  $R_{HEX,conv}^i$  è stata calcolata come segue:

$$R_{HEX,conv}^i = 1 / (A_{HEX}^i \bar{h}_{HEX}^i) \quad (3)$$

$$\bar{h}_{HEX}^i = (\overline{Nu}_{HEX}^i k_{HTF}) / D_{HEX}^i \quad (4)$$

In cui  $A_{HEX}^i$  è l'area della superficie interna, e  $\bar{h}_{HEX}^i$  è la conduttanza convettiva interna, dipendente dalla conducibilità termica del fluido  $k_{HTF}$ , dal diametro interno  $D_{HEX}^i$ , e dal numero di Nusselt medio  $\overline{Nu}_{HEX}^i$ , valutato con la correlazione di Gnielinsky.

La resistenza termica convettiva esterna  $R_{HEX,conv}^e$  è stata calcolata come segue:

$$R_{HEX,conv}^e = 1 / (A_{HEX}^e \bar{h}_{HEX}^e) \quad (5)$$

$$\bar{h}_{HEX}^e = (\overline{Nu}_{HEX}^e k_{w,tank}) / L_{HEX} \quad (6)$$

In cui è  $A_{HEX}^e$  l'area della superficie esterna, e  $\bar{h}_{HEX}^e$  è la conduttanza convettiva esterna, dipendente dalla conducibilità termica dell'acqua  $k_{w,tank}$  nel corrispondente nodo del serbatoio, dalla lunghezza del serpentino  $L_{HEX}$ , e dal numero di Nusselt medio  $\overline{Nu}_{HEX}^e$ , valutato mediante differenti correlazioni, ovvero la correlazione di Morgan e di Churchill e Chu per la convezione naturale in tubi orizzontali, la correlazione di Ali per i tubi elicoidali:

$$\overline{Nu}_{HEX}^e = 0.106 \overline{Ra}_L^{-0.335} \quad (7)$$

e quella di Prabhanjan et al.:

$$\overline{Nu}_{HEX}^e = 0.009759 \overline{Ra}_L^{-0.3972} \quad (8)$$

L'equazione (1) è stata risolta con il metodo di Eulero, per ciascun istante temporale e per ciascun nodo.

### 2.1.1.1 Input e Output del modello

Gli input del modello sono stati:

- campo di temperatura nel fluido termovettore alla sezione di ingresso del serpentino in ogni istante temporale, fissata in base ai dati sperimentali forniti da ENEA;
- portata del fluido termovettore alla sezione di ingresso del serpentino in ogni istante temporale, fissata in base ai dati sperimentali forniti da ENEA;
- distribuzione di temperatura dell'acqua nel serbatoio calcolata all'istante precedente.

L'output del modello è stata la temperatura del fluido termovettore alla sezione di uscita e in ciascun istante temporale.

### 2.1.2 Modello per il serbatoio

L'acqua all'interno del serbatoio è stata considerata suddivisa in strati isotermi di egual volume. Per ciascuno di tali nodi è stata scritta la seguente equazione di bilancio in regime transitorio:

$$\rho_w c_w V_w \frac{dT_w}{dt} = \frac{\bar{T}_{HTF} - T_w}{R_{HEX}^*} + \dot{Q}_{cond} - \frac{T_w - T_{amb}}{R_{tank}} \quad (9)$$

In cui  $\rho_w$  e  $c_w$  sono rispettivamente la densità e il calore specifico dell'acqua,  $V_w$  è il volume,  $T_w$  la temperatura dell'acqua,  $\dot{Q}_{cond}$  è il calore trasmesso per conduzione con il nodo adiacente,  $T_{amb}$  è la temperatura ambiente, e  $R_{tank}$  è la resistenza termica totale relativa alle pareti del serbatoio. Per quanto concerne i parametri  $\bar{T}_{HTF}$  e  $R_{HEX}^*$ : per ciascun nodo del serbatoio,  $\bar{T}_{HTF}$  è stata valutata come la media pesata delle temperature dei nodi relativi alle sezioni di serpentino intersecate dallo strato di serbatoio considerato, utilizzando come pesi i corrispondenti valori di  $R_{HEX}$  calcolati mediante l'equazione (2);  $R_{HEX}^*$  è stata calcolata come la somma dei valori di  $R_{HEX}$  relativi alle sezioni di serpentino intersecate dallo strato di serbatoio considerato.

L'equazione (9) è stata risolta con il metodo di Eulero, per ciascun istante temporale e per ciascun nodo. È stato, inoltre, implementato il *reversion-elimination algorithm* per tener conto degli effetti dovuti alla convezione naturale che si instaura nel serbatoio tra i diversi strati d'acqua a differente altezza.

#### 2.1.2.1 Input e Output del modello

Il principale input del modello consiste nei valori aggiornati della distribuzione di temperatura nel fluido termovettore. L'output del modello è stata la temperatura dell'acqua in ciascun nodo e in ciascun istante temporale.

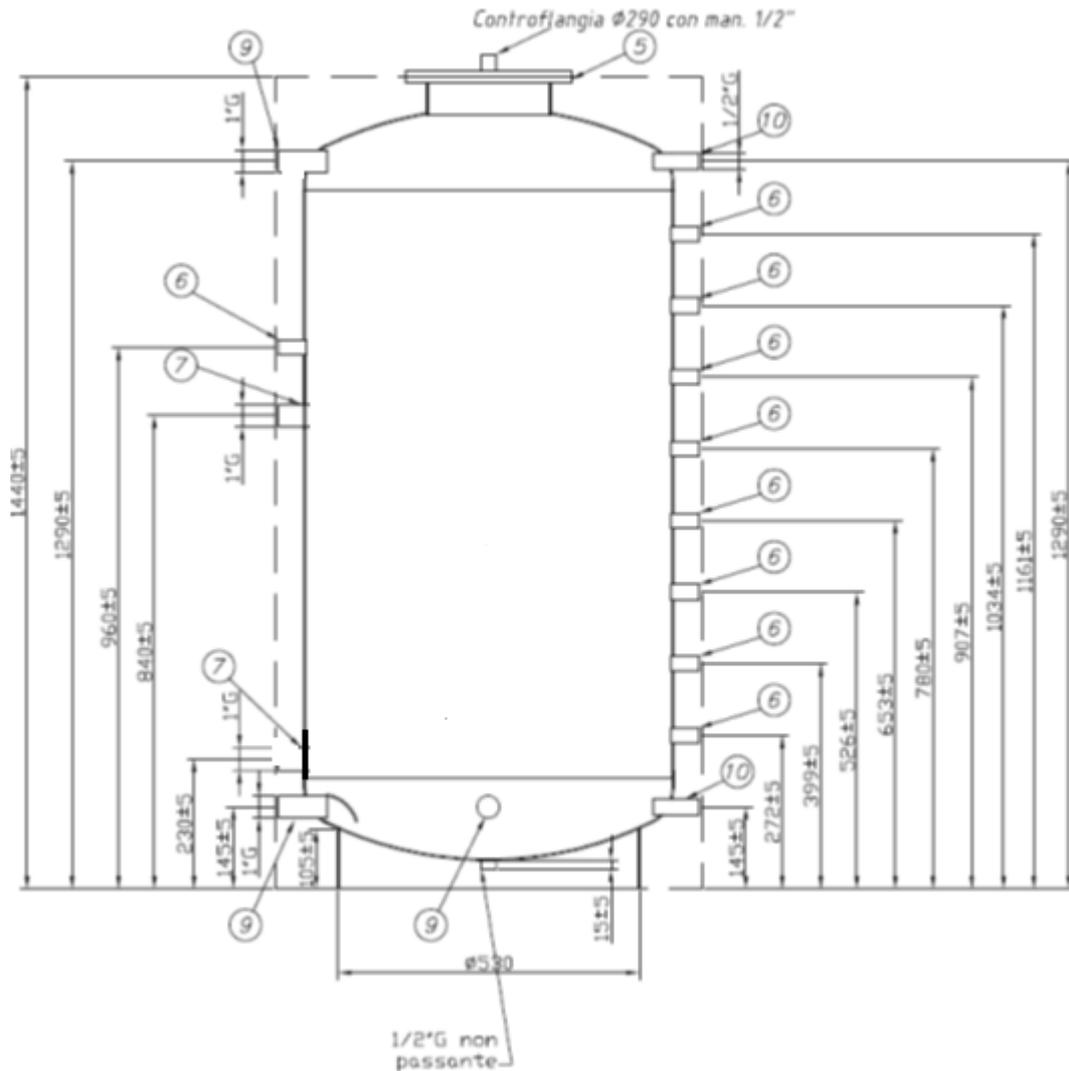
### 2.1.3 Accoppiamento tra i modelli

I modelli sopra descritti sono stati sviluppati in ambiente Matlab, e i diversi componenti del sistema sono stati accoppiati mediante un approccio iterativo. Nel dettaglio, in ogni istante temporale, lo scambiatore di calore è stato simulato utilizzando i valori della temperatura e della portata del fluido termovettore in ingresso al serpentino misurati in fase sperimentale da ENEA, mentre la distribuzione di temperatura dell'acqua nel serbatoio è quella valutata all'istante precedente. Successivamente, l'acqua nel serbatoio è stata simulata utilizzando i valori aggiornati della distribuzione di temperatura nel fluido termovettore. Il processo iterativo, quindi, riprende dalla simulazione del serpentino utilizzando i valori aggiornati della distribuzione di temperatura nell'acqua e procede fino a convergenza.

## 2.2 Modellazione del sistema di accumulo del freddo ad acqua sprovvisto di serpentino

Di seguito, è riportato il modello sviluppato per la modellazione del sistema di accumulo del freddo ad acqua sprovvisto di scambiatore di calore a serpentina. Al fine di valutare il campo di temperatura dell'acqua contenuta nel serbatoio, e dei vari componenti del serbatoio stesso, è stato sviluppato un modello monodimensionale. Tale modello risulta molto simile a quello sviluppato precedentemente per il caso di serbatoio con scambiatore di calore immerso, ma ovviamente, in questo caso, è stato omesso il termine relativo allo scambio termico con lo scambiatore.

La modellazione è stata effettuata considerando il serbatoio mostrato in Figura 2. Come nel caso precedente, esso consiste in un serbatoio di 300 litri in acciaio inox, tuttavia privato dello scambiatore di calore.



**Figura 2. Serbatoio di accumulo senza scambiatore immerso.**

L'acqua all'interno del serbatoio è stata considerata suddivisa in strati isotermi di egual volume. Per ciascuno di tali nodi è stata scritta la seguente equazione di bilancio in regime transitorio:

$$\rho_w c_w V_w \frac{dT_w}{dt} = \dot{Q}_{cond} - \frac{T_w - T_{amb}}{R_{tank}} \quad (10)$$

In cui  $\rho_w$  e  $c_w$  sono rispettivamente la densità e il calore specifico dell'acqua,  $V_w$  è il volume,  $T_w$  la temperatura dell'acqua,  $\dot{Q}_{cond}$  è il calore trasmesso per conduzione con il nodo adiacente,  $T_{amb}$  è la temperatura ambiente, e  $R_{tank}$  è la resistenza termica totale relativa alle pareti del serbatoio.

