

Ricerca di Sistema elettrico



**SVILUPPO E MESSA A PUNTO DI UN MODELLO
NUMERICO SEMPLIFICATO A PARAMETRI
CONCENTRATI DEL COMPORTAMENTO DI UN LHTES DI
TIPO "TUBE&SHELL"**

Francesco Fornarelli



TITOLO (LA4.12 SVILUPPO E MESSA A PUNTO DI UN MODELLO NUMERICO SEMPLIFICATO A PARAMETRI CONCENTRATI DEL COMPORTAMENTO DI UN LHTES DI TIPO “TUBE&SHELL”)

Francesco Fornarelli DAFNE – Università di Foggia

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: *Progetto Integrato 1.2 (Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico)*

Linea di attività: *4.12*

Responsabile del Progetto: Raffaele, Liberatore, ENEA

Responsabile Linea di Attività: *Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria dell’Università degli Studi di Foggia*

Mese inizio previsto: Gennaio 2023

Mese inizio effettivo: Gennaio 2023

Mese fine previsto: Giugno 2023

Mese fine effettivo: Giugno 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione “ENEA - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria dell’Università degli Studi di Foggia”

Responsabile scientifico ENEA: Daniele, Nicolini

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Francesco, Fornarelli

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	4
4	PRODOTTI SVILUPPATI	4
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	4
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	5
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	14
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	14
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	14
11	POSIZIONAMENTO DELLA RICERCA RISPETTO ALLO STATO DELL'ARTE INTERNAZIONALE	14
12	BIBLIOGRAFIA.....	15

1 Risultati attesi

Sviluppo e mettere a punto di un modello semplificato a parametri concentrati del comportamento di un LHTES di tipo “tube&shell”, sia singolo che a cascata, atto alla predizione delle performance del sistema di accumulo al variare delle condizioni di funzionamento. Tale modello consentirà di simularne in modo facile e veloce il comportamento termico di un LHTES e di valutarne l’integrazione di impianto attraverso all’interno di programmi dedicati allo scopo.

2 Risultati ottenuti

L’attività ha riguardato lo studio preliminare e trattazione analitica del modello di predizione della potenza termica scambiata. La trattazione si è basata sull’analisi del comportamento fisico del componente di accumulo termico a cambiamento di fase nelle diverse fasi di lavoro.

Come evidenziato in letteratura, la fenomenologia influisce considerevolmente sulle prestazioni del componente finale. Il sistema di accumulo può funzionare in diverse condizioni operative che portano il sistema ad accumulare energia o a cedere l’energia accumulata al fluido termo-vettore. L’accumulo di energia viene denominata fase di carica, mentre la cessione di energia è denominata fase di scarica.

Nei sistemi di accumulo a calore latente il materiale scelto deve quindi avere un punto di scioglimento/solidificazione termodinamicamente compatibile con le condizioni operative. Nei sistemi solido/liquido il parametro più importante è rappresentato dalla temperatura. Il raggiungimento della temperatura di passaggio di fase determina nel materiale di accumulo l’immagazzinamento o la cessione dell’energia di legame intermolecolare a cui è correlato lo stato liquido o solido.

In materiali puri questo passaggio avviene a temperatura costante, a cui non corrisponde la costanza dell’entalpia totale. In relazione al range operativo, questi sistemi possono quindi funzionare sia in assenza di passaggio di fase, calore sensibile, sia in condizioni di cambio fase, calore latente.

Il sistema di accumulo è stato quindi studiato rispetto al suo componente base, il singolo monotubo, di cui si compone il sistema completo. La corretta rappresentazione del comportamento del singolo monotubo sarà alla base dell’analisi di un sistema più complesso costituito da monotubi collegati tra loro in serie e in parallelo.

3 Prodotti attesi

Un modello numerico semplificato a parametri concentrati del comportamento di un LHTES di tipo “tube&shell”.

4 Prodotti sviluppati

È stato impostato un modello di previsione analitico del comportamento di un sistema di accumulo termico a calore latente. Il modello deve tenere in considerazione il funzionamento non stazionario del sistema in diverse condizioni operative. Rispetto a modelli esistenti in letteratura lo scambio termico nella fase convettiva presenta un modello di stima del coefficiente di scambio termico basato sul comportamento fisico delle fasi liquida e solida durante la fase di carica e scarica all'interno del materiale a cambiamento di fase. Tramite studi sperimentali e numerici si è evidenziato infatti la non simmetria tra fase di carica e scarica. Per tale ragione il modello di previsione del comportamento del sistema, a partire dal singolo monotubo, si divide in due parti: la prima rispetto alla fase di carica, la seconda rispetto alla fase di scarica. Tale approccio innovativo della modellistica di un sistema ad accumulo termico a cambiamento di fase ha portato ad un ottimo confronto con i risultati di letteratura. Il modello consente la risoluzione non stazionaria del sistema in tempi rapidi rispetto ad analisi di tipo numerico dettagliate (CFD) o sperimentali. Lo strumento si presta a poter essere utilizzato all'interno di un ambiente di progettazione o verifica di massima di un sistema complesso.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati riscontrati scostamenti rispetto a quanto previsto.

