

Ricerca di Sistema elettrico



Realizzazione e validazione di un modulo software basato sul modello numerico semplificato di un LHTES di tipo "tube&shell"

Francesco Fornarelli

Sergio Camporeale

Realizzazione e validazione di un modulo software basato sul modello numerico semplificato di un LHTES di tipo "tube&shell"

F. Fornarelli – Università degli Studi di Foggia

S. Camporeale – Politecnico di Bari

Giugno 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.2 – Progetto integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

Linea di attività: 13

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile del Work Package: Raffaele Liberatore, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Francesco Fornarelli

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 24

Mese fine effettivo: 24

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

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	4
3	Prodotti attesi	4
4	Prodotti ottenuti.....	4
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	4
6	Sintesi delle attività svolte	5
7	Dettaglio delle attività svolte.....	5
7.1	Descrizione del modello OD sviluppato	5
7.2	Descrizione del modulo software sviluppato.....	9
7.3	Descrizione del modello usato per la validazione	12
7.4	Validazione del modello OD tramite confronto con risultati di riferimento	13
7.5	Descrizione modello OD per la fase di scarica	15
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	17
9	Pubblicazioni scientifiche	17
10	Eventi di disseminazione	17
11	Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale.....	17
	Bibliografia	18

Indice delle figure

Figura 1: Rappresentazione schematica del comportamento del sistema durante la fase di carica. La fase di carica è stata suddivisa in una configurazione iniziale, rappresentata a destra, e da una configurazione successiva, rappresentata a sinistra.	5
Figura 2: Suddivisione del processo di carica in due regioni, in accordo con le analisi sperimentali e numeriche.	6
Figura 3: Diagramma a blocchi relativo alla sequenza delle operazioni svolte all'interno del modello	7
Figura 4: Diagramma a blocchi architettura modello OD con indicazione condizioni di utilizzo subroutine	11
Figura 5: punti di misura temperatura all'interni di PCM	13
Figura 6: Confronto tra la temperatura media del PCM durante la fase di carica, calcolata dal codice numerico, e la temperatura sperimentale del PCM misurata da termocoppie posizionate a diversi raggi dalla parete del tubo sui tre piani del PCM.....	14
Figura 7: Energia termica immagazzinata nell'LHTES durante la fase di carica. Energia termica totale del PCM (linea blu). Energia termica latente (linea nera). Energia termica sensibile del PCM liquido (linea verde). Energia termica sensibile del PCM solido (linea rossa).....	14
Figura 8: Schematizzazione della distribuzione della fase liquida (in rosso) e della fase solida (in blu) durante il processo di scarica del sistema di accumulo.....	15
Figura 9: Confronto tra la temperatura media del PCM durante la fase di scarica, calcolata dal codice numerico, e la temperatura sperimentale del PCM misurata da termocoppie posizionate a diversi raggi dalla parete del tubo sui tre piani del PCM.....	16
Figura 10: Confronto tra la temperatura media del PCM, calcolata dal codice numerico, e la temperatura media sperimentale del PCM misurata da una delle termocoppie posizionata in posizione centrale all'interno del PCM.....	16

Indice delle tabelle

Tabella 1: Parametri Geometrici	12
Tabella 2: proprietà fisiche dell'HTF (olio diatermico) come funzione della temperatura del fluido espressa in °C	12
Tabella 3: proprietà fisiche del PCM.....	12
Tabella 4. Proprietà fisiche isolante	13

1 Risultati attesi

Sviluppo del software relativo al modello OD a parametri concentrati in grado di predire le varie fasi del processo di carica-scarica di un sistema LHTES di tipo "tube&shell" nelle sue caratteristiche principali. Tale codice sarà validato sulla base di risultati ottenuti sperimentalmente e numericamente per applicazioni di media temperatura che utilizzano sali come mezzo di accumulo. Le simulazioni numeriche CFD bidimensionali, sviluppate nel periodo precedente sul singolo monotubo in termini di livello di carica e potenza termica scambiata, saranno utilizzate come benchmark con i quali confrontare e mettere a punto il codice OD.

2 Risultati ottenuti

È stato sviluppato un codice di calcolo in ambiente FORTRAN per lo studio del comportamento dinamico di un sistema di accumulo a cambiamento di fase sia in fase di carica che di scarica. Il codice predice la potenza termica scambiata tra fluido HTF e materiale di accumulo PCM al variare delle condizioni operative. Il codice è stato validato rispetto a risultati sperimentali mostrando la sua affidabilità.

3 Prodotti attesi

Report: RT-1.02-4.13 Realizzazione e validazione di un modulo software basato sul modello numerico semplificato di un LHTES di tipo "tube&shell".

Codice di calcolo in linguaggio FORTRAN (sorgenti e listati)

4 Prodotti ottenuti

Report: RT-1.02-4.13 Realizzazione e validazione di un modulo software basato sul modello numerico semplificato di un LHTES di tipo "tube&shell".

Codice di calcolo in linguaggio FORTRAN (sorgenti e listati)

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono scostamenti sulle attività previste

6 Sintesi delle attività svolte

Il modello OD qui proposto mira a prevedere le prestazioni del sistema, stimando lo scambio di energia termica e soddisfacendo al contempo i requisiti computazionali. Il modello si basa sulla stima del trasferimento di calore grazie al comportamento fisico del sistema, riconosciuto dagli esperimenti e dalle simulazioni numeriche dettagliate. Il presente modello si basa sulla modellizzazione semplificata del comportamento fisico del sistema nelle diverse fasi in cui si può trovare nel corso del suo utilizzo all'interno di un sistema di trasformazione dell'energia. La validazione è stata effettuata confrontando l'andamento della temperatura del fluido di trasferimento del calore e del materiale a cambiamento di fase con i dati sperimentali e le simulazioni CFD.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Descrizione del modello OD sviluppato

In questo capitolo viene descritto l'approccio utilizzato per la schematizzazione del problema in modo da poter procedere con la relativa modellizzazione. I concetti qui riportati sono stati oggetto di studio approfondito nella precedente LA4.12, vengono quindi richiamati solo i concetti base in modo da poter descrivere coerentemente i passi relativi alla realizzazione del software. Per sviluppare un codice OD in grado di simulare il processo di carica del sistema in tempo reale, è stato necessario dividere la fase di liquefazione in due stadi. Nella prima fase, il volume della frazione liquida del PCM è vicino alla parete del tubo e il fronte di fusione avanza in direzione radiale, come mostrato nell'immagine a sinistra di Figura 1. Nella seconda fase, il fronte di fusione in direzione radiale smette di avanzare e si crea un nuovo volume di frazione liquida nella parte superiore del volume del PCM, con il fronte di fusione che si sposta dall'alto verso il basso.

