



## Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi elementari di accumulo termico a calore latente

*A. Miliozzi, R. Liberatore,  
G.M. Giannuzzi, D. Mele,  
G. Napoli, E. Giovannini*

ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA DEL COMPORTAMENTO TERMODINAMICO  
DI SISTEMI ELEMENTARI DI ACCUMULO TERMICO A CALORE LATENTE

A. Miliozzi, R. Liberatore, G.M. Giannuzzi, D. Mele, G. Napoli, E. Giovannini (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

## Indice

1	INTRODUZIONE .....	4
2	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1	CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEI SISTEMI LHTES .....	5
2.1.1	<i>Introduzione</i> .....	5
2.1.2	<i>Pianificazione delle prove sperimentali</i> .....	5
2.1.3	<i>Pesatura degli accumulatori</i> .....	6
2.1.4	<i>Acquisizione e posizionamento termocoppie</i> .....	8
2.1.5	<i>Olio diatermico</i> .....	9
2.1.6	<i>Condizioni fluidodinamiche</i> .....	9
2.1.6.1	Portata e velocità .....	9
2.1.6.2	Numero di Reynolds e coefficiente di scambio.....	9
2.1.7	<i>Temperatura del termo-criostato ed dell'ambiente</i> .....	10
2.1.8	<i>Temperature del sistema di accumulo</i> .....	10
2.1.9	<i>Temperature nel mezzo di accumulo</i> .....	11
2.1.10	<i>Potenza richiesta al termo-criostato e dispersa dai soli accumulatori</i> .....	15
2.1.11	<i>Potenza assorbita dal TES e potenza persa verso l'ambiente</i> .....	16
2.1.12	<i>Risultati e discussione</i> .....	17
2.2	SIMULAZIONE NUMERICA DEL COMPORTAMENTO TERMODINAMICO DEI SISTEMI LHTES .....	20
2.2.1	<i>Introduzione</i> .....	20
2.2.2	<i>Geometria</i> .....	21
2.2.3	<i>Materiali</i> .....	23
2.2.4	<i>Tipo di analisi</i> .....	24
2.2.5	<i>Condizioni al contorno</i> .....	24
2.2.6	<i>Simulazione numerica 1D di un TES elementare</i> .....	25
2.2.6.1	TES elementare a "sali solari" e tubo liscio .....	25
2.2.6.2	TES elementare a "sali solari" e tubo alettato .....	29
2.2.6.3	TES elementare a "sali solari" con nanoparticelle e tubo liscio .....	33
2.2.6.4	TES elementare a "sali solari" con nanoparticelle e tubo alettato .....	37
2.2.6.5	Ulteriori considerazione sulla conducibilità termica dei mezzi di accumulo .....	41
2.2.7	<i>Simulazione numerica 2D di un TES elementare</i> .....	45
2.2.7.1	TES elementare a "sali solari" e tubo liscio .....	45
2.2.7.2	TES elementare a "sali solari" e tubo alettato .....	49
2.2.7.3	TES elementare a "sali solari" con nanoparticelle e tubo liscio .....	53
2.2.7.4	TES elementare a "sali solari" con nanoparticelle e tubo alettato .....	57
2.2.8	<i>Risultati e discussione</i> .....	61
3	CONCLUSIONI.....	64
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	66
5	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	67

## 1 Introduzione

Nell'ambito del Progetto B.1.3 (ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE) del PAR 2013 è stato realizzato un impianto sperimentale, denominato ATES (Advanced Thermal Energy Storage), dedicato alla caratterizzazione termica di sistemi elementari di accumulo termico a calore latente (Figura 1).



Figura 1- Scorcio dell'impianto ATES in Enea Casaccia (Roma)

Durante il PAR 2014, detto impianto è stato messo a punto ed automatizzato al fine di eseguire una serie di prove sperimentali su alcune tipologie di accumulo termico per impianti solari a concentrazione (CSP).

In particolare si sono testati quattro tipi di accumulo elementare a calore latente di tipo "tube and shell" costituiti da un **tubo liscio od alettato** circondato da un mezzo di accumulo costituito da "sali solari" (Phase Change Material - **PCM base**) oppure additivati con nanoparticelle di silice ed allumina (Nano Fluid PCM - **NFPCM**). I dati acquisiti saranno analizzati, elaborati e messi a confronto tra di loro, per evidenziare il comportamento termodinamico delle differenti tipologie di accumulo termico sperimentate.

L'impianto ATES presenta due sezioni di prova (linea A e linea B) attivabili alternativamente. Su ciascuna linea sono presenti tre accumulatori elementari posti in serie ([4],[5]).

Successivamente, sono stati sviluppati alcuni modelli numerici **FEM**, sia semplici (1D) che complessi (2D), e validati attraverso un confronto con i risultati sperimentali. Tali modelli dovranno servire, in una prima fase, ad interpretare i risultati sperimentali e, successivamente, per analizzare nuove soluzioni od effettuare una progettazione preliminare di un sistema di accumulo più complesso.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Caratterizzazione sperimentale dei sistemi LHTES

#### 2.1.1 Introduzione

Le attività sperimentali, condotte utilizzando l'impianto sperimentale ATES realizzato presso l'Enea Casaccia hanno per obiettivo la caratterizzazione dello scambio termico all'interno di un sistema di accumulo termico di tipo "tube and shell" a tubi verticali in cui il mezzo di accumulo a cambiamento di fase è costituito da "sale solare" (PCM) con eventuale aggiunta di **nanoparticelle** (NFPCM) ed il tubo di scambio possa avere o meno un sistema di promozione della conducibilità (aletatura). In **Tabella 1** è riportato lo schema di esecuzione delle prove sperimentali, così come sono state eseguite.

**Tabella 1 – Schema delle prove sperimentali eseguite**

ID Prova	ID Test	Mezzo di accumulo	Promotore conducibilità
1	1.1	PCM	No
	1.2		
	1.3		
2	2.1	PCM	Si
	2.2		
	2.3		
3	3.1	NFPCM	No
	3.2		
4	4.1	NFPCM	Si
	4.2		

#### 2.1.2 Pianificazione delle prove sperimentali

Le prove sperimentali di seguito descritte sono state eseguite come una successione di quattro fasi distinte ognuna delle quali termina con il raggiungimento di uno stato stazionario del sistema.

Quest'ultima condizione è necessaria al fine di valutare l'entità delle perdite associate al sistema di accumulo stesso e, di conseguenza, la quantità di energia effettivamente accumulata.

Le quattro fasi sono le seguenti:

- **Riscaldamento iniziale (20°C – 200°C)**

Il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) è portato dalla temperatura ambiente a quella teorica di 200°C. In questa fase il calore trasmesso sarà accumulato come calore sensibile.

Programma operativo: i) Predisporre il sistema (valvole) per la fase di "carica"; ii) Circolare riscaldando l'olio dalla temperatura ambiente fino a 200°C per **1 ora**; iii) Caricare il sistema circolando l'olio alla temperatura costante di circa 200°C per **10 ore** al fine di pre-riscaldare il sistema e la sezione di prova.

- **Fase di carico (200°C – 280°C)**

Il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) è portato dalla temperatura iniziale di 200°C a quella massima di 280°C. Il calore trasmesso sarà accumulato sia come calore sensibile che come calore latente.

Programma operativo: i) Circolare riscaldando l'olio dalla temperatura nominale di 200°C fino a quella di 280°C per **1 ora**; ii) Caricare il sistema circolando l'olio alla temperatura costante di circa 280°C per **8 ore** al fine di caricare il sistema e la sezione di prova.

- **Fase di scarico (280°C – 150°C)**

Il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) è portato dalla temperatura massima di 280°C iniziale a quella di 150°C. Il calore sarà recuperato sia come calore sensibile che come calore latente.

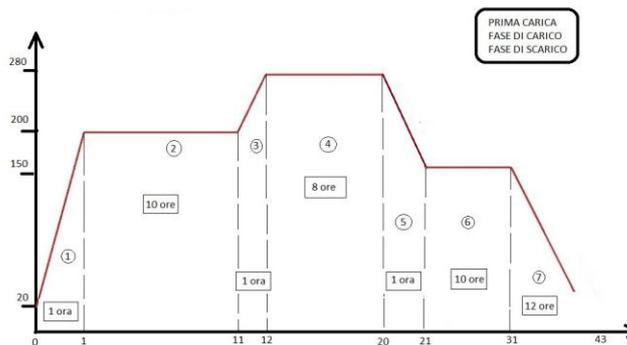
Programma operativo: i) Predisporre il sistema (valvole) per la fase di “scarica”, ovvero invertire il flusso dell’olio; ii) Circolare raffreddando l’olio dalla temperatura di 280°C fino a 150°C per **1 ora**; iii) Scaricare il sistema circolando l’olio alla temperatura costante di circa 200°C per **10 ore** al fine di scaricare il sistema e la sezione di prova.

- **Raffreddamento naturale (150°C – 20°C)**

Il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) è portato dalla temperatura di 150°C a quella ambiente fermando la circolazione dell’olio. Le temperature del sistema si ridurranno in ragione delle perdite di calore del sistema.

Programma operativo: i) Fermare la circolazione dell’olio nel sistema; ii) Lasciare raffreddare il sistema in modo naturale per circa **12 ore**.

In **Figura 2** è riportato il grafico dell’andamento della temperatura dell’olio, così come programmato sul termocristato (julabo), per l’intero ciclo di prova comprendente le quattro fasi precedentemente descritte. In deroga a tale schema, nella Prova 1.1 la temperatura di scarico del TES è stata imposta a 200°C invece dei 150°C previsti.



**Figura 2- Programmazione della temperatura del termocristato (Julabo)**

### 2.1.3 Pesatura degli accumulatori

Al fine di valutare l’entità del calore latente relativo al mezzo di accumulo presente nel TES si è effettuata una misura del suo peso. Ad una estremità di ciascun elemento di accumulo è presente un tappo rimovibile, attraverso il quale si è caricato il mezzo di accumulo prescelto (Il PCM base – sali solari - o il PCM con nanoparticelle – NPs). In tal modo si sono realizzate quattro terne di elementi (**Figura 3**), da montare alternativamente sulla sezione di prova, secondo lo schema di **Tabella 2**. Il PCM utilizzato è il “sale solare” (NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>-67/33%wt) con un punto di inizio solidificazione di circa 239 °C (**Tabella 3**).



Figura 3- Fasi di riempimento di una terna di accumulatori elementari coibentati contenenti PCM

Tabella 2 – Numero di elementi di accumulo realizzati suddivisi per tipologia

Numero elementi di accumulo	Con PCM Base	Con PCM e NPS	Totale
Con tubo liscio	3	3	6
Con tubo alettato	3	3	6
Totale	6	6	12

Tabella 3 – Composizione del “sale solare” utilizzato per riempire gli accumulatori

	% peso	% mol	% peso equiv. come nitrati	% molare equiv. come nitrati	rapporto peso NaNO <sub>3</sub> /KNO <sub>3</sub>
Na <sup>+</sup>	18.9	36.0	67.5	71.1	2.1
K <sup>+</sup>	13.0	14.6	32.5	28.9	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1.5	1.4	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	67.9	48.0	-	-	-

Gli accumulatori elementari sono stati sottoposti a misura del peso sia prima che dopo il riempimento per determinare la quantità esatta di PCM da introdurre (Tabella 4): questa è risultata essere di circa 3 kg, come previsto dal progetto degli stessi.

Tabella 4 – Misura del peso degli accumulatori

Peso (kg)	PCM base					
	Con tubo liscio			Con tubo alettato		
	AL01*	AL02	AL03	AA01*	AA02	AA03
A vuoto	11.0	8.7	8.8	11.5	9.8	10.0
Con Sali	13.9	11.7	11.8	14.0	12.7	12.8
Sali caricati	2.9	3.0	3.0	2.5	2.9	2.8
Peso (kg)	NFPCM					
	Con tubo liscio			Con tubo alettato		
	AL01*	AL02	AL03	AA01*	AA02	AA03
A vuoto	10.5	8.6	9.3	11.0	9.5	10.0
Con Sali	13.6	11.6	12.6	13.9	12.4	13.0
Sali caricati	3.1	3.0	3.3	2.9	2.8	3.0

(\*) il primo elemento (“01”) di ogni terna contiene dei pozzetti per termocoppie

Le misure effettuate confermano, come previsto, la presenza di circa 3kg di PCM o NFPCM all’interno di ciascun accumulatore elementare. Tale quantità consente di accumulare circa 90 Wh, per il PCM, o 105 Wh per il NFPCM, di calore latente in ciascun LHTES, nel caso di sua completa fusione.

### 2.1.4 Acquisizione e posizionamento termocoppie

L'acquisizione delle temperature per l'impianto ATES avviene tramite il programma *LabView* con lo schema rappresentato in **Figura 4**. Vengono misurate la temperatura ambiente, la temperatura all'esterno del TES, le temperature di ingresso ed uscita dagli accumulatori e dal Julabo. Sulla linea di mandata è anche presente un misuratore di portata volumetrica.

Sono anche presenti 9 termocoppie interne al primo TES elementare di ciascuna linea di prova, disposte su tre piani (uno superiore a 5 cm dal tappo, uno mediano e l'altro inferiori a 5 cm dal fondo) e in tre posizioni radiali (una interna prossima al tubo, una mediana ed una esterna prossima al vessel), come mostrato in **Figura 5**.

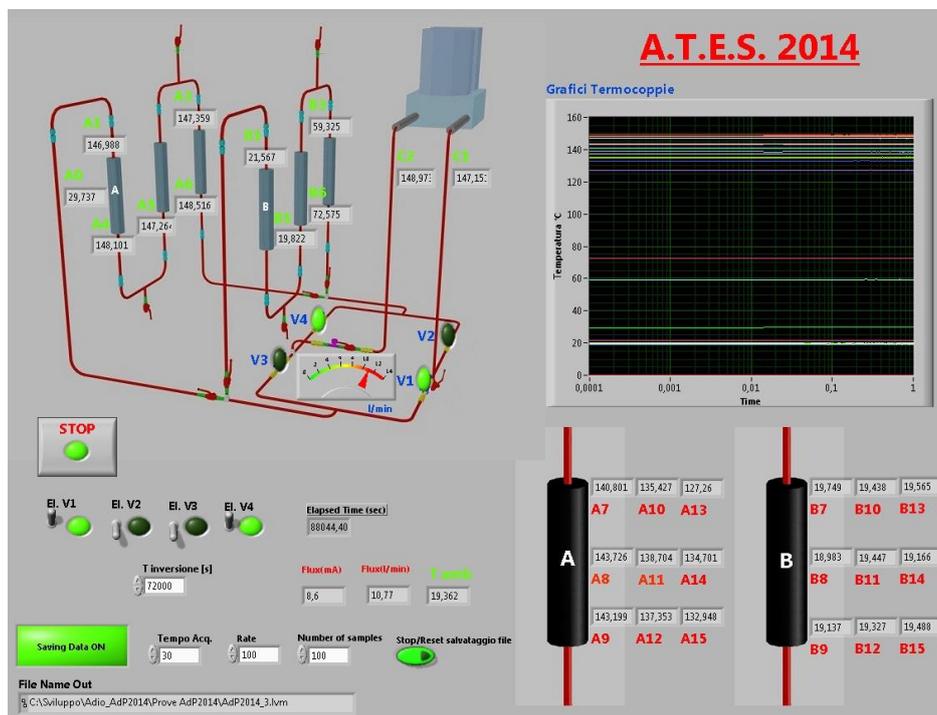


Figura 4 - schermata di LabView con disposizione dei punti di misura

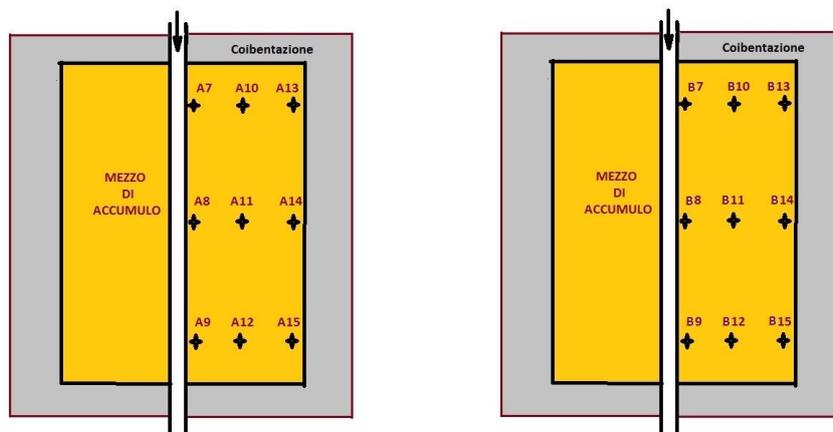


Figura 5 - schema disposizione termocoppie all'interno del TES elementare strumentato (per linea A e B)

### 2.1.5 Olio diatermico

L'olio diatermico impiegato è il Therminol66 le cui caratteristiche, in funzione della temperatura sono le seguenti:

$$\begin{aligned}
 \text{Densità} & : \quad \rho_{HTF} = 1020.62 - 0.614254 * T - 0.000321 * T^2 & (\text{kg/m}^3) \\
 \text{Calore specifico} & : \quad c_{p,HTF} = 1496.0 + 3.313 * T + 0.0008970785 * T^2 & (\text{J/kg.K}) \\
 \text{Conducibilità} & : \quad k_{HTF} = 0.118294 - 0.000033 * T - 0.00000015 * T^2 & (\text{W/m.K}) \\
 \text{Viscosità din.} & : \quad \nu_{HTF} = \exp\left(\frac{560.}{T + 60} - 2.38\right) & (\text{mPa.s})
 \end{aligned}$$

### 2.1.6 Condizioni fluidodinamiche

#### 2.1.6.1 Portata e velocità

Attraverso un flussimetro montato sulla linea di mandata dell'impianto ATES viene misurata la portata volumetrica ( $dV/dt$ ) del fluido termovettore. Tale portata varia da un minimo di 3 l/min (fondo scala) ad un massimo che si aggira intorno ai 10-11 l/min. Da tale portata, conoscendo la densità del fluido e l'area di passaggio del tubo è possibile calcolare la portata massica e la velocità del fluido stesso:

$$\begin{aligned}
 dm/dt & = dV/dt * \rho_{HTF} \quad (\text{kg/sec}) & \quad v_{HTF} & = (dV/dt) / A_{tubo} \quad (\text{m/sec})
 \end{aligned}$$

Nelle prove eseguite è possibile vedere come la portata massica rimanga sostanzialmente costante durante le singole fasi e sia pari a circa 0.165 kg/sec a 200°C, 0.16 kg/sec a 280°C e 0.17 a 150°C. In perfetta analogia la velocità del fluido sarà di circa 1.2 m/sec a 200°C, 1.25 m/sec a 280°C e 1.15 m/sec a 280°C. In [Figura 6](#) è mostrato l'andamento della portata massica e della velocità del fluido per la Prova 1.2.

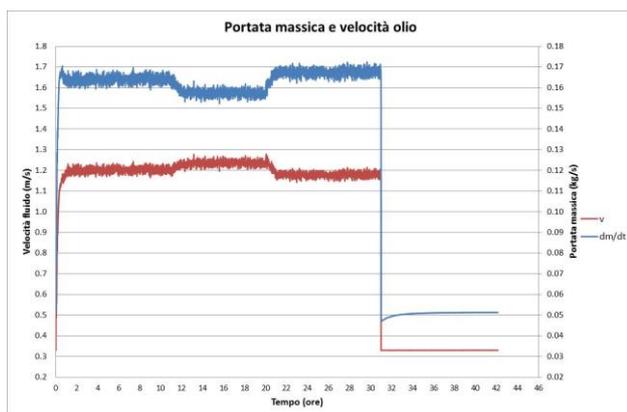


Figura 6 - Prova1.2 : portata e velocità HTF

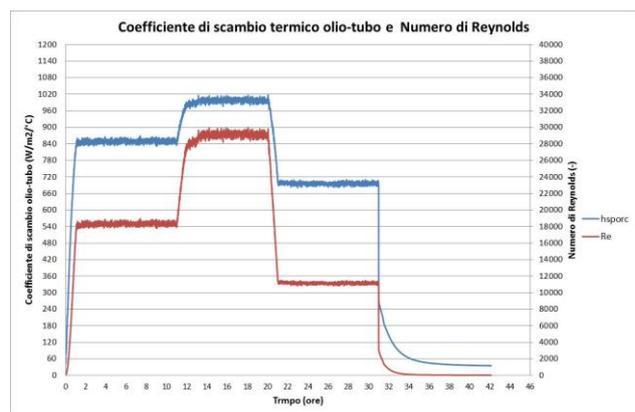


Figura 7 - Prova1.2 : numero di Reynolds e coefficiente di scambio

#### 2.1.6.2 Numero di Reynolds e coefficiente di scambio

Partendo dai dati precedenti e dalle caratteristiche del circuito di prova è possibile determinare sia il numero di Reynolds che il coefficiente di scambio termico fluido-parete tubo. Per quest'ultimo è stata considerato un fattore di sporco di  $1.72E-4 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ . Il numero di Reynolds, durante la fase operativa vera e propria, risulta essere compreso tra 11000 e 30000. Tale valore ci assicura la presenza di un flusso interno di tipo turbolento e quindi di un ottimo scambio termico tra fluido e parete del tubo.

Infatti, tale coefficiente mostra dei valori piuttosto elevati e compresi tra 700 W/m<sup>2</sup>.°C (a 150°C) e 1000 W/m<sup>2</sup>.°C (a 280°C). In tali condizioni le temperature di parete e del fluido possono essere considerate sufficientemente prossime e quindi confuse.

### 2.1.7 Temperatura del termo-criostato ed dell'ambiente

La temperatura di mandata (C2) del termo-criostato segue con sufficiente precisione quanto programmato per la prova. Quella di ritorno risulta essere, nel campo operativo normale, inferiore a quella di mandata di circa 2-4°C, a seconda del livello di temperatura, con tre eccezioni:

- Durante la salita a 200°C del primo riscaldamento: il PCM ed i materiali di contenimento e di isolamento si debbono riscaldare e quindi assorbono più calore (max 6.5°C);
- Durante la salita a 280°C ed all'inizio dello stazionario della fase di carica: oltre il normale riscaldamento in questa fase inizia la fusione del PCM che assorbe importanti quantità di calore (max 5°C);
- Durante la discesa a 150°C ed all'inizio dello stazionario della fase di scarica: in questa fase avviene la solidificazione del PCM, oltre il normale raffreddamento dei materiali (min -2.5°C).

La temperatura ambiente registrata varia dai 19-21°C, durante il giorno, ai 12-17°C, durante la notte. Invece, la temperatura esterna alla coibentazione (A0) risente sia delle condizioni ambientali che del programma di riscaldamento/raffreddamento degli accumulatori impostato: essa raggiunge un massimo di 35- 40°C.

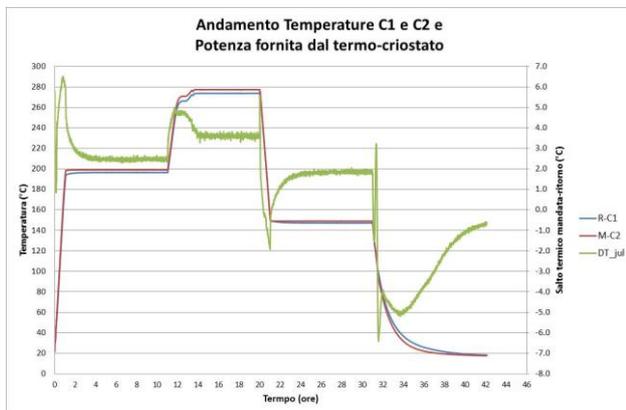


Figura 8 - Prova1.2 : andamento temperature mandata e ritorno del termo-criostato

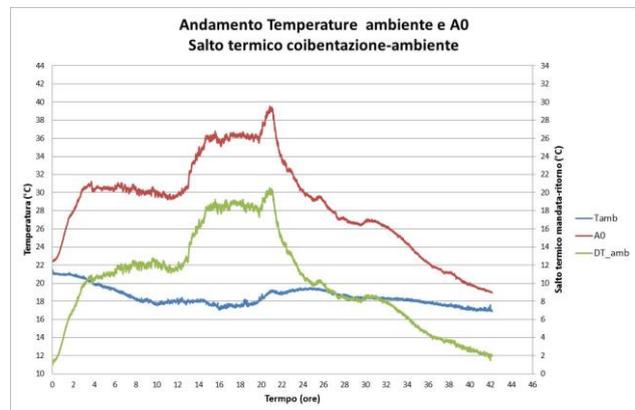


Figura 9 - Prova1.2 : andamento temperature ambiente ed esterno coibentazione

### 2.1.8 Temperature del sistema di accumulo

Le termocoppie posizionate nella sezione di accumulo termico del circuito sono le: A1, A3, A5, A6 (o B1, B3, B5, B6 nel caso si utilizzi della linea B). In **Figura 10** sono rappresentate le temperature di ingresso (A1) e di uscita (A6) del TES ed il salto termico relativo alla Prova 1.2. Si può notare che, in questa e nelle altre prove, l'abbassamento di temperatura sia di circa 2°C durante lo stazionario, dovuti sostanzialmente alle perdite termiche del sistema, con alcuni picchi positivi (2-4°C) o negativi (1-2°C), conseguenti alle fasi di assorbimento o cessione del calore dal sistema.

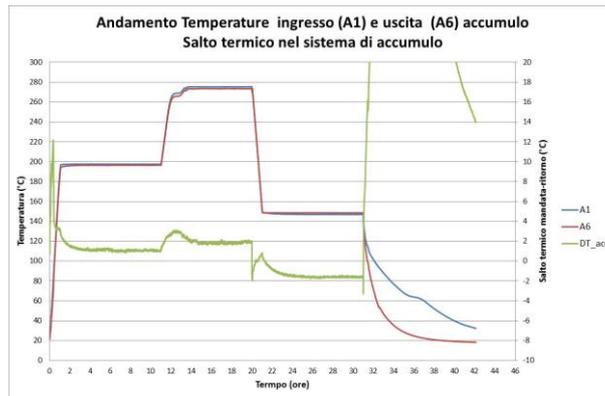


Figura 10 - Prova1.2 : andamento temperature ingresso-uscita dal TES e relativo salto termico

### 2.1.9 Temperature nel mezzo di accumulatore

Nel primo accumulatore di ciascuna linea sono state inserite, come già descritto, nove termocoppie. Nella **Figura 11** sono riportati gli andamenti nel tempo delle temperature della sezione mediana (A8, A11 e A14, o B8, B11 e B14) all'interno del mezzo di accumulatore per le prove 1.2, 2.2, 3.2 e 4.2.

Le figure in alto sono relative agli accumulatori contenenti il PCM mentre quelle in basso al NFPCM. Invece, le figure a sinistra sono relative agli accumulatori con tubi lisci mentre quelle a destra a tubi alettati.

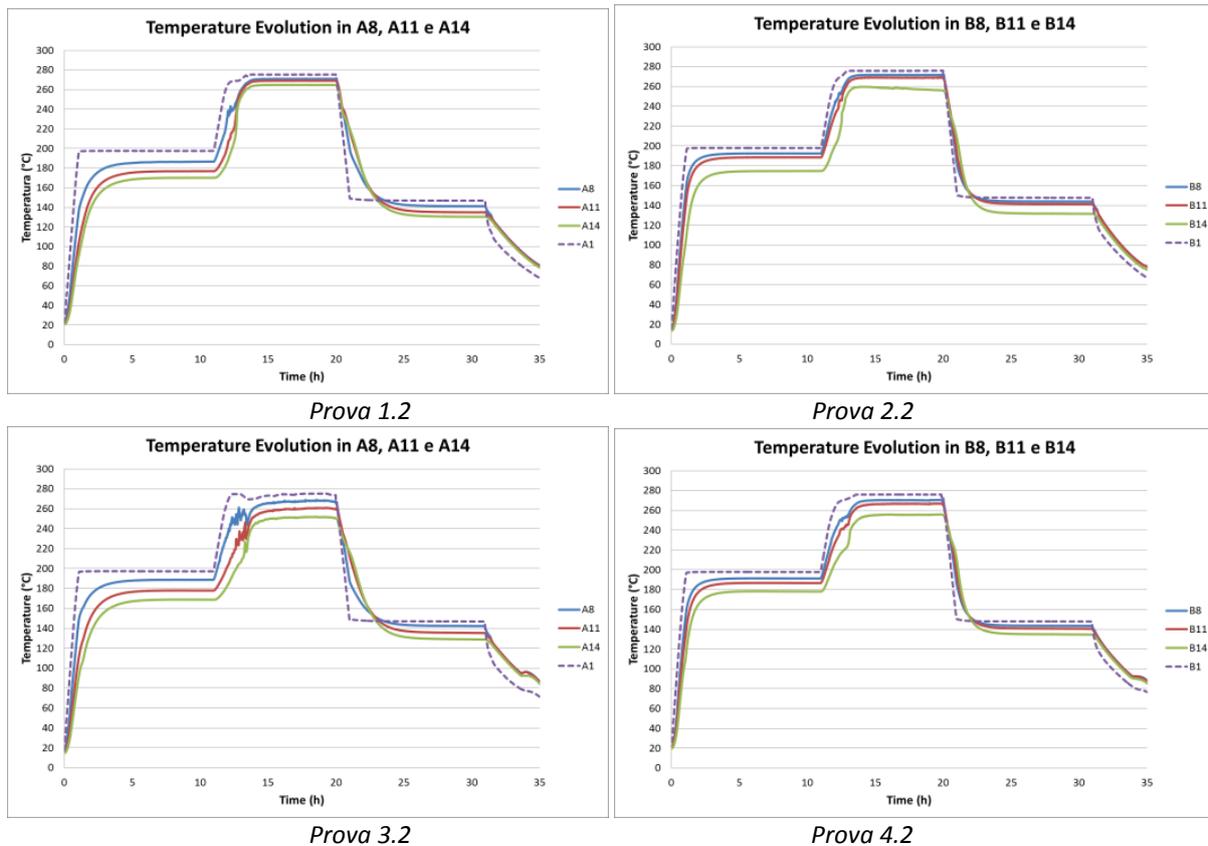
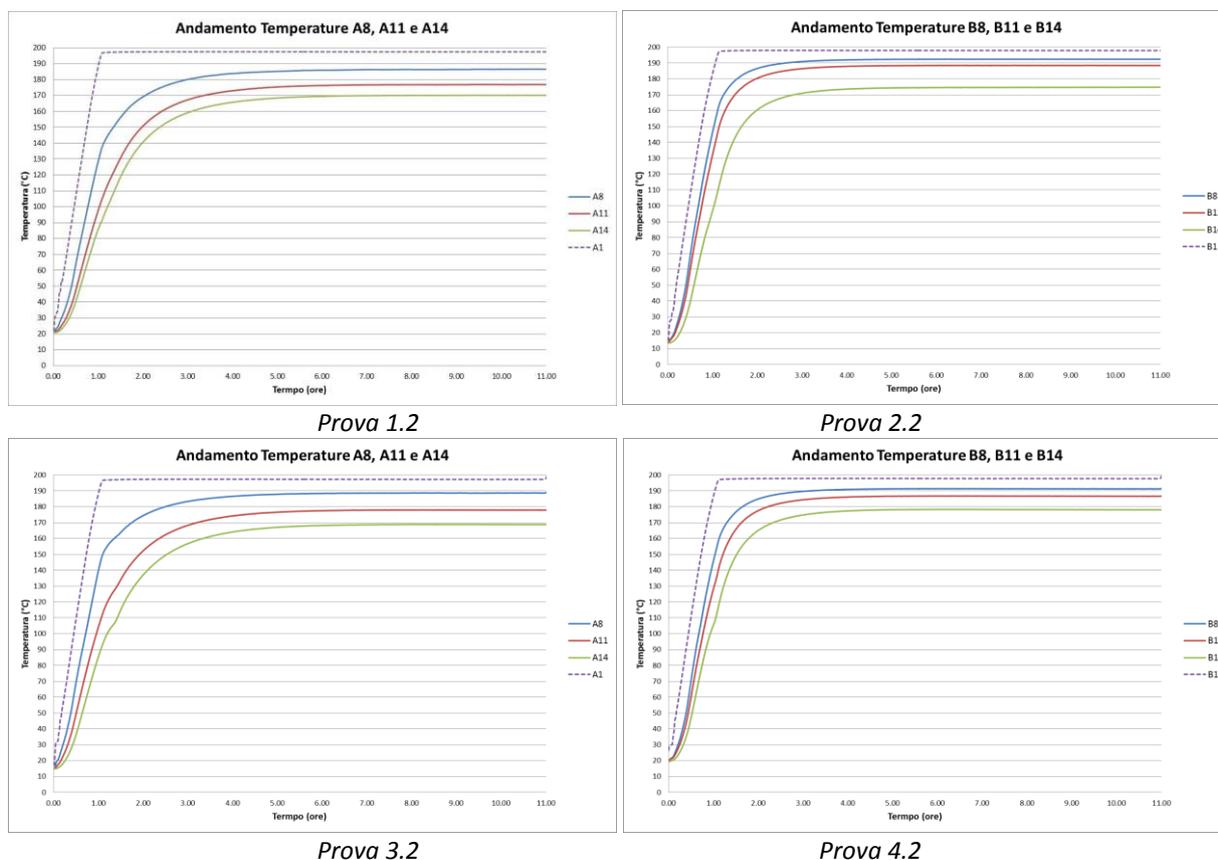


Figura 11 – Evoluzione delle temperature nella sezione mediana del mezzo di accumulatore per la prova completa

Nelle figure successive questi stessi andamenti saranno mostrati nel dettaglio per le fasi di riscaldamento, carico e scarico.