Anche in questo caso l'equazione (10) è stata risolta con il metodo di Eulero, per ciascun istante temporale e per ciascun nodo, ed è stato implementato il *reversion-elimination algorithm* per tener conto degli effetti dovuti alla convezione naturale che si instaura nel serbatoio tra i diversi strati d'acqua a differente altezza.

### 2.2.1 Input e Output del modello

Il principale input del modello è stato la temperatura dell'acqua in ingresso al serbatoio in ogni istante temporale, fissato in base ai dati sperimentali forniti da ENEA. L' output del modello è stata la temperatura dell'acqua in ciascun nodo e in ciascun istante temporale.

### 3 Attività svolte nella Fase II

Di seguito è descritta l'attività di modellazione svolta nel secondo periodo della corrente annualità. L'attività della fase II ha riguardato l'accoppiamento del modello di serbatoio ad acqua senza scambiatore interno per l'accumulo del freddo, presentato nelle sezioni precedenti, con il modello sviluppato, in ambiente Comsol Multiphysics, nel corso della precedente annualità e relativo alla simulazione termo-fluidodinamica di un contenitore cilindrico di alluminio contenente un PCM biologico con temperatura di fusione pari a 15 °C e calore latente pari a 182 J/kg. Tale accoppiamento è stato effettuato utilizzando l'interfaccia Matlab-Comsol, in modo da poter simulare il sistema di accumulo per l'applicazione ENEA, basato sull'impiego di acqua e PCM macro-incapsulato come materiali di accumulo. I fattori di input necessari al modello Comsol sono stati: il valore iniziale della temperatura dell'acqua nel serbatoio, ed il medesimo valore in ogni istante temporale. Il primo è stato fornito da ENEA in base al corrispondente dato sperimentale, gli altri sono stati ottenuti come fattori di output della simulazione Matlab. A sua volta, il fattore di input necessario alla simulazione Matlab è stata la temperatura della parete esterna del contenitore del PCM all'istante iniziale, ed il medesimo valore in ogni istante temporale. Anche in questo caso, il primo è stato settato in base ai dati sperimentali forniti da ENEA, mentre gli altri sono stati ottenuti come fattori di output del modello Comsol.

Tale attività ha previsto due attività preliminari e relative all'aggiornamento del codice Matlab, sviluppato nel corso della Fase I, e del codice COMSOL, sviluppato durante la scorsa annualità: la prima, necessaria al fine di poter permettere la comunicazione tra i codici; la seconda, necessaria a ridurre il costo computazionale delle simulazioni COMSOL. Come già detto, i dati necessari per l'esecuzione delle simulazioni sono stati forniti da ENEA in accordo alle prove sperimentali svolte. Nel dettaglio, i dati forniti sono stati:

- le caratteristiche geometriche del serbatoio;
- il numero di moduli di PCM utilizzati;
- la posizione dei moduli di PCM all'interno del serbatoio;
- le caratteristiche geometriche dei moduli di PCM;
- il set di condizioni iniziali;
- la durata delle simulazioni.

Di seguito, nel paragrafo 3.1 è riportato l'aggiornamento del codice Matlab; nel paragrafo 3.2 l'aggiornamento del codice COMSOL; nel paragrafo 3.3 è mostrata la procedura iterativa utilizzata per l'accoppiamento dei suddetti modelli. Infine, nel paragrafo 3.4 sono riportate le mappe colorimetriche di temperatura e frazione fusa/solida del PCM nei vari strati e in diversi istanti temporali.

#### 3.1 Aggiornamento codice Matlab

Lo sviluppo del codice completo (serbatoio ad acqua + moduli di PCM), ha richiesto una fase di aggiornamento del codice Matlab sviluppato nel corso della Fase I e relativo al sistema di accumulo del freddo composto da un serbatoio di 300 litri, sprovvisto di serpentino. Nel dettaglio, è stato necessario introdurre una parte di codice necessaria alla simulazione dello scambio termico tra i moduli di PCM, introdotti nel serbatoio, e l'acqua contenuta all'interno del serbatoio stesso.

La modellazione è stata effettuata considerando 55 moduli contenenti PCM, posizionati in 3 differenti strati, composti, rispettivamente da 19, 21 e 15 moduli. Ciascun modulo presenta un'altezza pari a 14,3 cm

e raggio pari a 8,8 cm. Definite le caratteristiche geometriche dei moduli, per ciascun nodo del serbatoio occupato da una porzione di uno degli strati di moduli di PCM è stata scritta la seguente equazione di bilancio:

$$\rho_w c_w V_w \frac{dT_w}{dt} = \frac{\bar{T}_{PCM} - T_w}{R_{PCM}} + \dot{Q}_{cond} - \frac{T_w - T_{amb}}{R_{tank}} \quad (11)$$

In cui  $\rho_w$  e  $c_w$  sono rispettivamente la densità e il calore specifico dell'acqua,  $V_w$  è il volume,  $T_w$  la temperatura dell'acqua,  $\dot{Q}_{cond}$  è il calore trasmesso per conduzione con il nodo adiacente,  $T_{amb}$  è la temperatura ambiente, e  $R_{tank}$  è la resistenza termica totale relativa alle pareti del serbatoio. Per quanto concerne i parametri  $\bar{T}_{PCM}$  e  $R_{PCM}$ : per ciascun nodo del serbatoio,  $\bar{T}_{PCM}$  è la temperatura superficiale media dei moduli di PCM appartenenti ad uno dei tre strati occupante il nodo in oggetto ed è stata valutata mediante la simulazione del modulo di PCM effettuata con il software COMSOL, mentre  $R_{PCM}$  è la resistenza offerta dal singolo strato di moduli di PCM all'interno del nodo del serbatoio, valutata, mediante un codice iterativo, considerando la presenza di convezione naturale. Anche in questo caso, l'equazione (11) è stata risolta con il metodo di Eulero, per ciascun istante temporale e per ciascun nodo, ed è stato implementato il *reversion-elimination algorithm* per tener conto degli effetti dovuti alla convezione naturale che si instaura nel serbatoio tra i diversi strati d'acqua a differente altezza.

### 3.2 Aggiornamento codice COMSOL

La modellazione del modulo cilindrico contenente PCM è stata effettuata nel corso della precedente annualità ed è riportata nel dettaglio nel report *"Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico per l'accumulo del freddo, contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material), con e senza la presenza di una schiuma metallica immersa nel PCM atta a favorire la trasmissione del calore"* elaborato dal DII dell'Università di Napoli Federico II. In tale report, è riportata la modellazione del sistema di accumulo del freddo sia con solo PCM che con PCM e schiuma metallica; inoltre, per entrambi i casi, sono riportati sia il modello puramente conduttivo che conduttivo - convettivo. Il modello cui si fa riferimento nel presente report è quello conduttivo - convettivo sviluppato per il caso con solo PCM.

L'accoppiamento del suddetto modello COMSOL con il codice Matlab, ne ha richiesto una semplificazione, al fine di ridurre l'elevato costo computazionale. Considerando, quindi, la simmetria delle condizioni al contorno, è stato possibile passare da un modello con dominio computazione 3D ad uno 2D assialsimmetrico. Di seguito è riportato nel dettaglio il modello aggiornato.

Le ipotesi formulate sono state le medesime, ovvero:

- materiale di accumulo omogeneo ed isotropo;
- temperatura iniziale del PCM uniforme;
- moti convettivi interni al PCM trascurabili;
- passaggio di fase all'interno di un range di temperatura fissato.

La modellazione è stata, quindi, effettuata mediante le seguenti equazioni:

- equazione di conservazione dell'energia

$$\rho_{PCM} c_{p,PCM} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k_{PCM} \nabla T) \quad (12)$$

- equazione di conservazione della massa

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (13)$$

- equazione di conservazione della quantità di moto

$$\rho_{PCM} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \nabla \cdot \bar{v} \right) = -\nabla p + \mu_{PCM} \nabla^2 \bar{v} + \bar{F}_b \quad (14)$$

In cui  $p$  è la pressione,  $\mu_{PCM}$  è la viscosità dinamica del PCM, e  $\bar{v}$  è il vettore della velocità

Il termine  $\bar{F}_b$  presente nell'equazione (14) rappresenta l'approssimazione di Boussinesq, introdotta nell'equazione per tener conto degli effetti di galleggiamento. Tale termine è stato calcolato come segue:

$$\bar{F}_b = \rho_{PCM} \bar{g} \beta (T - T_M) \quad (15)$$

In cui  $\bar{g}$  e  $\beta$  sono, rispettivamente, l'accelerazione di gravità e il coefficiente di espansione termica. Le proprietà del PCM,  $k_{PCM}$ ,  $\rho_{PCM}$  e  $c_{p,PCM}$  sono state considerate costanti in tutto il dominio, e per tener conto del passaggio di fase, è stato implementato il metodo della capacità effettiva. Per quanto riguarda la viscosità del materiale, è stata valutata in accordo all'equazione (16), al fine di imporre una velocità nulla nella regione solida del PCM.

$$\mu_{PCM} = \mu_L (1 + S(T)) \quad (16)$$

$$S(T) = C \frac{(1 - \varphi(T))^2}{\varphi(T)^3 + \delta} \quad (17)$$

Nell'equazione (17),  $C$  e  $\delta$  sono delle costanti arbitrarie:  $\delta$  è di solito pari a  $10^{-3}$ , mentre  $C$  definisce la variazione di velocità della zona di transizione di fase. La condizione iniziale e le condizioni al contorno per ciascun modulo di PCM, sono state settate in base alle prove sperimentali svolte da ENEA, ovvero considerando la temperatura dell'acqua nel serbatoio all'istante iniziale e in tutti gli istanti successivi. Nel dettaglio, la temperatura iniziale di ciascuno strato di PCM è stata imposta uguale alla temperatura media dell'acqua nei nodi di serbatoio occupati dallo strato; per la condizione al contorno è stato fissato un flusso termico attraverso le pareti inferiore e laterale dei moduli di PCM considerando la presenza di convezione naturale, mentre la parete superiore è stata considerata adiabatica. Per quanto riguarda il settaggio dei parametri del solver utilizzato per la risoluzione del problema, essi sono rimasti invariati rispetto al precedente report.

### 3.3 Accoppiamento dei modelli

L'accoppiamento tra i componenti del sistema, ovvero tra il serbatoio ad acqua e il modulo di PCM, è stato eseguito attraverso la stessa procedura iterativa descritta nel caso con sola acqua in presenza dello scambiatore di calore. All'istante iniziale, è stato simulato il serbatoio in assenza dei moduli di PCM.