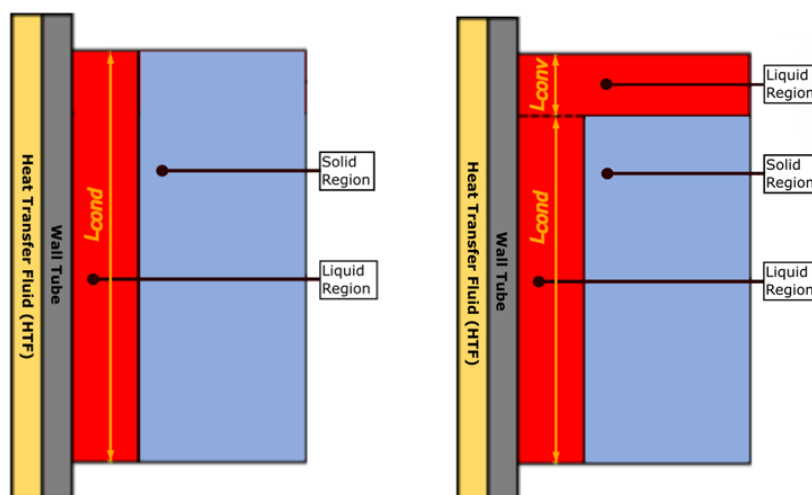


Figura 1: Rappresentazione schematica del comportamento del sistema durante la fase di carica. La fase di carica è stata suddivisa in una configurazione iniziale, rappresentata a destra, e da una configurazione successiva, rappresentata a sinistra.

Il codice OD, durante la prima fase del processo di carica, stima la coordinata radiale in cui il fronte di liquefazione passa dalla posizione radiale a quella orizzontale identificando la posizione radiale s^* in cui la temperatura della frazione liquida del PCM è uguale alla temperatura di fusione del PCM.

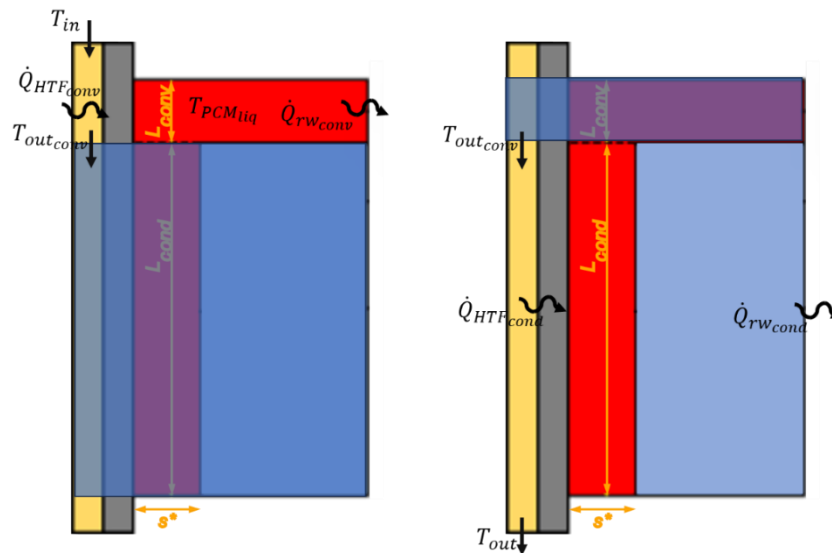


Figura 2: Suddivisione del processo di carica in due regioni, in accordo con le analisi sperimentali e numeriche.

Dopo aver raggiunto s^* il fronte di fusione non può procedere radialmente. Pertanto, tutta la frazione liquida del PCM prodotta in questa fase riempie la parte superiore del volume del PCM. Il modello 0D, conoscendo la temperatura all'ingresso del fluido termovettore, calcola la temperatura $T_{out_{conv}}$ dell'HTF nella sezione corrispondente al fronte di fusione orizzontale. Partendo dal calcolo di $T_{out_{conv}}$, il codice 0D calcola la temperatura di uscita T_{out} del fluido termovettore. Le temperature di ingresso e di uscita HTF sono utilizzate dal codice per aumentare la frazione liquefatta di PCM e quindi la coordinata L_{conv} del fronte di fusione. (vedi Figura 2).

In Figura 3 è riportato un diagramma a blocchi relativo alle fasi sviluppate nel codice 0D per la simulazione a parametri concentrati del sistema in esame.

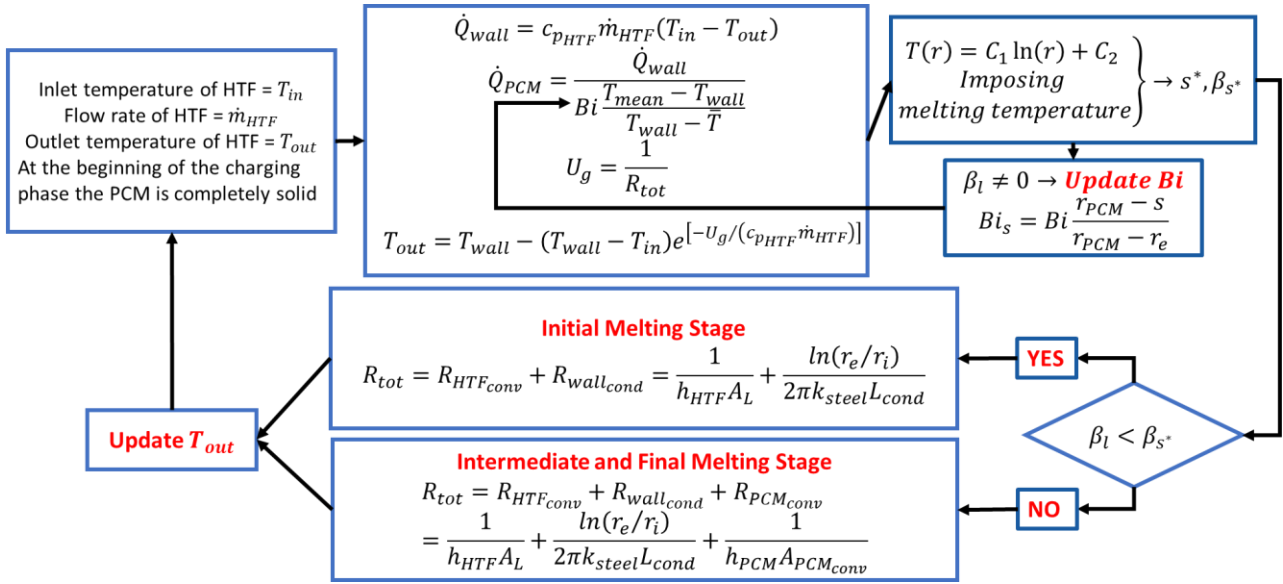


Figura 3: Diagramma a blocchi relativo alla sequenza delle operazioni svolte all'interno del modello