**Riscaldamento (Tamb – 200°C)**



**Figura 12 – Evoluzione delle temperature nella sezione mediana del mezzo di accumulo per la fase di riscaldamento**

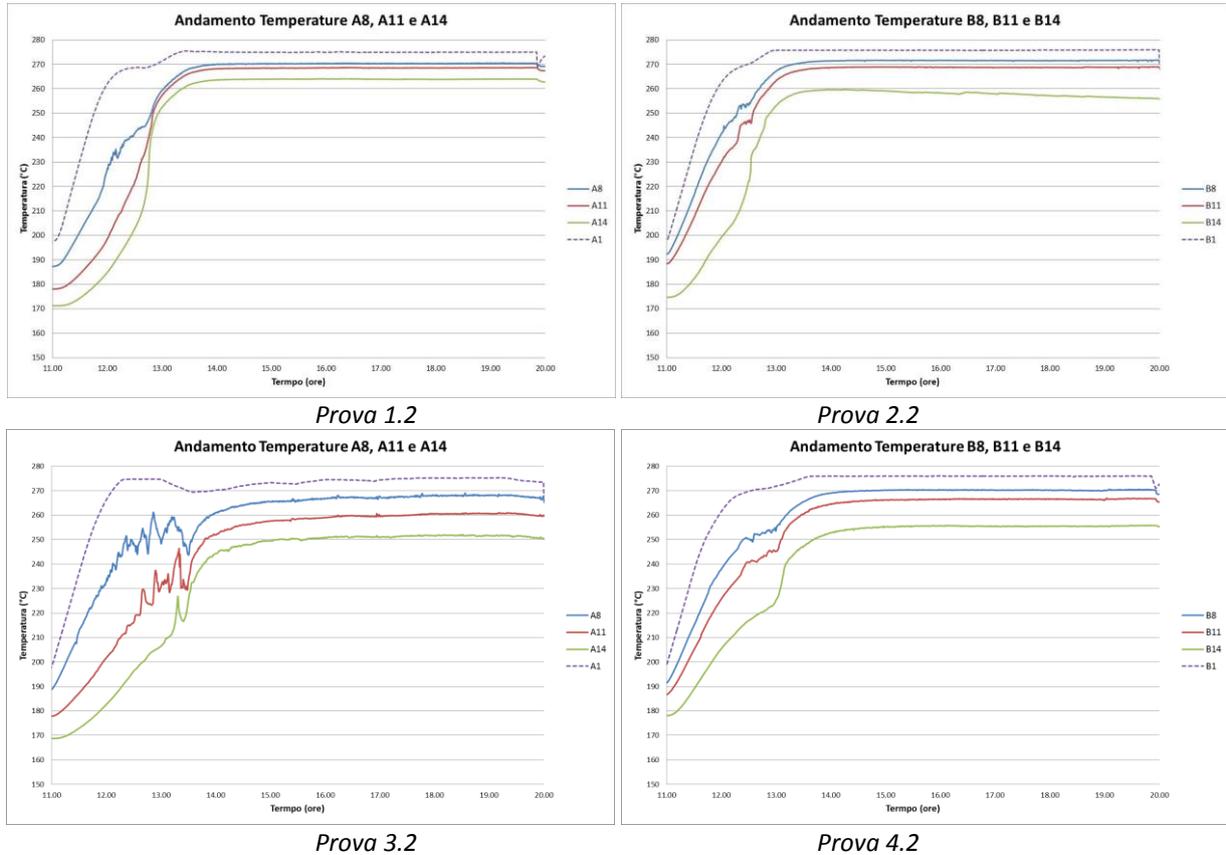
Durante la prima parte del riscaldamento la portata di olio si incrementa gradualmente con l’aumentare della temperatura e, con essa, migliora anche lo scambio termico tra olio e parete interna del tubo.

Le temperature all’interno del TES elementare crescono e raggiungono uno stato stazionario con una velocità differente a seconda del tipo di accumulo. Nel caso di accumulo a tubo liscio i tempi di riscaldamento sono di circa 6.5 ore, invece, se l’accumulo è a tubi alettati, questi si riducono a circa 4.5 ore.

La differenza dei tempi di riscaldamento è chiaramente dovuta all’azione di promozione della conducibilità termica (diffusività) esercitata dalle alette. Tale azione si nota anche sui valori delle temperature: queste risultano essere di circa 10-30°C più basse di quella dell’olio nel caso di tubi lisci e di 10-20°C per quelli alettati.

Tra il PCM ed il NFPCM la differenza tra le curve delle temperature sono minime anche se si notano dei valori maggiori per il NFPCM relativamente alla termocoppia A1 (lato parete tubo) e B14 (lato vessel). Ciò potrebbe essere indice di un migliore scambio termico tra mezzo di accumulo e superficie di scambio (tubo o alette) conseguenza della maggiore effusività del NFPCM rispetto al PCM.

## Fase di carico (200°C – 280°C)



**Figura 13 – Evoluzione delle temperature nella sezione mediana del mezzo di accumulo per la fase di carico**

Il transitorio della fase di carico del sistema si conclude dopo circa 3 ore dall'avvio in tutti i casi ad eccezione di quello a tubi lisci e NFPCM, per il quale il tempo di carico è di circa 4 ore. Ferma restando l'azione di promozione della conducibilità esercitata dalle alette, risulta "anomala" l'accelerazione che si ha nel caso di tubo liscio e PCM, soprattutto in corrispondenza delle temperature corrispondenti al cambio di fase.

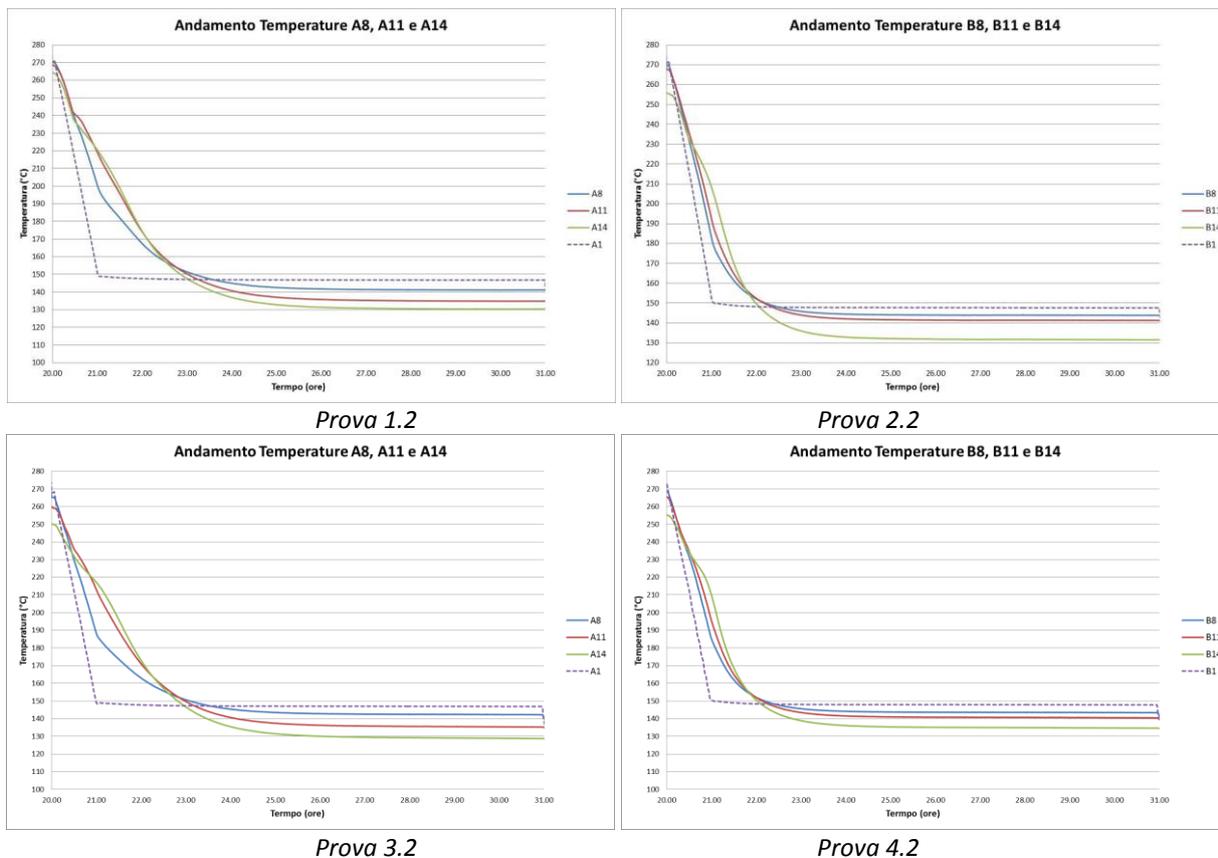
Il cambio di fase, che dovrebbe avvenire tra i 220°C ed i 240°C risulta abbastanza evidente sulla base dei cambi di pendenza delle curve.

Nel caso di tubo liscio e PCM, sono molto evidenti, attorno tra la 12ma e 13ma ora, gli innalzamenti rapidi della temperatura conseguenza dell'innesco, in fase liquida, di moti convettivi nel mezzo di accumulo che trasmettono rapidamente in calore verso gli strati più interni.

A conferma di ciò il fatto che le temperature delle termocoppie interne e quelle mediane siano molto vicine. Tale comportamento è, invece, molto meno evidente nel caso di tubo liscio e NFPCM, probabilmente a causa della maggiore viscosità del mezzo di accumulo che ne impedisce l'innesco.

Anche nei casi di tubi alettati gli effetti correlati all'innesco di moti convettivi nel mezzo di accumulo (salita rapida di temperatura) risultano essere poco evidenti e limitati alle sole termocoppie più esterne, in quanto la presenza delle alette ne blocca la formazione.

**Fase di scarico (280°C – 150°C)**



**Figura 14 – Evoluzione delle temperature nella sezione mediana del mezzo di accumulo per la fase di scarico**

Il transitorio della fase di scarico del sistema si conclude dopo circa 7 ore dall’avvio per gli accumulatori a tubi lisci e 6 ore per quelli alettati.

Questo transitorio è di fatto più lungo di quello relativo alla fase di carico: ciò può essere dovuto sia alla assenza sostanziale di moti convettivi che facilitano lo scambio termico e, contemporaneamente, alla solidificazione del mezzo di accumulo in vicinanza della parete che, al contrario, lo danneggia.

Anche in questo caso il cambiamento di fase non risulta essere molto evidente ma si intuisce dai cambi di pendenza delle curve intorno alla 21ma ora. In quel momento è evidente l’inversione del gradiente termico tra interno ed esterno (le termocoppie interne sono più fredde di quelle esterne) che però si ripristina circa 2 ore dopo.

### 2.1.10 Potenza richiesta al termo-criostato e dispersa dai soli accumulatori

Dalle temperature misurate in C1 e C2 e dalla misura di portata è possibile valutare la potenza termica assorbita dal circuito di misura, accumulatori compresi:

$$P_{jul} = dm/dt * c_{p,HTF} * (T_{C2} - T_{C1}) \quad (W)$$

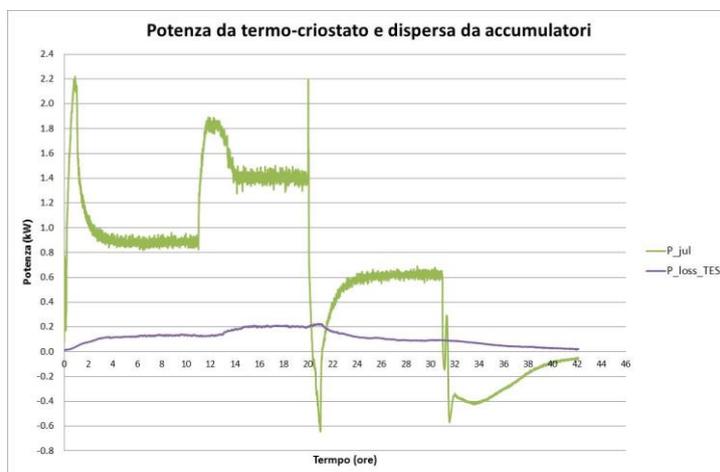
Tale potenza risulta essere di circa 900 W nello stazionario a 200°C, con un picco di 2.2 nella salita in temperatura. A 280°, la potenza assorbita in stazionario è di circa 1.4 kW, con un picco di 1.9 kW nella salita in temperatura. Infine a 150°, la potenza assorbita in stazionario è di circa 600 W, con un picco in assorbimento di 700 W durante la discesa della temperatura.

Invece, dalle temperature in A0 e ambiente, sapendo che la superficie esterna del sistema di coibentazione di un accumulatore è di circa 0.735 m<sup>2</sup> (gli accumulatori sono 3) ed ipotizzando un coefficiente di scambio pari a 5 W/m<sup>2</sup>.°C (aria sostanzialmente ferma), è possibile valutare la potenza termica dispersa da sistema di accumulatori:

$$P_{loss\_TES} = 3 * [h_{amb} * A_{TES} * (T_{A0} - T_{amb})] \quad (W)$$

la potenza dispersa da TES è allora valutabile in massimo 200W.

In **Figura 15** sono mostrati, a titolo esemplificativo, gli andamenti della potenza fornita e di quella dispersa durante la Prova 1.2.



**Figura 15 - Potenza assorbita dall'impianto e dispersa dagli accumulatori per la Prova 1.2**

### 2.1.11 Potenza assorbita dal TES e potenza persa verso l'ambiente

La potenza termica assorbita dal TES può essere valutata attraverso la seguente relazione:

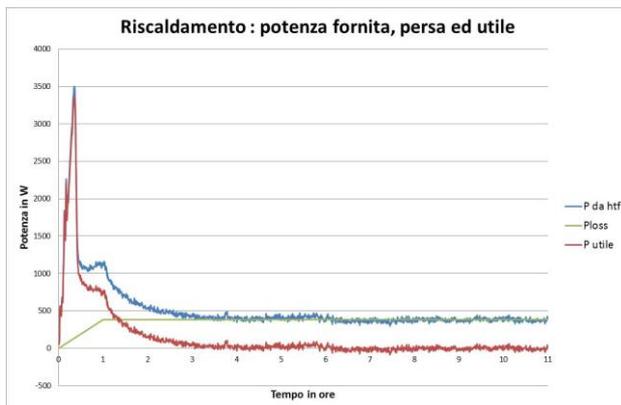
$$P_{TES} = dm/dt * c_{p,HIF} * (T_{A1} - T_{A6}) \quad (W)$$

Durante la fase di riscaldamento, la potenza assorbita dal TES ha l'andamento mostrato in **Figura 16**, prendendo in esame la Prova 1.2. Come si può vedere, dopo un primo picco, la potenza assorbita va diminuendo fino ad assumere un valore costante al raggiungimento di uno stato stazionario. Questo valore (stazionario) rappresenta la potenza dispersa dal TES alla temperatura di 200°C.

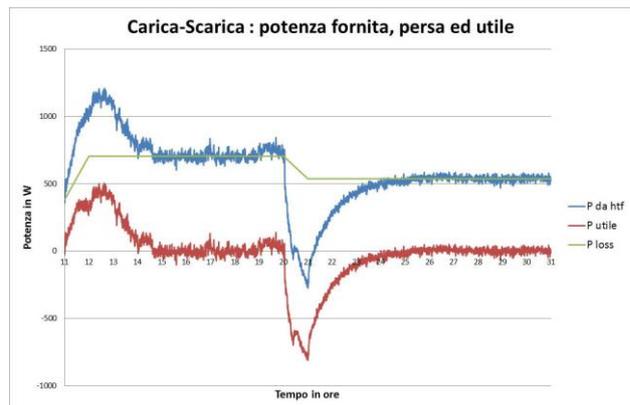
Se togliamo queste perdite dalla potenza assorbita otteniamo la potenza utile per il riscaldamento del TES.

$$P_{STO} = P_{TES} - P_{LOSS} \quad (W)$$

Integrando quest'ultima nel tempo si ottiene l'energia immagazzinata in questa fase.



**Figura 16 - Prova1.2: potenza fornita persa ed utile**



**Figura 17 - Prova1.2: potenza fornita persa ed utile**

Se applichiamo lo stesso procedimento precedente alle fasi di carico e scarico del TES otteniamo delle curve analoghe (**Figura 17**).

Dalla analisi delle curve mostrate in precedenza è possibile anche valutare i tempi necessari al riscaldamento, ad il carico ed allo scarico del sistema di accumulo provato.

### 2.1.12 Risultati e discussione

In questo paragrafo sono riportati i principali risultati sperimentali ottenuti utilizzando l'impianto Enea denominato ATES (Advanced Thermal Energy Storage) per analizzare le caratteristiche termiche di una serie di accumulatori elementari.

L'elaborazione dei dati è stata fatta secondo quanto specificato in [1].

I dati riportati fanno riferimento alla campagna sperimentale in cui si sono testati 3 accumulatori elementari collegati in serie e costituiti da uno scambiatore a singolo tubo liscio o alettato e da una materiale a cambiamento di fase, posto lato mantello, costituito da semplici "Sali solari" (nitrati di sodio e potassio - PCM) con temperatura di fusione di circa 225°C (prove 1 e 2) e dallo stesso PCM con aggiunta di nanoparticelle (silica e allumina - NFPCM) con temperatura di fusione di circa 222°C (prove 3 e 4).

In Tabella 5 e Tabella 6 è mostrato il riassunto dei principali risultati ottenuti durante la campagna sperimentale.

**Tabella 5 – Riassunto risultati sperimentali – Prove 1 e 2 (PCM)**

<b>ATES</b>	<b>Prova/ unità</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>
<b>Riscaldamento</b>							
<i>Temperatura</i>	<b>°C</b>	200	200	200	200	200	200
<i>Tempo di carico/scarico</i>	<b>ore</b>	5-6	5-6	6	2.5	3	2.5
<i>Potenza persa dal TES</i>	<b>W</b>	352	383	426	579	420	277
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	<b>Wh</b>	1800	1754	1980	1978	2306	1921
<b>Carico</b>							
<i>Temperatura</i>	<b>°C</b>	280	280	280	280	280	280
<i>Tempo di carico/scarico</i>	<b>ore</b>	4	4	3	4.5	3.5	3
<i>Potenza persa dal TES</i>	<b>W</b>	694	705	789	762	517	621
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	<b>Wh</b>	870	922	698	1561	1260	816
<b>Scarico</b>							
<i>Temperatura</i>	<b>°C</b>	200	150	150	150	150	150
<i>Tempo di carico/scarico</i>	<b>ore</b>	7	6	4	4.5	4	3.5
<i>Potenza persa dal TES</i>	<b>W</b>	663	537	538	281	444	359
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	<b>Wh</b>	912	1268	1180	1155	1144	1888
<b>Capacità termica di progetto</b>							
<b>Capacità termica di progetto</b>	<b>Wh</b>	912	1268	1180	1155	1144	1888
<b>Tempo medio di completo rilascio</b>	<b>ore</b>	7	6	4	4.5	4	3.5
<b>Potenza media di progetto</b>	<b>W</b>	135	215	310	236	293	497
<b>Efficienza termica</b>	<b>%</b>	104	137	169	74	91	231

**Tabella 6 – Riassunto risultati sperimentali – Prove 3 e 4 (NFPCM)**

<b>ATES</b>	<b>Prova/ unità</b>	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>
<b>Riscaldamento</b>					
<i>Temperatura</i>	<b>°C</b>	200	200	200	200
<i>Tempo di carico/scarico</i>	<b>ore</b>	5-6	4	4	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	<b>W</b>	381	269	306	395
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	<b>Wh</b>	1637	2023	1823	1846
<b>Carico</b>					
<i>Temperatura</i>	<b>°C</b>	280	280	280	280
<i>Tempo di carico/scarico</i>	<b>ore</b>	7-8	6	5	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	<b>W</b>	489	536	553	678
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	<b>Wh</b>	1145	683	977	803
<b>Scarico</b>					
<i>Temperatura</i>	<b>°C</b>	150	150	150	150
<i>Tempo di carico/scarico</i>	<b>ore</b>	6	7	4	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	<b>W</b>	517	491	265	250
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	<b>Wh</b>	1072	1091	1209	1202
<b>Capacità termica di progetto</b>					
	<b>Wh</b>	1072	1091	1209	1202
<b>Tempo medio di completo rilascio</b>					
	<b>ore</b>	6	7	4	4
<b>Potenza media di progetto</b>					
	<b>W</b>	219	158	310	308
<b>Efficienza termica</b>					
	<b>%</b>	93.7	160	123	149

Dalla analisi dei risultati riportati si possono fare le seguenti considerazioni:

- Nella fase di riscaldamento del TES, dove è predominante il ruolo della diffusività termica, i tempi di riscaldamento risultano essere in generale più contenuti negli accumulatori con tubi alettati. In tal caso è evidente il ruolo di promozione della conducibilità termica, e quindi della diffusività, esercitato dalle alette;
- Nella fase di carico gli accumulatori con tubi alettati (Prove 2 e 4) hanno tempi di carico sostanzialmente comparabili (3-4 ore), indipendentemente dal mezzo di accumulo. Lo scambio termico è principalmente di tipo conduttivo.
- La fase di carico della prova con tubo liscio e PCM ha tempi confrontabili con quelli dei TES con tubi alettati. In questa fase l'azione promotrice esercitata dalle alette è controbilanciata dall'innesco di moti convettivi nel caso di tubo liscio (Prova1). Lo scambio termico è prevalente di tipo convettivo;
- La fase di carico della prova con tubo liscio e NFPCM (Prova 3) è molto più lenta (6 ore, circa il 30% in più), manifestando un comportamento puramente conduttivo all'interno del liquido, probabilmente dovuto alla maggiore viscosità del mezzo.
- Durante la fase di carico il mezzo di accumulo fonde completamente assorbendo, sotto forma di calore latente, circa 270Wh nel caso di PCM e 315Wh in quello di NFPCM. Naturalmente, questo calore è completamente restituito durante la fase di scarico;
- Nei casi con tubi alettati, la fase di scarico è più rapida in quanto l'azione ritardante (isolante) dovuta alla solidificazione dei sali sulla parete di scambio termico è parzialmente compensata dalla azione delle alette;
- L'azione delle alette è evidente, in tutte le fasi, anche dalla quasi sovrapposizione degli andamenti di temperatura tra termocoppie interne e medie e dalla ridotta differenza con quelle esterne;
- Nella fase di riscaldamento le perdite del sistema con tubi alettati sono maggiori proprio a causa del migliore diffusività termica del mezzo di accumulo ovvero della temperatura media del sistema

maggiore. Queste risultano poi essere sostanzialmente confrontabili nella fase di carico e addirittura inferiori in quella di scarico. In quest'ultimo caso è ancora evidente l'effetto della maggiore conducibilità che tende a raffreddare prima la parete esterna del TES;

- L'energia termica rilasciata nella fase di scarico è superiore a quella caricata poiché comprende anche la quota di calore sensibile dovuta alla differenza di temperatura del TES tra inizio della carica (200°C) e fine della scarica (150°C). Inoltre, parte di questa energia non è fornita al fluido termovettore ma all'ambiente esterno sotto forma di perdite;
- La maggiore capacità termica, unita ai minori tempi di scarico, consente al sistema alettato di poter fornire una potenza media di progetto maggiore (circa il 10-30%).
- Dall'analisi dei dati elaborati, il NFPCM conferma rispetto il PCM: un miglioramento in termini di capacità di accumulo (15-20%); una sostanziale invarianza della diffusività termica (trasporto di calore); un evidente miglioramento della capacità di scambio con materiali esterni (effusività termica).

Occorre infine notare che, l'aver voluto favorire lo scambio termico tra olio e tubo di scambio (alte velocità del fluido), ha condotto ad un salto termico tra ingresso ed uscita della linea di accumulatori che è generalmente piuttosto basso e dell'ordine di 1-2 gradi. Con un valore così basso, i bilanci energetici potrebbero essere influenzati dagli eventuali errori associati alle termocoppie utilizzate (tipo K). Inoltre, come prevedibile vista la geometria a tubo singolo adottata, le perdite di calore della sezione di prova risulta essere importanti e disperdono buona parte del calore fornito dal termocriostato. Questi problemi potrebbero essere risolti in futuro sia ricorrendo ad un sistema di rilevazione della temperatura più preciso, sia aumentando il salto termico tra ingresso e uscita del sistema di accumulo (riduzione di portata, sistema TES integrato a tubi multipli).

Maggiori dettagli sulle prove sperimentali possono essere trovati in [8] e [9].

## 2.2 Simulazione numerica del comportamento termodinamico dei sistemi LHTES

### 2.2.1 Introduzione

Nel capitolo precedente sono state mostrate le attività ed i risultati connessi alla sperimentazione del comportamento termico di alcune tipologie di accumulo termico per impianti solari a concentrazione (CSP). In particolare si sono testati quattro tipi di accumulo elementare a calore latente di tipo “tube and shell” costituiti da un tubo liscio od alettato circondato da un mezzo di accumulo costituito da “sali solari” semplici oppure additivati con nanoparticelle di silice ed allumina.

Di seguito, verrà invece descritto lo sviluppo di due **modelli FEM**, uno semplificato (1D) ed uno più complesso (2D), atti a simulare il comportamento termico dei sistemi di accumulo sopra descritti, confrontando i risultati ottenuti con i dati provenienti dalla sperimentazione. Tali modelli si basano sull'ipotesi che il trasferimento di calore avvenga in perfetta simmetria assiale (problema assialsimmetrico). Sono inoltre ritenuti trascurabili eventuali fenomeni convettivi del PCM quando questo è in fase liquida. Più in dettaglio, al fine di modellizzare il comportamento termico del sistema di accumulo termico (TES) elementare sperimentato sull'impianto ATES si è sviluppato un primo modello ad elementi finiti (FEM) semplificato. Si tratta di un modello sostanzialmente 1D (in realtà è un 2D a simmetria sia assiale che verticale). Successivamente, si è sviluppato un modello FEM più complesso, un modello 2D in simmetria assiale, in cui si sono portati in conto gli effetti termici assiali (geometria TES limitata) e la termodinamica dello scambio olio-tubo.

Detti modelli dovranno servire, in una prima fase, ad interpretare i risultati sperimentali e, successivamente, per analizzare nuove soluzioni od effettuare una progettazione preliminare di un sistema di accumulo più complesso.

I casi sottoposti ad analisi 1D e 2D saranno quattro, ovvero:

- TES elementare a “sali solari” e tubo liscio (caso sperimentale 1.2)
- TES elementare a “sali solari” e tubo alettato (caso sperimentale 2.2)
- TES elementare a “sali solari” con nanoparticelle e tubo liscio (caso sperimentale 3.2)
- TES elementare a “sali solari” con nanoparticelle e tubo alettato (caso sperimentale 4.2)

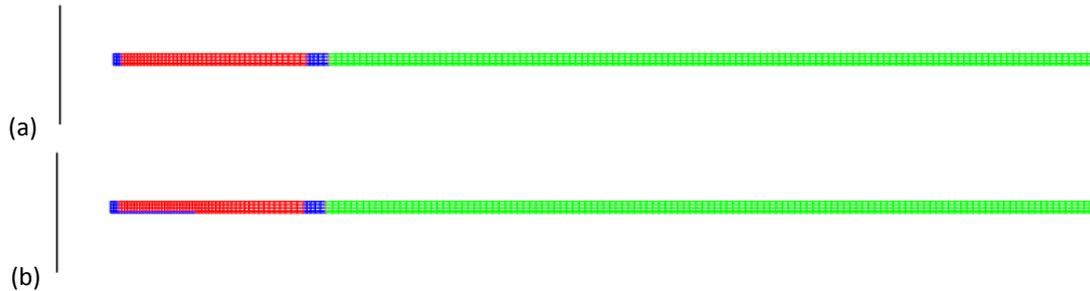
In tale elenco sono stati associati anche i casi sperimentali di riferimento.

I calcoli sono stati effettuati utilizzando un codice non commerciale chiamato **Cast3M** e sviluppato presso il CEA di Saclay (Parigi).

Per il calcolo più complesso (2D), le risorse di calcolo ed il relativo supporto tecnico utilizzato sono state messe a disposizione dalla infrastruttura “**CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing**” e dal suo staff<sup>[13]</sup>. L'infrastruttura “CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing” è finanziata da ENEA e da programmi di ricerca Europei, vedi <http://www.cresco.enea.it/english> per informazione.

### 2.2.2 Geometria

La geometria rappresentata nella simulazione 1D è quella relativa ad una sezione contenente un tubo di scambio alettato, il PCM, il contenitore o vessel e la coibentazione (**Figura 8-b**). Nel caso debba essere trattato un tubo liscio, la geometria relativa alle alette sarà integrata a quella del PCM invece che a quella del tubo (**Figura 8-a**).



**Figura 18- Geometria sezione: (a) con tubo liscio; (b) con tubo alettato**

Invece, nella simulazione 2D, la geometria rappresentata è quella relativa ad un TES elementare contenente un tubo di scambio alettato, il PCM, il contenitore o vessel e la coibentazione, nella sua dimensione effettiva (**Figura 19-b**). Anche qui, nel caso debba essere trattato un tubo liscio, la geometria relativa alle alette sarà integrata a quella del PCM invece che a quella del tubo (**Figura 19-a**).