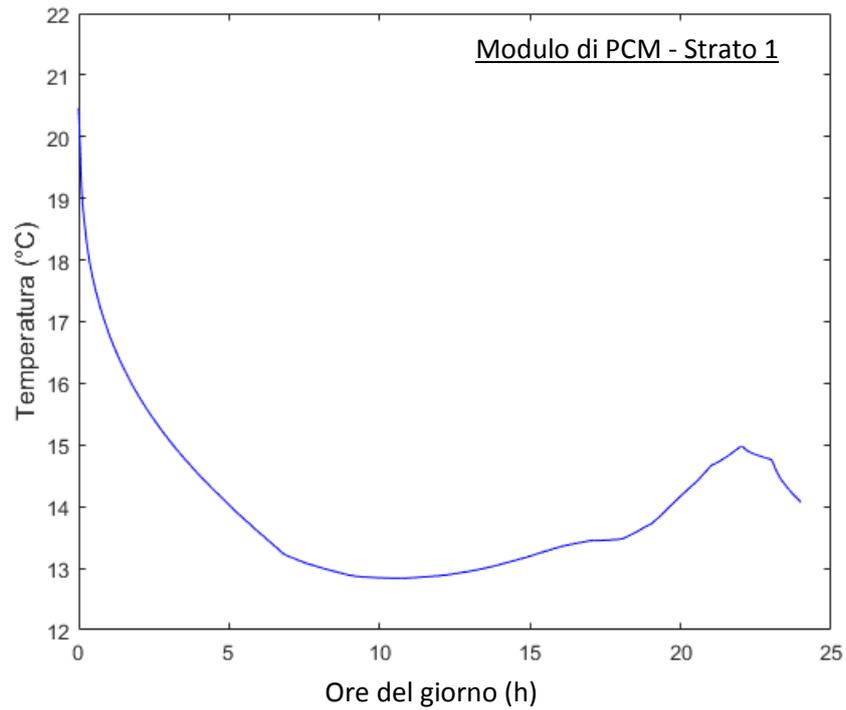
Dopodiché, è stato simulato ciascuno strato di moduli di PCM utilizzando come fattori di input (ovvero come condizione al contorno) le temperature dell'acqua nel serbatoio relative all'iterazione precedente, poi è stata rieseguita la simulazione del serbatoio ad acqua utilizzando come fattori di input la temperatura media superficiale dei moduli di PCM per ciascuno strato ottenuta dalla simulazione COMSOL: i dati in ingresso sono stati i valori aggiornati delle temperature del PCM, la trasmittanza termica complessiva tra acqua e PCM, e la temperatura ambiente. Il processo iterativo, quindi, ha ripreso dalla simulazione del PCM utilizzando i valori aggiornati delle temperature e ha proceduto fino a convergenza. Il tempo di simulazione è stato di 24h ed il time step utilizzato pari a 100s.

### 3.4 Risultati

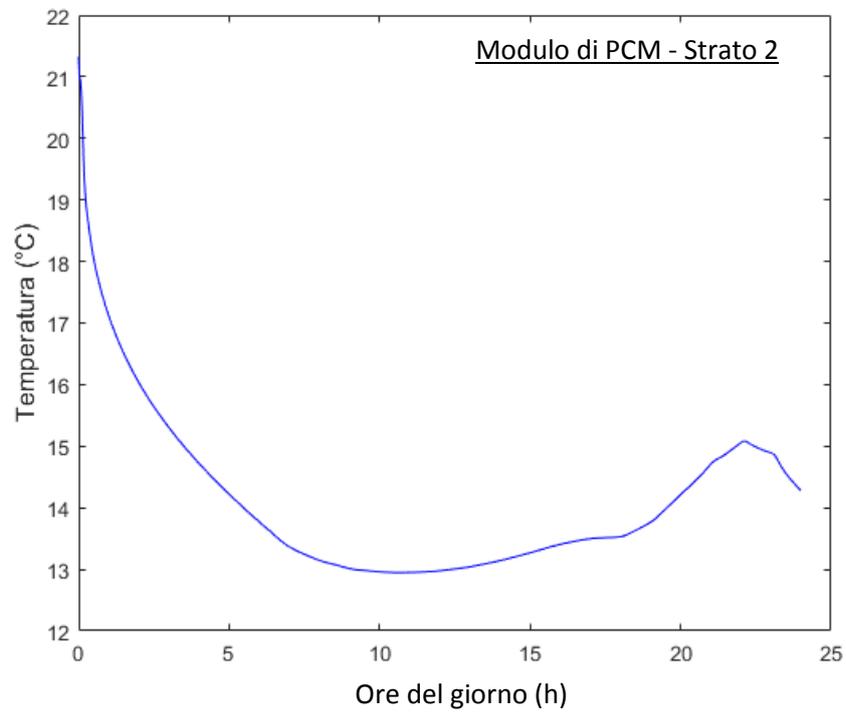
La validazione del modello sviluppato è riportata nel capitolo successivo, nel quale sono descritte le attività di validazione svolte nella Fase III della corrente annualità. Nel seguito sono, invece, riportati i principali risultati ottenuti per ciascuno dei tre differenti strati di PCM presenti all'interno del serbatoio. Nel dettaglio, sono riportate la temperatura media, la frazione solida/fusa media e l'energia accumulata/rilasciata da un unico modulo di PCM, rappresentativo di tutti quelli appartenenti a ciascuno strato. Inoltre, sono mostrate le mappe colorimetriche di temperatura e frazione solida/fusa all'istante iniziale, finale e in altri due istanti temporali ritenuti significativi.

Il ciclo di carica/scarica cui è soggetto il sistema in esame è stato impostato in accordo alle prove sperimentali svolte dal Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici. Il caricamento in fase sperimentale ha avuto una durata di 13 ore, seguita da una fase di scaricamento di 9 ore e da un'ulteriore fase di caricamento di 2 ore. Come già detto, i valori della temperatura dell'acqua e della conduttanza convettiva, necessari per il settaggio della condizione al contorno, sono stati calcolati dal codice per ciascuna iterazione.

Le figure 3, 4 e 5 riportano l'andamento della temperatura media nel modulo di PCM appartenente, rispettivamente, allo strato 1, 2 e 3, al variare del tempo. Da tali figure, si evince come lo strato 3, quello posto più in alto all'interno del serbatoio e, quindi, a contatto con la parte più calda del serbatoio stesso, sia caratterizzato da una temperatura media lievemente più alta rispetto a quella degli altri due strati. Ciò è maggiormente visibile all'istante iniziale e nella parte finale del ciclo.



**Figura 3. Andamento della temperatura media nel modulo di PCM appartenente allo strato 1.**



**Figura 4. Andamento della temperatura media nel modulo di PCM appartenente allo strato 2.**

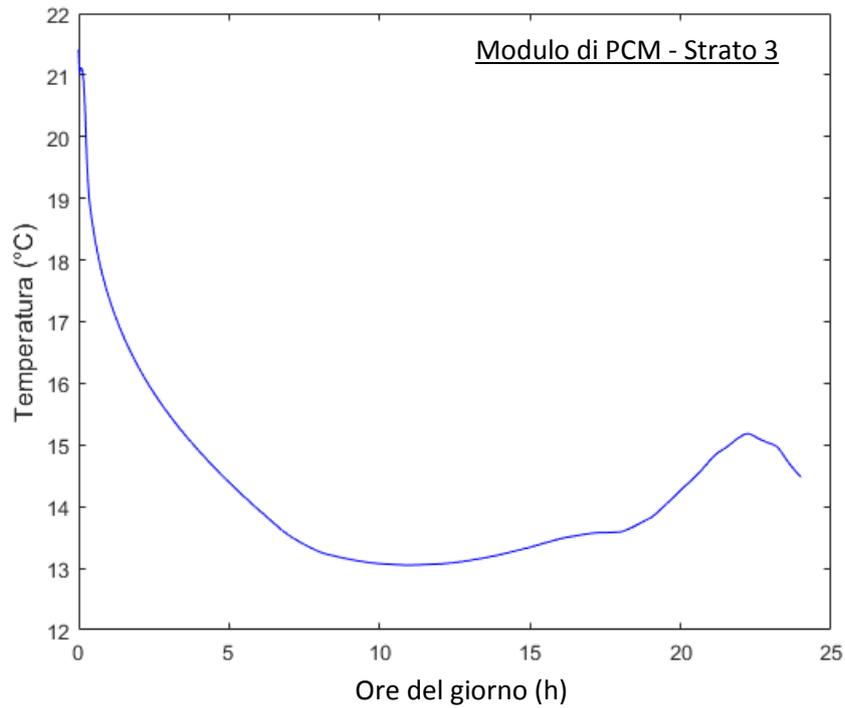


Figura 5. Andamento della temperatura media nel modulo di PCM appartenente allo strato 3.

Le figure 6, 7 e 8 riportano l'andamento della frazione solida/fusa media nel modulo di PCM appartenente, rispettivamente, allo strato 1, 2 e 3, al variare del tempo. Da tali figure risulta chiaro che il PCM all'interno dei moduli sia soggetto a fasi di carica e scarica non complete. Inoltre, risulta evidente che il materiale è soggetto a caricamento fino a circa 13 ore, segue lo scaricamento per le successive 9, infine il caricamento riparte alla 22esima ora del giorno. In accordo a ciò che è stato osservato nelle precedenti figure, lo strato che solidifica maggiormente è il primo, ovvero quello caratterizzato da una temperatura media più bassa. In questo caso, il valore minimo della  $\phi$  media è pari a 0,175, per lo strato 2 è pari a 0,185 e per lo strato 3 è pari a 0,197.

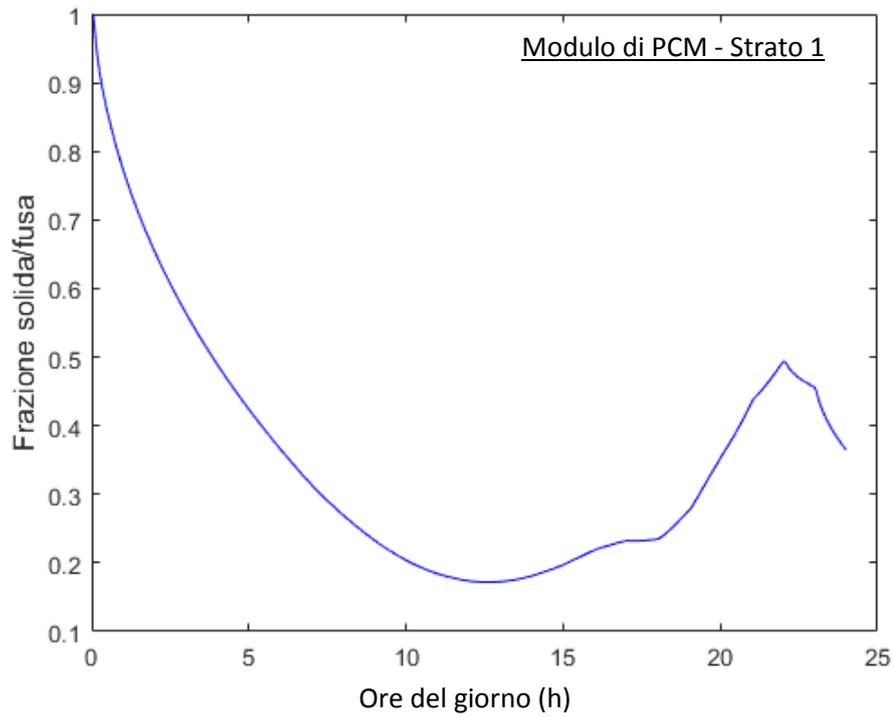


Figura 6. Andamento della frazione solida/fusa media nel modulo di PCM appartenente allo strato 1.