Date le condizioni di ingresso e di uscita del fluido termovettore, è possibile ottenere la potenza termica trasmessa tramite la parete $\dot{Q}_{wall} = c_{HTF} \dot{m}_{HTF} (T_{in} - T_{out})$. \dot{Q}_{PCM} è la potenza termica trasferita dalla parete al PCM. Essendo il fenomeno di scambio termico non stazionario viene stimato il rapporto tra \dot{Q}_{wall} e \dot{Q}_{PCM} in base al numero di Biot associato alla condizione fisica nella quale si trova il sistema nel passo temporale.

$$\dot{Q}_{PCM} = \frac{\dot{Q}_{wall}}{Bi \frac{T_{mean} - T_{wall}}{T_{wall} - \bar{T}}}$$

dove \bar{T} è la temperatura media del solido PCM e T_{mean} è la temperatura media dell'HTF. Il numero di Biot è il rapporto tra il trasferimento di calore convettivo e quello conduttivo rispetto a un materiale solido. In questo caso, all'inizio della fase di carica il PCM è completamente solido, quindi il numero di Biot è $Bi = h_{HTF} (r_{PCM} - r_e) / k_{PCM}$. In condizioni stazionarie $\dot{Q}_{wall} = \dot{Q}_{PCM}$, quindi la temperatura della parete sarà costante. Dalla definizione di queste potenze termiche, possono essere calcolati gli incrementi di temperatura della parete ΔT_{wall} e del PCM ΔT_{PCM} .

$$\Delta T_{wall} = \frac{(\dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_{PCM}) dt}{c_{steel} m_{steel}}$$

$$\Delta T_{PCM} = \frac{\dot{Q}_{PCM} dt}{c_{PCM} m_{PCM}}$$

dove c_{steel} è la capacità termica a pressione costante della parete, m_{steel} è la massa della parete, c_{PCM} è la capacità termica a pressione costante del PCM, m_{PCM} è la massa del PCM. La formazione della fase liquida in prossimità della parete di scambio termico del tubo avviene se è soddisfatta la relazione $T_{wall} = T_{liq}$ (T_{liq} = temperatura del liquido). In questo caso, considerando il profilo logaritmico della temperatura, $T(r) = C_1 \ln(r) + C_2$, grazie alla soluzione del problema dello scambio termico stazionario in coordinate cilindriche, confermata dalle simulazioni CFD 2D assialsimmetriche [1] [2] secondo i casi relativi alle applicazioni a media temperatura, è possibile calcolare la posizione radiale del fronte di

fusione. Si definiscono le condizioni al contorno C_1 e C_2 . Quindi, imponendo la temperatura di fusione, si ottiene la posizione radiale s^* del fronte di fusione e la relativa frazione liquida β_{s^*} . In questa fase, il gradiente di temperatura è perpendicolare alla direzione del flusso HTF, il contributo al trasferimento di calore sarà solo conduttivo e contribuirà ad aumentare la frazione liquida. Assumendo una temperatura costante della parete dell'acciaio T_{wall} lungo il tubo, è possibile calcolare la temperatura di uscita dell'HTF, poiché il coefficiente di trasferimento di calore globale è pari a $U_g = 1/R_{total}$ è noto. $R_{total_{cond}}$ rappresenta la resistenza termica totale durante la fase intermedia. In questo caso specifico, la resistenza totale sarà calcolata come segue.

$$R_{total_{cond}} = R_{HTF_{conv}} + R_{wall_{cond}} = \frac{1}{h_{HTF}A_L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_t L_{cond}}$$

La temperatura di uscita del fluido termovettore HTF sarà calcolata come segue:

$$T_{out} = T_{wall} - (T_{wall} - T_{in})e^{\frac{-U_g}{c_{HTF}\dot{m}_{HTF}}}$$

Finché la frazione liquida β_l risulta essere minore del rispettivo valore β_{s^*} relativo all'istante in cui il fronte del liquido raggiunge s^* , si suppone che il fronte di fusione si muova parallelamente alla superficie del tubo. Per $\beta_l \neq 0$ il numero di Biot dovrebbe essere corretto in base all'ascissa curvilinea s :

$$Bi_s = Bi \frac{r_{PCM} - s}{r_{PCM} - r_e}$$

L'ultima fase del processo di carica prevede la modellazione del moto convettivo, quando $\beta_l > \beta_{s^*}$. Un ulteriore aumento di β_l aumenterà l'altezza dello strato superiore di PCM liquido (L_{conv}), riducendo, di conseguenza, l'altezza del PCM solido (L_{cond}). Lo schema semplificato di questa fase è presentato a sinistra nella Figura 2. In questa fase il PCM è diviso nella parte superiore convettiva e nella parte inferiore conduttiva. Quest'ultima si comporterà come descritto in precedenza sostituendo L con L_{cond} e T_{out} con $T_{out_{conv}}$. Per il resto, la parte superiore è caratterizzata da un trasferimento di calore convettivo. Il coefficiente di trasferimento termico convettivo del PCM liquido nella parte superiore è stato valutato in base alla correlazione $Nu - Ra$ come descritto nel precedente report "RdS_PTR22-24_PR1.2_LA4.12_094" considerando che la resistenza termica totale della parte superiore, $R_{total_{conv}}$, è la seguente:

$$R_{total_{conv}} = R_{HTF_{conv}} + R_{wall_{cond}} + R_{PCM_{conv}} = \frac{1}{h_{HTF}A_L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_t L_{cond}} + \frac{1}{h_{PCM}A_{PCM_{conv}}}$$

Una volta calcolata la resistenza termica complessiva, è possibile stimare la temperatura dell'HTF e utilizzarla come temperatura di ingresso della parte inferiore.

$$T_{out_{conv}} = T_{LIQ_{conv}} - (T_{LIQ_{conv}} - T_{in})e^{\frac{-U_{g_{conv}}}{c_{HTF}\dot{m}_{HTF}}}$$

dove $U_{g_{conv}} = 1/R_{total_{conv}}$. Di conseguenza, la potenza termica trasmessa \dot{Q}_{conv} , il calore ceduto dal fluido termovettore Q_{conv} e l'aumento di temperatura del fluido nella regione convettiva $\Delta T_{PCM_{conv}}$ si definiscono come segue:

$$\dot{Q}_{conv} = c_{HTF}\dot{m}_{HTF}(T_{out_{conv}} - T_{out})$$

$$Q_{conv} = \int \dot{Q}_{conv} dt$$

$$\Delta T_{PCM_{conv}} = \frac{Q_{conv}}{c_{PCM}}$$

Per ogni istante di tempo, il codice aggiorna la temperatura della regione liquida $T_{LIQ_{conv}}$ aggiungendo $\Delta T_{PCM_{conv}}$

7.2 Descrizione del modulo software sviluppato

Il codice OD è strutturato in una parte principale (MAIN) che, a seconda della fase del processo di carica-scarica nel quale si trova il sistema, richiama 7 subroutine qui di seguito elencate:

- INPUT: legge i parametri di input per ogni sezione relativa alla fase del processo nel main
- BETA_L_CARICA: risolve lo scambio termico conduttivo
- BETA_L_SCARICA: risolve lo scambio termico durante la fase di scarica
- BETA_STAR: calcola la frazione liquida del PCM relativa alla coordinata radiale s^*
- CARICA_CONV: risolve lo scambio termico convettivo durante la fase di carica
- PCM_SOLID: calcola l'aumento di temperatura all'interno del PCM prima dell'inizio della liquefazione
- T_MEDIA: calcola la temperatura media all'interno del PCM partendo dal profilo logaritmico di temperatura

In Figura 4 riportiamo un diagramma di flusso dell'architettura del modello OD dove sono specificate le chiamate alle subroutine con i relativi nomi. Il modello parte definendo le leggi temporali di variazione delle grandezze in ingresso della temperatura di ingresso, per esempio la temperatura di ingresso del fluido HTF. Il modello ad ogni istante di tempo, in base alla condizione di lavoro, aggiorna la variazione di temperatura del PCM ΔT_{PCM} , la variazione di temperatura della parete tra HTF e PCM, ΔT_{wall} , e la variazione di frazione liquida del PCM $\Delta \beta_l$. Si possono verificare tre casi che, il modello attiva a seconda del valore di frazione massica β_l :

- Caso 1: $\beta_l = 0$. Il PCM risulta essere interamente solido. Indipendentemente dalla situazione di carica o scarica del sistema, governata dalle differenze di temperatura tra HTF e PCM, viene chiamata la subroutine PCM_SOLID. In questa condizione viene anche stimato il valore di β_{s^*} (subroutine BETA_STAR), nel momento in cui la parete raggiunge la condizione di liquefazione del materiale PCM.
- Caso 2: $0 < \beta_l < 1$. Questo caso, come descritto in precedenza, deve essere trattato diversamente in base alla temperatura del HTF rispetto a quella della parete. Identifichiamo quindi due possibili sotto-casi, ($T_{HTF_{in}} > T_{wall}$) carica e ($T_{HTF_{in}} < T_{wall}$) scarica. La fase di carica ($T_{HTF_{in}} > T_{wall}$) deve essere a sua volta differenziata in base al valore di β_l , in particolare:
 - $\beta_l \leq \beta_{s^*}$ siamo nella condizione in cui la fase liquida si dispone radialmente rispetto all'asse del modulo. Viene richiamata dapprima la subroutine BETA_L_CARICA applicata a tutta l'altezza del modulo.
 - $\beta_l > \beta_{s^*}$ in questo caso la frazione liquida ha colmato la zona radiale identificata con s^* e l'ulteriore PCM liquefatto occuperà la zona superiore del modulo. In questo caso il problema viene diviso in due parti: la risoluzione della parte alta

con sviluppo longitudinale pari a L_{conv} in cui viene richiamata la subroutine CARICA_CONV; a valle di questa zona nella parte più bassa viene invece richiamata la subroutine BETA_L_CARICA, come già fatto in precedenza, ma applicata alla sola parte bassa con ingombro longitudinale pari a L_{cond} .

La fase di scarica ($T_{HTF_{in}} < T_{wall}$) viene gestita richiamando la subroutine BETA_L_SCARICA applicata quindi all'intera altezza longitudinale del modulo L.

- Caso 3: $\beta_l > 1$, In questo caso tutto il PCM risulta liquefatto. Per gestire questa fase viene richiamata la subroutine CARICA_CONV, già richiamata nel caso 2, ma adesso estesa a tutta l'altezza longitudinale del modulo.

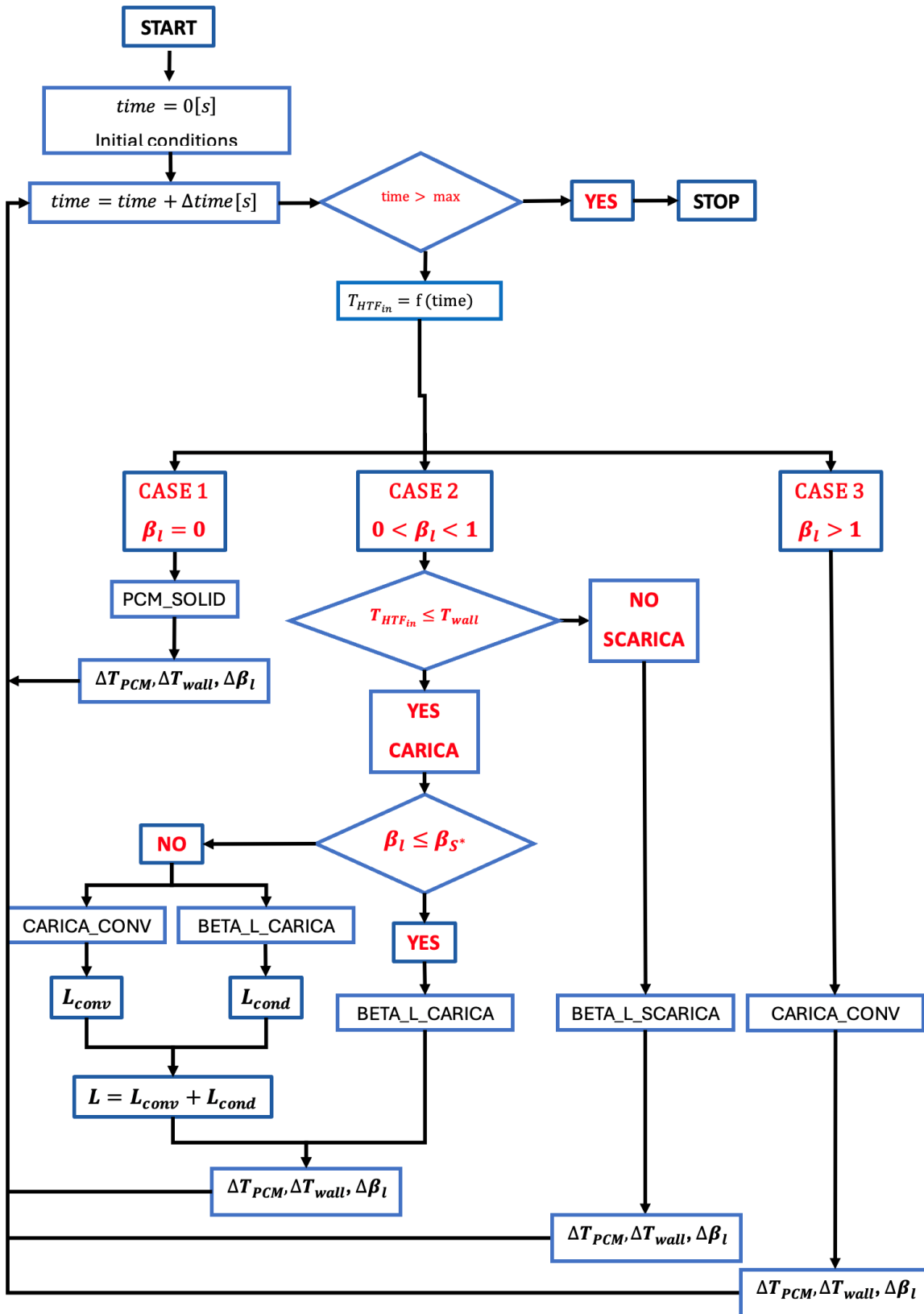


Figura 4: Diagramma a blocchi architettura modello OD con indicazione condizioni di utilizzo subroutine