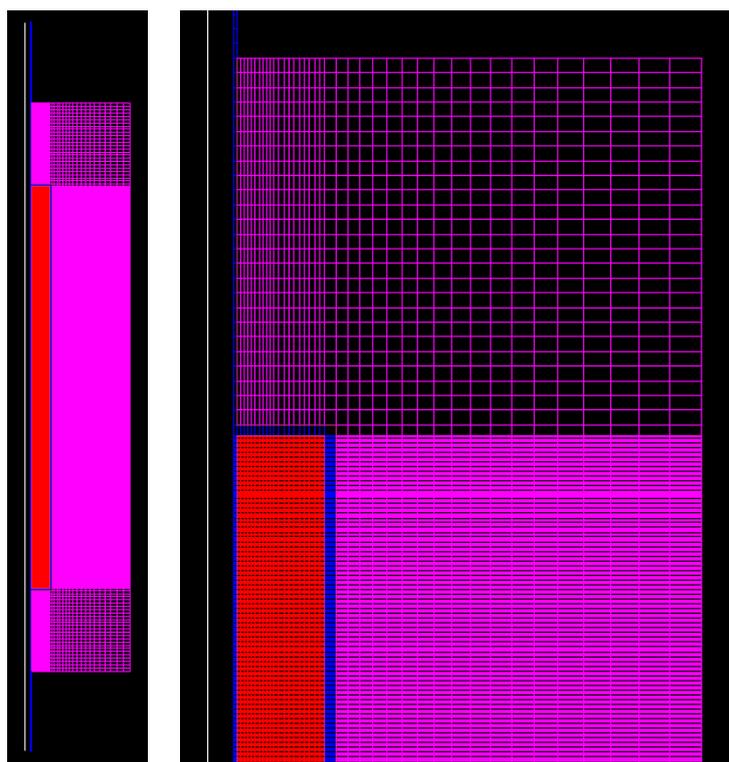
Le dimensioni adottate sono le seguenti:

**Tabella 7 – Dimensioni geometria 1D e 2D**

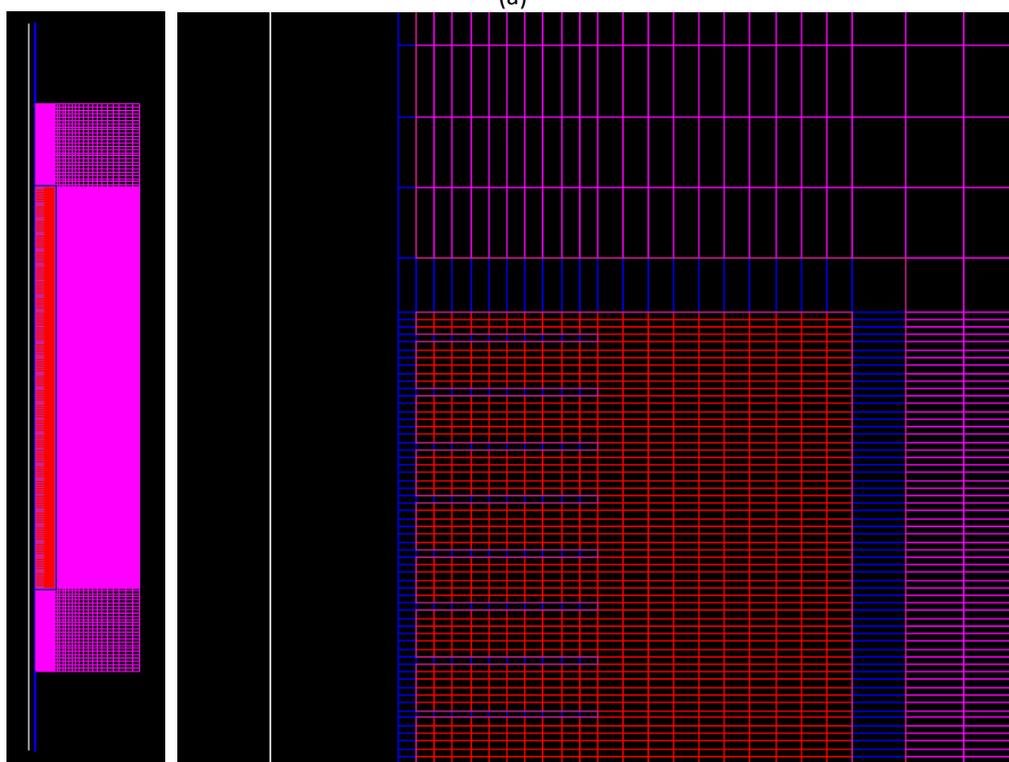
Componente TES	Dimensione	Valore (m)
Tubo acciaio	raggio esterno	8.0E-03
	raggio interno	7.0E-03
	spessore	1.0E-03
	lunghezza interna	0.7 (2D)
	lunghezza parte superiore	0.2 (2D)
	lunghezza parte inferiore	0.2 (2D)
Alette	spessore	4.0E-04
	altezza	1.0E-02
	passo	3.0E-03
Contenitore PCM	raggio esterno	3.5E-02
	raggio interno	3.2E-02
	spessore	3.0E-03
Coibentazione	spessore	0.100
	raggio esterno	0.135
	altezza	1.5E-03 (1D) 0.5 (2D)
TES Completo	altezza sez.	0.7 (2D)

Per il caso 1D, l'altezza complessiva della sezione esaminata è stata presa, per questioni di simmetrie, pari alla metà del passo delle eventuali alette. In tal modo, verrà rappresentata una aletta con solo metà spessore.

Per il caso 2D, la superficie esterna del coibente, che scambia con l'ambiente, è di circa 0.706 m<sup>2</sup>.



(a)



(b)

Figura 19- Geometria TES: (a) con tubo liscio; (b) con tubo alettato

### 2.2.3 Materiali

I materiali definiti nelle simulazioni sono sostanzialmente tre: i) acciaio; ii) PCM; iii) coibentazione.

L'acciaio utilizzato per tubo, alette e contenitore è un AISI 316L, le cui caratteristiche termiche sono riportate in **Tabella 8**.

**Tabella 8 – Caratteristiche termiche acciaio**

Proprietà	Dimensioni	Valore
Densità	kg/m <sup>3</sup>	7800
Capacità termica	J/kg.C	510
Conducibilità	W/m.C	17

Il PCM è costituito dai cosiddetti “sali solari” e sarà presente in due versioni con e senza nanoparticelle (silica ed allumina) aggiunte (1%wt) (**Tabella 9**).

**Tabella 9 – Caratteristiche termiche PCM**

Proprietà	Dimensioni	Valore
<i>Senza nanoparticelle [NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> (60,40)]</i>		
Densità	kg/m <sup>3</sup>	1850
Capacità termica	J/kg.C	1700
Conducibilità	W/m.C	0.70
T fusione	C	225
cal. lat.	J/kg	1.10E+05
<i>Con nanoparticelle [NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> (60,40)+1%wt SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]</i>		
Densità	kg/m <sup>3</sup>	1850
Capacità termica	J/kg.C	2050
Conducibilità	W/m.C	0.9
T fusione	C	222
cal. lat.	J/kg	1.27E+05

Per la coibentazione si è assunto di utilizzare della lana di roccia (**Tabella 10**)

**Tabella 10 – Caratteristiche termiche coibente**

Proprietà	Dimensioni	Valore
Densità	kg/m <sup>3</sup>	96
Capacità termica	J/kg.C	1150
Conducibilità	W/m.C	7.0E-02

Nelle simulazioni più complesse (2D), sarà considerata anche la presenza di olio diatermico come fluido termovettore (HTF). L'olio diatermico utilizzato è il Therminol66 (**Tabella 11**).

**Tabella 11 – Caratteristiche termodinamiche HTF**

Proprietà	Dimensioni	Valore
Densità	kg/m <sup>3</sup>	850
Capacità termica	J/kg.C	2300
Conducibilità	W/m.C	0.1
velocità	m/s	1.2
Portata massica	kg/s	0.157
Sezione tubo	m <sup>2</sup>	1.54E-04

Per la analisi FEM 1D, nel caso di tubo liscio avremo un volume del PCM di  $3.01E-03m^3/m$  , una massa del PCM di  $5.58kg/m$ , una massa di acciaio di  $5.29kg/m$  ed una di coibente di  $5.13kg/m$  per un totale di  $16kg/m$ . Invece, nel caso di tubo alettato avremo un volume del pcm di  $2.91E-03 m^3/m$  , una massa del PCM di  $5.38kg/m$ , una massa di acciaio di  $6.14kg/m$  ed una di coibente di  $5.13 kg/m$  per un totale di  $16.65kg/m$ . Invece, per la analisi 2D, nel caso di tubo liscio avremo un volume del PCM di  $1.5E-03m^3$ , una massa del PCM di  $2.78kg$ , una massa di acciaio di  $2.95kg$  (0.33 tubo e 2.62 contenitore) ed una di coibente di  $3.68kg$  per un totale di  $9.4kg$ . Invece, nel caso di tubo alettato avremo un volume del PCM di  $1.45E-03 m^3$  , una massa del PCM di  $2.68kg$ , una massa di acciaio di  $3.37kg$  (0.75 tubo e 2.62 contenitore) ed una di coibente di  $3.68 kg$  per un totale di  $9.74kg$ . Il massimo calore latente accumulabile in un TES elementare è allora di circa  $84.9 Wh$ , per la soluzione a tubo liscio, e di  $81.8 Wh$ , per quella a tubo alettato.

### 2.2.4 Tipo di analisi

Le analisi condotte sono dei transitori termici non-lineari ad un passo temporale (metodo theta) in cui sia previsto il cambiamento di fase del mezzo, siano trascurati i moti convettivi dei fluidi e siano tenuti in conto gli scambi termici per conduzione e convezione. Per il caso 2D, il calore è ceduto od estratto dal fluido HTF (olio diatermico), che scorre all'interno del tubo, per avvezione.

Il codice di calcolo FEM utilizzato è CAST3M ed è stato fatto girare un PC quadriprocessore con s.o. Win7 sfruttando la condizione di parallelizzazione (" Parallelisation automatique") del codice. Nel caso 2D, gli stessi casi sono stati eseguiti anche sul sistema Enea HPC Cresco4 con S.O. Linux.

I tempi di calcolo per ogni caso si aggirano intorno alle 35 ore.

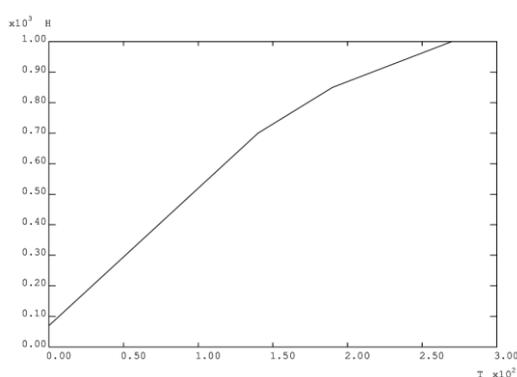
### 2.2.5 Condizioni al contorno

Il TES elementare scambia per convezione (caso 1D) o per avvezione (caso 2D) verso il fluido termovettore (HTF) che scorre all'interno del tubo e per convezione con l'aria all'esterno (ambiente).

Il fluido termovettore è supposto avere una temperatura variabile nel tempo e pari a quella misurata sperimentalmente all'ingresso del primo elemento (termocoppia A1). Nel caso 2D, tale temperatura sarà quella di ingresso dell'olio mentre quella in uscita varierà in conseguenza dello scambio termico con il TES.

L'HTF scambia con la parete in acciaio secondo un coefficiente di scambio dipendente dal mezzo (olio diatermico Therminol66), dalla sua temperatura e dalle condizioni fluidodinamiche (portata).

Il relativo coefficiente di scambio termico (in  $W/m^2.C$ ) è stato valutato durante le prove sperimentali e rappresentato in modo semplificato in **Figura 20**.



**Figura 20- Variazione del coefficiente di scambio termico olio-tubo con la temperatura**

Anche la temperatura ambiente è stata imposta variabile nel tempo e pari a quella misurata sperimentalmente (termocoppia A2). Il coefficiente di scambio termico tra la parete esterna del TES e l'aria è stato ipotizzato essere costante e pari a  $5 W/m^2.C$  (aria in quiete).

Infine, l'intero TES è stato ipotizzato essere inizialmente alla stessa temperatura dell'ambiente esterno al tempo  $t=0$ .

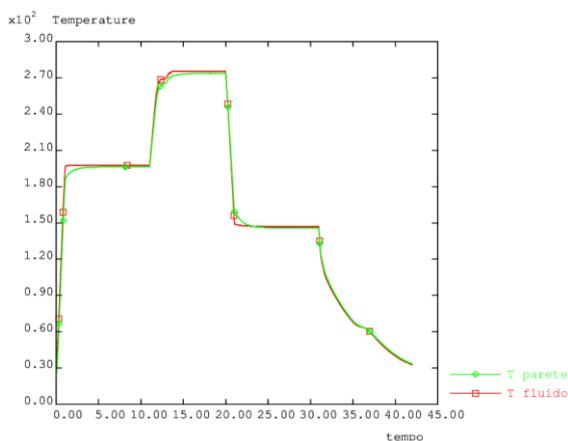
## 2.2.6 Simulazione numerica 1D di un TES elementare

### 2.2.6.1 TES elementare a “sali solari” e tubo liscio

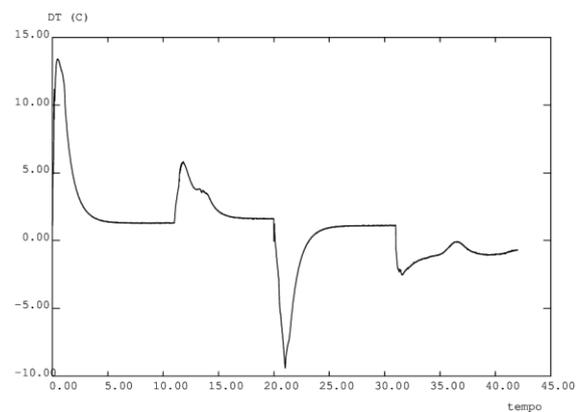
Il primo caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio liscio e contenente dei semplici sali solari come PCM.

#### Scambio olio-tubo

In **Figura 21** è possibile vedere l’andamento della temperatura del tubo di scambio in rapporto a quella imposta al fluido. La differenza tra le due (**Figura 22**) si attesta, nei regimi stazionari, nell’ordine dei 2°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (13°C) e di raffreddamento (-10°C). Tale differenza di temperature provoca dei flussi di calore che a regime sono di 1-2 kW/m<sup>2</sup>, ovvero ad una potenza ceduta al TES di circa 0.1-0.05 W (per la sola sezione analizzata: 1.5 mm di altezza). Per un elemento di circa 500 mm di altezza occorre moltiplicare per un fattore 500/1.5=333, ovvero la potenza ceduta sarebbe 15-33 W per TES.



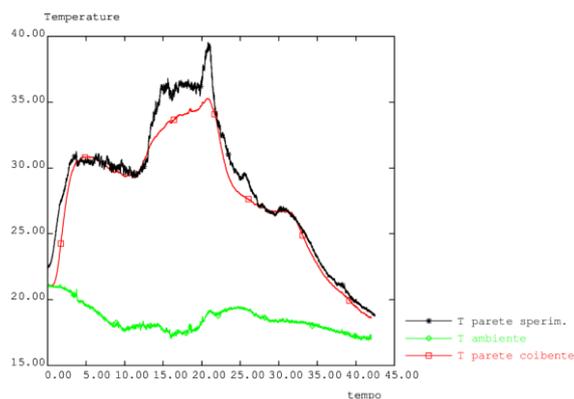
**Figura 21- Andamento temperature fluido e tubo**



**Figura 22- Andamento salto termico tubo-fluido**

#### Perdite verso l’ambiente

In **Figura 23** è mostrato l’andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.

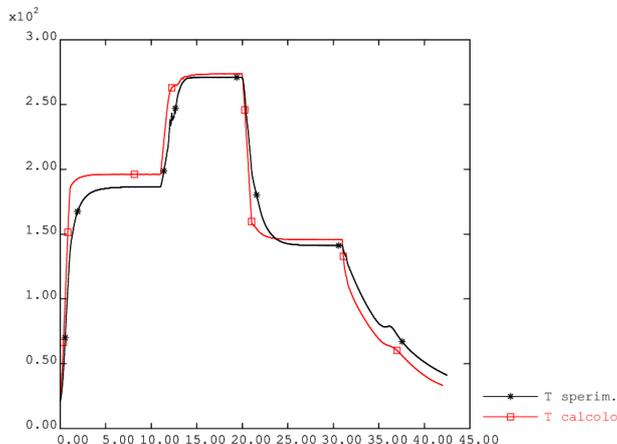


**Figura 23- Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)**

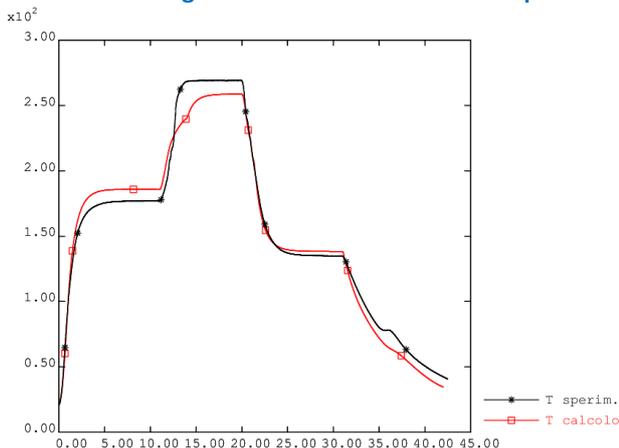
Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nella zona relativa al cambiamento di fase solido-liquido. In questa zona la temperatura misura risulta essere più alta di quella calcolata e, di conseguenza le perdite calcolate saranno sottostimate rispetto la realtà. Il salto termico tra la parete del TES e l’ambiente è, in genere, tra gli 8 ed i 16°C mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo è 0.05-0.1 W. Per un elemento di circa 500 mm di altezza, la potenza dispersa verso l’ambiente sarebbe allora di 20-40W.

### Temperatura nel PCM

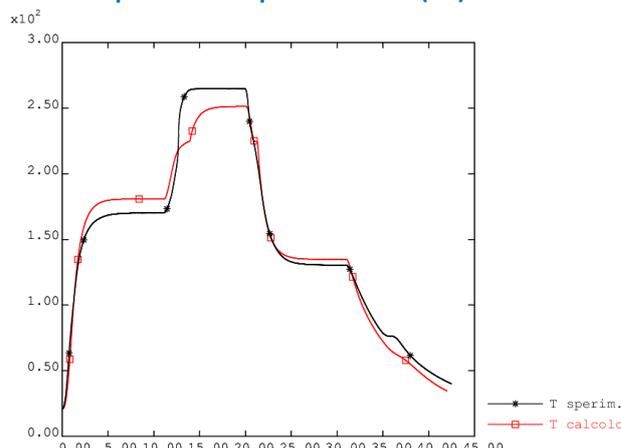
In **Figura 24**, **Figura 25** e **Figura 26** è riportata l'evoluzione delle temperature sia calcolate che sperimentali in 3 punti del PCM: uno interno, prossimo al tubo di scambio, uno esterno, prossimo al contenitore, ed uno intermedio (rispettivamente: A8, A11 e A14).



**Figura 24- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (A8)**



**Figura 25- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (A11)**



**Figura 26- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (A14)**

Le temperature mostrano un buon accordo per le zone relative al riscaldamento e raffreddamento del mezzo solido. Invece, nella zona centrale, interessata dal cambio di fase e dai fenomeni connessi, la previsione numerica risulta essere sottostimante. Le temperature sperimentali sono più elevate, evidenziano molto meno il cambio di fase del mezzo, arrivano ad una condizione stazionaria in tempi molto più rapidi e risultano costanti in quasi tutta la sezione.

Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal fatto che il PCM, in fase liquida, è soggetto a moti convettivi, innescati dai gradienti termici e dalla gravità del mezzo stesso, che migliorano il trasporto del calore nel mezzo e tendono a miscelare ed uniformare le temperature. Chiaramente, la simulazione numerica FEM non tiene in conto questa tipologia di fenomeno, per la quale sarebbe necessario ricorrere a simulazioni CFD. Inoltre, nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di onset ed una di endset, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno.

In **Figura 27** e **Figura 28** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 4 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, circa 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

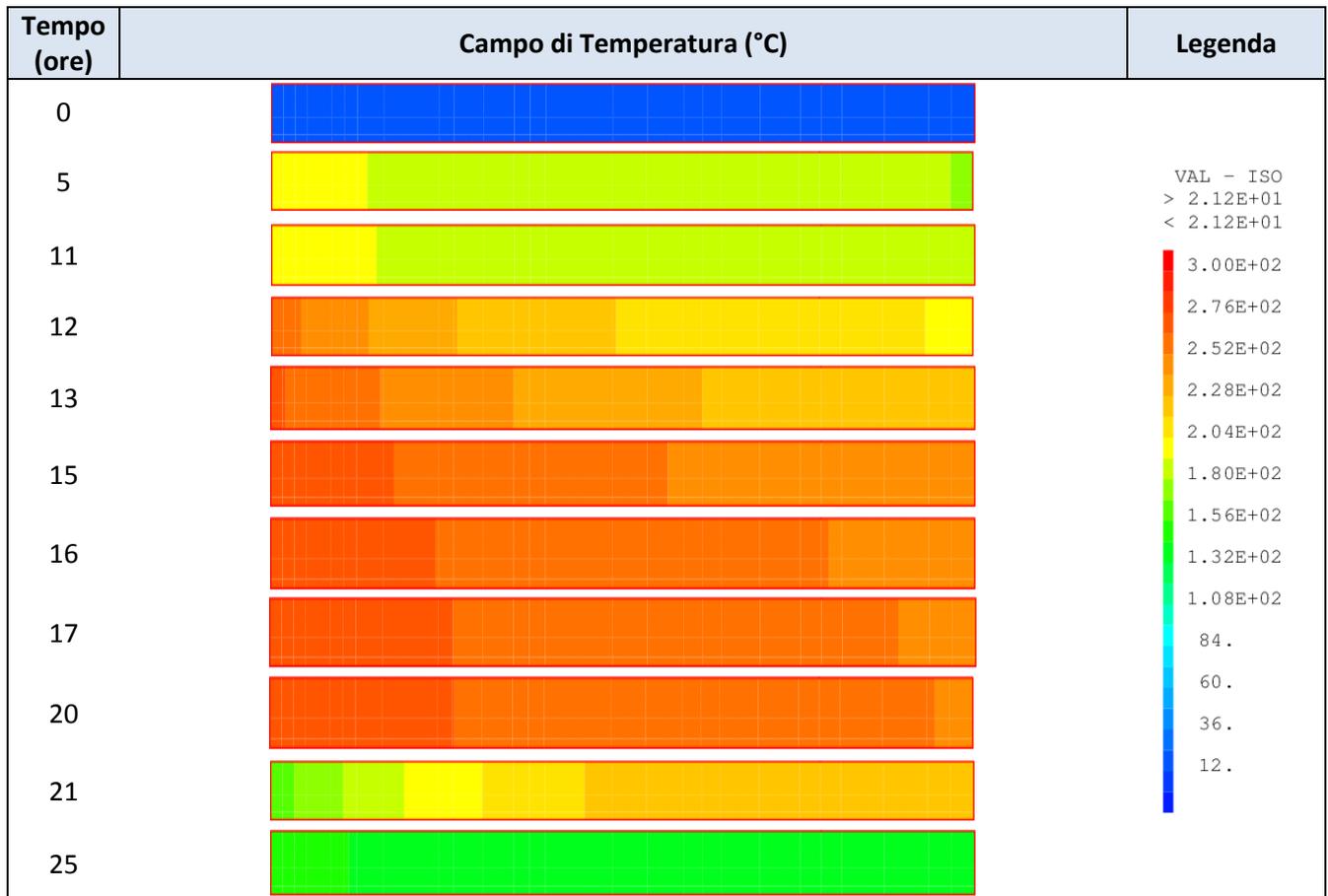


Figura 27- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

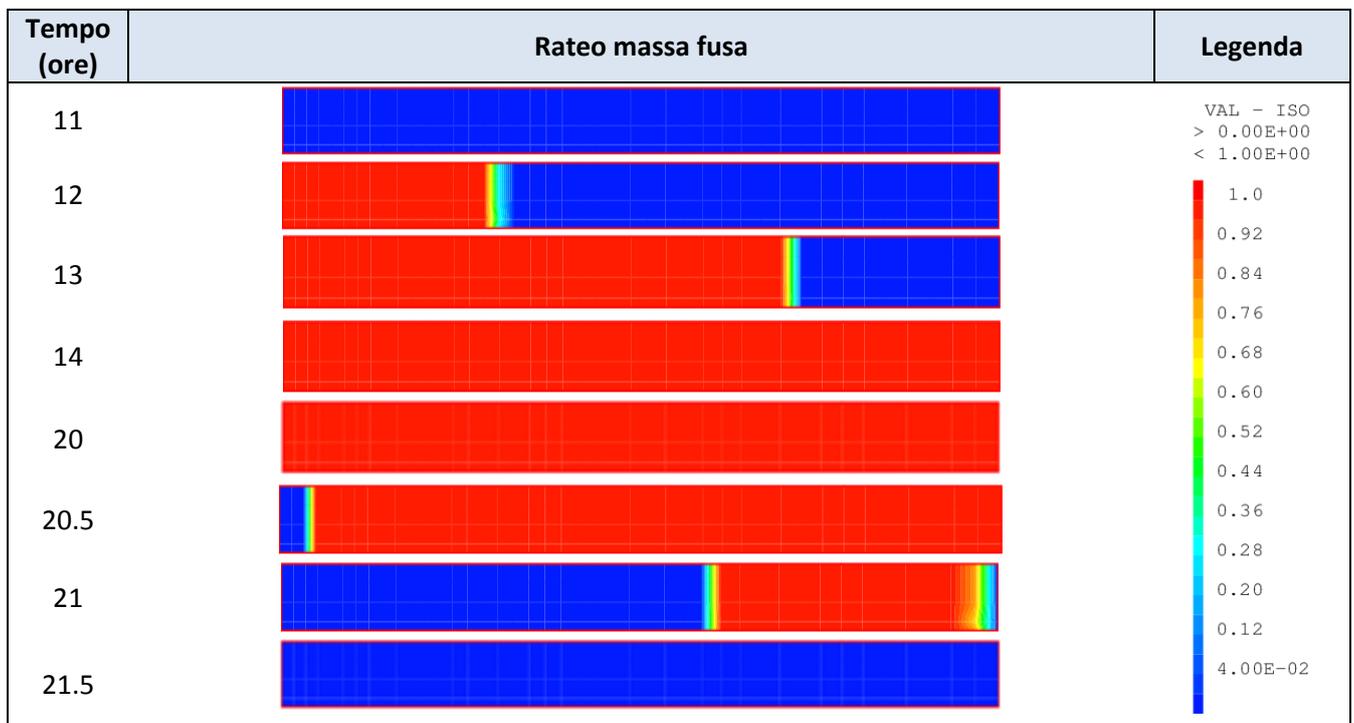
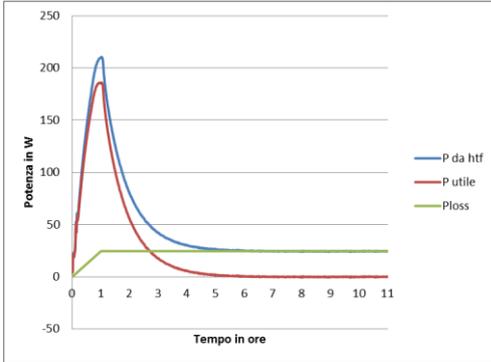


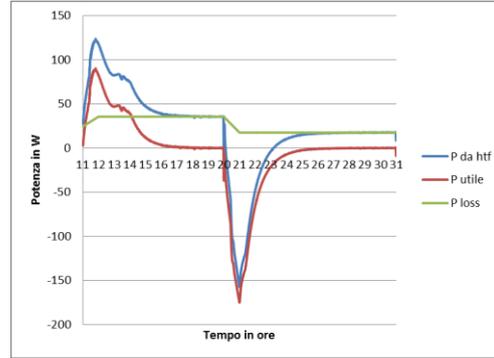
Figura 28- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore, riportata ad un elemento di 500mm, e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionario è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES. In fase di primo riscaldamento (Figura 29) la potenza persa è di circa 25W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 180W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 6 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 275 Wh.

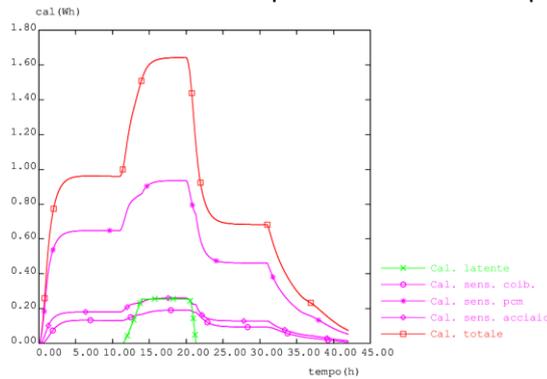


**Figura 29- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 30- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 30) la potenza persa è, rispettivamente di circa 35.5W e 17.5W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 90W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 7 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -170W e si riannulla ancora dopo circa 6 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 200Wh mentre quella estratta (scarica) di 279Wh. La differenza tra questi due valori, circa 79Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 7-8 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 35.3W. In Figura 31 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel PCM sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 31- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

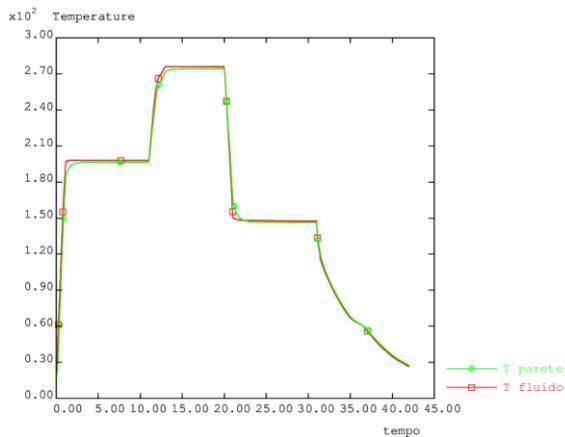
L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 0.25 Wh. Per un elemento lungo 500mm questa è di circa 83 Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente nella evoluzione complessiva della prova il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 15% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carico e scarico). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura (0.25Wh), rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 0.7Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale (circa 0.15Wh).

### 2.2.6.2 TES elementare a “sali solari” e tubo alettato

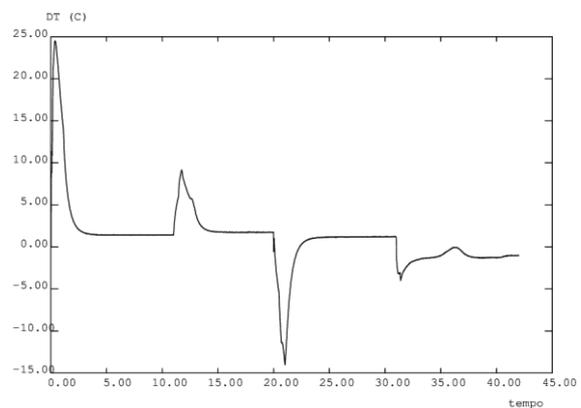
Il secondo caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio alettato e contenente dei semplici sali solari come PCM.

#### Scambio olio-tubo

In **Figura 32** è possibile vedere l'andamento della temperatura del tubo di scambio in rapporto a quella imposta al fluido. La differenza tra le due (**Figura 33**) si attesta, nei regimi stazionari, nell'ordine dei 1°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (25°C) e di raffreddamento (-15°C). Tale differenza di temperature provoca dei flussi di calore che a regime sono di 1-2 kW/m<sup>2</sup>, ovvero ad una potenza ceduta al TES di circa 0.05-0.1 W (per la sola sezione analizzata: 1.5 mm di altezza). Per un elemento di circa 500 mm di altezza occorre moltiplicare per un fattore 500/1.5=333, ovvero la potenza ceduta sarebbe 15-35 W per TES.



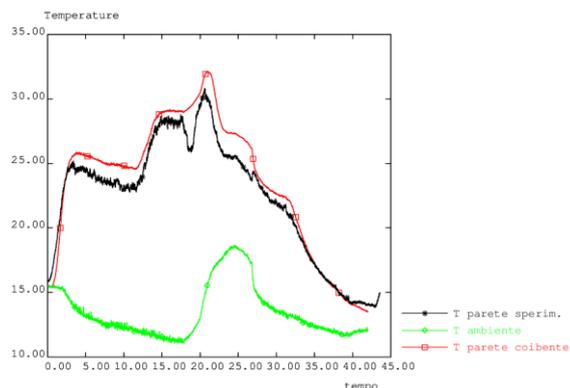
**Figura 32- Andamento temperature fluido e tubo**



**Figura 33- Andamento salto termico tubo-fluido**

#### Perdite verso l'ambiente

In **Figura 34** è mostrato l'andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.