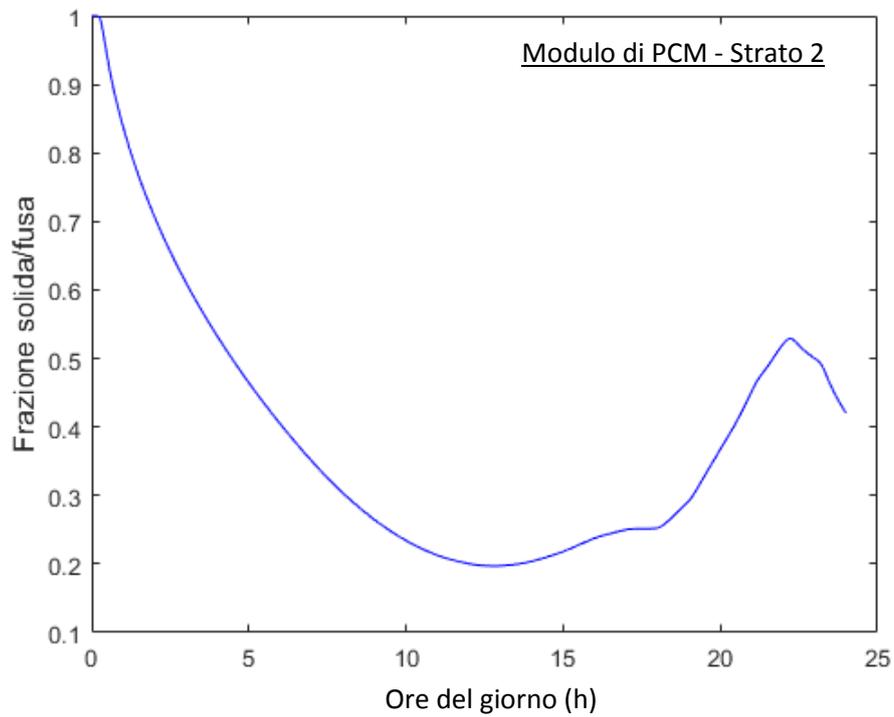


Figura 7. Andamento della frazione solida/fusa media nel modulo di PCM appartenente allo strato 2.

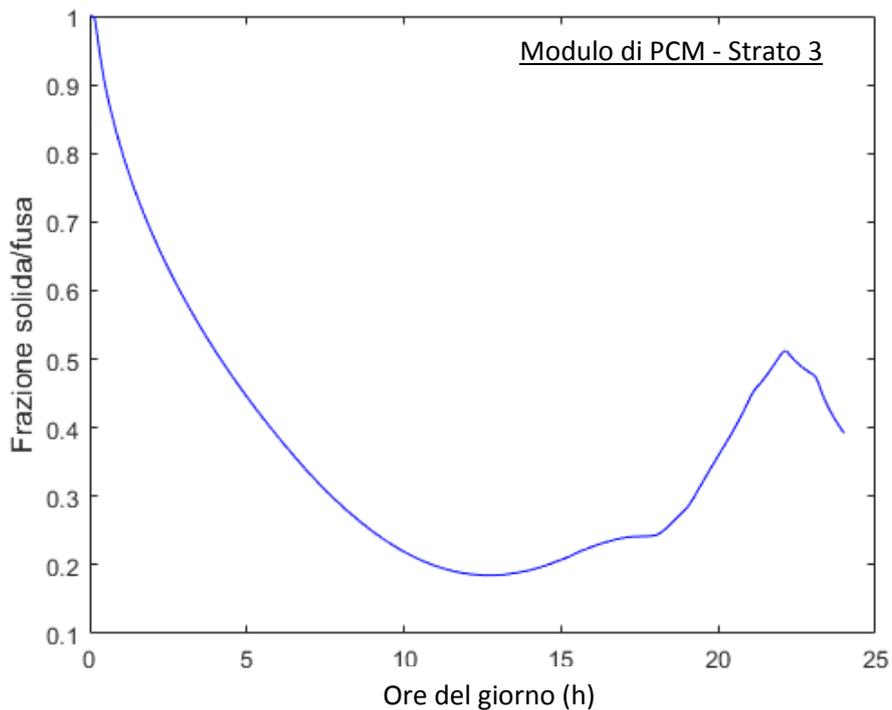
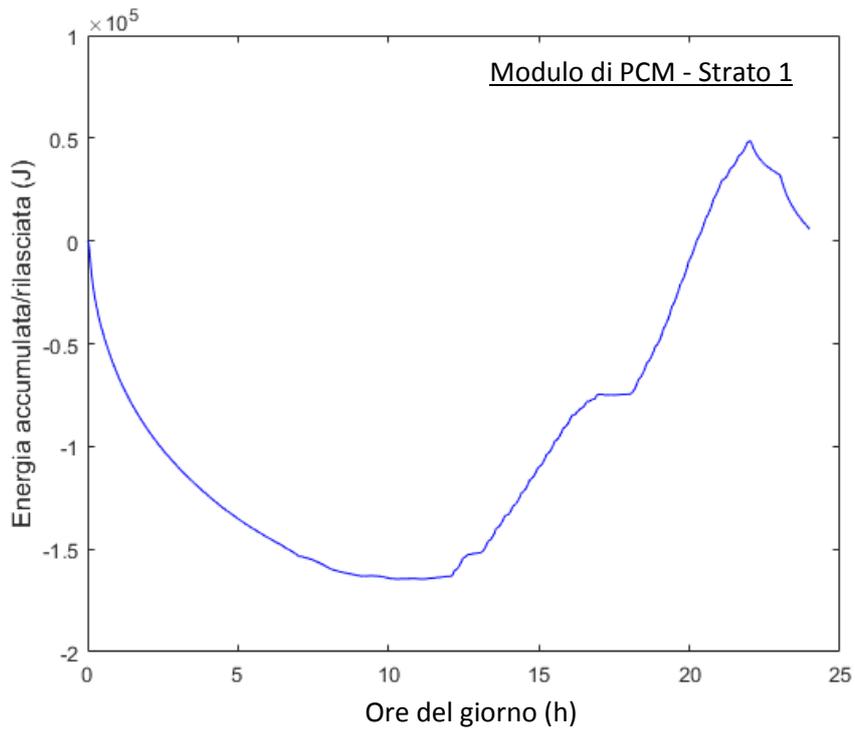
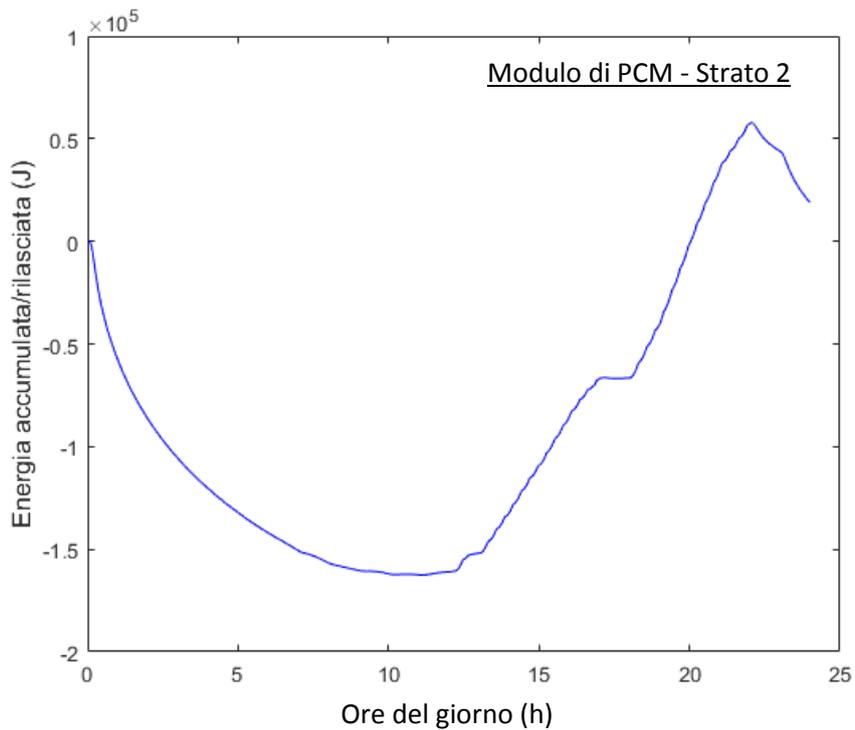


Figura 8. Andamento della frazione solida/fusa media nel modulo di PCM appartenente allo strato 3.

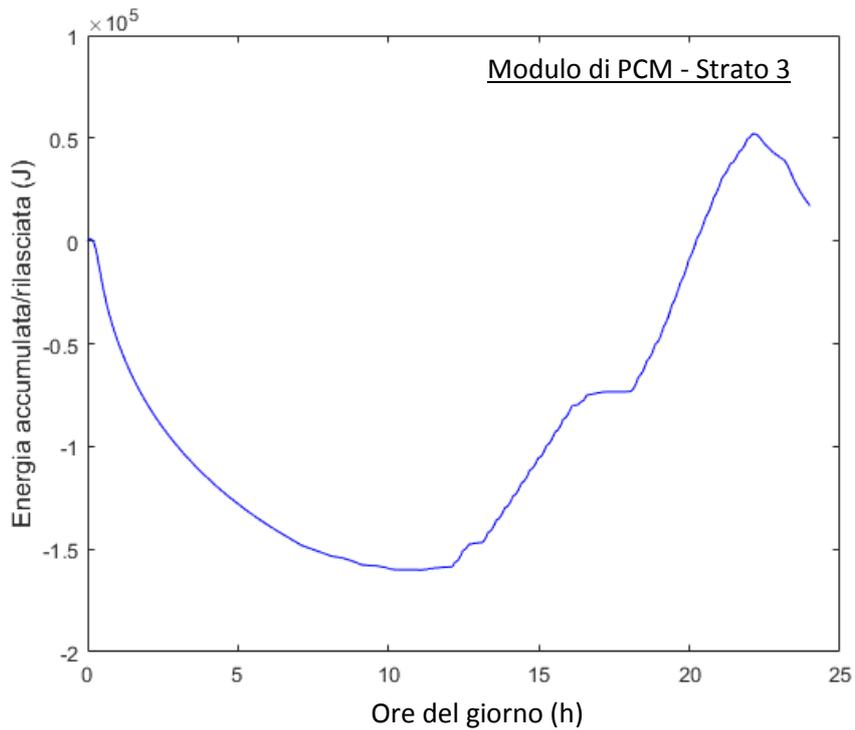
Le figure 9, 10 e11 riportano l’andamento dell’energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM durante l’intero ciclo. L’energia accumulata è negativa per convenzione. Da tali figure si evince come i tre strati non siano caratterizzati da differenze apprezzabili in termini di energia accumulata e rilasciata.