7.3 Descrizione del modello usato per la validazione

Il modello OD è stato validato in base alla prova sperimentale dell'ENEA [3] su una configurazione verticale a singolo tubo shell-and-tube in cui il fluido HTF scorre dall'alto verso il basso. I parametri dimensionali del modulo LHTES sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1: Parametri Geometrici

Materiale	Proprietà	Valore [mm]
Raggio esterno tubo HTF	r_e	8
Raggio interno tubo HTF	r_i	7
Raggio lana di roccia	r_{rw}	67
Raggio PCM	r_{PCM}	35
Altezza PCM	L_{PCM}	500

L'HTF considerato è un olio diatermico che si mantiene allo stato liquido nell'intervallo di temperatura considerato per il caso in esame, le cui caratteristiche fisiche dipendono esclusivamente dalla temperatura secondo le relazioni polinomiali riportate in Tabella 2.

Tabella 2: proprietà fisiche dell'HTF (olio diatermico) come funzione della temperatura del fluido espressa in °C

Proprietà	Espressione	Unità di misura
Densità	$\rho_{HTF} = 1020.62 - 0.614254 \cdot T - 0.000321 \cdot T^2$	[kg/m ³]
Calore specifico	$c_{HTF} = 1469.7 + 3.313 \cdot T + 0.008970785 \cdot T^2$	[J/(kg · K)]
Conduttività termica	$k_{HTF} = 0.118294 - 0.000033 \cdot T - 0.00000015 \cdot T^2$	[W/(m · K)]
Viscosità dinamica	$\nu_{HTF} = \exp\left(\frac{560}{T + 60} - 2.38\right)$	[mPa · s]

Il sistema è riempito con un materiale a cambiamento di fase (PCM) che consiste in una miscela binaria di sali di sodio e potassio, KNO₃/NaNO₃ (40/60% in peso) le cui proprietà sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3: proprietà fisiche del PCM

Proprietà	Espressione	Unità di misura
Densità	1850	[kg/m ³]
Calore specifico	1700	[J/(kg · K)]
Conduttività termica	0.7	[W/(m · K)]
Temperatura di scioglimento	225	[mPa · s]
Calore latente	$1 \cdot 10^{-5}$	[J/kg]
Coefficiente di espansione	$3.18861 \cdot 10^{-4}$	[1/K]

In questo caso, il sistema non è adiabatico, quindi la dissipazione termica sulla parete esterna è stata modellata tenendo conto di uno spazio isolante riempito di lana di roccia, le cui proprietà sono riportate nella Tabella 4.

Tabella 4. Proprietà fisiche isolante

Proprietà	Espressione	Unità di misura
Densità	96	$[kg/m^3]$
Calore specifico	1150	$[J/(kg \cdot K)]$
Conduktività termica	0.07	$[W/(m \cdot K)]$
Coefficiente di scambi termico convettivo	5	$[W/(m \cdot K)]$
Temperatura esterna	298.15	$[K]$

Durante l'analisi i valori di temperatura durante la fase di carica sono stati misurati in nove punti all'interno del PCM come mostrato in Figura 5.

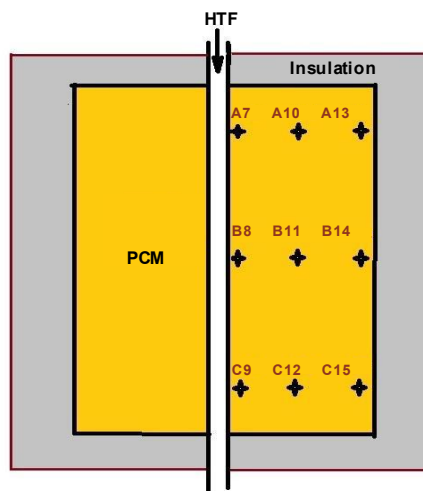


Figura 5: punti di misura temperatura all'interni di PCM

La temperatura all'inizio della fase di carica, sia dell'HTF che del PCM, è impostata a 200°C con una portata massica di HTF pari a 0,162 kg/s. Viene imposta una rampa lineare della temperatura di ingresso dell'HTF a partire da 200°C fino a 280°C in un'ora, seguita da una fase a temperatura costante in cui l'ingresso viene mantenuto a 280°C fino alla distribuzione stabile della temperatura all'interno del PCM.

7.4 Validazione del modello OD tramite confronto con risultati di riferimento

Figura 6 mostra il confronto tra la temperatura ottenuta con il codice numerico OD e le temperature misurate sperimentalmente dalle termocoppie poste nei tre piani del volume di PCM. I dati sperimentali utilizzati per validazione sono stati anche oggetto di validazione CFD i cui risultati sono riportati in articoli scientifici già pubblicati dagli autori [2]. La temperatura media è stata definita come la media ponderata della temperatura della fase liquida e della temperatura della fase solida in funzione della frazione liquida. Vale la pena notare come le misurazioni siano influenzate dalla distribuzione spaziale delle temperature all'interno del volume del PCM. Durante la parte iniziale del test, le temperature sono più elevate vicino al tubo HTF rispetto alla parete esterna del dispositivo.