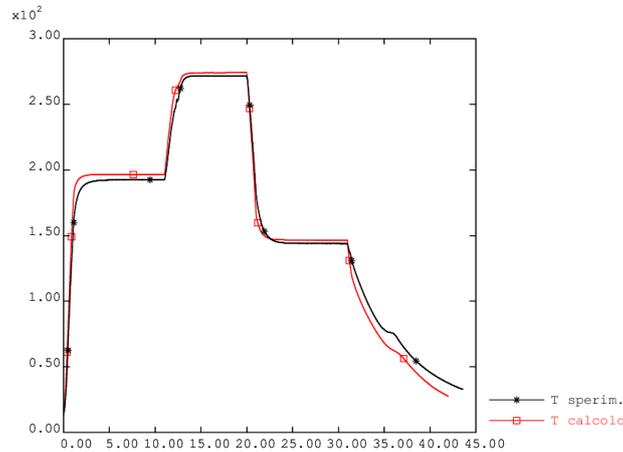


**Figura 34- Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)**

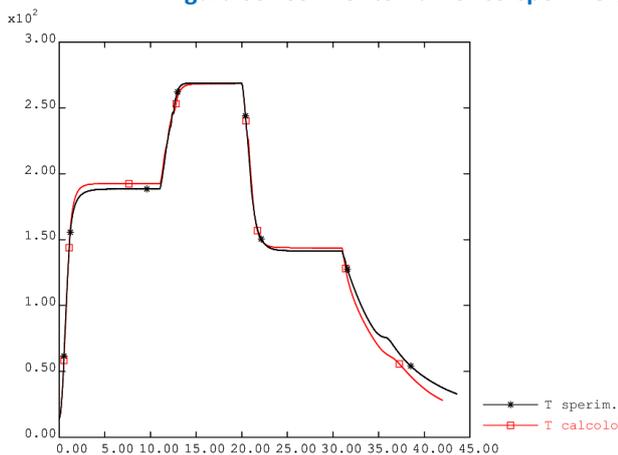
Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nella zona relativa al cambiamento di fase solido-liquido. In questa zona la temperatura calcolata risulta essere più alta di quella sperimentale e, di conseguenza le perdite calcolate saranno sovrastimate rispetto la realtà. Il salto termico tra la parete del TES e l'ambiente è in genere tra gli 9 ed i 18°C mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo è 0.05-0.11W. Per un elemento di circa 500 mm di altezza, la potenza dispersa verso l'ambiente sarebbe allora di 20-40W.

## Temperatura nel PCM

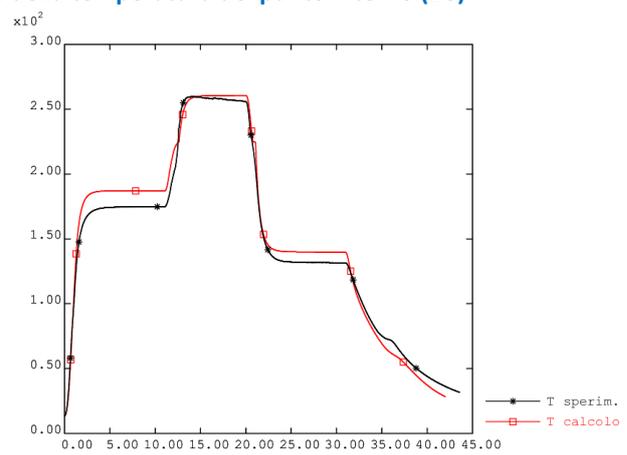
In **Figura 35**, **Figura 36** e **Figura 37** è riportata l'evoluzione delle temperature sia calcolate che sperimentali in 3 punti del PCM: uno interno, prossimo al tubo di scambio, uno esterno, prossimo al contenitore, ed uno intermedio (rispettivamente: B8, B11 e B14).



**Figura 35- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (B8)**



**Figura 36- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (B11)**



**Figura 37- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (B14)**

Le temperature mostrano un buon accordo generale anche se tendono a sovrastimare leggermente quelle misurate. In questo caso, l'eventuale effetto di possibili moti convettivi del PCM in fase liquidi non sono evidenziati. Il comportamento termico dell'elemento è governato principalmente dalla conduzione "equivalente" del mezzo (PCM ed alette). Nel calcolo, al contrario dei risultati sperimentali, è visibile il cambio di fase del mezzo, soprattutto lontano dalla sorgente di calore. Nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di onset ed una di endset, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno. Confrontando i risultati attuali con quelli con tubo liscio, risulta evidente l'effetto di promozione della conducibilità termica innescato dalla presenza delle alette. Infatti, la differenza con le temperature misurate è ridotta e la temperature sono più uniformi attraverso la sezione.

In **Figura 38** e **Figura 39** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 2 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, circa 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

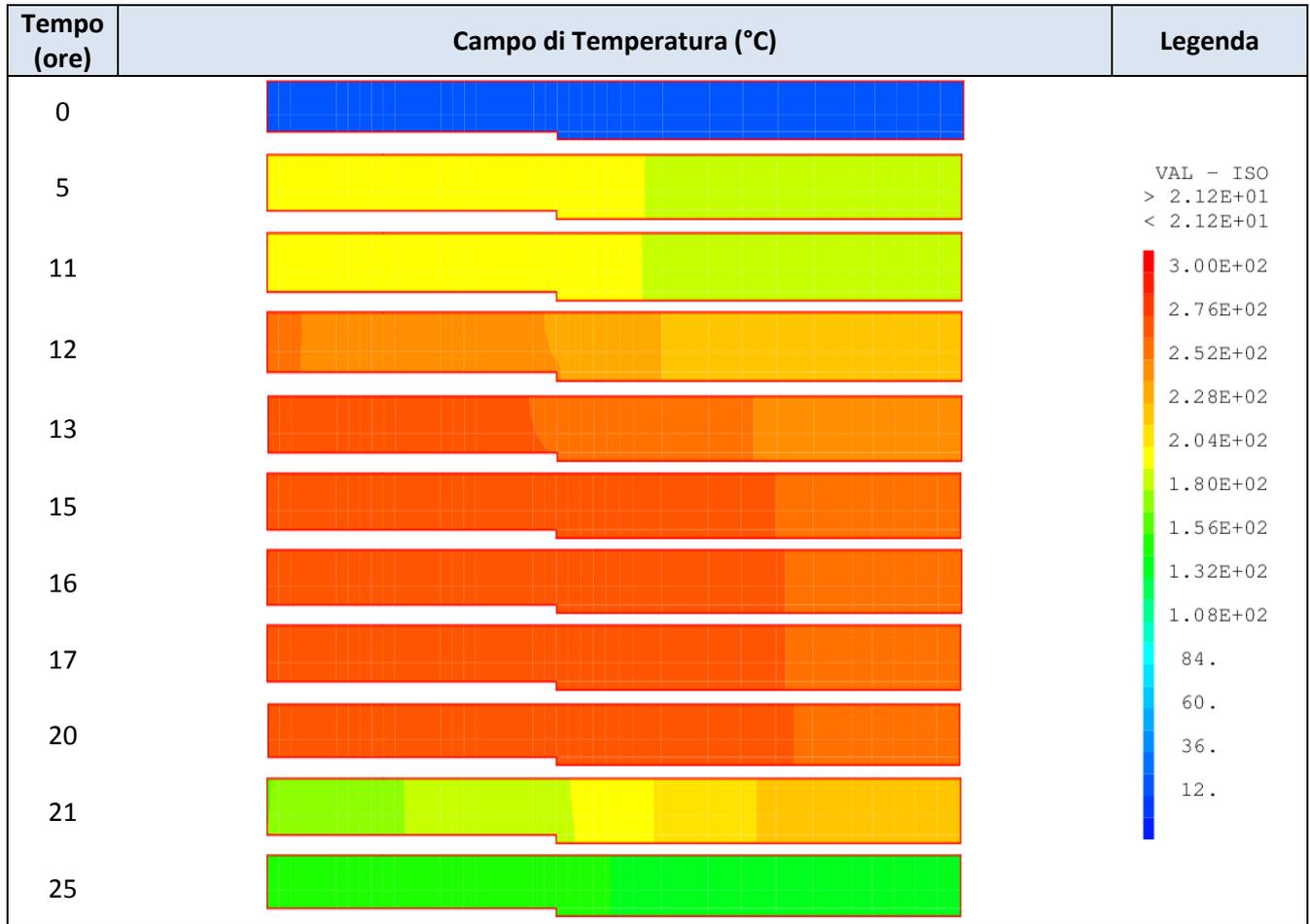


Figura 38- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

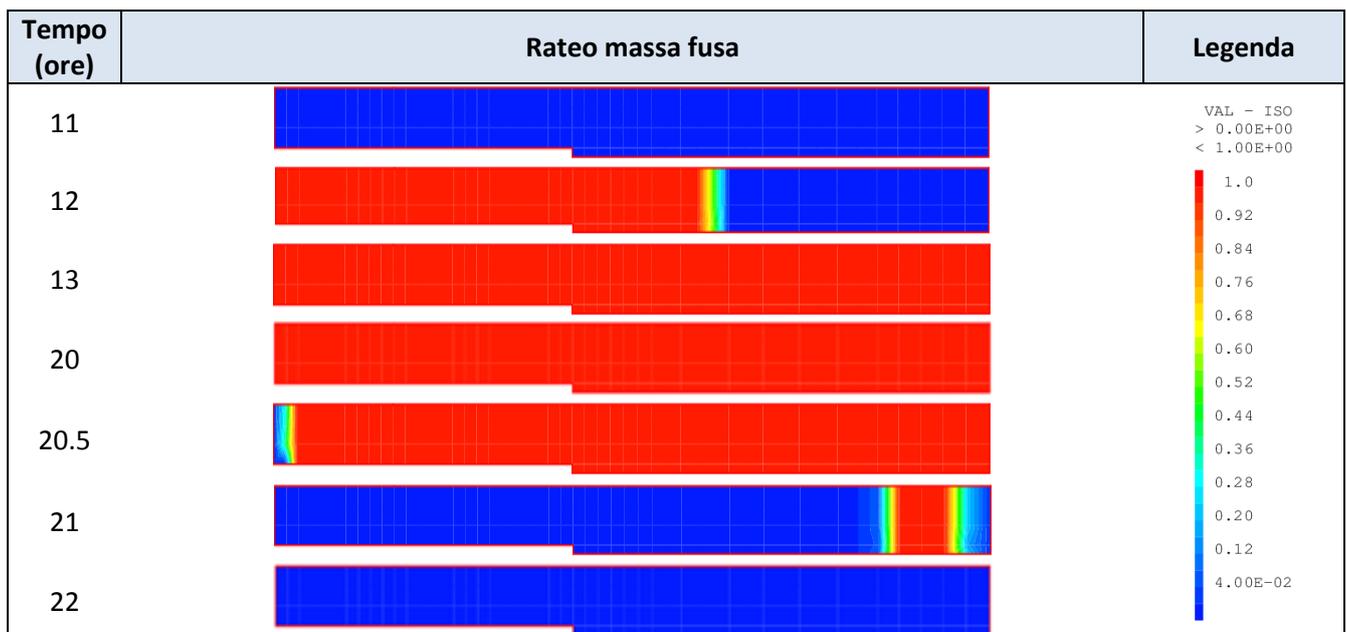
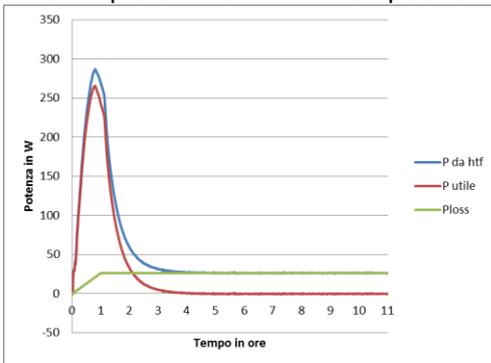


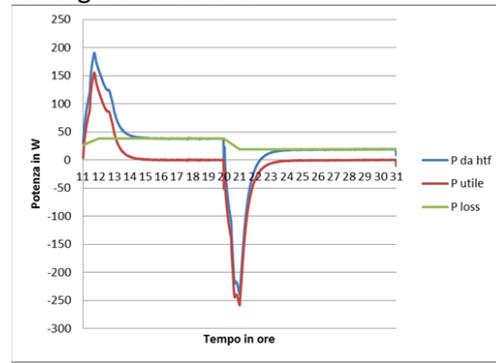
Figura 39- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore, rapportata ad un elemento da 500mm, e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES. In fase di primo riscaldamento (Figura 40) la potenza persa è di circa 27W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 260W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 310Wh.

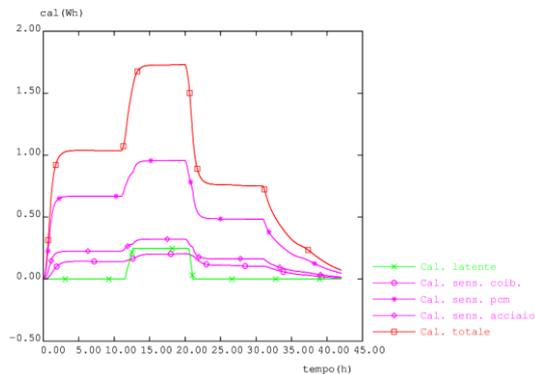


**Figura 40- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 41- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 41) la potenza persa è, rispettivamente di circa 38W e 19W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 150W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -250W e si riannulla ancora dopo circa 4 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 211Wh mentre quella estratta (scarica) di 294Wh. La differenza tra questi due valori, circa 83Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 4 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 75.5W. In Figura 42 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel PCM sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 42- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

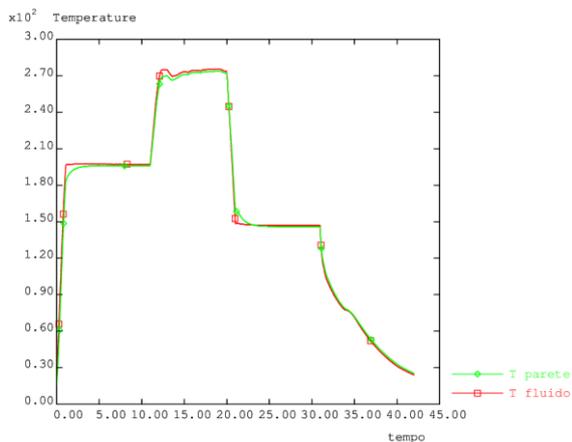
L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 0.25 Wh. Per un elemento lungo 500mm questa è di circa 83 Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente nella evoluzione complessiva della prova il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 14% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carico e scarico). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura (0.25Wh), rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 0.7Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale (circa 0.15Wh).

### 2.2.6.3 TES elementare a “sali solari” con nanoparticelle e tubo liscio

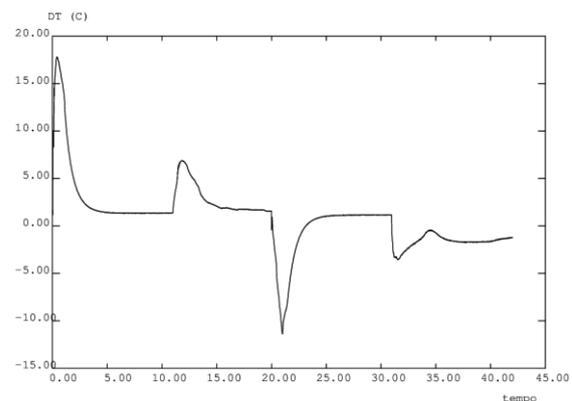
Il terzo caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio liscio e contenente dei sali solari con aggiunta di nanoparticelle come PCM.

#### Scambio olio-tubo

In **Figura 43** è possibile vedere l'andamento della temperatura del tubo di scambio in rapporto a quella imposta al fluido. La differenza tra le due (**Figura 44**) si attesta, nei regimi stazionari, nell'ordine dei 2°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (17°C) e di raffreddamento (-11°C). Tale differenza di temperature provoca dei flussi di calore che a regime sono di 1-2 kW/m<sup>2</sup>, ovvero ad una potenza ceduta al TES di circa 0.1-0.05 W (per la sola sezione analizzata: 1.5 mm di altezza). Per un elemento di circa 500 mm di altezza occorre moltiplicare per un fattore 500/1.5=333, ovvero la potenza ceduta sarebbe 15-33 W per TES.



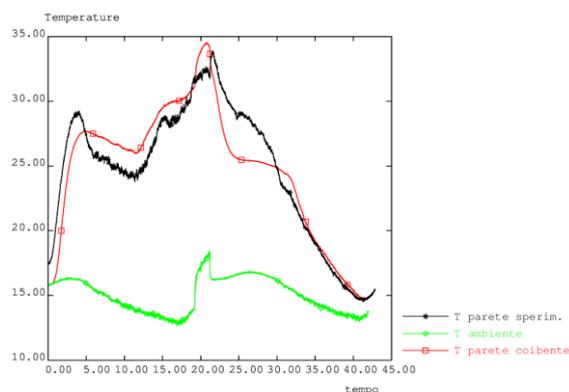
**Figura 43- Andamento temperature fluido e tubo**



**Figura 44- Andamento salto termico tubo-fluido**

#### Perdite verso l'ambiente

In **Figura 45** è mostrato l'andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.

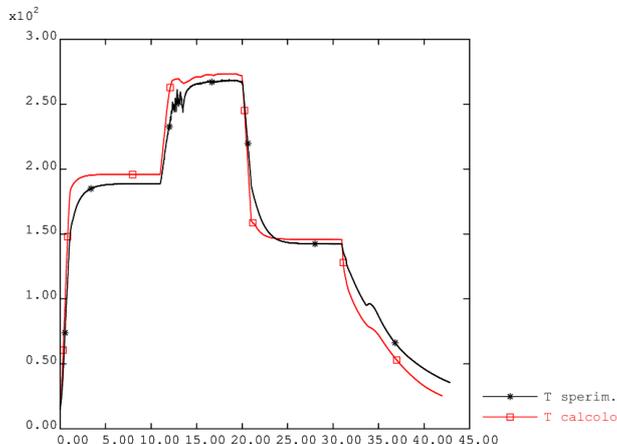


**Figura 45- Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)**

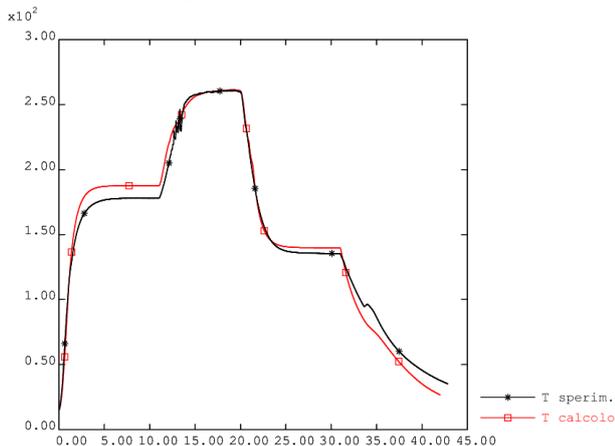
Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nella zona relativa al cambiamento di fase solido-liquido. In questa zona la temperatura misura risulta essere più alta di quella calcolata e, di conseguenza le perdite calcolate saranno sottostimate rispetto la realtà. Il salto termico tra la parete del TES e l'ambiente è in genere tra gli 8 ed i 18°C mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo è 0.05-0.11 W. Per un elemento di circa 500 mm di altezza, la potenza dispersa verso l'ambiente sarebbe allora di 20-40W.

### Temperatura nel PCM

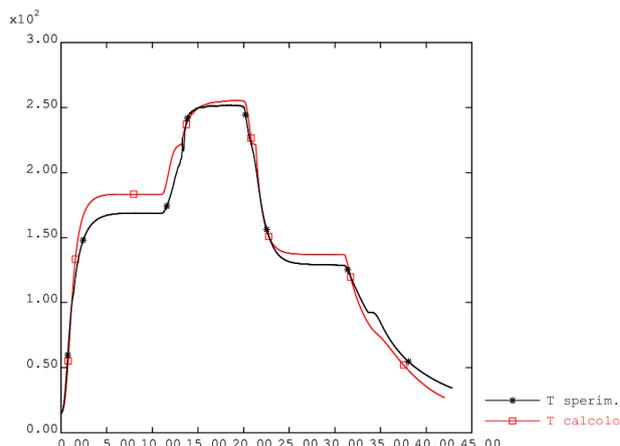
In **Figura 46**, **Figura 47** e **Figura 48** è riportata l'evoluzione delle temperature sia calcolate che sperimentali in 3 punti del PCM: uno interno, prossimo al tubo di scambio, uno esterno, prossimo al contenitore, ed uno intermedio (rispettivamente: A8, A11 e A14).



**Figura 46- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (A8)**



**Figura 47- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (A11)**



**Figura 48- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (A14)**

Le temperature mostrano un buon accordo generale per tutte le zone relative con una sovrastima soprattutto durante il riscaldamento e raffreddamento del mezzo solido. Invece, nella zona centrale, interessata dal cambio di fase e dai fenomeni connessi, la previsione numerica risulta essere quasi coincidente. Le temperature sperimentali sono generalmente più basse, evidenziano molto meno il cambio di fase del mezzo, arrivano ad una condizione stazionaria in tempi leggermente più rapidi e risultano decrescenti nella sezione.

A differenza di quanto avviene nel caso analogo con il solo PCM (Prova1) sembra che lo scambio termico all'interno del NFPCM sia sostanzialmente governato da fenomeni puramente conduttivi e la presenza, in fase liquida, di moti convettivi sia trascurabile. Ciò potrebbe essere dovuto ad una maggiore viscosità del mezzo di accumulo che ostacolerebbe l'innesco di tali moti. Chiaramente, la simulazione numerica FEM non tiene in conto questa tipologia di fenomeno, per la quale sarebbe necessario ricorrere a simulazioni CFD.

In **Figura 49** e **Figura 50** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 2.5 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, circa 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

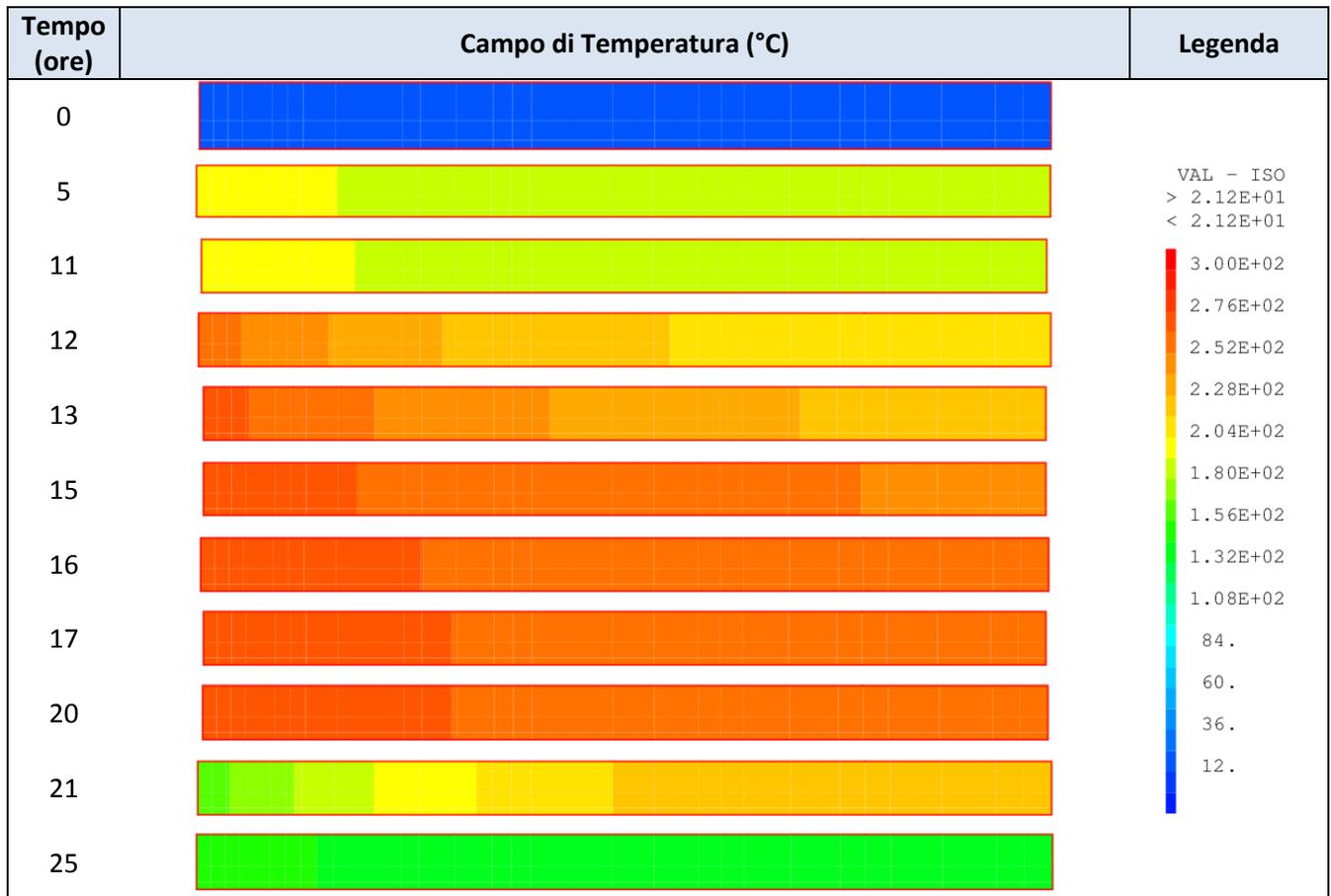


Figura 49- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

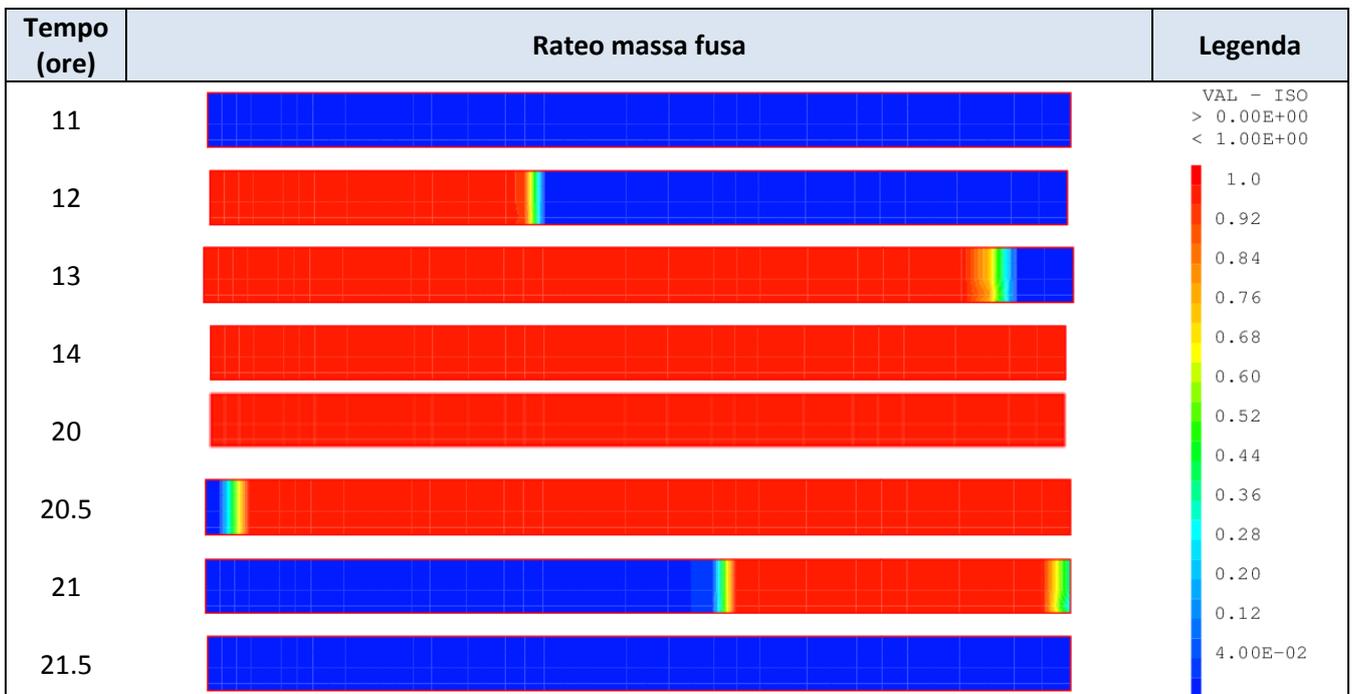
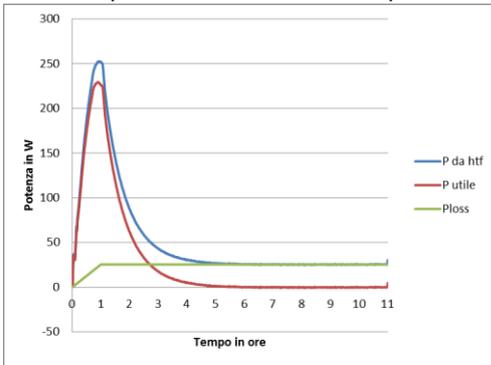


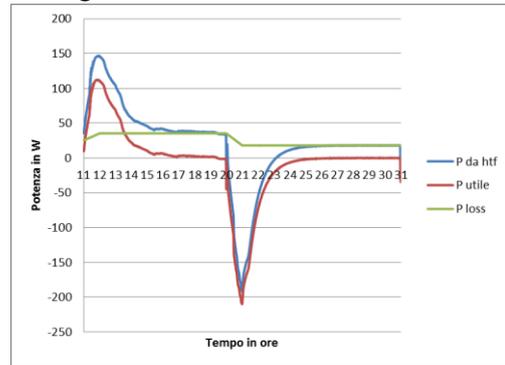
Figura 50- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore, riportata ad un elemento di 500mm, e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES. In fase di primo riscaldamento (Figura 51) la potenza persa è di circa 25.5W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 180W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 6 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 331 Wh.

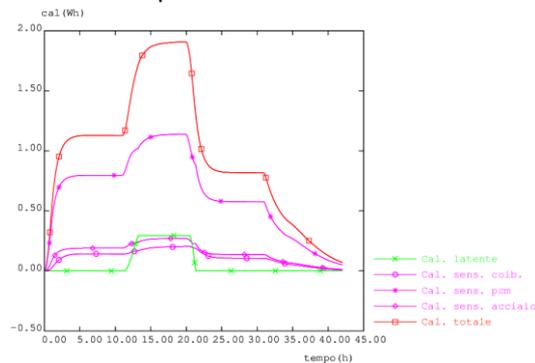


**Figura 51- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 52- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 52) la potenza persa è, rispettivamente di circa 35.3W e 18W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 110W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 6 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -190W e si riannulla ancora dopo circa 6 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 238Wh mentre quella estratta (scarica) di 320Wh. La differenza tra questi due valori, circa 82Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 6 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 65.3W. In Figura 53 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel PCM sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 53- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 0.25 Wh. Per un elemento lungo 500mm questa è di circa 83 Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente.

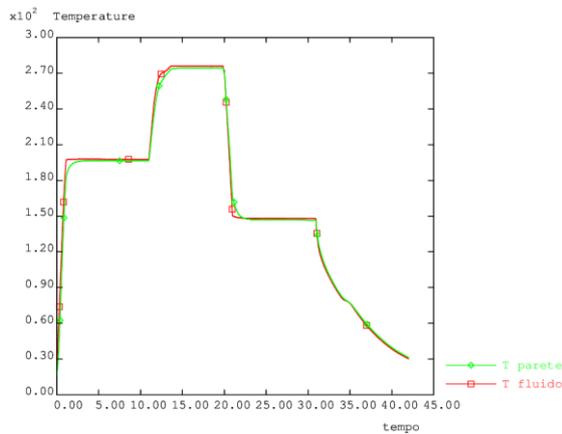
Chiaramente nella evoluzione complessiva della prova il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 15% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carico e scarico). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura (0.25Wh), rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 0.7Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale (circa 0.15Wh).