**Figura 9. Andamento dell'energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM appartenente allo strato 1.**

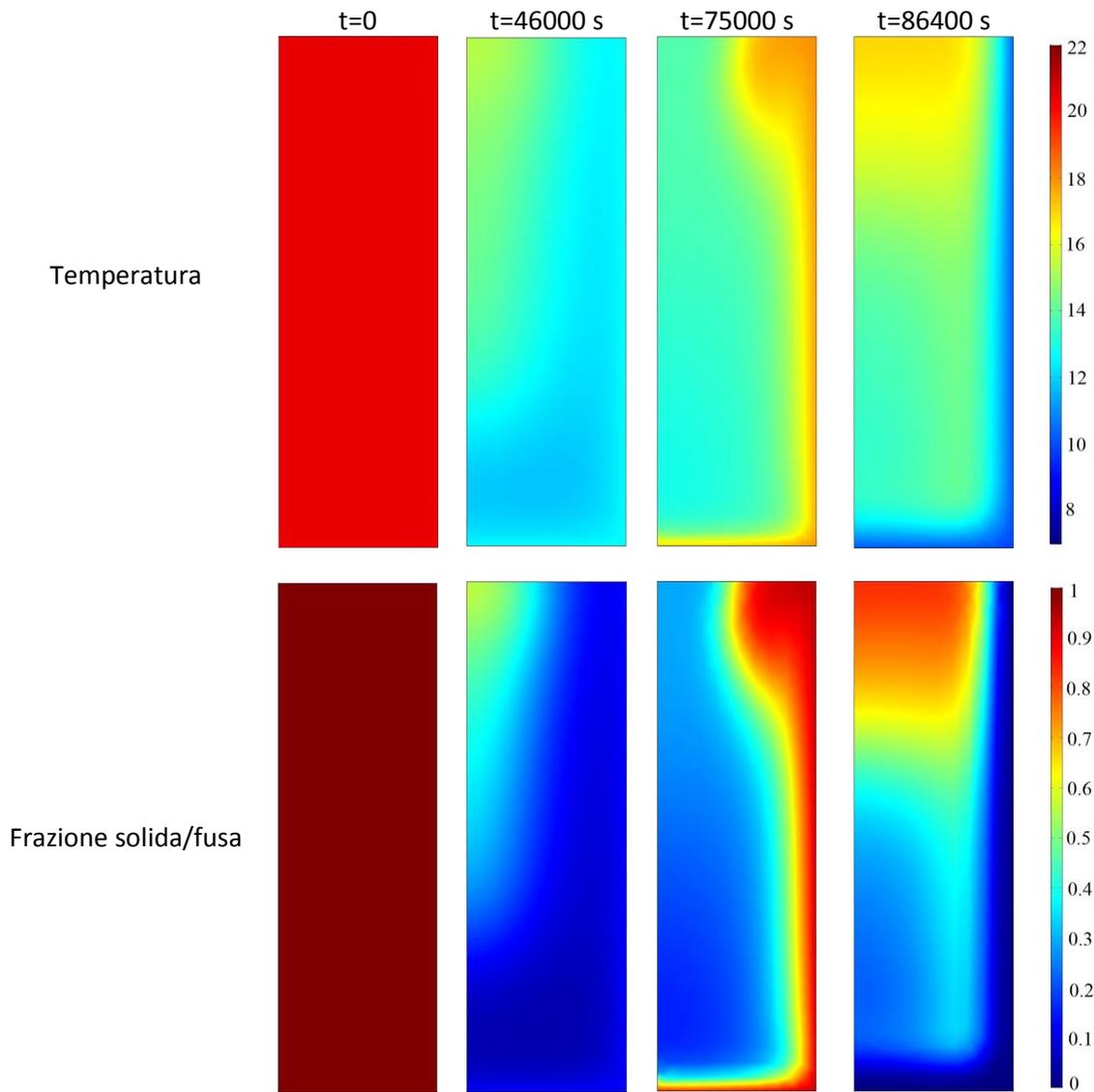


**Figura 10. Andamento dell'energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM appartenente allo strato 2.**



**Figura 11. Andamento dell'energia accumulata/rilasciata dal modulo di PCM appartenente allo strato 3.**

Di seguito, sono riportate le mappe colorimetriche di temperatura e frazione solida/fusa di uno dei moduli di PCM appartenente a ciascuno dei tre strati, all'istante iniziale, finale e in altri due istanti significativi, ovvero quegli istanti in cui sono massimi il caricamento e lo scaricamento del modulo. Osservando tali mappe, è possibile rilevare le differenze, seppur piccole e già rilevate dalle figure precedenti, che si verificano tra i tre differenti strati di moduli di PCM. In particolare, tali differenze risultano più marcate per lo strato 1 rispetto agli altri due. Al secondo istante temporale osservato, infatti, risulta evidente come lo strato 1 sia caratterizzato da maggior presenza di PCM in fase solida, rispetto agli altri due strati. Come già detto in precedenza, è evidente che il PCM in nessuno strato riesca a solidificare o fondere completamente.



**Figura 12. Mappe colorimetriche di temperatura e frazione solida/fusa relative ad un modulo di PCM appartenente allo strato 1.**

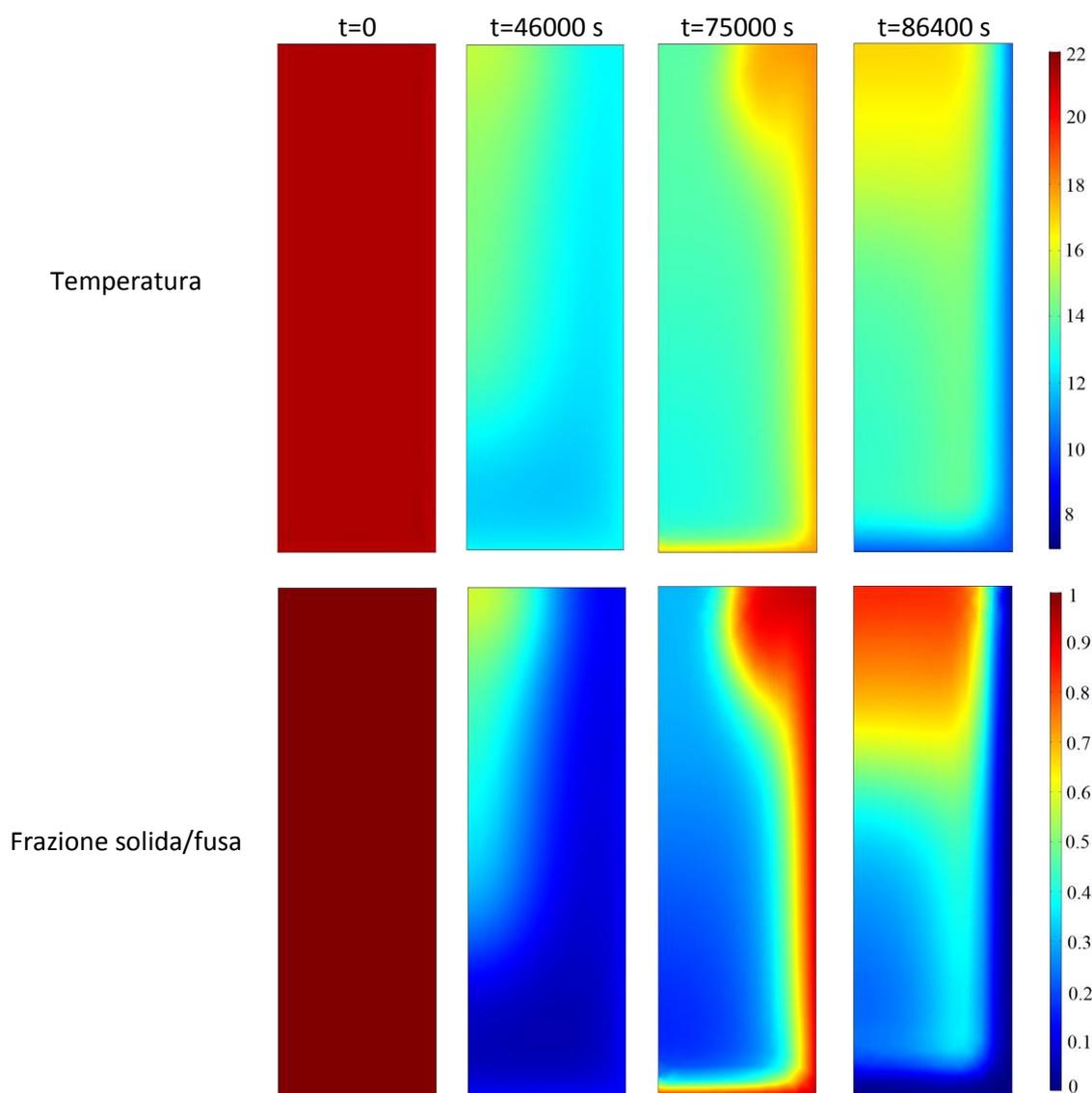
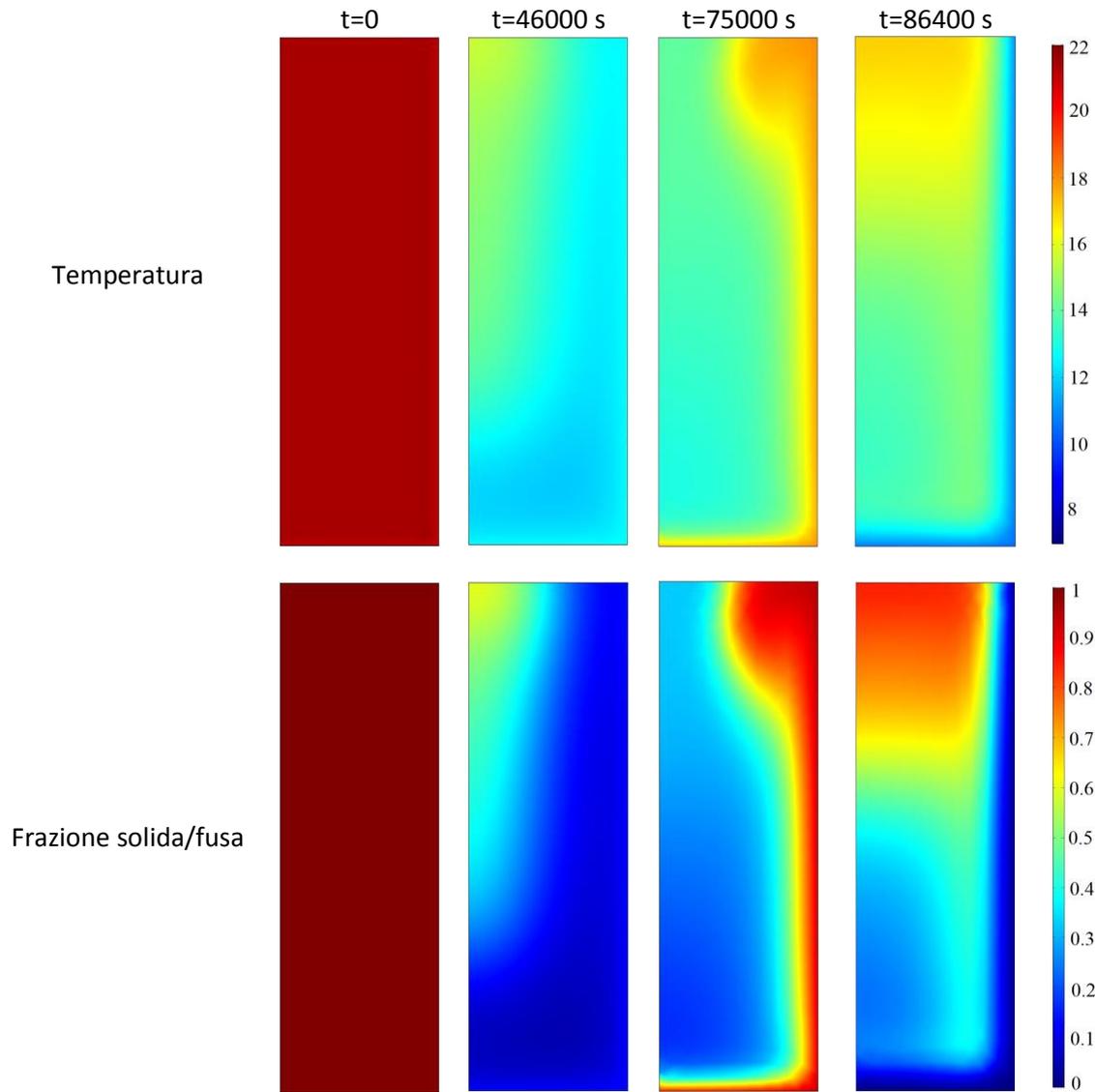


Figura 13. Mappe colorimetriche di temperatura e frazione solida/fusa relative ad un modulo di PCM appartenente allo strato 2.