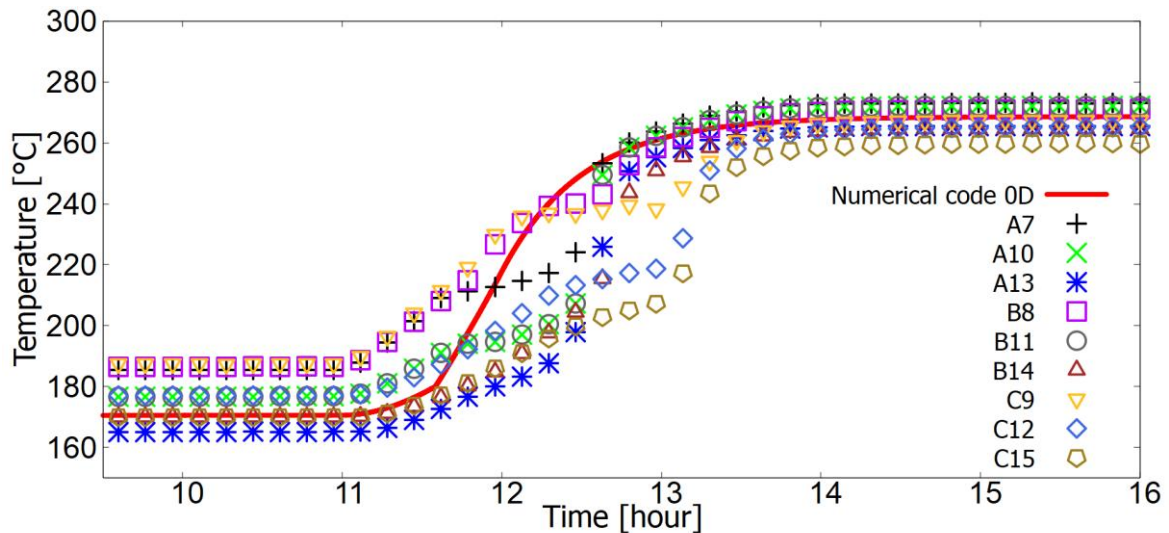


Figura 6: Confronto tra la temperatura media del PCM durante la fase di carica, calcolata dal codice numerico, e la temperatura sperimentale del PCM misurata da termocoppie posizionate a diversi raggi dalla parete del tubo sui tre piani del PCM.

La fase di carica rimarca la distribuzione spaziale del fronte di fusione, come rappresentato nello schema del problema (Figura 1), dove il PCM inferiore impiega più tempo ad aumentare la sua temperatura rispetto alla parte superiore. Il comportamento complesso della temperatura del PCM è ben riprodotto dal modello proposto in termini di temperatura media del dispositivo, come riportato in Figura 6.

La Figura 7 mostra i dettagli dell'energia termica immagazzinata nell'LHTES. Il modello è in

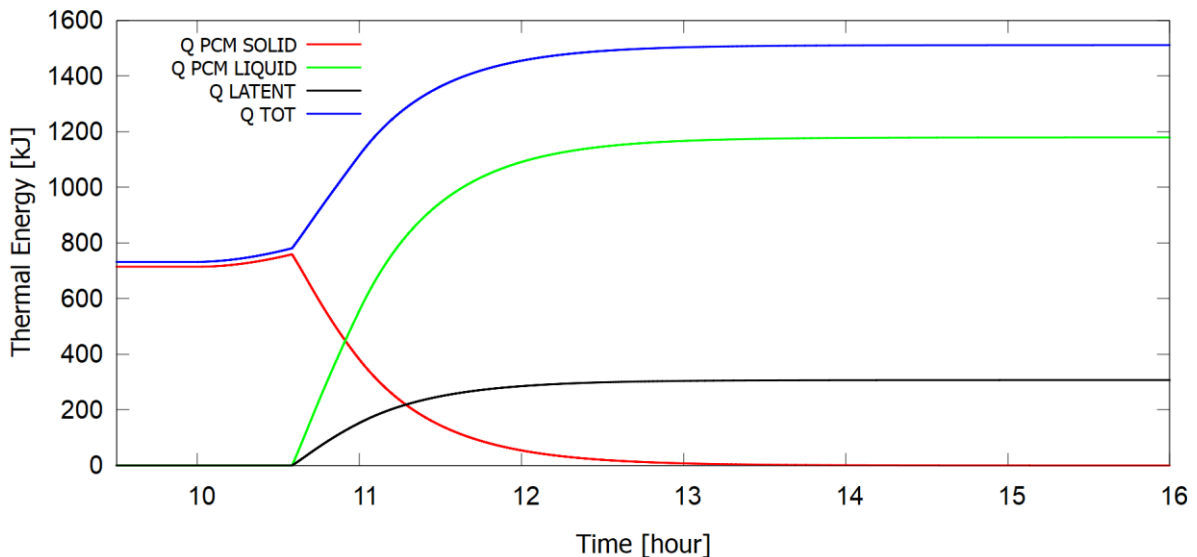


Figura 7: Energia termica immagazzinata nell'LHTES durante la fase di carica. Energia termica totale del PCM (linea blu). Energia termica latente (linea nera). Energia termica sensibile del PCM liquido (linea verde). Energia termica sensibile del PCM solido (linea rossa).

grado di stimare l'energia termica immagazzinata nel dispositivo considerando i contributi sensibili e latenti. Il calore sensibile è stato suddiviso in quota liquida e solida. La temperatura di riferimento è pari a 20°C.

7.5 Descrizione modello 0D per la fase di scarica

La schematizzazione del processo di scarica di Figura 8 prevede lo spostamento radiale del fronte di liquefazione. Rispetto alla fase di carica il fronte di solidificazione procede solo radialmente e non verticalmente.

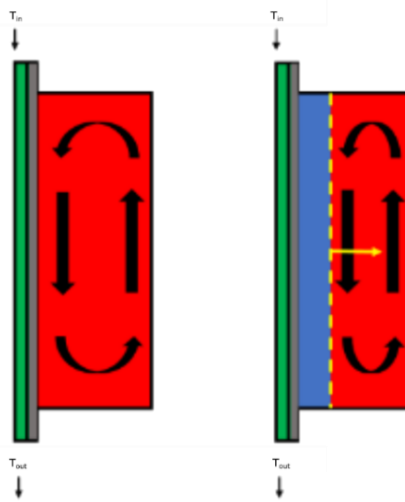


Figura 8: Schematizzazione della distribuzione della fase liquida (in rosso) e della fase solida (in blu) durante il processo di scarica del sistema di accumulo

Per la modellazione del processo di scarica è necessario calcolare per ogni passo di integrazione temporale la massa di materiale a cambiamento di fase solido, quindi la frazione di materiale solido, e la massa di PCM liquido. Come accennato precedentemente, il problema del processo di scarica viene modellato prevedendo lo spostamento del fronte di liquefazione, R_S con la relativa area di scambio termico A_S . Definiti i parametri è possibile calcolare le resistenze termiche che verranno impiegate per la modellazione dello scambio termico, R_1 , R_2 , R_3 come suggerito per il processo di carica.