### 2.2.6.4 TES elementare a “sali solari” con nanoparticelle e tubo alettato

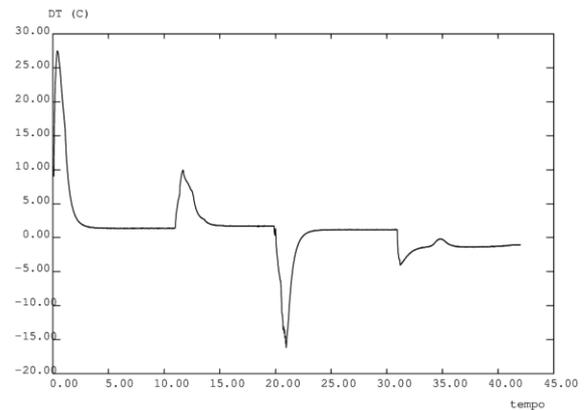
Il quarto caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio alettato e contenente dei sali solari con aggiunta di nanoparticelle come PCM.

#### Scambio olio-tubo

In **Figura 54** è possibile vedere l'andamento della temperatura del tubo di scambio in rapporto a quella imposta al fluido. La differenza tra le due (**Figura 55**) si attesta, nei regimi stazionari, nell'ordine dei 1°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (27°C) e di raffreddamento (-17°C). Tale differenza di temperature provoca dei flussi di calore che a regime sono di 1-2 kW/m<sup>2</sup>, ovvero ad una potenza ceduta al TES di circa 0.05-0.1 W (per la sola sezione analizzata: 1.5 mm di altezza). Per un elemento di circa 500 mm di altezza occorre moltiplicare per un fattore 500/1.5=333, ovvero la potenza ceduta sarebbe 15-35 W per TES.



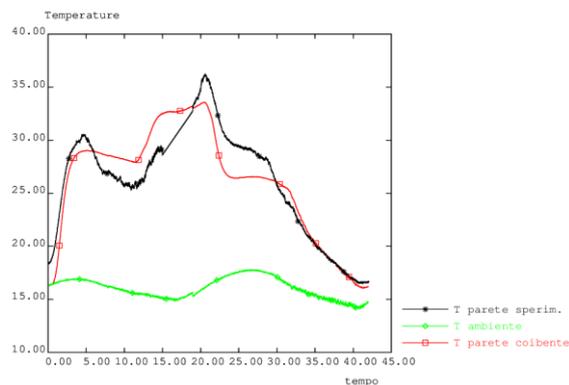
**Figura 54- Andamento temperature fluido e tubo**



**Figura 55- Andamento salto termico tubo-fluido**

#### Perdite verso l'ambiente

In **Figura 56** è mostrato l'andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.

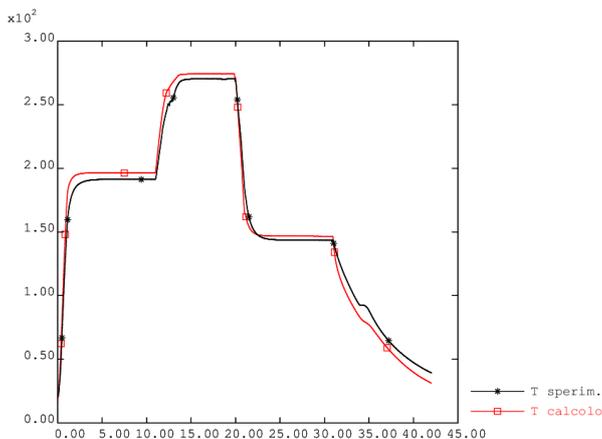


**Figura 56- Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)**

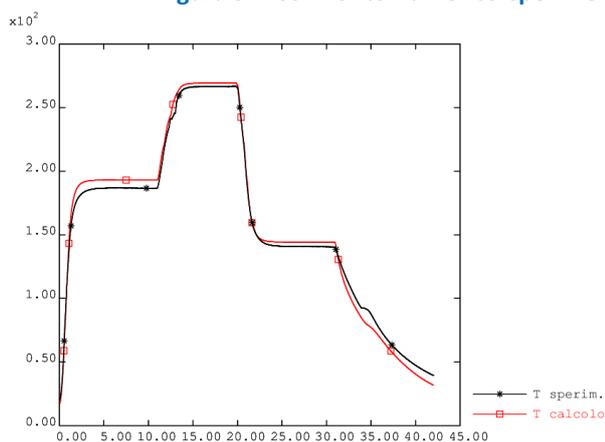
Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nella zona relativa al cambiamento di fase solido-liquido. In questa zona la temperatura calcolata risulta essere più alta di quella sperimentale e, di conseguenza le perdite calcolate saranno sovrastimate rispetto la realtà. Il salto termico tra la parete del TES e l'ambiente è in genere tra gli 8 ed i 18°C mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo è 0.05-0.11 W. Per un elemento di circa 500 mm di altezza, la potenza dispersa verso l'ambiente sarebbe allora di 20-40W.

### Temperatura nel PCM

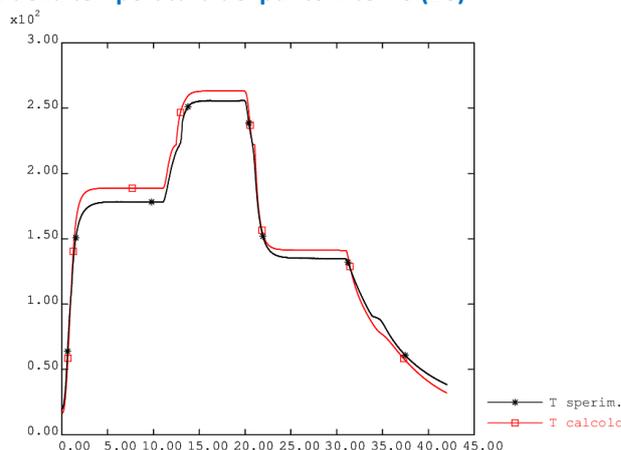
In **Figura 57**, **Figura 58** e **Figura 59** è riportata l'evoluzione delle temperature sia calcolate che sperimentali in 3 punti del PCM: uno interno, prossimo al tubo di scambio, uno esterno, prossimo al contenitore, ed uno intermedio (rispettivamente: B8, B11 e B14).



**Figura 57- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (B8)**



**Figura 58- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (B11)**



**Figura 59- Confronto numerico-sperimentale della temperatura del punto interno (B14)**

Le temperature mostrano un buon accordo generale anche se tendono a sovrastimare leggermente quelle misurate. In questo caso, l'eventuale effetto di possibili moti convettivi del PCM in fase liquidi non sono evidenziati. Il comportamento termico dell'elemento è governato principalmente dalla conduzione "equivalente" del mezzo (PCM ed alette). Nel calcolo, al contrario dei risultati sperimentali, è visibile il cambio di fase del mezzo, soprattutto lontano dalla sorgente di calore. Nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di onset ed una di endset, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno. Confrontando i risultati attuali con quelli con tubo liscio, risulta evidente l'effetto di promozione della conducibilità termica innescato dalla presenza delle alette. Infatti, la differenza con le temperature misurate è ridotta e la temperature sono più uniformi attraverso la sezione.

In **Figura 60** e **Figura 61** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 2 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, circa 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

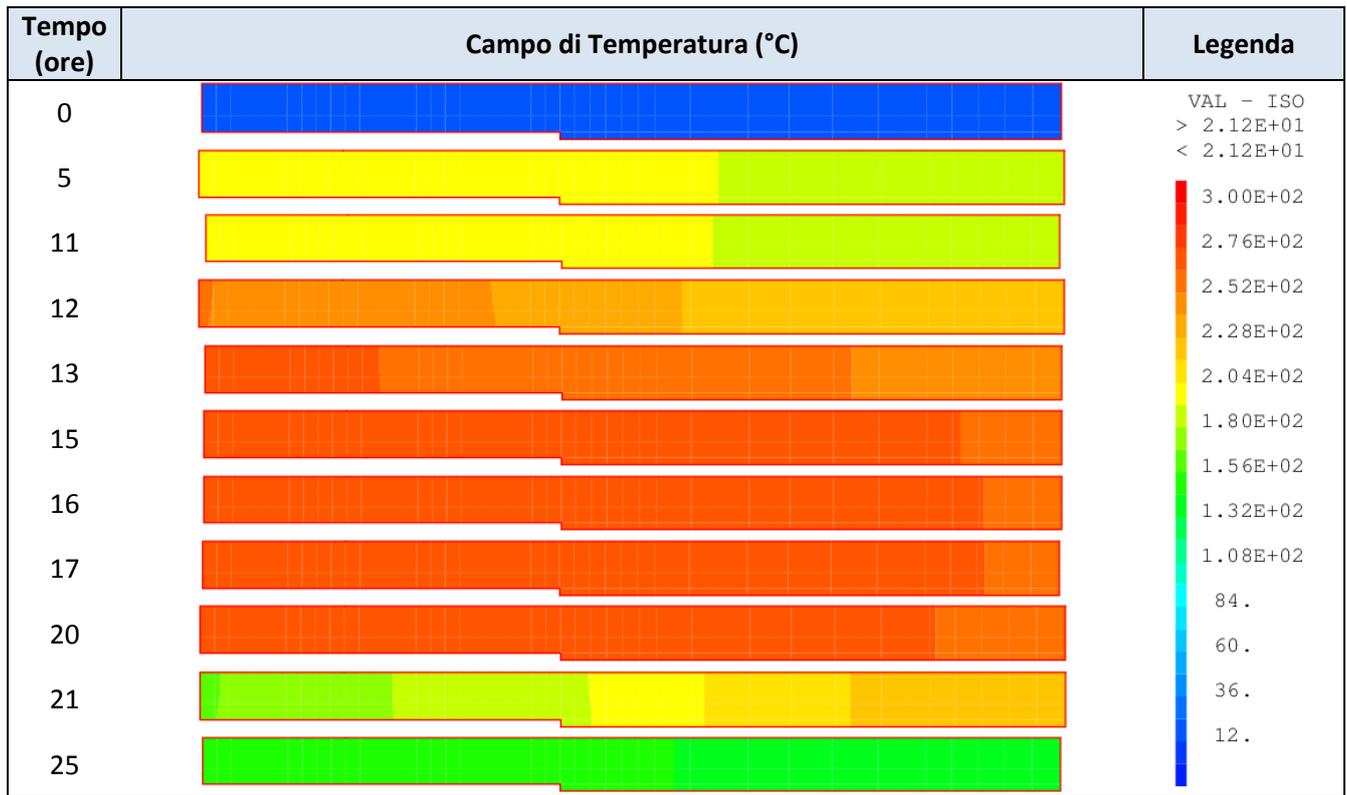


Figura 60- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

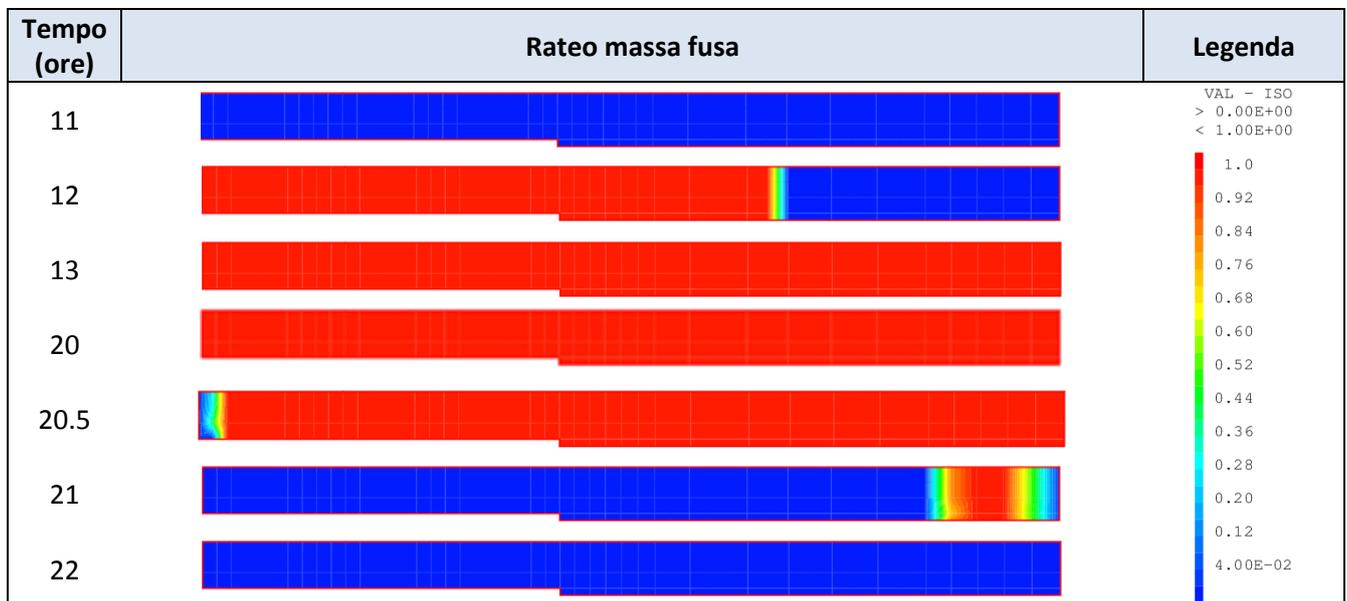
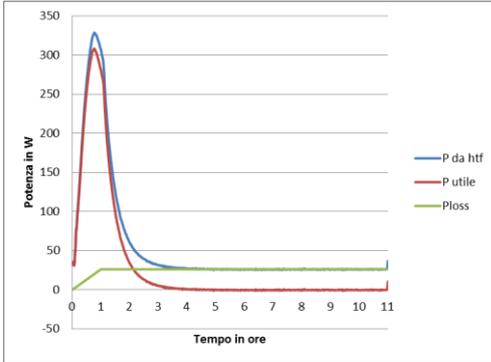


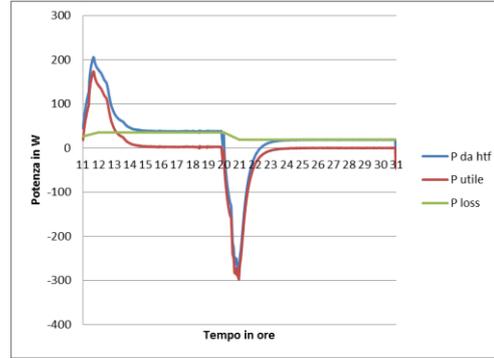
Figura 61- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore, rapportata ad un elemento da 500mm, e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES. In fase di primo riscaldamento (Figura 62) la potenza persa è di circa 26.3W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 260W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 351Wh.

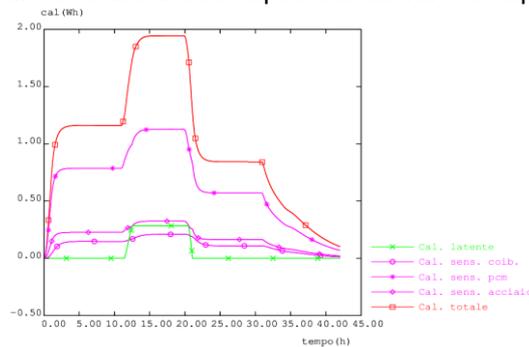


**Figura 62- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 63- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 63) la potenza persa è, rispettivamente di circa 35.4W e 18.7W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 170W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -280W e si riannulla ancora dopo circa 4 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 253Wh mentre quella estratta (scarica) di 332Wh. La differenza tra questi due valori, circa 78Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 4 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 85W. In Figura 64 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel PCM sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.

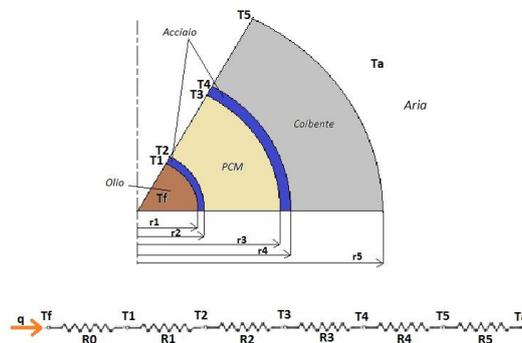


**Figura 64- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 0.25 Wh. Per un elemento lungo 500mm questa è di circa 83 Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente nella evoluzione complessiva della prova il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 14% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carico e scarico). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura (0.25Wh), rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 0.7Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale (circa 0.15Wh).

### 2.2.6.5 Ulteriori considerazione sulla conducibilità termica dei mezzi di accumulo

Ricordiamo che la conducibilità termica valutata in laboratorio e poi utilizzata nei calcoli era di **0.7 W/m/°C** per i Sali solari semplici e di **0.9 W/m/°C** per quelli con nanoparticelle<sup>[2]</sup>. Poiché, nei casi analizzati, al termine delle fasi di riscaldamento, carica e scarica del TES si raggiungono degli stati termici stazionari che sono facilmente valutabili anche da un punto di vista teorico, possiamo utilizzare detti stati per fare delle considerazioni/valutazioni sulla conducibilità “apparente” del mezzo di accumulo. Per una geometria cilindrica è possibile valutare la distribuzione radiale della temperatura nel seguente modo. In **Figura 65**, è mostrata una parte della sezione piana di un elemento di accumulo “tube and shell”, di lunghezza L. Nella parte interna scorre il fluido termovettore che cede o recupera calore dal sistema. Esso scorre all’interno di un tubo di raggio **r1** e spessore **sa**. Il calore è accumulato all’interno di una zona di spessore **sp** che contiene il mezzo di accumulo. Tale mezzo è delimitato da un vessel di spessore **sv**. All’esterno del vessel ci darà uno spessore **sc** di coibente tale da minimizzare le perdite di energia termica dal sistema e permettere al mezzo di accumulo la sua totale fusione.



**Figura 65- Schema di scambio termico di un TES elementare guscio-tubo**

Le varie zone saranno definite dai seguenti raggi;

$$r2 = r1 + sa \quad r3 = r2 + sp \quad r4 = r3 + sv \quad r5 = r4 + sc$$

Per l’elemento di accumulo coibentato vale l’equivalenza elettrica rappresentata in **Figura 65**. Le resistenze termiche conduttive relative all’acciaio, al PCM nelle sole fasi liquida o solida ed al coibente possono essere espresse come segue:

$$R_1 = \frac{1}{k_1(2\pi L)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad R_2 = \frac{1}{k_2(2\pi L)} \ln \frac{r_3}{r_2} \quad R_3 = \frac{1}{k_3(2\pi L)} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad R_4 = \frac{1}{k_4(2\pi L)} \ln \frac{r_5}{r_4}$$

Invece, le resistenze convettive relative allo scambio termico con l’olio diatermico, internamente, e con

l’aria, esternamente sono espresse:  $R_0 = \frac{1}{2\pi r_1 L h_0}$   $R_5 = \frac{1}{2\pi r_5 L h_5}$

Quindi, la resistenza termica totale del sistema è:  $R_{tot} = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$

Mentre, la potenza termica trasmessa è:  $q = \frac{(T_f - T_a)}{R_{tot}}$

Nota la potenza termica è allora possibile calcolare le temperature di tutte le zone:

$$T_1 = T_f - qR_0 \quad T_2 = T_1 - qR_1 \quad T_3 = T_2 - qR_2 \quad T_4 = T_3 - qR_3 \quad T_5 = T_4 - qR_4$$

L’andamento della temperatura all’interno di ciascuna zona sarà chiaramente di tipo logaritmico tra i due valori estremi calcolati. Su tale base, considerando gli stati stazionari di riscaldamento (ora 10), carica (ora 19) e scarica (ora 29) possiamo ricavarci gli andamenti radiali delle temperature sia teorici che da FEM 1D oltre i punti sperimentali. In **Figura 66** sono mostrate la curva teorica (tratteggiata), la curva numerica (FEM,

continua) e punti sperimentali (olio e termocoppie interne al HSM) per il caso 1.2 (tubo liscio e PCM semplice).

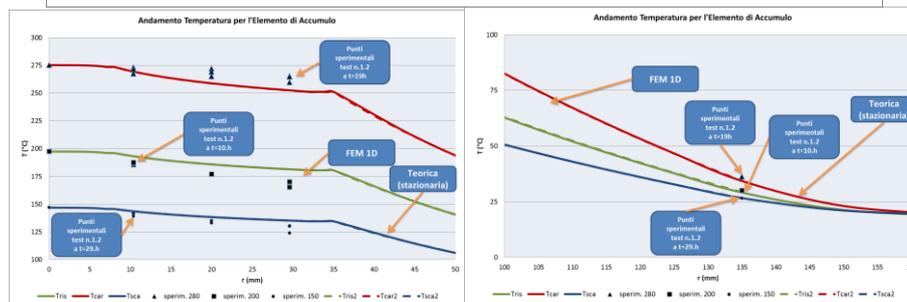
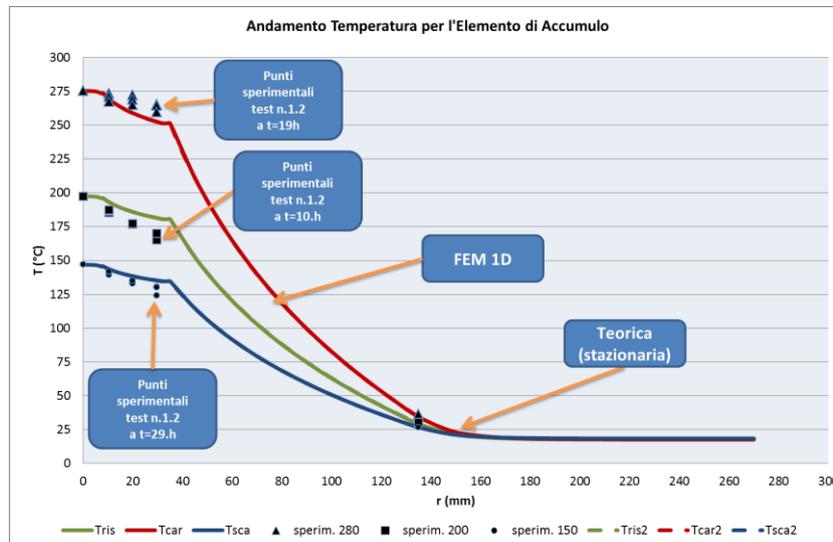


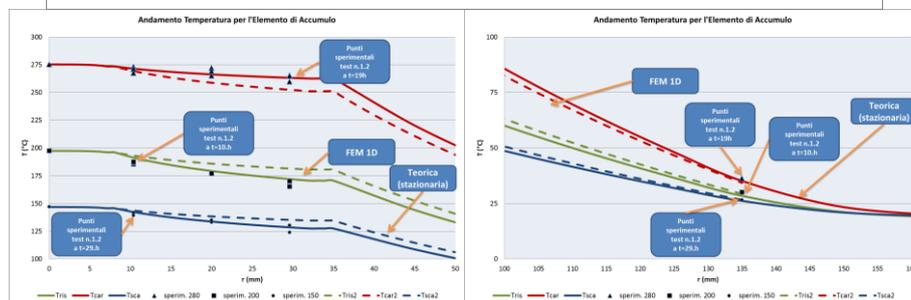
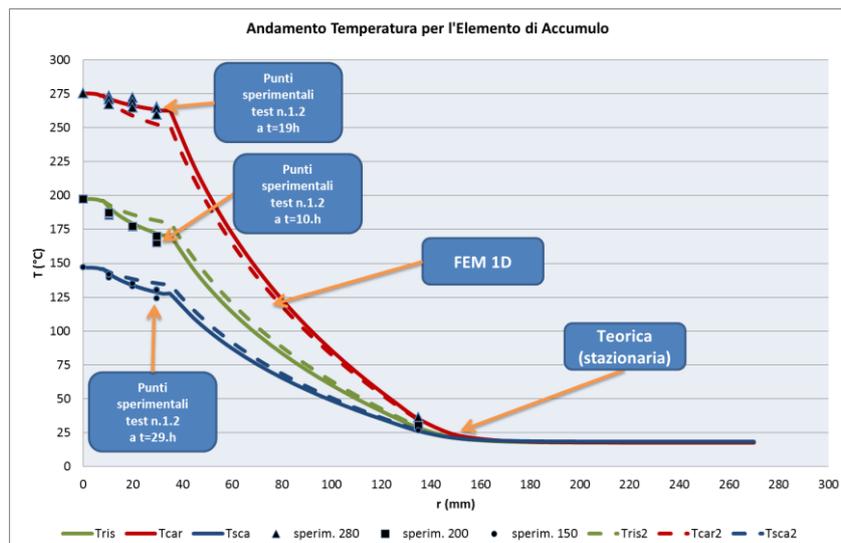
Figura 66- Curva teorica, numerica e punti sperimentali per stati stazionari – caso 1.2

Le curve sono perfettamente sovrapposte. L'accordo con i punti sperimentali è abbastanza buono ma lascia trapelare alcune discordanze rispetto la conducibilità del PCM. Nei calcoli, questa era stata supposta essere **0.7 W/m.K**. Negli stazionari in fase solida tale valore sembra essere eccessivo. Nello stazionario in fase liquida è esattamente il contrario. Proviamo a valutarli modificando i valori della la curva teorica fino ad ottenere dei valori più prossimi a quelli sperimentali (Figura 67).

Ora l'accordo teorico-sperimentale risulta essere migliore.

Tale risultato è stato raggiunto:

- Mettendo la conducibilità in fase solida pari a **0.4 W/m.K**. Tale valore è molto prossimo a quelli di letteratura (0.4-0.5 W/m.K). Da ciò ne risulterebbe un valore di conducibilità misurato superiore a quello reale;
- Mettendo la conducibilità in fase liquida pari a **1.5 W/m.K**. Tale valore è circa 3 volte quello di letteratura, che viene considerato simile al solido. Ciò lascia supporre che l'instaurarsi dei moti convettivi nel fluido alteri lo scambio termico e la componente convettiva sia predominante. Il valore trovato è perciò quello relativo ad una conducibilità "equivalente" che tenga in conto il fenomeno;



**Figura 67-- Curva teorica modificata, numerica e punti sperimentali per stati stazionari – caso 1.2**

Facendo la stessa operazione con il TES a tubi lisci ma contenente il sale solare con nanoparticelle si ottiene quanto mostrato in **Figura 68**. Anche in questo caso la conducibilità termica del mezzo di accumulo, in laboratorio pari a **0.9 W/m.K**, è stata ridotta per la fase solida a **0.4 W/m.K** ed lasciata inalterata per la fase liquida a **0.9 W/m.K**. Da ciò ne possono derivare due tipi di considerazione:

- La presenza di nanoparticelle non sembra alterare in modo significativo la conducibilità termica del PCM base utilizzato;
- Il vantaggio relativo al migliore scambio termico connesso all’innesco dei moti convettivi nel mezzo in fase fluida sono notevolmente ridotti. Questo potrebbe essere conseguenza di un possibile incremento della viscosità del mezzo indotto dalla presenza delle nanoparticelle.

Infine, ripetiamo lo stesso procedimento anche per i tubi alettati con il PCM base, cercando il valore della conducibilità “equivalente” che approssimasse bene i dati sperimentali (**Figura 69**).

Tale risultato è stato raggiunto:

- Mettendo la conducibilità in fase solida pari a **0.8 W/m.K**. Tale dato è il valore “equivalente” dell’insieme PCM+alette, ed evidenzia il ruolo di promozione della conducibilità esercitato da quest’ultime. Evidentemente, il punto sperimentale più esterno si trova in basso poiché non risente di questo effetto;
- Mettendo la conducibilità in fase liquida pari a **1.5 W/m.K**. Tale valore è praticamente uguale a quello trovato per i tubi lisci e superiore a quello “equivalente” precedente del solido. Evidentemente, anche in questo caso, oltre l’effetto di promozione delle alette esiste una componente, seppur minima, connessa ad eventuali moti convettivi del fluido.

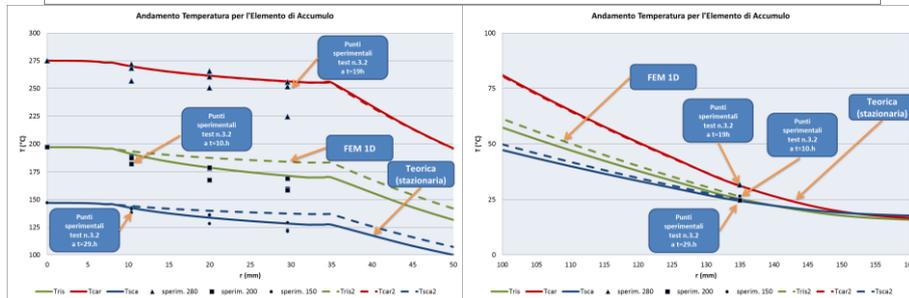
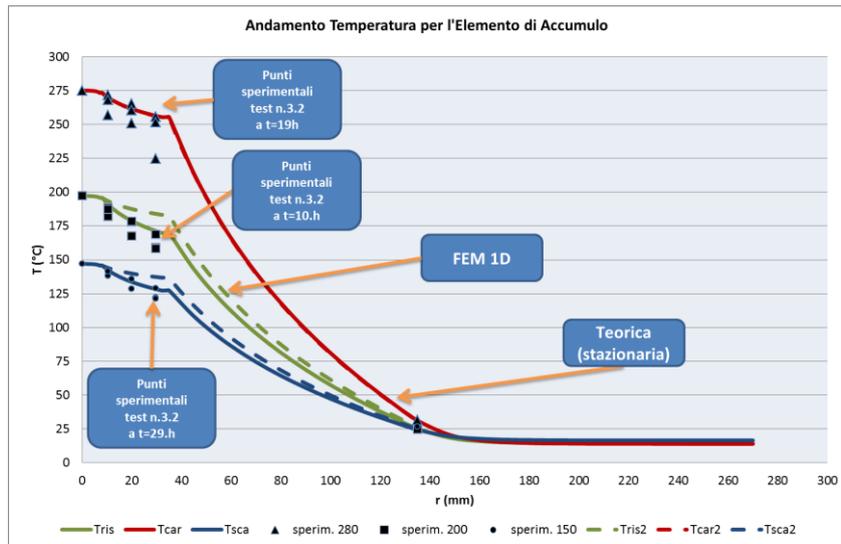


Figura 68-- Curva teorica modificata, numerica e punti sperimentali per stati stazionari – caso 3.2

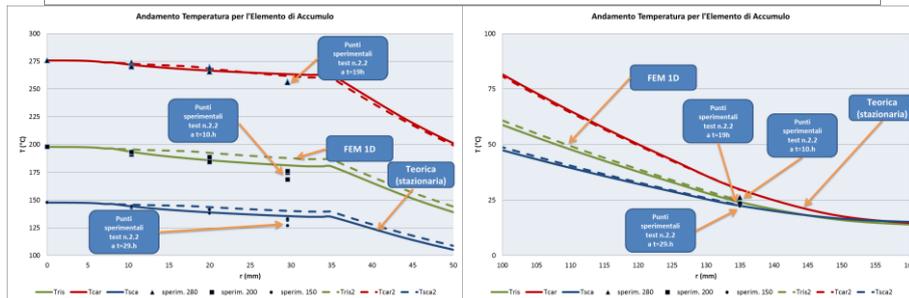
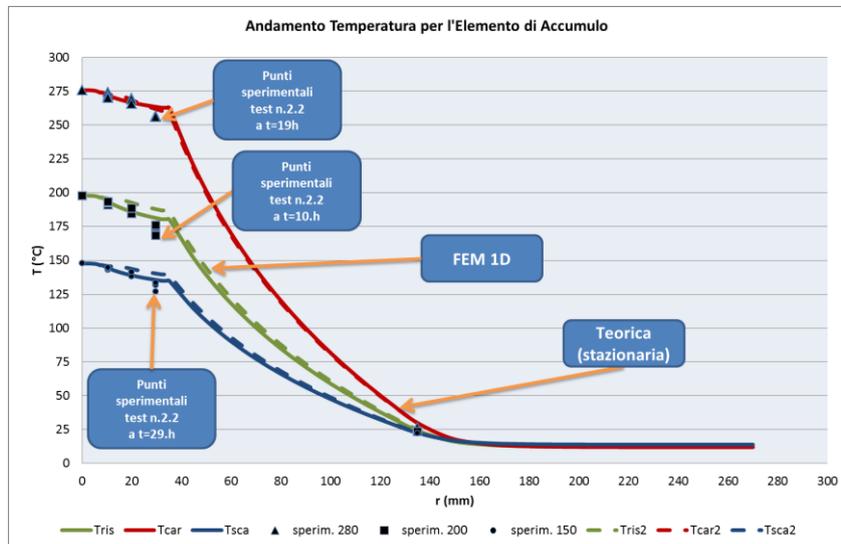


Figura 69-- Curva teorica modificata, numerica e punti sperimentali per stati stazionari – caso 2.2

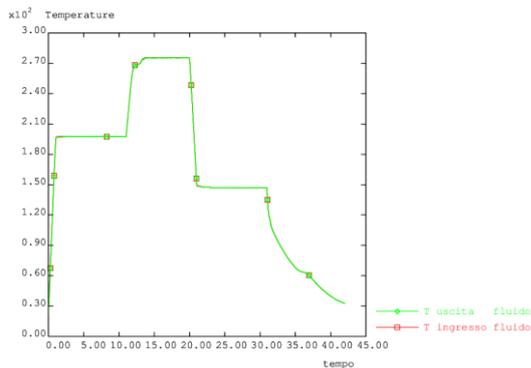
## 2.2.7 Simulazione numerica 2D di un TES elementare

### 2.2.7.1 TES elementare a “sali solari” e tubo liscio

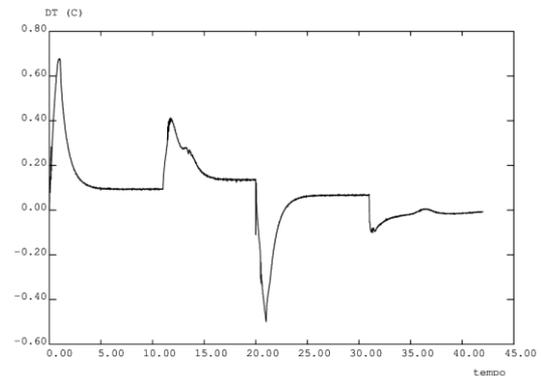
Il primo caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio liscio e contenente dei semplici sali solari come PCM.