**Figura 14. Mappe colorimetriche di temperatura e frazione solida/fusa relative ad un modulo di PCM appartenente allo strato 3.**

## 4 Attività svolte nella Fase III

Le attività della Fase III hanno riguardato la validazione sperimentale dei due modelli di serbatoio di accumulo del freddo ad acqua, sviluppati nel corso della Fase I e del modello sviluppato nel corso della Fase II.

Come già detto in precedenza, le prove sperimentali sono state effettuate dal Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici. Tali attività sperimentali sono riportate nel dettaglio nel Report *“Analisi sperimentale di sistemi di accumulo del freddo innovativi per applicazioni residenziali”* elaborato da ENEA nell’ambito dell’Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, e hanno permesso la definizione dei fattori di input, introdotti nei paragrafi precedenti, necessari all’implementazione degli applicativi in oggetto e hanno fornito, quindi, i profili di temperatura necessari alla validazione dei modelli sviluppati.

### 4.1 Validazione dei modelli

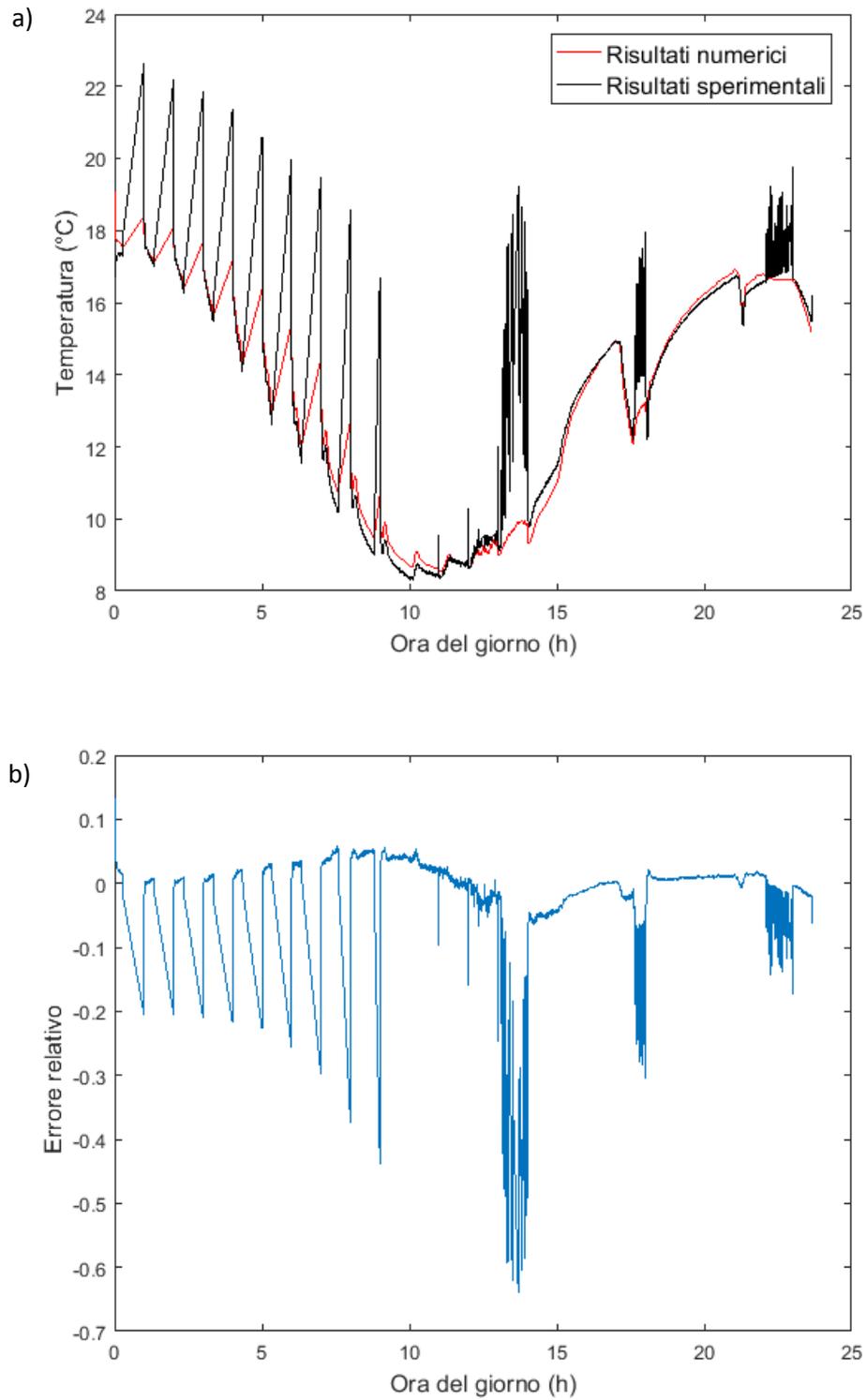
Di seguito, nel paragrafo 4.1.1 è riportata e discussa la validazione del modello di serbatoio di accumulo del freddo ad acqua dotato di scambiatore di calore interno; nel paragrafo 4.1.2 la validazione del modello di serbatoio di accumulo del freddo ad acqua sprovvisto di scambiatore di calore; infine, il paragrafo 4.1.3, mostra la validazione del modello di serbatoio di accumulo del freddo ad acqua e PCM macro-incapsulato.

#### 4.1.1 Serbatoio ad acqua con scambiatore di calore immerso

In questo caso, i risultati sono riportati in termini di confronto tra la temperatura del fluido termovettore all’uscita del serpentino ottenuta dalle prove sperimentali e dai test numerici.

Come riportato nel paragrafo 2.1.1, la modellazione del serpentino è stata effettuata analizzando diverse correlazioni per il calcolo del Nusselt medio utilizzato per la valutazione della conduttanza convettiva esterna. La correlazione che comporta il minor valore dell’errore relativo medio, valutato tra i dati numerici e quelli sperimentali, è quella di Ali, con un errore relativo medio pari a 0,0251. A questa seguono la correlazione di Prabhanjani con un errore relativo medio pari a 0,0256, quella di Churchill e Chu con un errore relativo medio pari a 0,0279, ed infine la correlazione di Morgan con un errore relativo medio pari a 0,0268.

I risultati sono mostrati nelle figure 15, 16, 17, 18, che riportano il confronto tra i risultati sperimentali, forniti da ENEA, e quelli numerici ottenuti utilizzando, rispettivamente, la correlazione di Ali, Prabhanjani, Churchill e Chu, e Morgan. Inoltre, le medesime figure mostrano gli errori relativi calcolati in ciascuno dei casi analizzati. Le figure, in generale, mostrano tutte un’ottima sovrapposizione tra i risultati sperimentali e i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, e mostrano inoltre, che la massima deviazione tra le curve è ottenuta in corrispondenza dei picchi superiori di temperatura. Tali picchi sono relativi a quegli intervalli temporali in cui, raggiunto il carico utente orario, l’impianto si spegne. Di conseguenza, in tali intervalli, il serpentino non fornisce alcun contributo energetico al serbatoio, e pertanto la differenza tra i due andamenti è praticamente ininfluenza.



**Figura 15. Correlazione di Ali: a) confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici; b) errore relativo medio.**