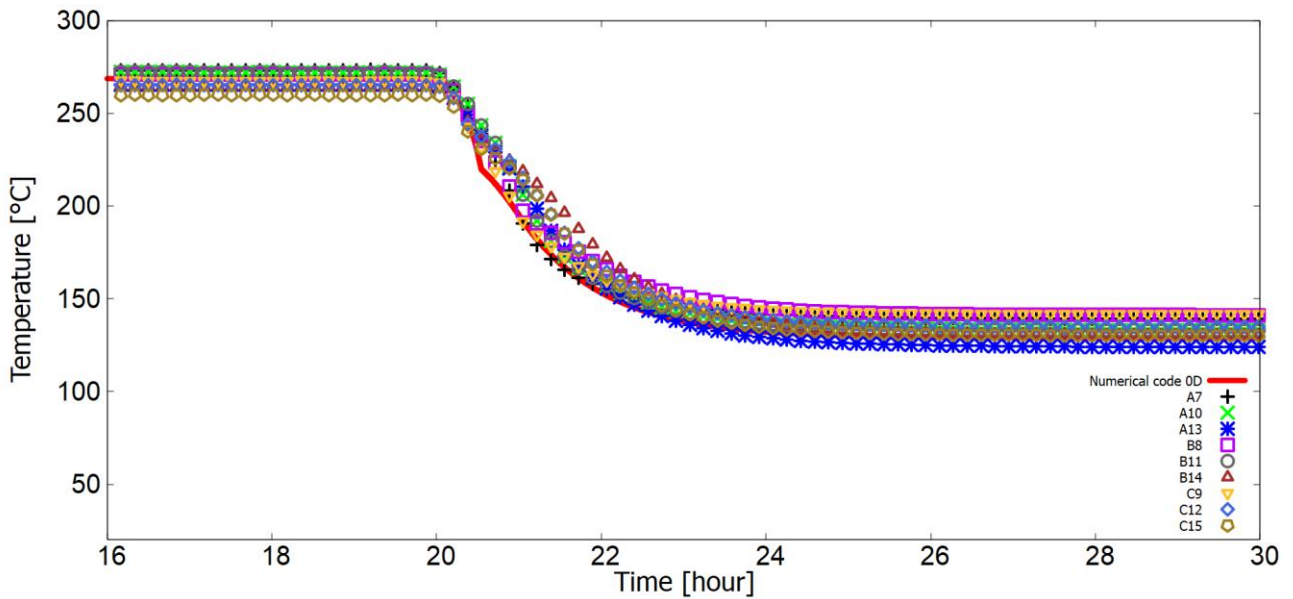


Figura 9: Confronto tra la temperatura media del PCM durante la fase di scarica, calcolata dal codice numerico, e la temperatura sperimentale del PCM misurata da termocoppie posizionate a diversi raggi dalla parete del tubo sui tre piani del PCM.

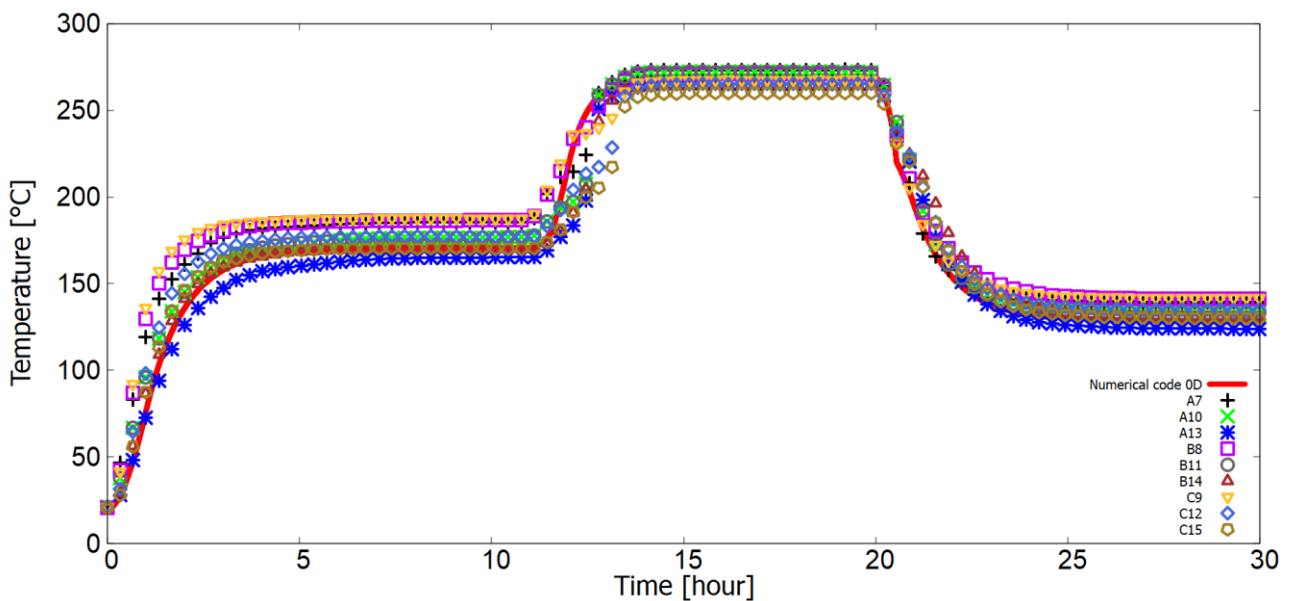


Figura 10: Confronto tra la temperatura media del PCM, calcolata dal codice numerico, e le temperature registrate all'interno del PCM.

La stima della potenza termica trasmessa dal materiale a cambiamento di fase al PCM al fluido termovettore avviene attraverso il calcolo della temperatura di uscita dello stesso imponendo come coefficiente di scambio termico globale la sola convezione lungo la tubazione. La potenza termica trasmessa dal materiale a cambiamento di fase verso il fluido termovettore descrive una variazione della temperatura della tubazione media d'acciaio da cui si calcola sia la temperatura della parete d'acciaio a contatto con il materiale PCM che quella a contatto col il fluido termovettore. Note le temperature medie della tubazione calcolate sia all'istante precedente e che a quello effettivo, si calcola la potenza termica entrante nella tubazione e quindi si aggiorna la temperatura di uscita HTF. Nella figura 8 si nota come anche il processo di scarica sia ben riprodotto dal software. Dal confronto tra la temperatura del PCM calcolata dal

codice OD e le temperature registrate dalle termocoppie interne al PCM (Figura 10) si nota come il codice a parametri concentrati sviluppato riesce a predire accuratamente l'intero processo di carica-scarica del sistema LHTES esaminato. I dati sperimentali utilizzati per validazione sono stati anche oggetto di validazione CFD i cui risultati sono riportati in articoli scientifici già pubblicati dagli autori [2]

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state previste attività di consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

Ceglie, V., Anaclerio, F., Camporeale, S. M., Miliozzi, A., Nicolini, D., & Fornarelli, F. (2024, November). OD physical model for the charging phase of shell-and-tube Latent Heat Thermal Storage. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2893, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.

10 Eventi di disseminazione

- Invited Speaker presso il Congresso Nanoinnovation 2024. Presentazione del lavoro "Unsteady simplified numerical model for the prediction of latent heat thermal energy storage devices". Roma 12 settembre 2024
- Partecipazione al 79° convegno ATI 2024. Presentazione del lavoro: "OD physical model for the charging phase of shell-and-tube Latent Heat Thermal Storage". Genova, 4 - 6 Settembre 2024.