#### Temperatura del fluido termo-vettore

In **Figura 21** è possibile vedere l'andamento della temperatura del fluido termo-vettore all'ingresso ed all'uscita del tubo di scambio termico. La differenza tra le due (**Figura 22**) si attesta, nei regimi stazionari, nell'ordine dei 0.1°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (0.7 e 0.4°C) e di raffreddamento (-0.5°C).



**Figura 70-** Andamento temperature di ingresso ed uscita del fluido termo-vettore

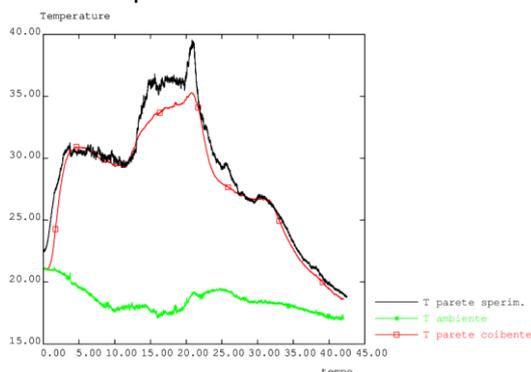


**Figura 71-** Andamento salto termico ingresso-uscita

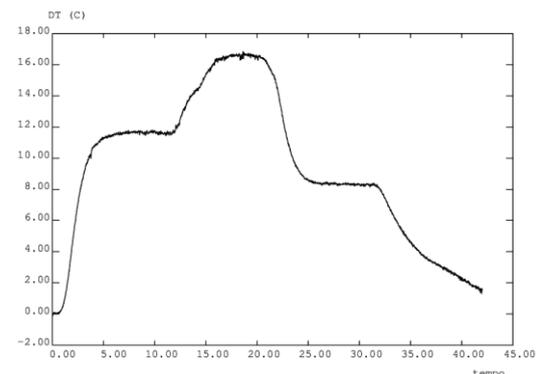
Tale differenza di temperature conduce, a regime e nelle condizioni termo-fluido-dinamiche ipotizzate, ad una potenza ceduta al TES di circa 25-50W.

#### Temperatura della parete esterna del TES

In **Figura 72** è mostrato l'andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.



**Figura 72-** Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)

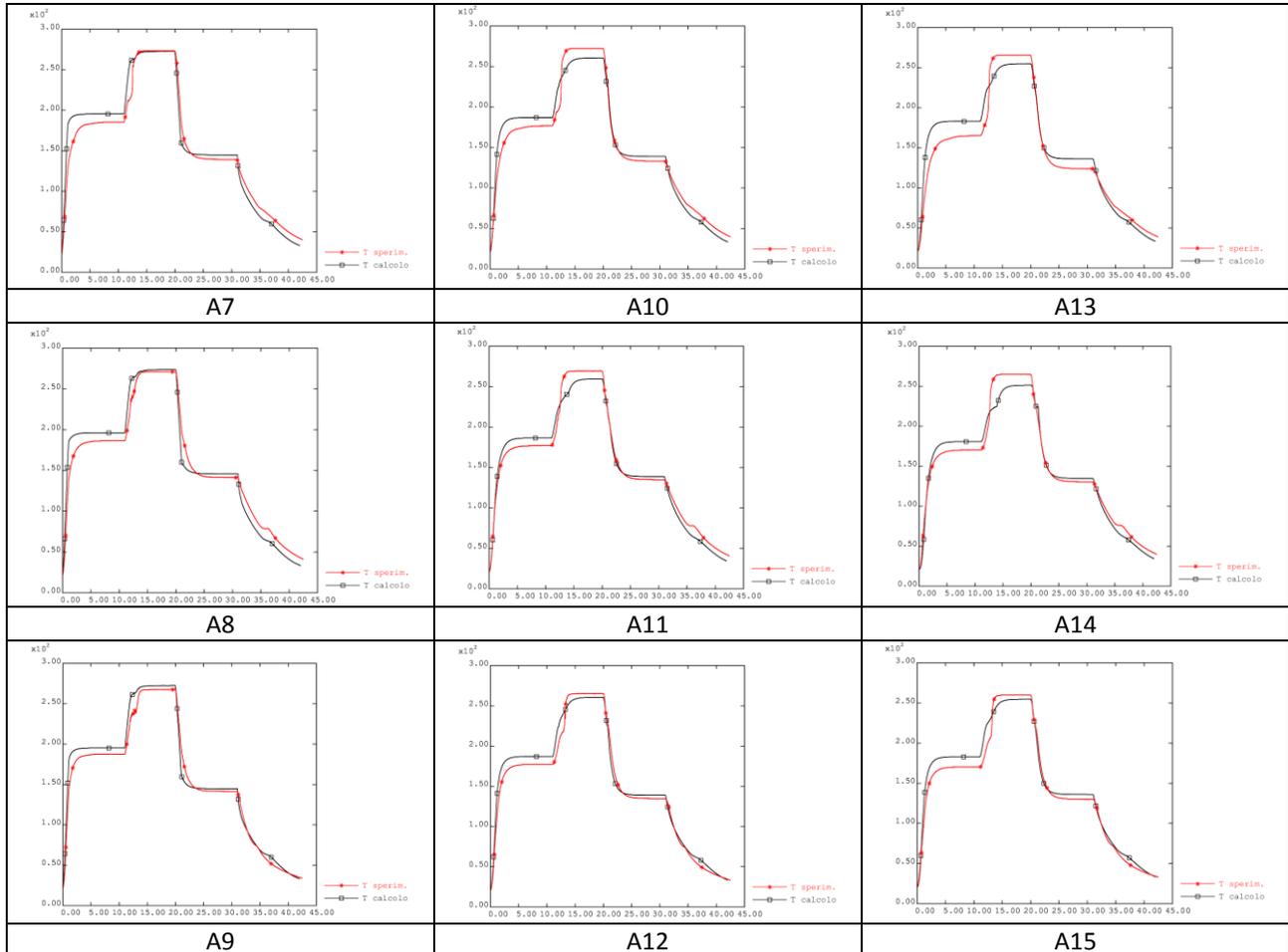


**Figura 73-** Andamento salto termico TES-ambiente

Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nella zona relativa al cambiamento di fase solido-liquido. In questa zona la temperatura misura risulta essere più alta di quella calcolata e, di conseguenza le perdite calcolate saranno sottostimate rispetto la realtà. Il salto termico tra la parete del TES e l'ambiente è in genere tra gli 8 ed i 17°C (**Figura 73**) mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo (30-60 W). Per un sistema di 3 elementi la potenza dispersa verso l'ambiente sarebbe allora di 90-180W.

### Temperatura nel PCM

In **Figura 74** è riportata l'evoluzione delle temperature calcolate e sperimentali in 9 punti del PCM: tre punti (interno, medio ed esterno) su tre livelli (superiore, medio, inferiore), da A8 a A15.



**Figura 74- Confronto numerico-sperimentale della temperatura dei punti A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14 e A15**

Le temperature mostrano un buon accordo per le zone relative al riscaldamento e raffreddamento del mezzo solido. Invece, nella zona centrale, interessata dal cambio di fase e dai fenomeni connessi, la previsione numerica risulta essere sottostimante. Le temperature sperimentali sono più elevate, evidenziano molto meno il cambio di fase del mezzo, arrivando ad una condizione stazionaria in tempi più rapidi e risultando quasi uniformi in tutta la sezione.

Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal fatto che il PCM, in fase liquida, è soggetto a moti convettivi, innescati dai gradienti termici e dalla gravità del mezzo stesso, che migliorano il trasporto del calore nel mezzo e tendono a miscelare ed uniformare le temperature.

Chiaramente, la simulazione numerica FEM non tiene in conto questa tipologia di fenomeno, per la quale sarebbe necessario ricorrere a simulazioni CFD. Inoltre, nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di *onset* ed una di *endset*, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno.

In **Figura 75** e **Figura 76** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 4 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, circa 1 ora. Occorre tenere presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

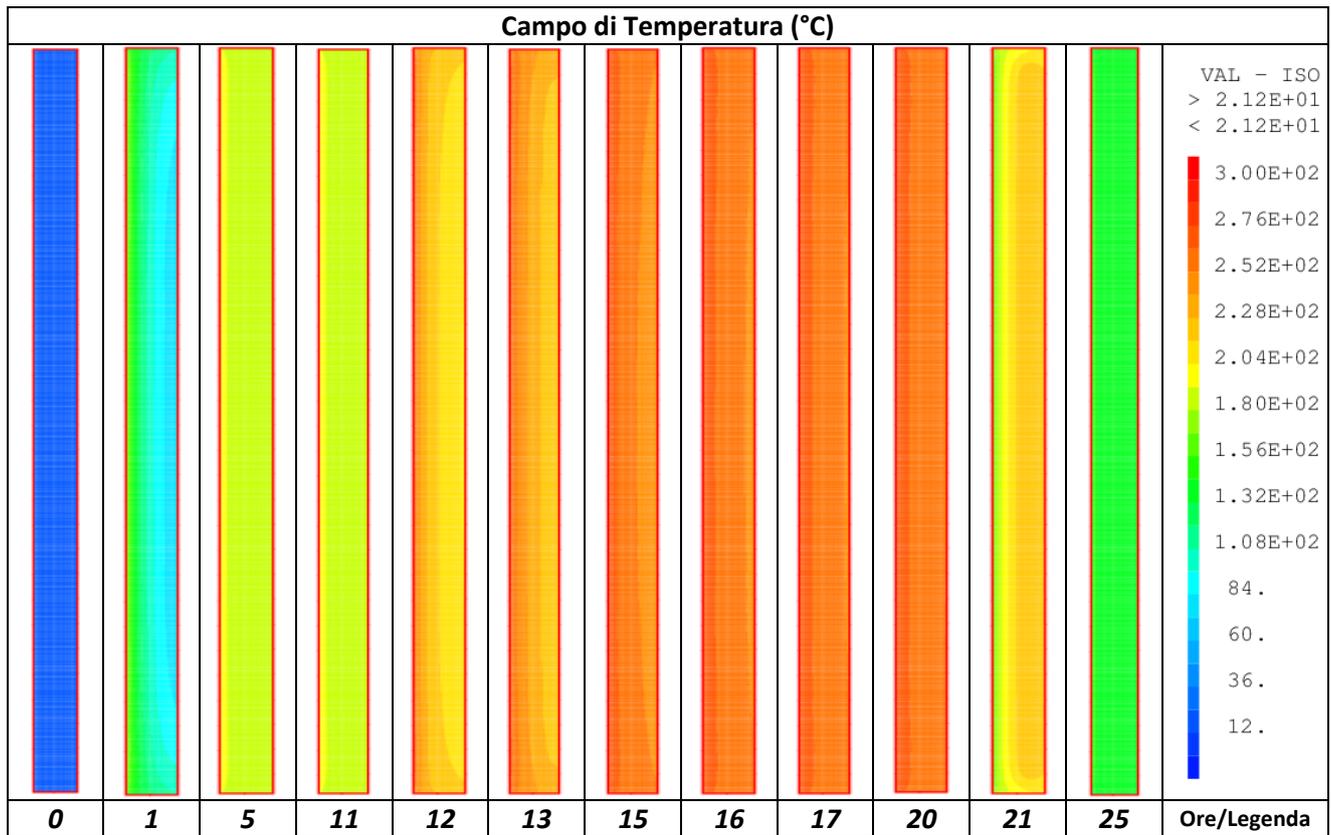


Figura 75- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

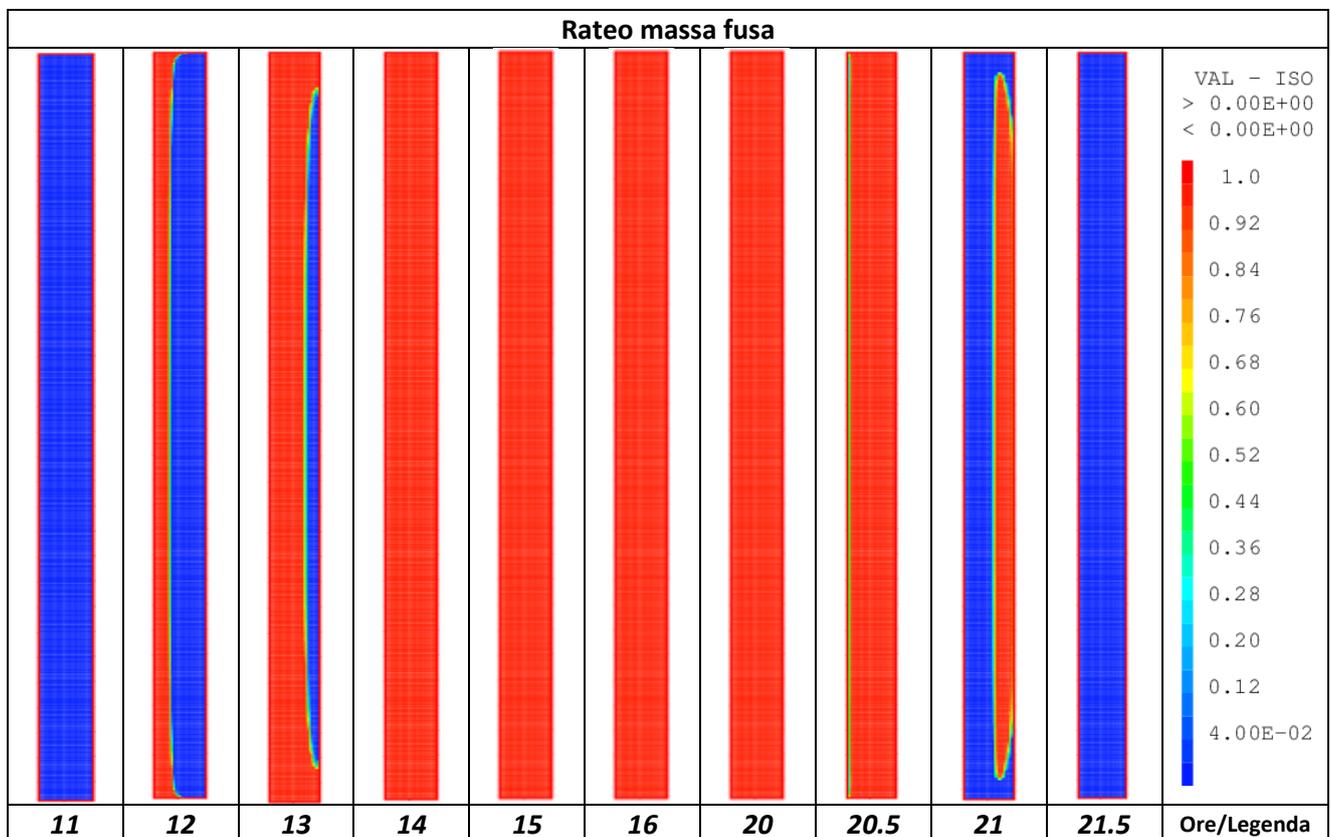
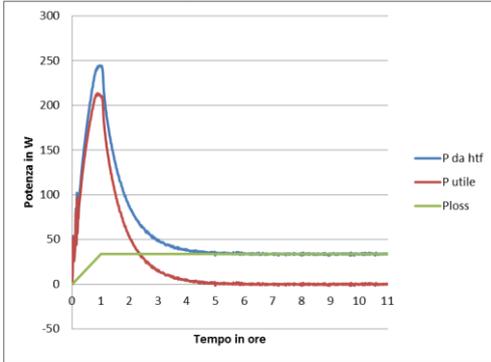


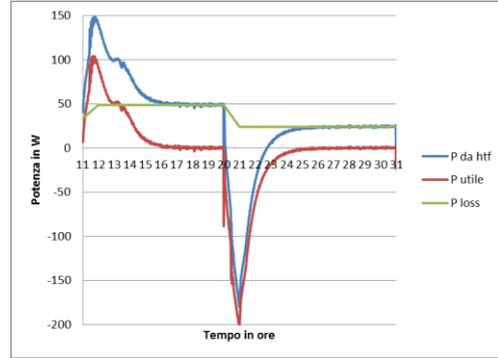
Figura 76- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES. In fase di primo riscaldamento (Figura 77) la potenza persa è di circa 34W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 210W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 5 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 297 Wh.

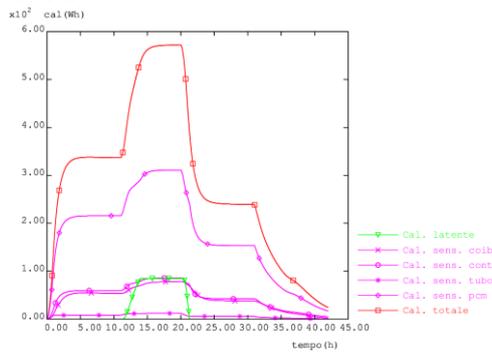


**Figura 77- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 78- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 78) la potenza persa è, rispettivamente di circa 49W e 24W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 100W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 5-6 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -200W e si riannulla ancora dopo circa 6 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 209Wh mentre quella estratta (scarica) di 294Wh). La differenza tra questi due valori, circa 85Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 6 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 42.6W. In Figura 31 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel TES sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 79- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

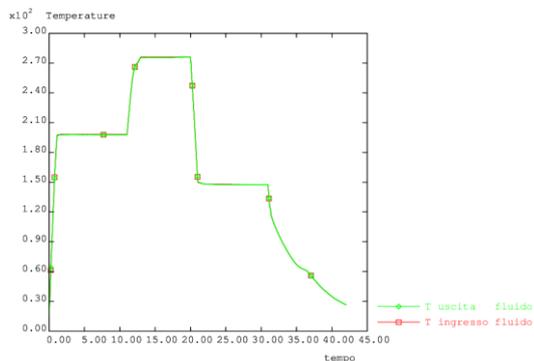
L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 85Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente, nella evoluzione complessiva della prova, il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 15% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carica e scarica). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura, rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 230Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale.

### 2.2.7.2 TES elementare a “sali solari” e tubo alettato

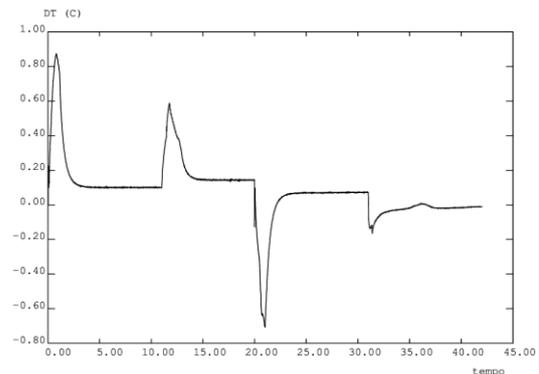
Il secondo caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio alettato e contenente dei semplici sali solari come PCM.

#### Temperatura del fluido termo-vettore

In **Figura 80** è possibile vedere l'andamento della temperatura del fluido termo-vettore all'ingresso ed all'uscita del tubo di scambio termico. La differenza tra le due (**Figura 81**) si attesta, nei regimi stazionari, nell'ordine dei 0.1°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (0.8 e 0.6°C) e di raffreddamento (-0.7°C).



**Figura 80-** Andamento temperature di ingresso ed uscita del fluido termo-vettore

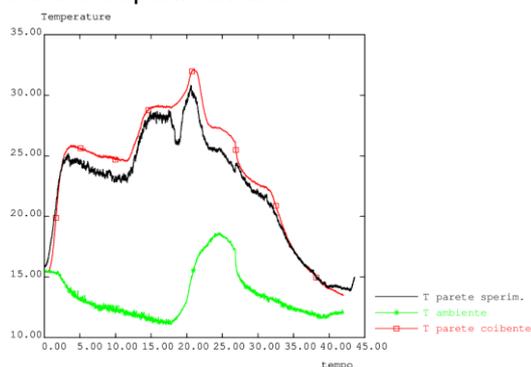


**Figura 81-** Andamento salto termico ingresso-uscita

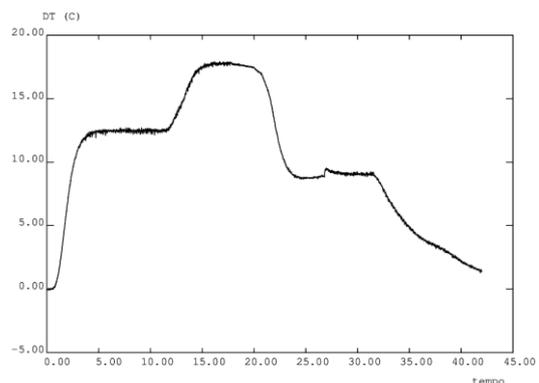
Tale differenza di temperature conduce, a regime e nelle condizioni termo-fluido-dinamiche ipotizzate, ad una potenza ceduta al TES di circa 25-50W.

#### Temperatura della parete esterna del TES

In **Figura 82** è mostrato l'andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.



**Figura 82-** Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)

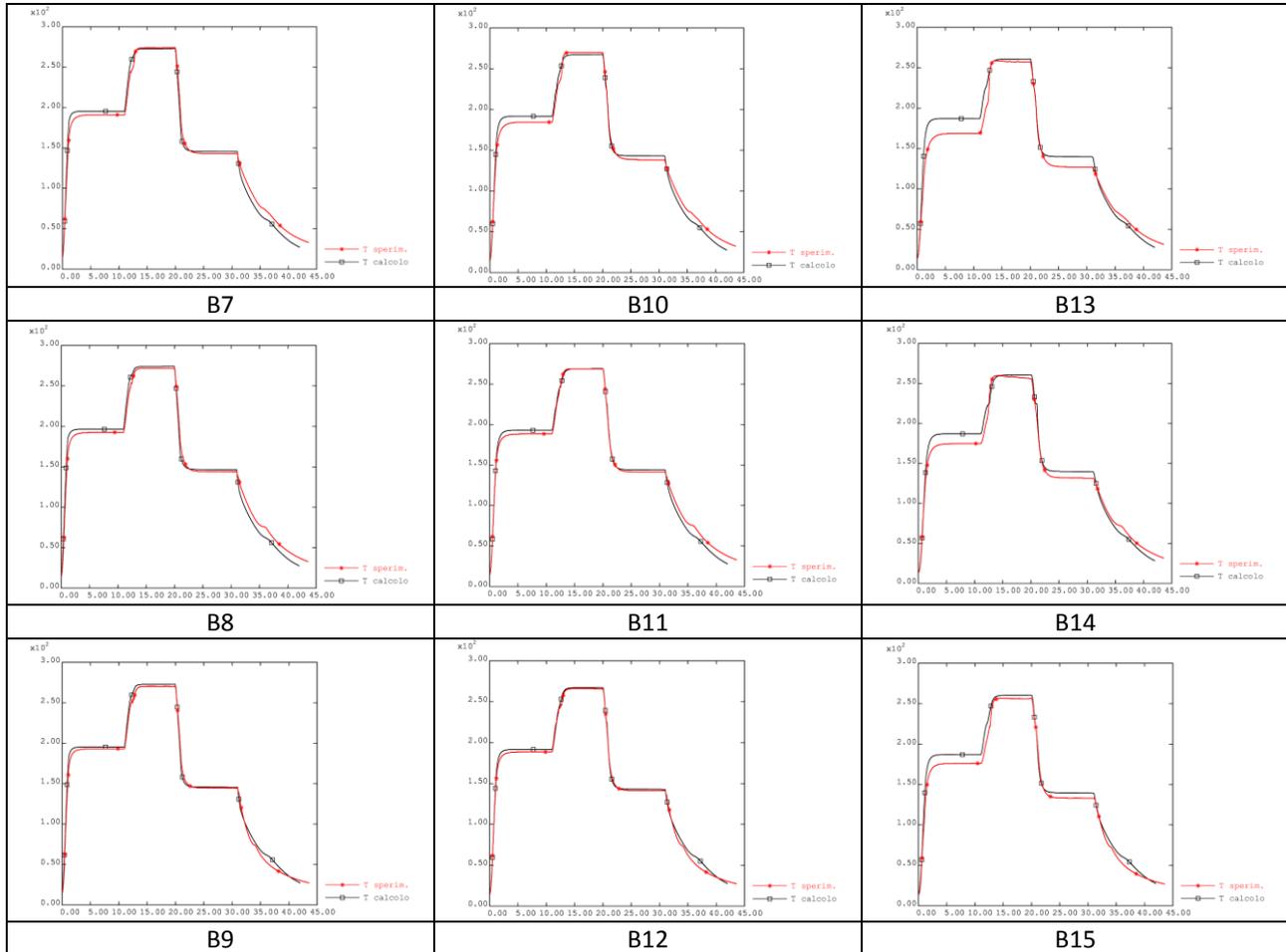


**Figura 83-** Andamento salto termico TES-ambiente

Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nelle zone relative al riscaldamento ed al cambiamento di fase solido-liquido. In queste zone la temperatura misura risulta essere più bassa di quella calcolata e, di conseguenza le perdite calcolate saranno sovrastimate rispetto la realtà. In **Figura 83** è riportato l'andamento del salto termico tra la parete del TES e l'ambiente (in genere tra gli 8 ed i 18°C) mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo (30-70 W). Per un sistema di 3 elementi la potenza dispersa verso l'ambiente sarebbe allora di 90-210W.

### Temperatura nel PCM

In **Figura 84** è riportata l'evoluzione delle temperature calcolate e sperimentali in 9 punti del PCM: tre punti (interno, medio ed esterno) su tre livelli (superiore, medio, inferiore), da B8 a B15.



**Figura 84- Confronto numerico-sperimentale della temperatura dei punti B8, B9, B10, B11, B12, B13, B14 e B15**

Le temperature mostrano un buon accordo generale con una leggera sovrastima soprattutto per le zone relative al riscaldamento e raffreddamento del mezzo solido. Invece, nella zona centrale, interessata dal cambio di fase e dai fenomeni connessi, la previsione numerica risulta essere in buon accordo.

Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal fatto che il PCM, in fase liquida, è soggetto a moti convettivi, innescati dai gradienti termici e dalla gravità del mezzo stesso, che migliorano il trasporto del calore nel mezzo e tendono a miscelare ed uniformare le temperature. Ciò avviene anche in presenza di alettatura che dovrebbe ostacolare tali moti.

Chiaramente, la simulazione numerica FEM non tiene in conto questa tipologia di fenomeno, per la quale sarebbe necessario ricorrere a simulazioni CFD. Inoltre, nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di *onset* ed una di *endset*, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno.