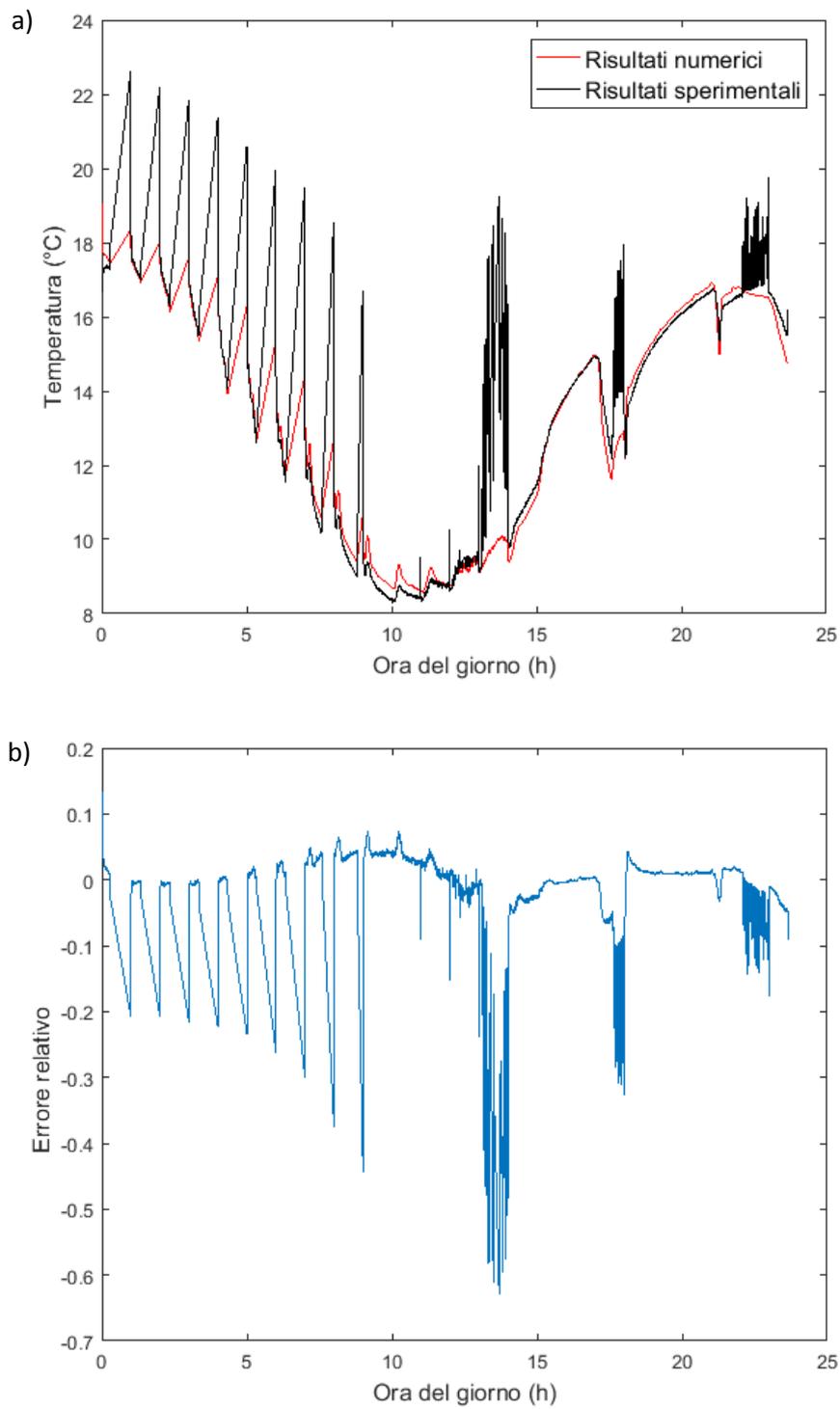
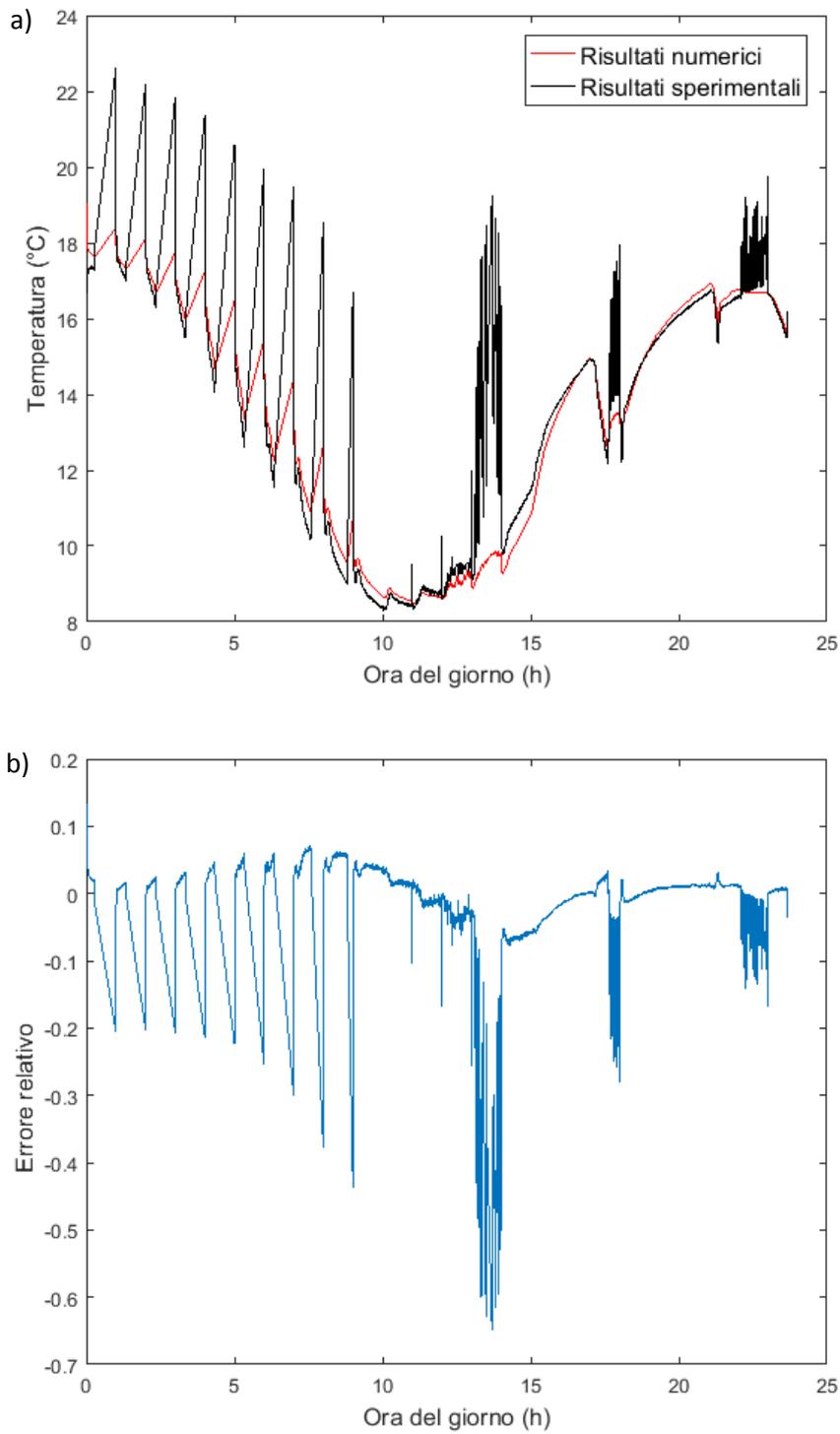
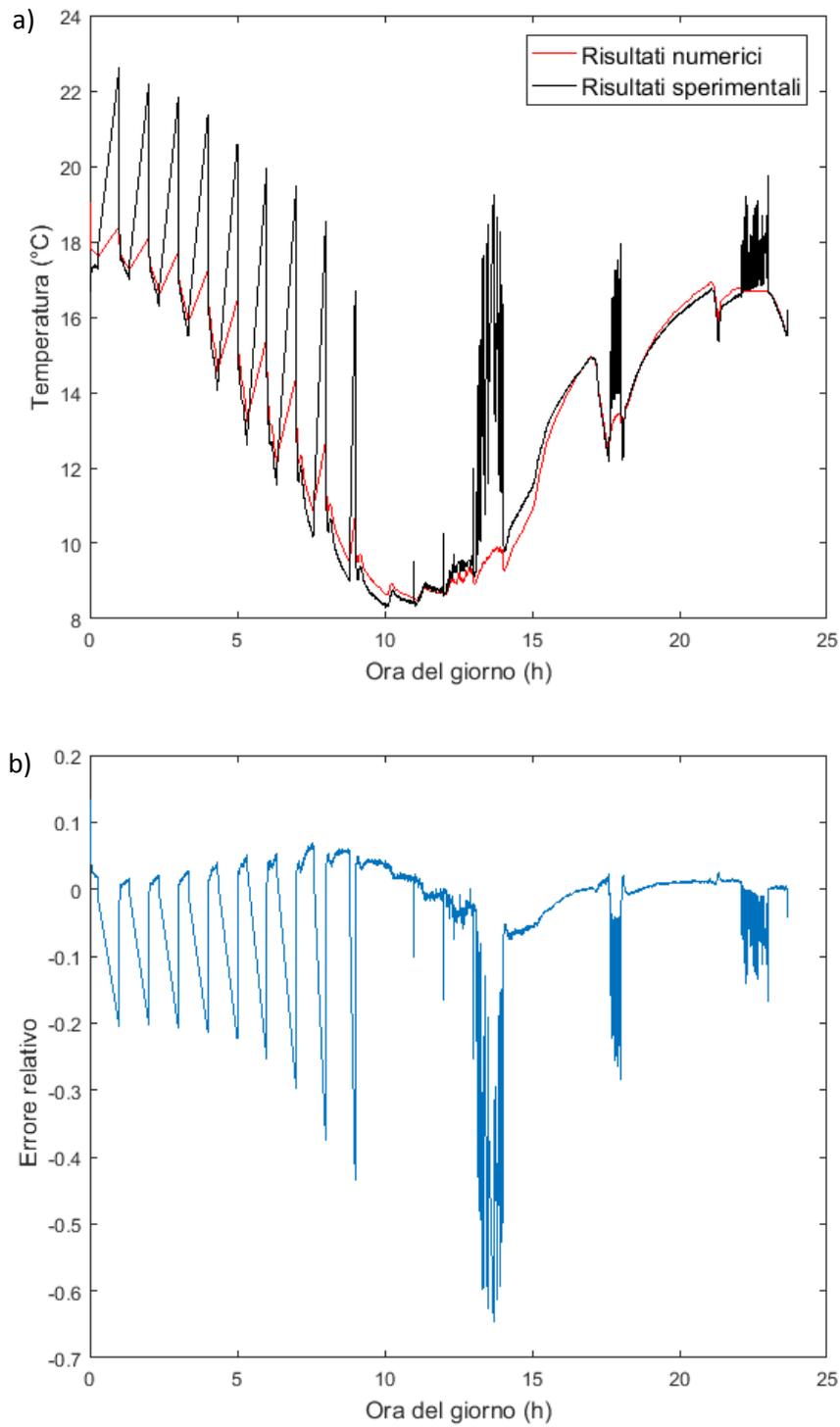


Figura 16. Correlazione di Prabhanjani: a) confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici; b) errore relativo medio.



**Figura 17. Correlazione di Churchill e Chu: a) confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici; b) errore relativo medio.**



**Figura 18. Correlazione di Morgan: a) confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici; b) errore relativo medio.**

#### 4.1.2 Serbatoio ad acqua con scambiatore di calore immerso

Nel caso di sistema di accumulo ad acqua sprovvisto di scambiatore interno, i risultati sono mostrati in termini di confronto tra la temperatura dell'acqua alla sezione di uscita del serbatoio ottenuta dalle prove sperimentali e dai test numerici.

Nel dettaglio, la figura 19 riporta il suddetto confronto e l'andamento dell'errore relativo. In questo caso il valore dell'errore relativo medio è di 0,075.

La figura mostra una buona sovrapposizione tra i risultati sperimentali e i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, soprattutto nelle prime nove ore. Da questa si può osservare come, anche in questo caso, la massima deviazione tra le curve è ottenuta in corrispondenza dei picchi superiori di temperatura. Come già detto nel caso di serbatoio dotato di scambiatore di calore immerso, tali picchi sono relativi a quegli intervalli temporali in cui, raggiunto il carico utente orario, l'impianto si spegne. Di conseguenza, in tali intervalli, la portata d'acqua in ingresso al serbatoio è nulla e quindi non è fornito alcun contributo energetico, e pertanto la differenza tra i due andamenti è praticamente ininfluenza.