11 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

I sistemi di accumulo termico che utilizzano materiali a cambiamento di fase (PCM) per l'accumulo di energia termica a calore latente (LHTES) sono ampiamente studiati per applicazioni negli edifici residenziali, nella produzione di energia e nei trasporti a temperatura controllata. Si tratta di sistemi complessi, che comportano comportamenti non lineari dovuti a fattori interconnessi, il che rende difficile la modellazione. La ricerca, in generale, si concentra sullo sviluppo di PCM [4][5], sul miglioramento del trasferimento di calore [6][7][8], sulla modellazione del cambiamento di fase solido-liquido [6][9] e sull'analisi delle prestazioni [10][11]. I modelli di previsione delle prestazioni si basano spesso su dati empirici provenienti da esperimenti. Alcuni studi si concentrano esclusivamente sull'energia latente, trascurando l'energia sensibile immagazzinata nel materiale di accumulo [12], nel fluido di trasferimento del calore (HTF) e nella struttura del sistema. Una stima accurata dello stato di carica deve considerare le variazioni di temperatura di tutti i componenti e la frazione liquida del PCM. Molti studi enfatizzano la frazione liquida, trascurando altri contributi allo stato di

carica [13]. La corretta predizione del comportamento di tali sistemi deve quindi includere tutti i contributi allo stato di carica [14]. Le prestazioni del sistema vengono valutate confrontando le geometrie in base alla loro capacità di completare la fase di carica utilizzando il calore latente. Il funzionamento efficiente dipende dalla capacità di sfruttare le transizioni di fase rispetto al riscaldamento o al raffreddamento sensibile. La carica e la scarica parziali rispetto alla capacità massima sono fondamentali [14], poiché le prestazioni diminuiscono significativamente oltre il 90% della capacità termica a causa delle limitazioni del trasferimento di calore. Studi sperimentali e numerici dimostrano che la dinamica dei fluidi PCM influenza l'efficienza del trasferimento di calore durante i cambiamenti di fase. I sistemi PCM solido/liquido presentano spesso variazioni spaziali nel fronte di fusione, la cui descrizione dettagliata è disponibile in letteratura [1]. Modelli semplificati che prevedono il tempo completo di carica/scarica dei sistemi LHTES shell-and-tube sono stati proposti [15] [16]; tuttavia, un modello predittivo deve gestire un comportamento instabile per essere integrato nella modellazione di un sistema di potenza. Il modello qui proposto mira a prevedere le prestazioni del sistema durante la fase di carica, stimando con precisione lo scambio di energia termica e lo stato di carica, soddisfacendo al contempo i requisiti computazionali. Il modello si basa sulla stima del trasferimento di calore, grazie al comportamento fisico del sistema riconosciuto dagli esperimenti e dalle simulazioni numeriche dettagliate. Uno studio recente ha identificato 12 numeri adimensionali che influenzano lo stato di carica dell'LHTES, fornendo spunti di progettazione ed evidenziando il deterioramento del trasferimento di calore per frazioni di liquido PCM superiori al 90%. Questo studio convalida un modello fisico per approssimare lo stato di carica e il flusso di calore del sistema LHTES.

Bibliografia

- [1] F. Fornarelli, S. M. Camporeale e B. Fortunato, «Convective Effects in a Latent Heat Thermal Energy Storage,» *Heat Transfer Engineering*, pp. no. 1, pp. 1-22, 2021.
- [2] F. Fornarelli, V. Ceglie, B. Fortunato, S. Camporeale, M. Torresi, P. Oresta e A. Milozzi, «Numerical simulation of a complete charging-discharging phase of a shell and tube thermal energy storage with phase change material,» *Energy Procedia*, p. vol. 126, 2017.
- [3] G. Giannuzzi, A. Milozzi e R. Liberatore, «Experimental and numerical analysis of the thermodynamic behaviour of simple latent heat thermal energy storage devices (in italian) energia elettrica da fonte solare,» Tech. Rep. Rds/Par2014/116 (ENEA, 2015), 2015.
- [4] L. F. Cabeza, A. Castell, C. d. Barreneche, A. De Gracia e A. Fernández, «Materialias used as pcm in thermal energy storage buildings: A review,» *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. vol.15, no. 3, pp.1675-1695, 2011.

- [5] G. Sadeghi, «Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges,» *Energy Storage Materials*, pp. vol. 46, pp. 192–222, 2022.
- [6] J. Yang, L. Yang, C. Xu e X. Du, «Numerical analysis on thermal behavior of solid-liquid phase change within copper foam with varying porosity,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. vol. 84, pp. 1008–1018, 2015.
- [7] D. Jamshideasli, «Heat transfer enhancement in thermal energy storage applications: a systematic review and data management salts,» *Journal of Energy Storage*, pp. vol. 46, p. 103863, 2022.
- [8] D. Ghosh, J. Ghose, P. Datta, P. Kumari e S. Pa, «Strategies for phase change material application in latent heat thermal energy storage enhancement: Status and prospect,» *Journal of Energy Storage*, pp. vol. 53, p. 105179, 2022.
- [9] M. Fadl e P. C. Eames, «Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter amush on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems,» *Applied Thermal Engineering*, pp. vol. 151, pp. 90–99, 2019.
- [10] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza e H. Mehling, «Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,» *Applied thermal engineering*, pp. vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003.
- [11] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki e Y. Zeraouli, «Energy storage: Applications and challenges,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, pp. vol. 120, pp. 59–80, 2014.
- [12] R. Raud, M. E. Cholette, S. Riahi, F. Bruno, W. Saman, G. Will e T. A. Steinberg, «Design optimization method for tube and fin latent heat thermal energy storage systems,» *Energy*, pp. vol. 134, pp. 585–594, 2017.
- [13] J. Gasia, A. de Gracia, G. Peirò, S. Arena, G. Cau e L. F. Cabeza, «Use of partial load operating conditions for latent thermal energy storage management,» *Applied energy*, pp. vol. 216, pp. 234–242, 2018.
- [14] W. Beyne, K. Couvreur, I. T’Jollyn, S. Lecompte e M. De Paepe, «Estimating the state of charge in a latent thermal energy storage heat exchanger based on inlet/outlet and surface measurements,» *Applied Thermal Engineering*, pp. vol. 201, p. 117806, 2022..
- [15] F. Fornarelli e S. M. Camporeale, «Simplified prediction model of the discharging time of a shell-and-tube lhtes,» *Applied Thermal Engineering*, pp. vol. 179, p. 115709, 2020..
- [16] F. Fornarelli, S. M. Camporeale e B. Fortunato,, «Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube lhtes,» *Applied Thermal Engineering*, pp. vol. 153, pp. 51–57, 2019.