In **Figura 85** e **Figura 86** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 2 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, meno di 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

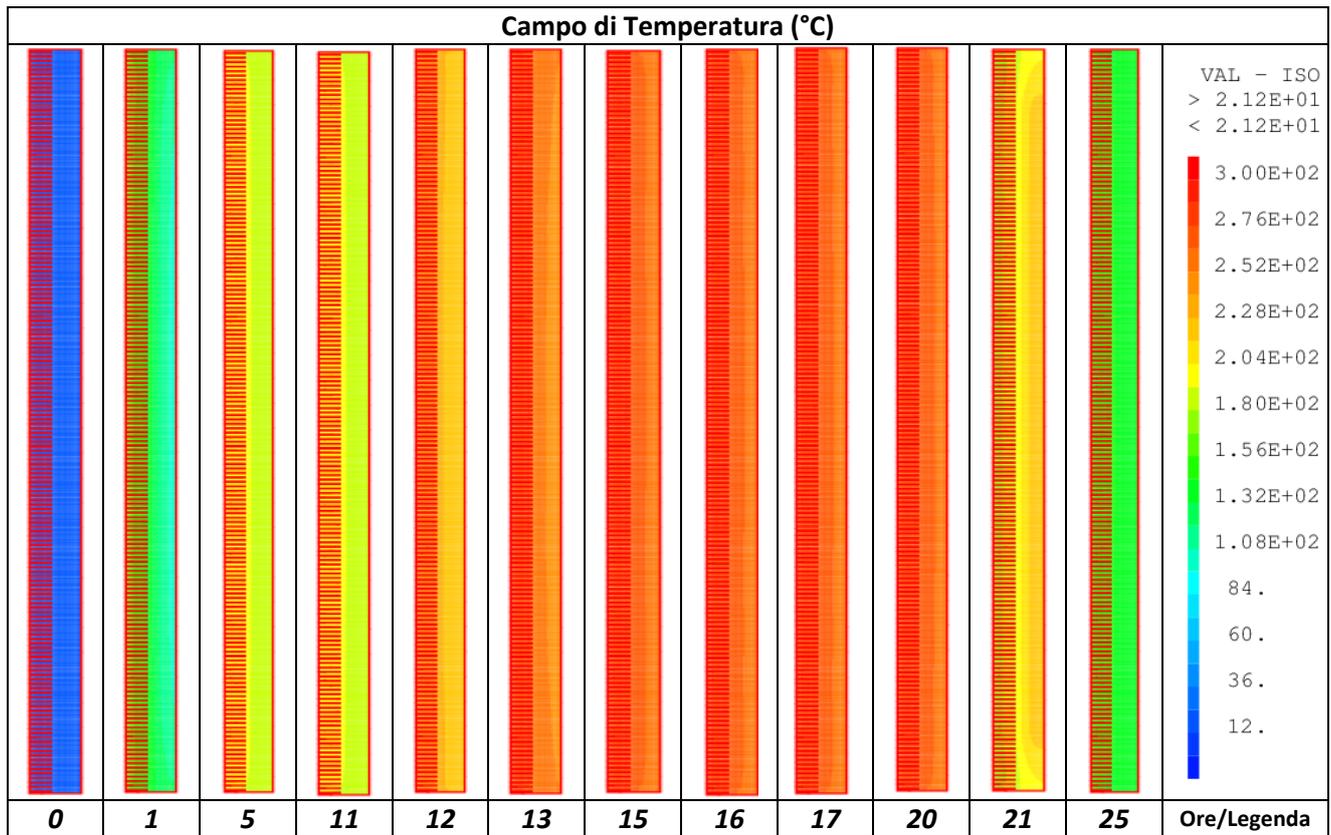


Figura 85- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

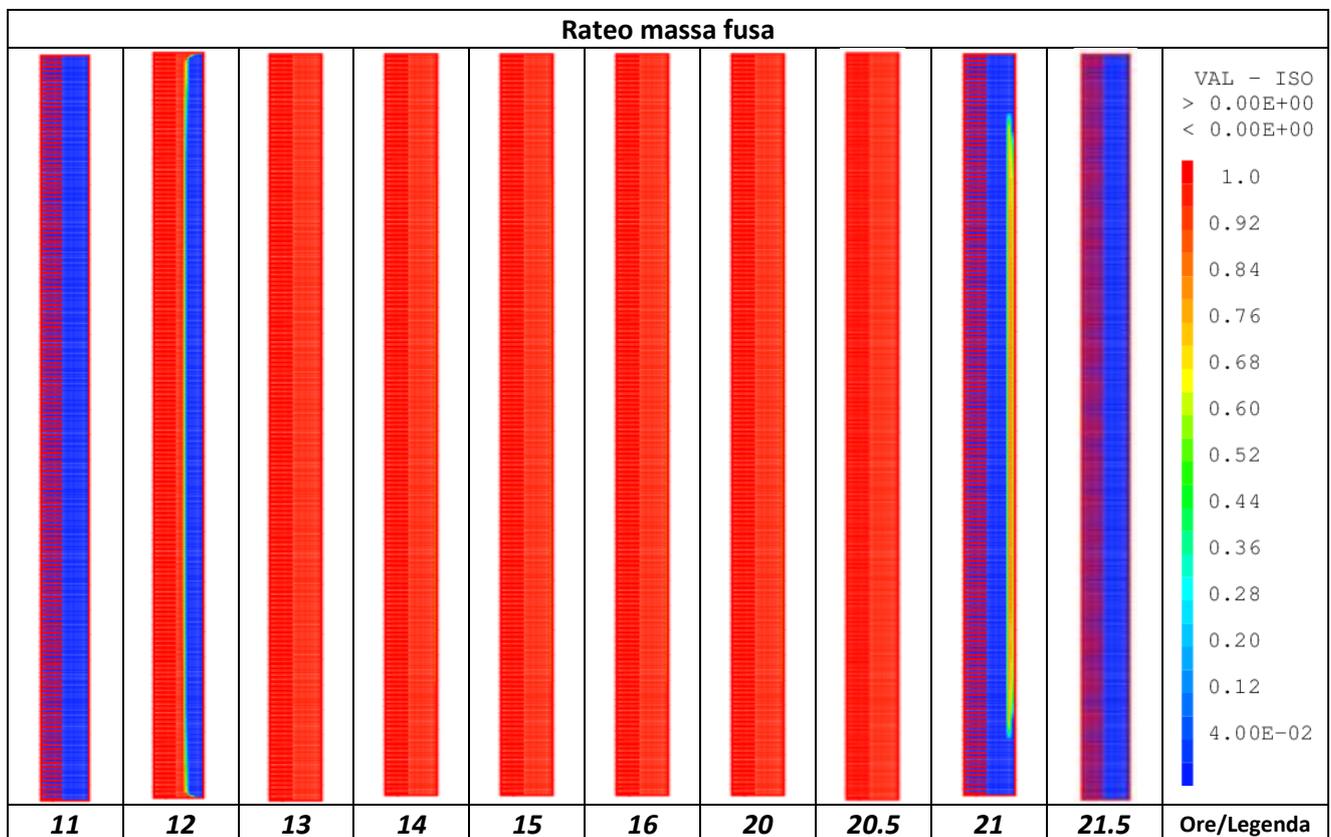
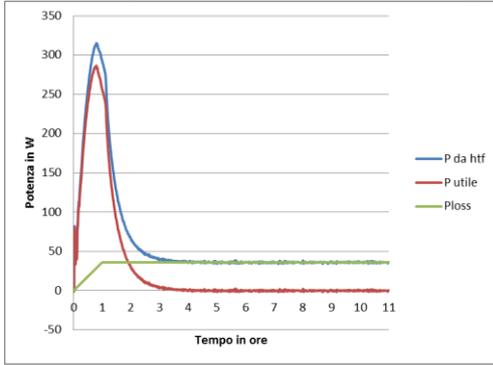


Figura 86- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

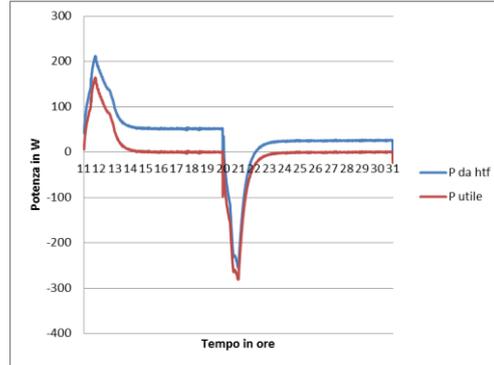
**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES.

In fase di primo riscaldamento (Figura 87) la potenza persa è di circa 36W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 280W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 328 Wh.

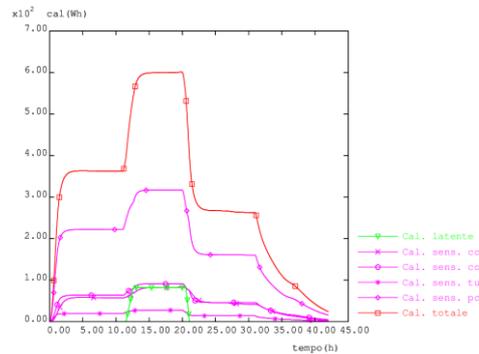


**Figura 87- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 88- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 88) la potenza persa è, rispettivamente di circa 52W e 26W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 175W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 3-4 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -280W e si riannulla ancora dopo circa 4 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 219Wh mentre quella estratta (scarica) di 308Wh. La differenza tra questi due valori, circa 89Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 4 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 63W. In Figura 89 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel TES sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 89- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

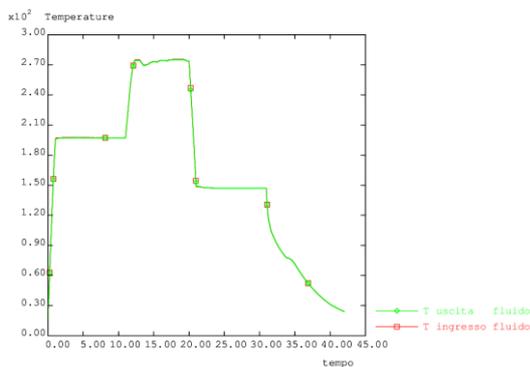
L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 85Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente, nella evoluzione complessiva della prova, il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 15% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carica e scarica). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura, rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 250Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale.

### 2.2.7.3 TES elementare a “sali solari” con nanoparticelle e tubo liscio

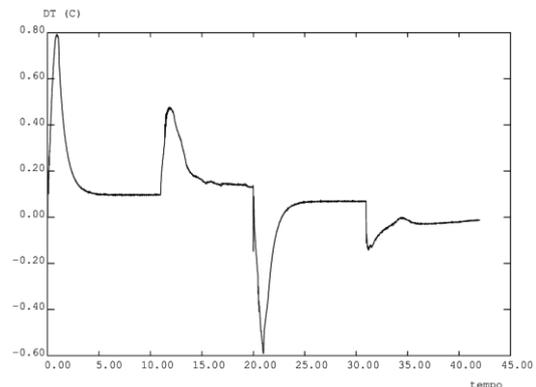
Il terzo caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio liscio e contenente dei sali solari con aggiunta di nanoparticelle come PCM.

#### Temperatura del fluido termo-vettore

In **Figura 90** è possibile vedere l'andamento della temperatura del fluido termo-vettore all'ingresso ed all'uscita del tubo di scambio termico. La differenza tra le due (**Figura 91**) si attesta, nei regimi stazionari, nell'ordine dei 0.1°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (0.8 e 0.5°C) e di raffreddamento (-0.6°C).



**Figura 90- Andamento temperature di ingresso ed uscita del fluido termo-vettore**

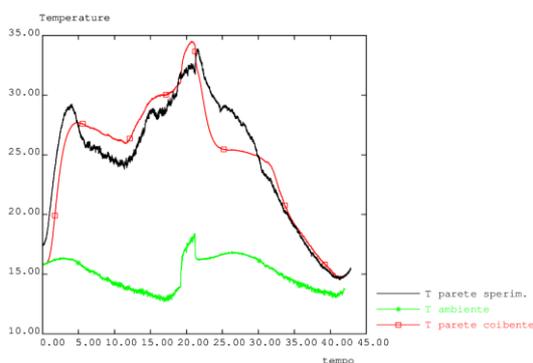


**Figura 91- Andamento salto termico ingresso-uscita**

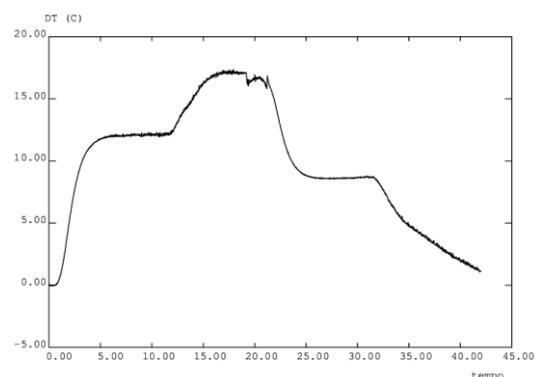
Tale differenza di temperature conduce, a regime e nelle condizioni termo-fluido-dinamiche ipotizzate, ad una potenza ceduta al TES di circa 25-50W.

#### Temperatura della parete esterna del TES

In **Figura 92** è mostrato l'andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.



**Figura 92- Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)**

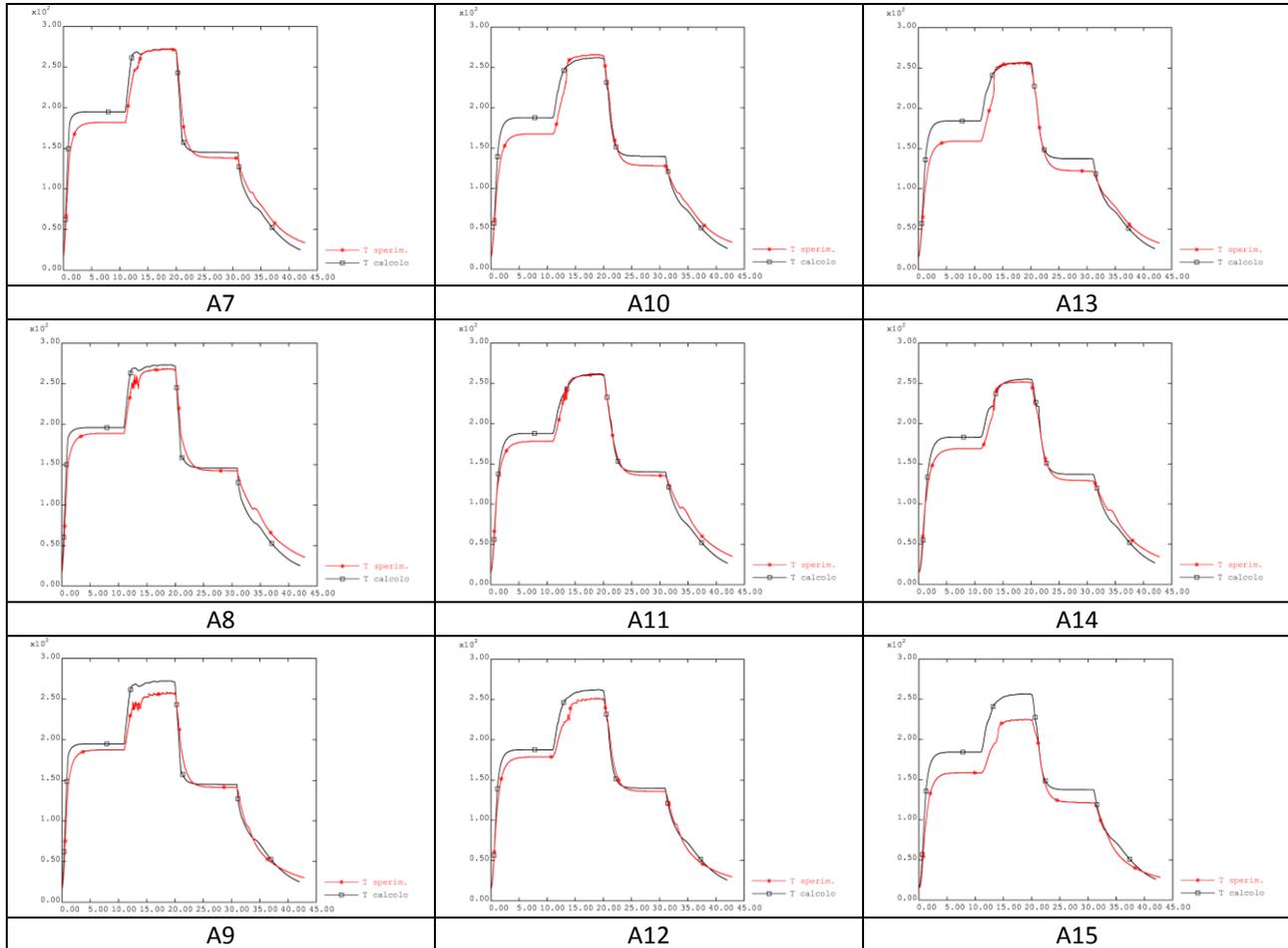


**Figura 93- Andamento salto termico TES-ambiente**

Il valore calcolato e sperimentale mostrano un buon accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia soprattutto nelle zone di riscaldamento e di scarico. In queste zone la temperatura misura risulta essere più bassa durante il riscaldamento e più alta durante lo scarico. In **Figura 93** è riportato l'andamento del salto termico tra la parete del TES e l'ambiente (in genere tra gli 8 ed i 17°C) mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo (30-60 W). Per un sistema di 3 elementi la potenza dispersa verso l'ambiente sarebbe allora di 90-180W.

### Temperatura nel PCM

In **Figura 94** è riportata l'evoluzione delle temperature calcolate e sperimentali in 9 punti del PCM: tre punti (interno, medio ed esterno) su tre livelli (superiore, medio, inferiore), da A8 a A15.



**Figura 94- Confronto numerico-sperimentale della temperatura dei punti A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14 e A15**

Le temperature mostrano un buon accordo nella zona centrale, interessata dal cambio di fase e dai fenomeni connessi. Invece, per le zone relative al riscaldamento e raffreddamento del mezzo solido, la previsione numerica risulta essere sovrastimante. Le temperature sperimentali sono più basse, evidenziano molto meno il cambio di fase del mezzo, e arrivando ad una condizione stazionaria in tempi più lunghi.

Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal fatto che il PCM, in fase solida, manifesta dei valori di conducibilità/diffusività, inferiori a quelli utilizzati nel calcolo, mentre, in fase liquida, è soggetto a moti convettivi, innescati dai gradienti termici e dalla gravità del mezzo stesso, che migliorano il trasporto del calore nel mezzo e tendono a miscelare ed uniformare le temperature.

Chiaramente, la simulazione numerica FEM non tiene in conto questa tipologia di fenomeno, per la quale sarebbe necessario ricorrere a simulazioni CFD. Inoltre, nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di *onset* ed una di *endset*, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno.

In **Figura 95** e **Figura 96** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 2 ore mentre quella di solidificazione è molto più corta, circa 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

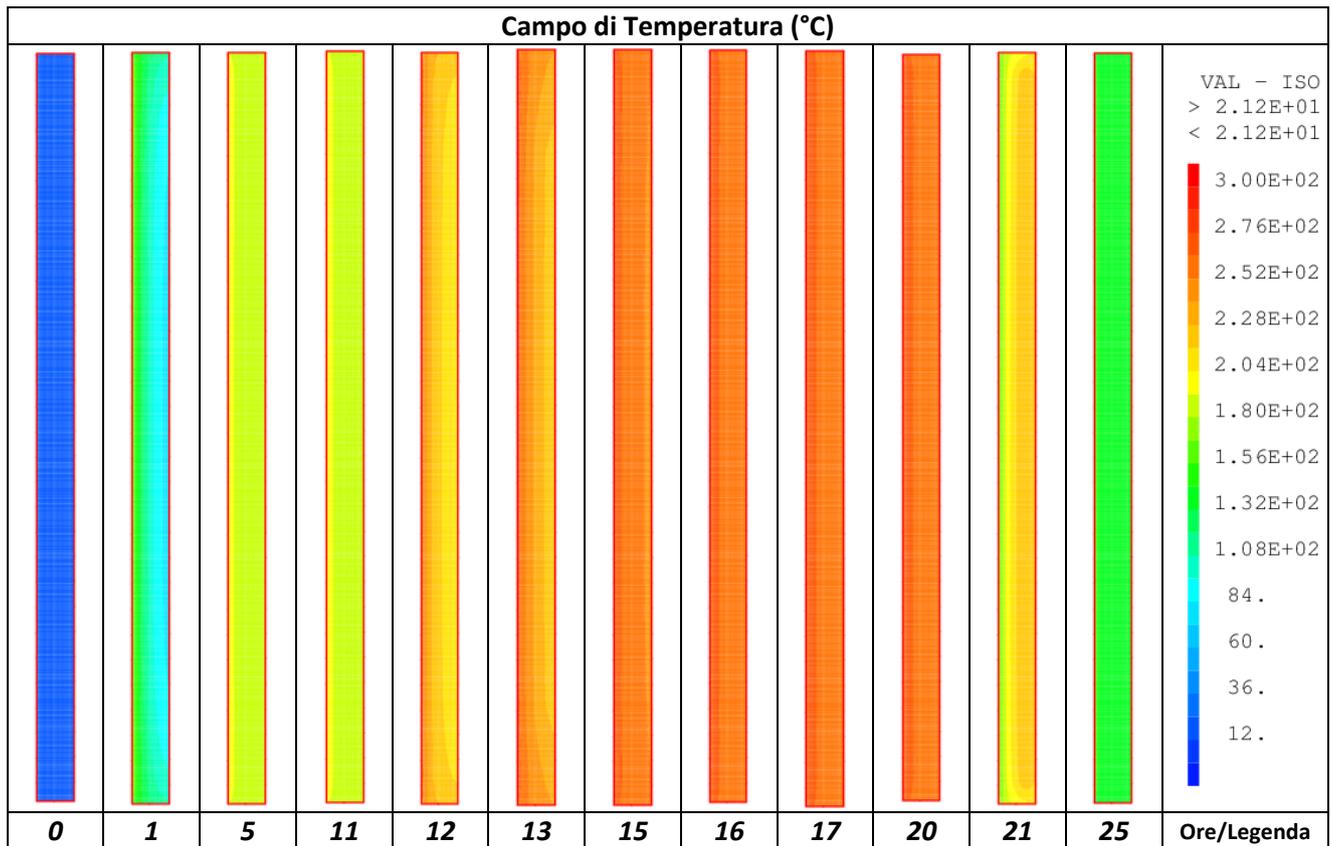


Figura 95- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

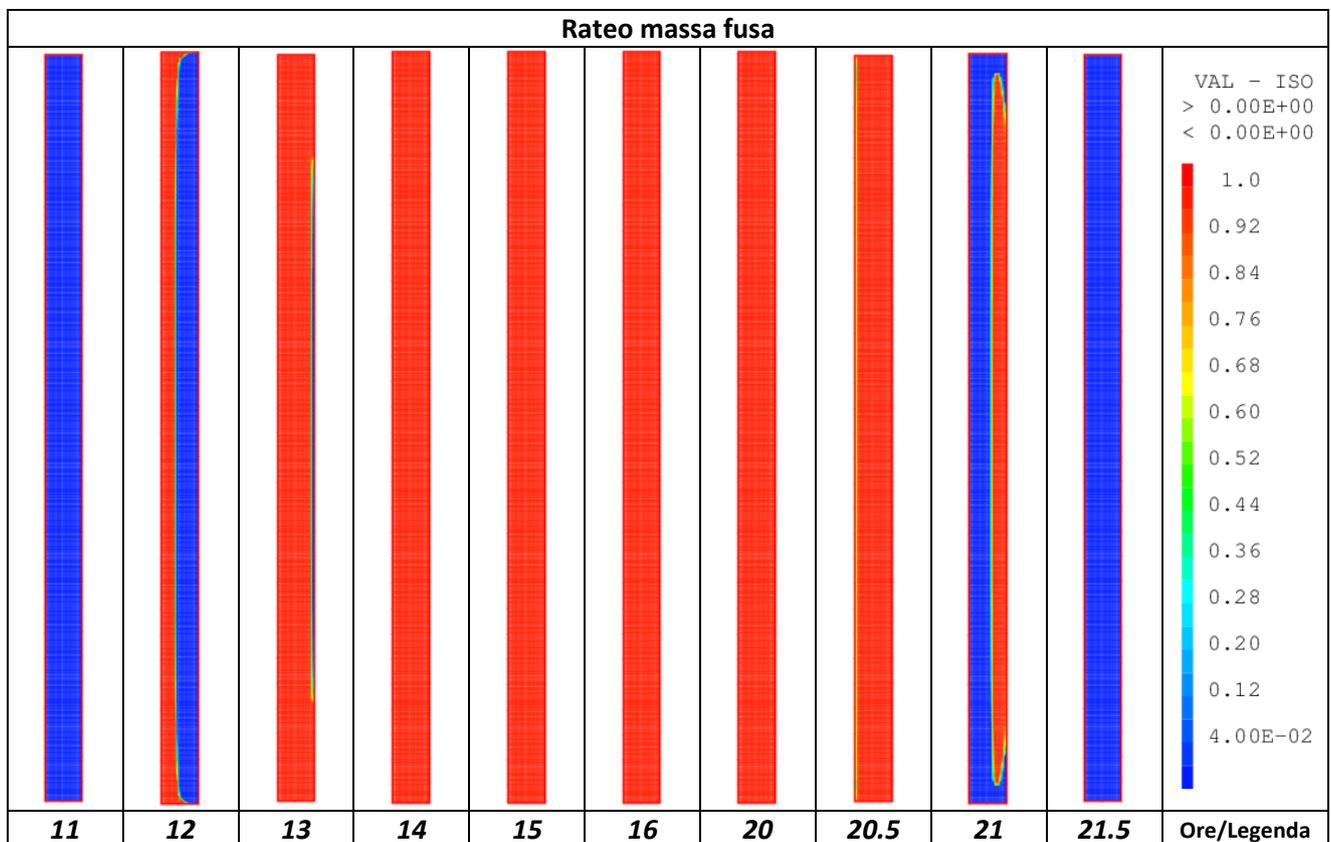
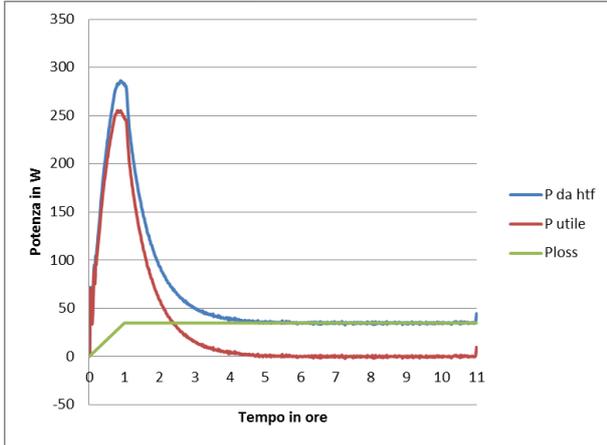


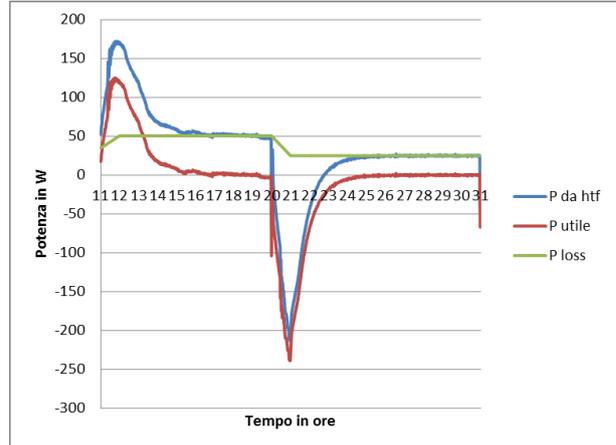
Figura 96- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PC

**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES. In fase di primo riscaldamento (Figura 97) la potenza persa è di circa 35W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 260W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 5 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 353 Wh.

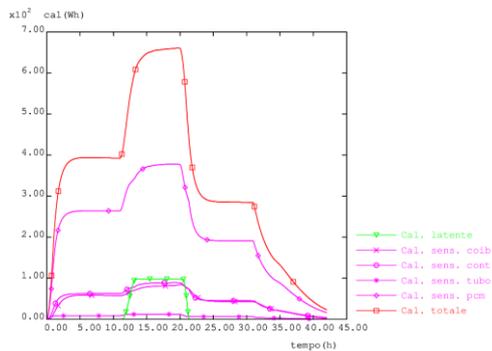


**Figura 97- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 98- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 98) la potenza persa è, rispettivamente di circa 51W e 25W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 125W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 5-6 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -230W e si riannulla ancora dopo circa 5 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 237Wh mentre quella estratta (scarica) di 336Wh. La differenza tra questi due valori, circa 99Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 5 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 68W. In Figura 99 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel TES sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 99- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

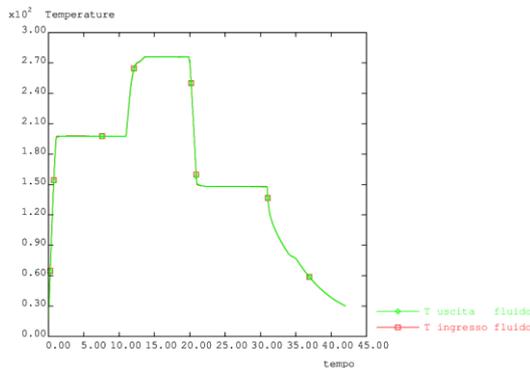
L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 100Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili, ma leggermente inferiori, sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente, nella evoluzione complessiva della prova, il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 15% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carica e scarica). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura, rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 260Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale.

### 2.2.7.4 TES elementare a “sali solari” con nanoparticelle e tubo alettato

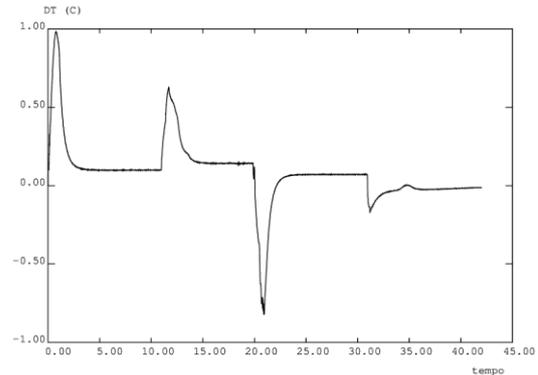
Il quarto caso analizzato è stato quello di un TES elementare utilizzando un tubo di scambio alettato e contenente dei sali solari con aggiunta di nanoparticelle come PCM.

#### Temperatura del fluido termo-vettore

In **Figura 100** è possibile vedere l’andamento della temperatura del fluido termo-vettore all’ingresso ed all’uscita del tubo di scambio termico. La differenza tra le due (**Figura 101**) si attesta, nei regimi stazionari, nell’ordine dei 0.1°C con alcuni picchi relativi ai transitori di riscaldamento (1.0 e 0.6°C) e di raffreddamento (-0.8°C).



**Figura 100- Andamento temperature di ingresso ed uscita del fluido termo-vettore**

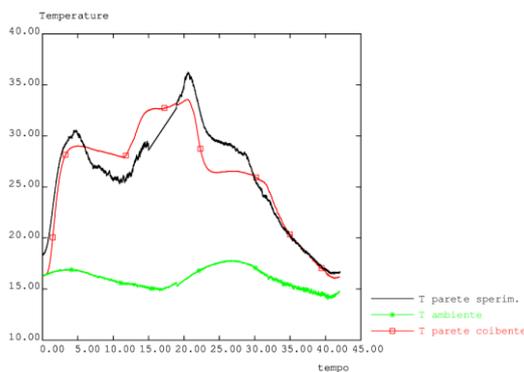


**Figura 101- Andamento salto termico ingresso-uscita**

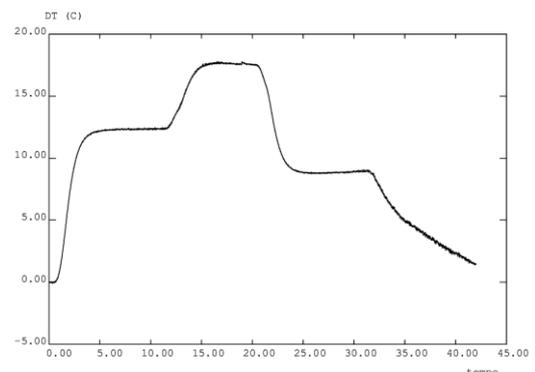
Tale differenza di temperature conduce, a regime e nelle condizioni termo-fluido-dinamiche ipotizzate, ad una potenza ceduta al TES di circa 25-50W.

#### Temperatura della parete esterna del TES

In **Figura 102** è mostrato l’andamento della temperatura ambiente e di quella della parete esterna del TES, sia calcolata che sperimentale.