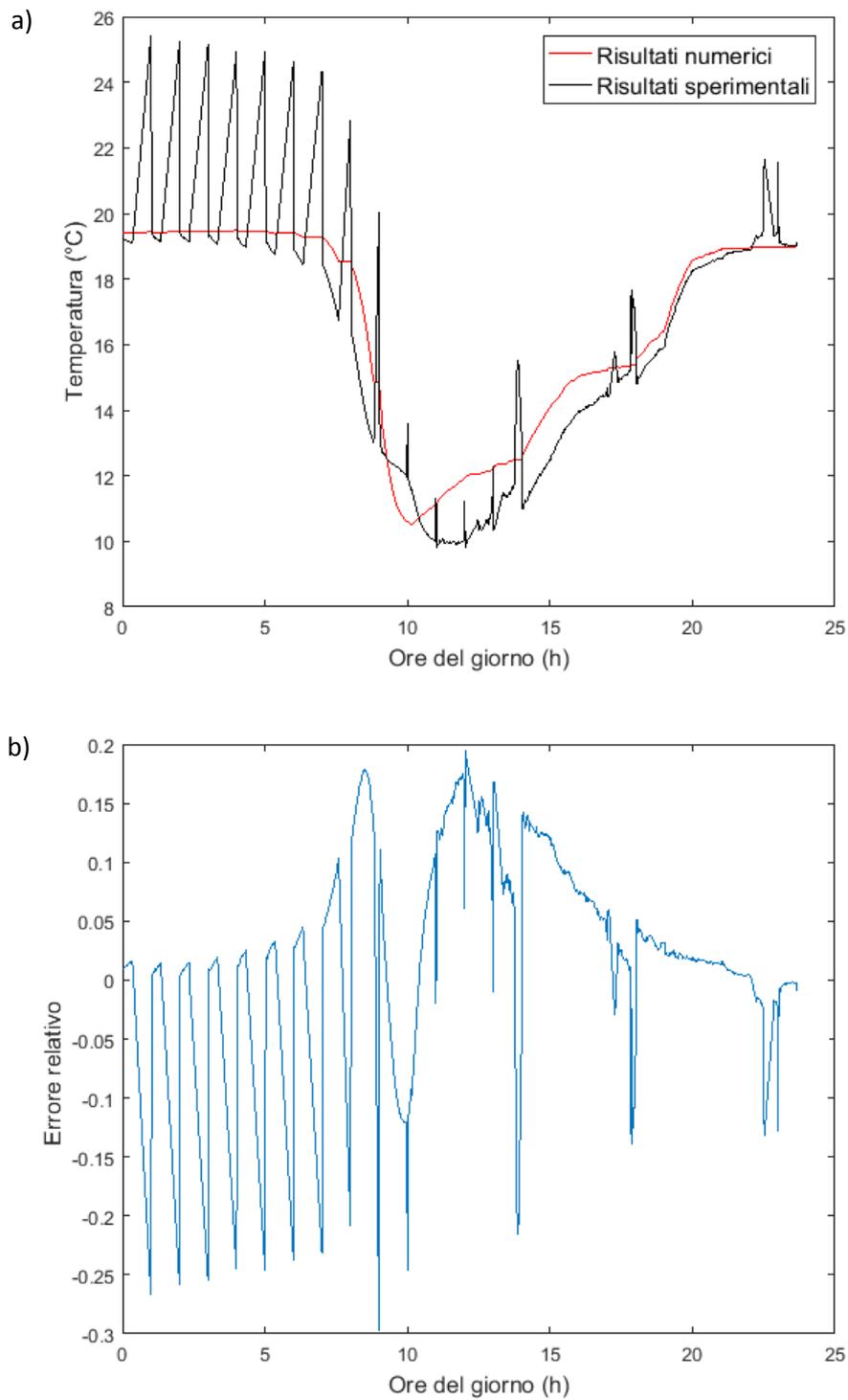
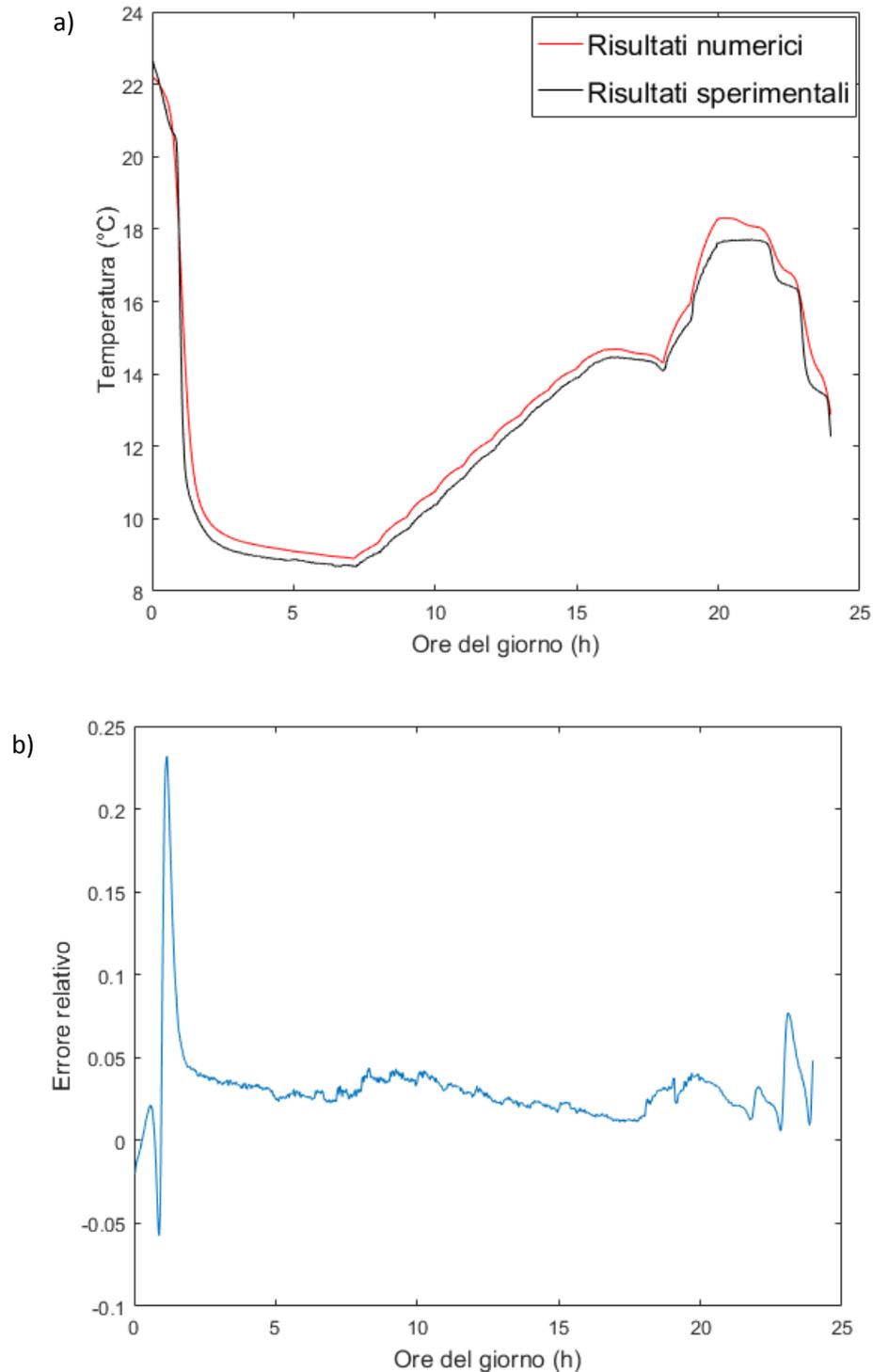


Figura 19. a) confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici; b) errore relativo medio.

### 4.1.3 Serbatoio ad acqua e PCM

Nel caso di serbatoio di accumulo ad acqua e PCM macro-incapsulato, la validazione è stata effettuata confrontando la temperatura dell'acqua in uscita al serbatoio ottenuta dalle prove numeriche e quelle sperimentali. Tale confronto e l'andamento dell'errore relativo sono riportati, rispettivamente, in figura 20 a) e b). Il valore calcolato dell'errore relativo medio, in questo caso, è pari a 0,032.

La figura mostra un'ottima sovrapposizione dei risultati numerici e quelli sperimentali in tutta la durata del ciclo.



**Figura 20. a) confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici; b) errore relativo medio.**

## 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 corso 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”* stipulato tra ENEA e DII. Tale attività ha riguardato lo sviluppo e la validazione sperimentale di opportuni modelli analitici per la simulazione numerica di tre differenti sistemi di accumulo del freddo ad acqua, di cui uno caratterizzato dalla presenza di uno scambiatore di calore immerso, uno contenente al suo interno un PCM macro-incapsulato in contenitori cilindrici di alluminio, e uno privo sia di scambiatore che di PCM.

Il lavoro è stato articolato in tre macrofasi, finalizzate allo sviluppo dei modelli computazionali dei sistemi di accumulo con sola acqua, allo sviluppo del modello relativo al sistema con acqua e PCM, e alla relativa validazione sperimentale.

Le attività della prima fase, riportate nel capitolo 2, hanno riguardato lo sviluppo dei modelli necessari alla simulazione dinamica dei due sistemi di accumulo del freddo utilizzando solo acqua come materiale di accumulo. Sono state vagliate differenti correlazioni per il calcolo del Nusselt medio necessario a simulare lo scambio termico tra acqua interna al serbatoio e ambiente esterno, e nel caso di serbatoio dotato di scambiatore, tra fluido termo-vettore circolante al suo interno e acqua contenuta nel serbatoio.

Le attività della seconda fase, riportate nel capitolo 3, hanno, invece, riguardato lo sviluppo del modello necessario alla simulazione dinamica del sistema di accumulo del freddo composto da acqua e PCM macro-incapsulato. Tale modello è stato ottenuto dall'accoppiamento, realizzato mediante l'interfaccia Matlab-COMSOL, tra il modello di serbatoio ad acqua sprovvisto di serpentino, sviluppato nel corso della fase I, con il modello COMSOL per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo di PCM, sviluppato nel corso della precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, nell'ambito dell'Accordo di Programma *“Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo”*, riportato nel relativo report tecnico, elaborato dal medesimo Dipartimento.

Le proprietà geometriche, termofisiche, i dati per il settaggio delle condizioni iniziali e al contorno, per tutti i sistemi analizzati e, quindi per tutti i modelli sviluppati, sono stati ottenuti dal Laboratorio Prove Accumulo Termico del Centro Ricerche ENEA Portici, in base alle prove sperimentali svolte.

Nel capitolo 3, è, inoltre, riportata l'attività relativa all'aggiornamento del codice Matlab, relativo alla simulazione del serbatoio ad acqua senza serpentino, e del codice COMSOL sviluppato nel corso della precedente annualità, al fine di poter permettere l'accoppiamento tra i modelli sviluppati e ridurre il costo computazionale delle simulazioni. In tale capitolo, è, inoltre, mostrata nel dettaglio la procedura iterativa di accoppiamento utilizzata. Infine, sono riportati i principali risultati ottenuti dalla simulazione numerica, in termini di variazione della temperatura media dei moduli di PCM; variazione della frazione solida media degli stessi; e di energia frigorifera accumulata e rilasciata dai moduli di PCM durante l'intera durata del ciclo.

L'ultima fase, descritta nel capitolo 4, riporta, infine, le attività relative alla validazione sperimentale dei modelli sviluppati. In tutti i casi, la sovrapposizione tra i dati numerici e quelli sperimentali risulta ottima, come testimoniato dall'andamento degli errori relativi mostrati per ciascun caso.

Alla luce delle analisi condotte, per il prossimo trimestre, si prevede un'attività di ricerca basata sulla realizzazione di un'analisi parametrica finalizzata alla valutazione delle performance energetiche del sistema di accumulo del freddo oggetto di studio, al variare della quantità di PCM utilizzata. A tal proposito, gli applicativi già realizzati saranno aggiornati con ulteriori implementazioni al fine di tener conto di più configurazioni del sistema di accumulo, ottenute al variare del numero di moduli contenenti PCM, immersi nel serbatoio ad acqua fredda, ed effettuare un'ottimizzazione del numero degli stessi e quindi della quantità di PCM da utilizzare per massimizzare le performance di scambio termico del sistema in oggetto, a servizio dell'utenza selezionata per il caso studio considerato.

## 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.

**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.