**Figura 102- Andamento della temperatura ambiente e di parete esterna (calcolata e sperimentale)**

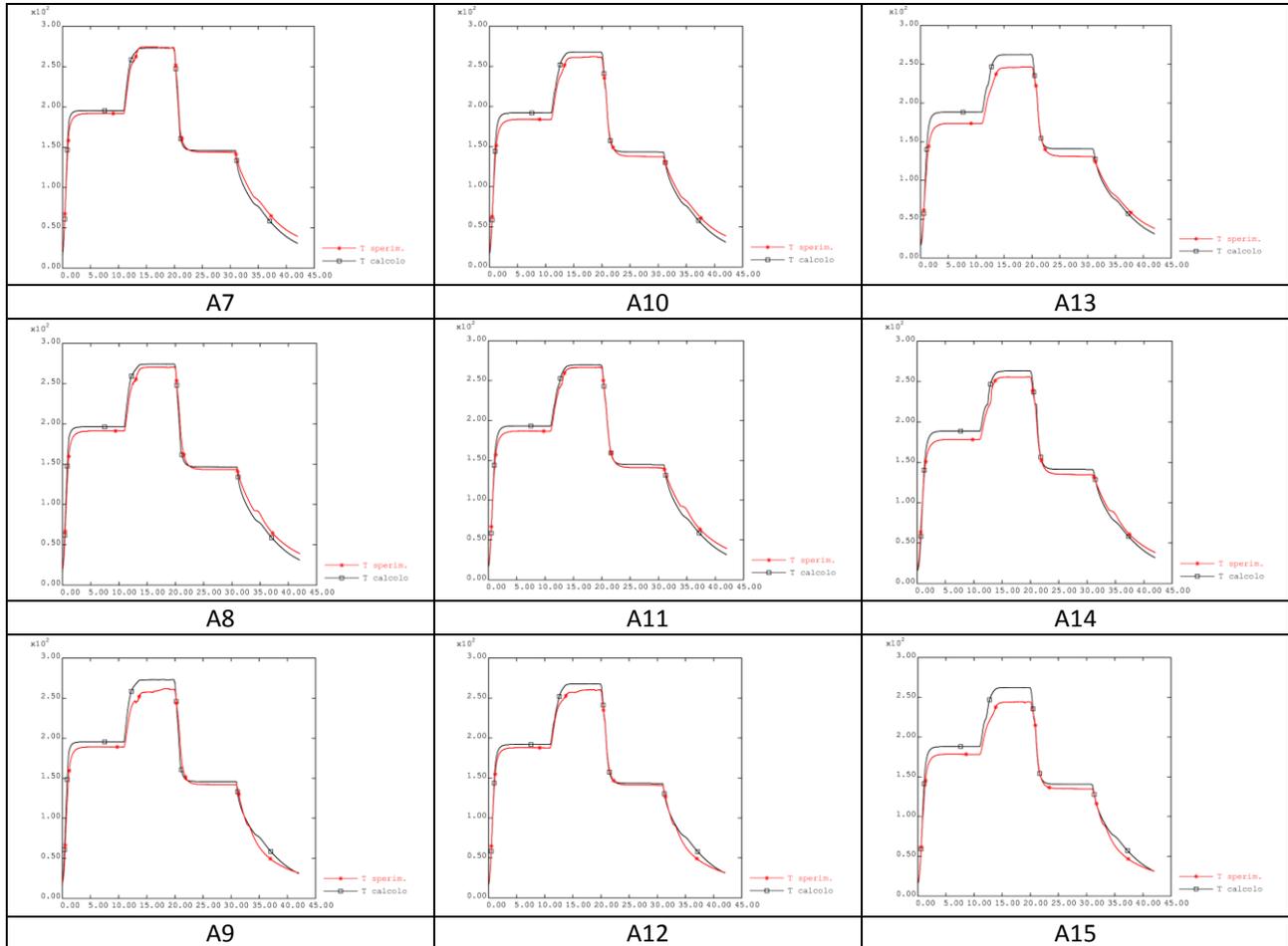


**Figura 103- Andamento salto termico TES-ambiente**

Il valore calcolato e sperimentale mostrano un certo accordo qualitativo ma una certa differenza quantitativa che si evidenzia in quasi tutte le zone. La temperatura misura risulta essere più bassa di quella calcolata durante il riscaldamento e la carica e più alta durante lo scarico. In **Figura 103** è riportato l’andamento del salto termico tra la parete del TES e l’ambiente (in genere tra gli 7 ed i 18°C) mentre la potenza dispersa per la sezione di calcolo (30-60 W). Per un sistema di 3 elementi la potenza dispersa verso l’ambiente sarebbe allora di 90-180W.

**Temperatura nel PCM**

In **Figura 104** è riportata l'evoluzione delle temperature calcolate e sperimentali in 9 punti del PCM: tre punti (interno, medio ed esterno) su tre livelli (superiore, medio, inferiore), da B8 a B15.



**Figura 104- Confronto numerico-sperimentale della temperatura dei punti A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14 e A15**

Le temperature mostrano un buon accordo per le zone relative al riscaldamento e raffreddamento del mezzo solido. Invece, nella zona centrale, interessata dal cambio di fase e dai fenomeni connessi, la previsione numerica risulta essere sovrastimante. Le temperature sperimentali sono più basse, evidenziano abbastanza bene il cambio di fase del mezzo, arrivano ad una condizione stazionaria in tempi confrontabili e risultando abbastanza uniformi in tutta la sezione, fatta debita eccezione per la parte dove non sono presenti le alette. Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal fatto che il trasporto del calore nel mezzo (NFPCM), in fase liquida, è migliorato dalla presenza delle alette (incremento conducibilità) mentre risente poco dei moti convettivi, innescati da gradienti termici e dalla gravità del mezzo stesso.

Chiaramente, la simulazione numerica FEM non tiene in conto questa tipologia di fenomeno, per la quale sarebbe necessario ricorrere a simulazioni CFD. Inoltre, nelle analisi FEM, il cambio di fase viene fatto avvenire ad una temperatura ben precisa mentre nella realtà avviene in un intervallo compreso tra una temperatura di *onset* ed una di *endset*, addolcendo le curve di temperatura e mascherando detto fenomeno.

In **Figura 105** e **Figura 106** sono invece mostrati in vari istanti i campi di temperatura e del rateo di massa fusa all'interno del PCM. Analizzando queste immagini, risulta che la fase di fusione dura circa 1.5 ore mentre quella di solidificazione è più corta, meno di 1 ora. Occorre tener presente che per un elemento singolo le perdite di calore verso l'esterno sono sempre una componente importante che rallenta la fase di riscaldamento del mezzo e, al contrario, velocizza il suo raffreddamento.

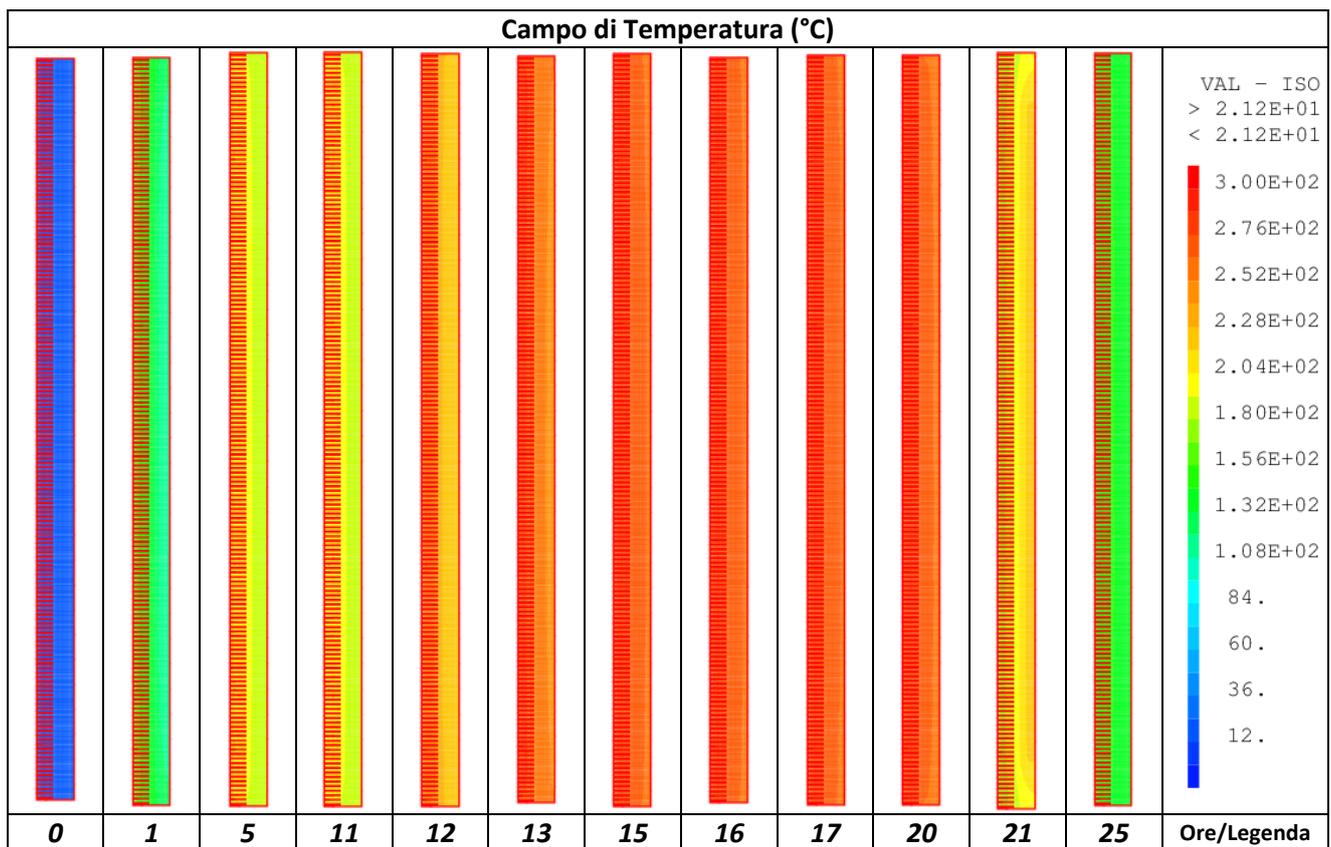


Figura 105- Evoluzione delle temperature all'interno del PCM

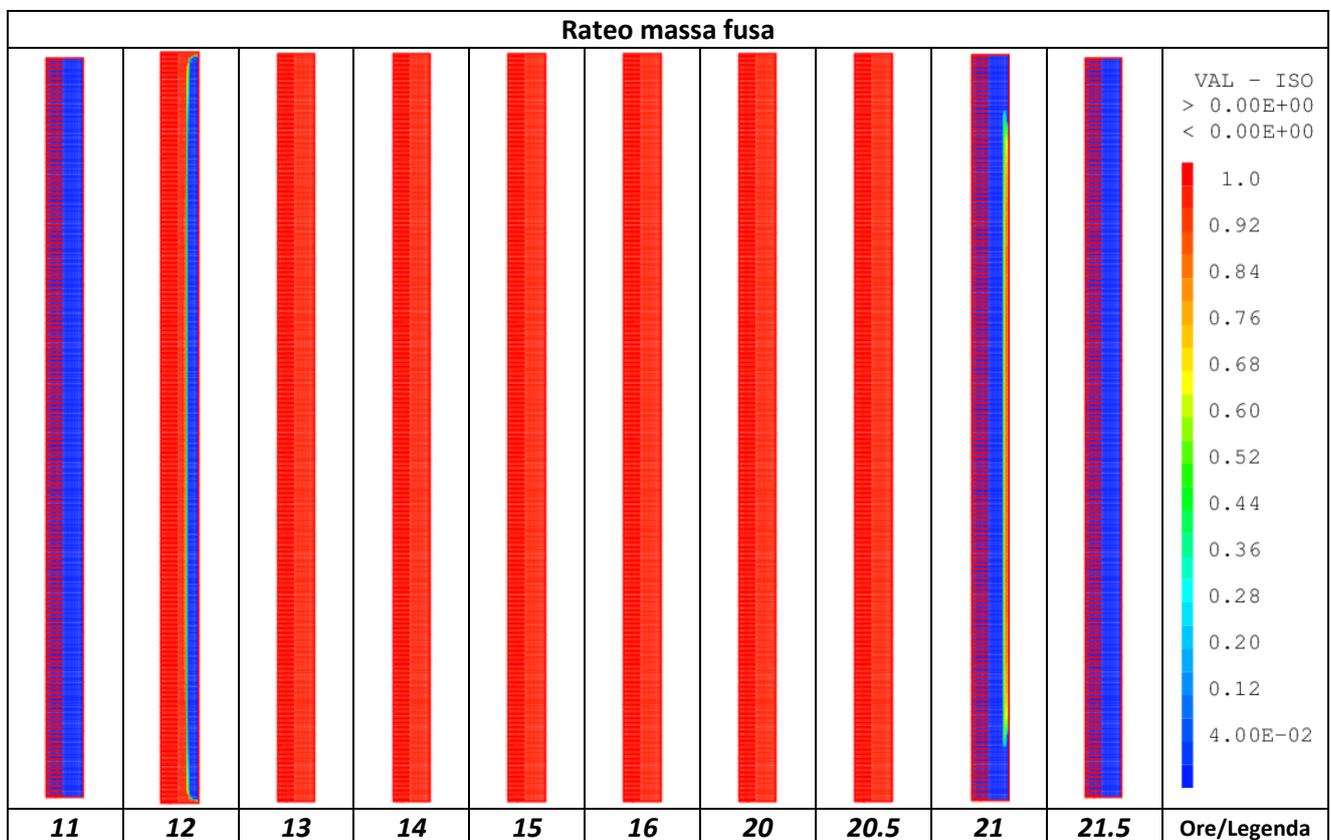
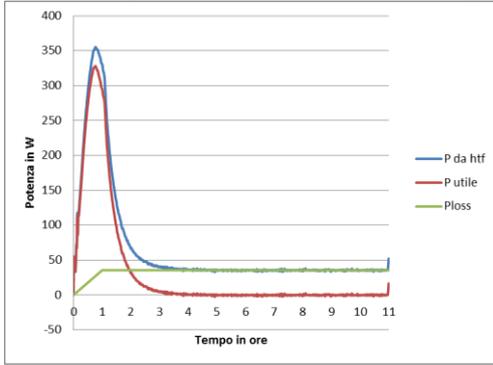


Figura 106- Evoluzione delle frazione di massa fusa all'interno del PCM

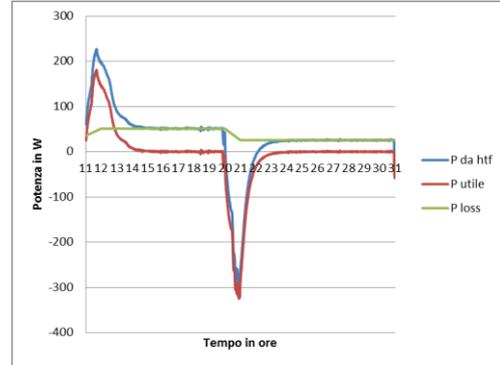
**Bilanci termici e calore accumulato**

Partendo dall'evoluzione della potenza ceduta/asportata dal fluido termovettore e tenendo conto che la potenza fornita durante le fasi stazionarie è esattamente quella necessaria a compensare le perdite del sistema, è possibile valutare la potenza utile per l'accumulo e l'energia accumulata dal TES.

In fase di primo riscaldamento (Figura 107) la potenza persa è di circa 36W mentre la potenza utile incrementa fino a circa 330W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. In questo intervallo di tempo si è accumulata una energia di circa 369 Wh.

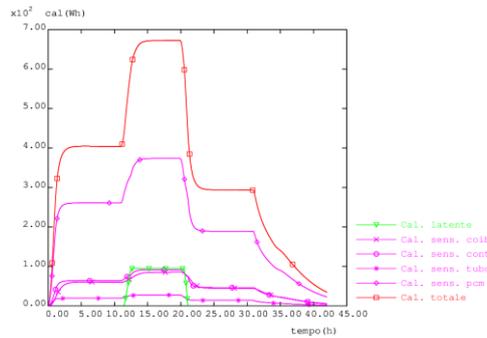


**Figura 107- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per la fase di riscaldamento**



**Figura 108- Evoluzione delle potenze da HTF, persa ed utile per le fasi di carica e scarica**

Invece, nelle fasi carica e scarica del TES (Figura 108) la potenza persa è, rispettivamente di circa 51W e 25W, mentre la potenza utile incrementa fino a circa 190W nella prima ora per poi decrescere ed annullarsi dopo circa 4 ore. Successivamente, durante la scarica, decresce per un'ora fino a -300W e si riannulla ancora dopo circa 3 ore. In tali condizioni, l'energia ceduta dal fluido al TES (carica) è di circa 249Wh mentre quella estratta (scarica) di 344Wh (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.). La differenza tra questi due valori, circa 95Wh, è principalmente dovuta al fatto che, essendo la temperatura di scarica (150°C) inferiore a quella iniziale di carica (200°C), si è estratto anche parte del calore sensibile fornito al sistema durante la fase di riscaldamento. I tempi sia di carica che di scarica si attestano intorno alle 4 ore. Durante la fase di scarica, il TES fornirà una potenza media di 98.3W. In Figura 109 è riportato l'andamento temporale del calore accumulato nel TES sia come valore totale che scomposto nella varie componenti.



**Figura 109- Evoluzione del calore accumulato nel PCM**

L'energia accumulata sotto forma di calore latente, per la nostra sezione di calcolo, è di circa 100Wh. Il calore sensibile accumulato dal PCM risulta essere la componente maggiore e circa 3.5 volte il calore latente. Componenti sostanzialmente equiparabili, ma leggermente inferiori, sono sia il calore sensibile accumulato nell'acciaio che nel coibente. Chiaramente, nella evoluzione complessiva della prova, il calore latente risulta essere un componente non sostanziale (solo il 15% del totale) ma ciò è diverso se consideriamo le sole fasi realmente operative (carica e scarica). In tal caso il calore latente, che rimane invariato riducendo l'intervallo operativo di temperatura, rappresenterà il 30% del totale (l'energia totale accumulata in queste fasi è di circa 260Wh) ed il contributo di acciaio e coibente sarà minimale.

## 2.2.8 Risultati e discussione

Scopo del lavoro, eseguito nell'ambito del Progetto B.1.3 (ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE) del PAR 2014, è stato quello di sviluppare dei modelli agli elementi finiti (FEM) per i sistemi di accumulo elementare a calore latente di tipo "tube and shell".

Il primo modello si basa sull'ipotesi che il trasferimento di calore avvenga preferibilmente in senso radiale (problema monodimensionale – 1D) ovvero che sia trascurabile la conduzione assiale del sistema. Il secondo, invece, si basa sull'ipotesi che il trasferimento di calore avvenga in perfetta simmetria assiale (problema bidimensionale assialsimmetrico - 2D) ed il sistema abbia dimensioni limitate anche nella direzione assiale. In entrambi i casi, sono inoltre ritenuti trascurabili eventuali fenomeni convettivi del PCM quando questo è in fase liquida.

I calcoli sono stati effettuati utilizzando un codice non commerciale chiamato Cast3M e sviluppato presso il CEA di Saclay (Parigi). Per quanto riguarda il secondo modello, le risorse di calcolo ed il relativo supporto tecnico utilizzato per questo lavoro sono state messe a disposizione dalla infrastruttura "CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing" e dal suo staff (vedi <http://www.cresco.enea.it>). "CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing" è finanziato da ENEA e da programmi di ricerca Europei.

In **Tabella 12** e **Tabella 13** sono riportati i principali risultati ottenuti utilizzando i modelli FEM, per ciascuna tipologia di sistema TES studiato, e messi a confronto con quelli sperimentali.

**Tabella 12 – Riassunto risultati sperimentali e FEM – Prove 1 e 2**

<b>ATES</b>	<b>Prova/ unità</b>	<b>1.2</b>	<b>FEM 1D (*)</b>	<b>FEM 2D (*)</b>	<b>2.2</b>	<b>FEM 1D (*)</b>	<b>FEM 2D (*)</b>
<b>Riscaldamento</b>							
<i>Temperatura</i>	°C	200	200	200	200	200	200
<i>Tempo di carico/scarico</i>	ore	5-6	6	6	3	4	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	W	383	75	101.4	420	81	108.1
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	Wh	1754	825	891	2306	930	948.6
<b>Carico</b>							
<i>Temperatura</i>	°C	280	280	280	280	280	280
<i>Tempo di carico/scarico</i>	ore	4	7	6	3.5	4	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	W	705	110	146.4	517	114	155.5
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	Wh	922	600	627	1260	633	638
<b>Scarico</b>							
<i>Temperatura</i>	°C	150	150	150	150	150	150
<i>Tempo di carico/scarico</i>	ore	6	6	7	4	4	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	W	537	52.5	72.0	444	57	76.8
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	Wh	1268	837	882	1144	882	925
<b>Capacità termica di progetto</b>							
	Wh	1268	837	882	1155	882	925
<b>Tempo medio di completo rilascio</b>							
	ore	6	6	7	4	4	4
<b>Potenza media di progetto</b>							
	W	215	105.9	127.8	293	226.5	187
<b>Efficienza termica</b>							
	%	137	140	139	91	140	141

(\*) essendo la sezione di prova costituita da 3 TES elementari in serie, il risultato del calcolo è stato triplicato

**Tabella 13 – Riassunto risultati sperimentali e FEM – Prove 3 e 4**

<b>ATES</b>	<b>Prova/ unità</b>	<b>3.2</b>	<b>FEM 1D (* )</b>	<b>FEM 2D (* )</b>	<b>4.2</b>	<b>FEM 1D (* )</b>	<b>FEM 2D (* )</b>
<b>Riscaldamento</b>							
<i>Temperatura</i>	°C	200	200	200	200	200	200
<i>Tempo di carico/scarico</i>	ore	4	6	5	4	4	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	W	269	77	105	395	79	106
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	Wh	2023	993	1059	1846	1053	1107
<b>Carico</b>							
<i>Temperatura</i>	°C	280	280	280	280	280	280
<i>Tempo di carico/scarico</i>	ore	6	6	5	4	5	4
<i>Potenza persa dal TES</i>	W	535	106	152	678	106	153
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	Wh	683	714	711	803	760	747
<b>Scarico</b>							
<i>Temperatura</i>	°C	150	150	150	150	150	150
<i>Tempo di carico/scarico</i>	ore	7	5	5	4	4	3.5
<i>Potenza persa dal TES</i>	W	491	54	75	250	56	76
<i>Energia caricata/scaricata nel TES</i>	Wh	1091	960	1008	1202	993	1032
<b>Capacità termica di progetto</b>							
<b>Capacità termica di progetto</b>	Wh	1091	960	1008	1202	993	1032
<b>Tempo medio di completo rilascio</b>	ore	7	5	5	4	4	3.5
<b>Potenza media di progetto</b>	W	158	196	207	308	256	295
<b>Efficienza termica</b>	%	160	134	142	149	131	138

(\* ) essendo la sezione di prova costituita da 3 TES elementari in serie, il risultato del calcolo è stato triplicato

Analizzando dette tabelle ed i confronti numerico-sperimentali dell’andamento delle temperature nel mezzo di accumulo, riportate nei paragrafi precedenti si può dedurre quanto segue:

- Le analisi 1D e 2D sono risultate essere sostanzialmente equivalenti in termini di previsione del comportamento termico del TES, anche se la seconda è sicuramente più precisa.
- Il primo caso, con tubi lisci e PCM semplice, l’HSM mostra temperature reali più elevate ed una dinamica più rapida rispetto il calcolo. Ciò è probabilmente indice di uno scambio termico governato da fenomeni convettivi invece che dalla pura conduzione come ipotizzato nel modello FEM. Tale comportamento non avviene quando nel mezzo ci sono le nanoparticelle o il tubo è alettato: nel primo caso la viscosità più elevata del HSM ostacola l’innesco dei moti convettivi mentre, nel secondo caso, l’impedimento è di natura fisica (presenza di alette);
- Il confronto delle temperature calcolate e sperimentali all’interno del PCM nella prova 1.2 evidenzia in modo inequivocabile che i moti convettivi che si instaurano all’interno della fase liquida del PCM cambiano completamente le caratteristiche di scambio termico.
- Le differenze nei bilanci energetici tra calcolo e sperimentazione sono piuttosto evidenti e dovute sia alle perdite verso l’esterno, molto superiori rispetto il modello, sia alle masse in gioco nella sezione sperimentale, anche esse molto superiori.
- La differenza dei tempi di carica e scarica del sistema tra la prova 1.2 e 3.2 è la riprova della maggiore facilità di trasmissione del calore verso il o dal mezzo di accumulo. Tale comportamento non è naturalmente evidenziato dal modello FEM.
- La presenza delle alette (casi 2.2 e 4.2), promotrici della conducibilità, induce una forte riduzione dei tempi di carica e scarica di un 25-30%. Tale azione risulta essere superiore a quella relativa all’innesco di moti convettivi (caso 1.2) e pressoché identica in entrambi i casi.

- La presenza delle alette evidenzia un indubbio beneficio sia in termini di tempi di carica/scarica che di energia accumulata (incremento di temperatura e, quindi, di calore sensibile).
- La presenza del HSM con nanoparticelle evidenzia una maggiore capacità termica ma non un corrispondente miglioramento della conducibilità.
- Per cogliere il comportamento termodinamico evidenziato dalla Prova 1 sarebbe necessario ricorrere ad una modellistica più complessa di tipo fluidodinamico (CFD), facendo debita attenzione alla determinazione di tutti quei parametri che governano l'instaurarsi dei moti convettivi del fluido. Il modello FEM sembra invece applicabile, oltre che alle prove con tubi alettati, alla prova 3, in cui il materiale di accumulo è un PCM additivato con nanoparticelle. Probabilmente, in questo caso, la viscosità del mezzo in fase liquida è notevolmente incrementata rispetto al PCM base e capace di inibire la partenza di moti convettivi importanti. In questo caso, l'ipotesi di scambio termico principalmente di tipo conduttivo rimane sostanzialmente valido.

Maggiori dettagli sulle analisi numeriche possono essere trovati in [10] e [11].

### 3 Conclusioni

Scopo del lavoro, eseguito nell'ambito del Progetto B.1.3 (ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE) del PAR 2014, è stato quello di analizzare il comportamento termico e di sviluppare appropriati modelli di simulazione agli elementi finiti (FEM) di un sistema elementare di LHTES di tipo "tube and shell".

Questo sistema è stato analizzato, sia aumentando la superficie di scambio (tramite alette) sia cambiando le proprietà termiche del PCM (aggiunta di nanoparticelle, NFPCM), mediante alcune prove sperimentali condotte su un impianto appositamente realizzato (ATES).

Il test mostra, come previsto, che l'aumento della superficie di scambio ha un effetto rilevante sulla promozione della conducibilità nel PCM e che l'uso di NFPCM, così formulati, migliora lo scambio termico verso l'esterno (effusività) e la capacità di stoccaggio ma non mostra vantaggi in termini di diffusività termica. Infatti, il tempo di carica del sistema sembra essere simile nel caso di tubi alettati ma anche nel caso di tubi lisci e PCM.

Quest'ultimo dato è effettivamente influenzato da un fenomeno fisico con effetti sorprendenti. Provando un TES con tubo liscio e semplici sali solari (PCM), nelle condizioni di prova imposte, abbiamo notato l'insorgere di un moto convettivo all'interno della frazione fusa. Questi moti hanno ampiamente migliorato lo scambio termico ed il trasporto di calore del fluido e il loro effetto è risultato essere paragonabile, se non superiore, a quella esercitata dalle alette.

Tali moti convettivi, tuttavia, non si verificano nel NFPCM perché, probabilmente, la presenza di nanoparticelle aumenta significativamente la viscosità del fluido e ne inibisce l'insorgere.

Per quanto riguarda, invece, la simulazione numerica del comportamento del LHTES, occorre dire che il modello FEM adottato, sia 1D che 2D, essendo puramente conduttivo, non riesce a cogliere i fenomeni connessi con l'insorgere dei moti convettivi (Prova 1.2), che invece caratterizzano uno scambio termico puramente convettivo.

Tale comportamento è sottolineato anche in diversi recenti lavori<sup>[12]</sup> in cui si dice che:

*"Studies based on the assumption that conduction is the major mechanism of heat transfer through the PCM assumed negligible convection heat transfer in the melt. In the case of convection controlled phase change, the common assumption was that the PCM was at the melting temperature. Models based on pure conduction and pure convection have not been able to predict accurately the melting rates nor track the complex motion of the solid-liquid interface at all times during the phase change. Less than 10% of articles surveyed treated convection and conduction at different stages and concluded that it depends on the phase transition stage to determine whether or not conduction or convection controls the heat transfer".*

Infatti, la dinamica reale dello scambio avviene secondo le seguenti fasi:

*"A) Sensible heat provision at the start-up period during which heat added increases the temperature of the solid PCM. Pure conduction heat transfer occurs at this stage. B) A second conduction regime, in which heat is purely transferred by conduction from the heated wall to the PCM and solid-liquid interface when melting had just begun. C) The transition from conduction to natural convection which starts as the thickness of the melt layer increases and the interface starts to incline. At the interface, there exists at equilibrium, a solid body and a pool of its own liquid. D) The convection regime, when most of the solid have been melted and the liquid core temperature distribution depends on height and depth and not on time (caused by buoyancy)."*

E quindi:

*“Phase change problems, first treated as pure conduction controlled, has in recent times moved to a different level of complexity with added convection in the melt being accounted for.”*

Per cogliere questo tipo di comportamento sarebbe necessario ricorrere ad una modellistica più complessa di tipo fluidodinamico (CFD), facendo debita attenzione alla determinazione di tutti quei parametri che governano l’instaurarsi dei moti convettivi del fluido.

Il modello FEM sembra invece applicabile alla prova 3.2, in cui il materiale di accumulo è un PCM additivato con nanoparticelle. Probabilmente, in questo caso, la viscosità del mezzo in fase liquida è notevolmente incrementata rispetto al PCM base e capace di inibire la partenza di moti convettivi importanti. In questo caso, l’ipotesi di scambio termico principalmente di tipo conduttivo rimane sostanzialmente valido.

In futuro, per sfruttare i fenomeni qui evidenziati e progettare un sistema LHTES compatto ed efficiente, sarà necessario eseguire delle prove su un prototipo di scala maggiore avendo cura di ridurre le perdite termiche, aumentare il salto di temperatura all’interno del TES ed effettuare una misurazione precisa della temperatura di ingresso e di uscita del sistema. Naturalmente, in fase di progettazione del prototipo, sarà necessario ricorrere all’ausilio di una modellistica CFD opportunamente validata.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] Definition of standardized procedures for testing thermal storage prototypes for concentrating solar thermal plants – SFERA Report – December 2011
- [2] ENEA – Report RdS/PAR2013/226 – “Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di un sistema di accumulo termico nell’intervallo di temperatura 200-250°C”, A. Miliozzi, E. Veca
- [3] ENEA – Report RdS/PAR2013/227 – “Studio, produzione e caratterizzazione di un nanoPCM, sia in forma massiva che micro-incapsulata, con temperatura di fusione prossima ai 220°C”, J.M. Kenny, M. Chieruzzi
- [4] ENEA – Report RdS/PAR2013/228 – “Simulazione del comportamento termo-dinamico di un elemento base di accumulo a calore latente e sua progettazione”, A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini, A. Miliozzi, E. Veca
- [5] ENEA – Report RdS/PAR2013/230-“Prove sperimentali del comportamento termico di un elemento base di accumulo”, A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, T. Crescenzi, R. Liberatore, E. Giovannini, G. Napoli, D. Mele
- [6] ENEA – Report RdS/2013/079 – “Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico”, A. Miliozzi, E. Veca, S. Sau
- [7] Università di Perugia – Report RdS/2013/081 – “Studio e sviluppo di un mezzo di accumulo termico a calore latente a media temperatura costituito da una miscela di sali e nanoparticelle”, Josè Maria Kenny, Manila Chieruzzi
- [8] Miliozzi, Liberatore, Giannuzzi, Mele, Napoli, Giovannini, Prove sperimentali di un sistema di accumulo termico elementare a calore latente utilizzando sali solari, Rapporto interno Enea UTRINN/2015/11
- [9] Miliozzi, Liberatore, Giannuzzi, Mele, Napoli, Giovannini, Prove sperimentali di un sistema di accumulo termico elementare a calore latente utilizzando sali solari e nanoparticelle, Rapporto interno Enea UTRINN/2015/12
- [10] Miliozzi, Simulazione 1D di un TES elementare e confronto con prove sperimentali, Rapporto interno Enea UTRINN/2015/13
- [11] Miliozzi, Simulazione 2D di un TES elementare e confronto con prove sperimentali, Rapporto interno Enea UTRINN/2015/14
- [12] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, “A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 615–628
- [13] G. Ponti et al., "The role of medium size facilities in the HPC ecosystem: the case of the new CRESCO4 cluster integrated in the ENEAGRID infrastructure", *Proceedings of the 2014 International Conference on High Performance Computing and Simulation, HPCS 2014*, art. no. 6903807, 1030-1033;

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

<b>PAR</b>	Piano Annuale di Ricerca
<b>CSP</b>	Potenza solare concentrata (Concentrating Solar Power)
<b>LCOE</b>	Costo livellato dell'energia (Levelized Cost Of Energy)
<b>TES</b>	Accumulo energia termica (Thermal Energy Storage)
<b>LHTES</b>	Accumulo energia termica a calore latente (Latent Heat Thermal Energy Storage)
<b>PCM</b>	Materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials)
<b>NFPCM</b>	PCM con aggiunta di nanoparticelle (Nano Fluid Phase Change Materials)
<b>HSM</b>	Materiale di accumulo termico (Heat Storage Medium)
<b>HTF</b>	Fluido termovettore (Heat Transfer Fluid)
<b>FEM</b>	Metodo agli elementi Finiti (Finite Element Method)
<b>CFD</b>	Fluido-dinamica Computazionale (Computational Fluid Dynamics)