6 Sintesi delle attività svolte

- È stato compreso e studiato il processo di carica e scarica del materiale a cambiamento di fase evidenziandone sia le differenze che le prestazioni in termini di flusso termico scambiato tra fluido termovettore e materiale a cambiamento di fase e tempi di liquefazione e solidificazione.
- A fronte della comprensione della fenomenologia associata al processo di carica e scarica di un sistema di accumulo a cambiamento di fase di tipo shell-and-tube, si è impostato un modello semplificato OD a parametri concentrati che riuscisse a tenere conto delle caratteristiche fisiche e cinematiche del problema.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Descrizione dettagliata del comportamento fisico del sistema di accumulo

Per poter descrivere matematicamente un problema complesso come quello associato al comportamento di un sistema di accumulo a cambiamento di fase solido-liquido è importante stabilire i vincoli ed il range di parametri entro i quali il modello debba essere in grado di predire correttamente le performance del dispositivo alle quali siamo interessati.

Nel caso specifico, il problema che si vuole affrontare riguarda sistemi di accumulo termico, generalmente impiegati in sistemi di conversione dell'energia, con temperature operative dell'ordine di 200°C/300°C. Lo studio preliminare ha riguardato lo studio del comportamento del materiale di accumulo all'interno del sistema sia in fase di carica che in fase di scarica. Sono state considerate sia esperienze sperimentali che numeriche presenti in letteratura.

Al fine di una descrizione di dettaglio della distribuzione della frazione di liquido, distribuzione di temperatura e potenza termica scambiata al variare delle condizioni operative. A tal proposito, si sono effettuate delle simulazioni numeriche su una geometria affine al sistema tipico "shell-and-tube" che sarà oggetto di studio. Il sistema considerato è costituito da un singolo monotubo il cui comportamento può essere preso come modello in sistemi di tipo multitubo. Questa approssimazione risulta consolidata in sistemi di tipo shell-and-tube nei quali gli effetti di bordo possono essere trascurati. Sono state studiate simulazioni fluidodinamiche 2D assial-simmetriche sia reperibili in letteratura sia realizzate ad hoc per il problema qui studiato in modo da poter caratterizzare nel dettaglio la fenomenologia associata al funzionamento di un sistema di accumulo termico a calore latente nella configurazione geometrica prevista nello studio.

È emerso come il processo di carica del materiale a cambiamento di fase (Phase Change Material, PCM) sia diviso in 3 fasi principali: fase di riscaldamento del materiale a cambiamento di fase allo stato solido (calore sensibile), fase di scioglimento del PCM (calore latente) e infine innalzamento della temperatura del PCM completamente liquefatto (calore sensibile), mentre il processo di scarica è caratterizzato dal raffreddamento sensibile del PCM liquido fino alla temperatura di scioglimento, dal passaggio del PCM dallo stato liquido a quello solido e dal raffreddamento del PCM solido al di sotto della temperatura di scioglimento.

Analizziamo qui di seguito in dettaglio la fenomenologia associata a ciascuna fase del processo:

1. La fase di carica è caratterizzata nelle fasi iniziali da un aumento della temperatura della parte di scambio termico con conseguente scioglimento del PCM a ridosso della parete. Con l'avanzare del tempo, si osserva la formazione di uno strato di fluido caldo che risale verso l'alto. La dimensione radiale di tale meato fluido sembrerebbe rimanere pressoché costante per tutto il processo di scioglimento del PCM (figura 1). Il fluido caldo che risale lungo la parete tende a subire una rotazione con il conseguente instaurarsi dei moti convettivi che promuovono lo scambio termico. Il processo di carica prosegue con il moto del fluido a contatto con la parete verso l'alto e la stratificazione del liquido nella parte superiore (figura 3). La parete liquida superiore continuerà a scambiare calore innalzando la propria temperatura.
2. Il processo di scarica è caratterizzato da una rapida diminuzione della temperatura del materiale a cambiamento di fase, ciò è accompagnato, nelle fasi iniziali, da elevate potenze termiche scambiate tra il PCM e fluido termovettore. Nella fase successiva il calore scambiato diventa di natura latente con annesso passaggio di stato del PCM da liquido a solido. Il passaggio di stato può essere osservato da uno spostamento orizzontale del fronte di solidificazione come si osserva in figura 4.

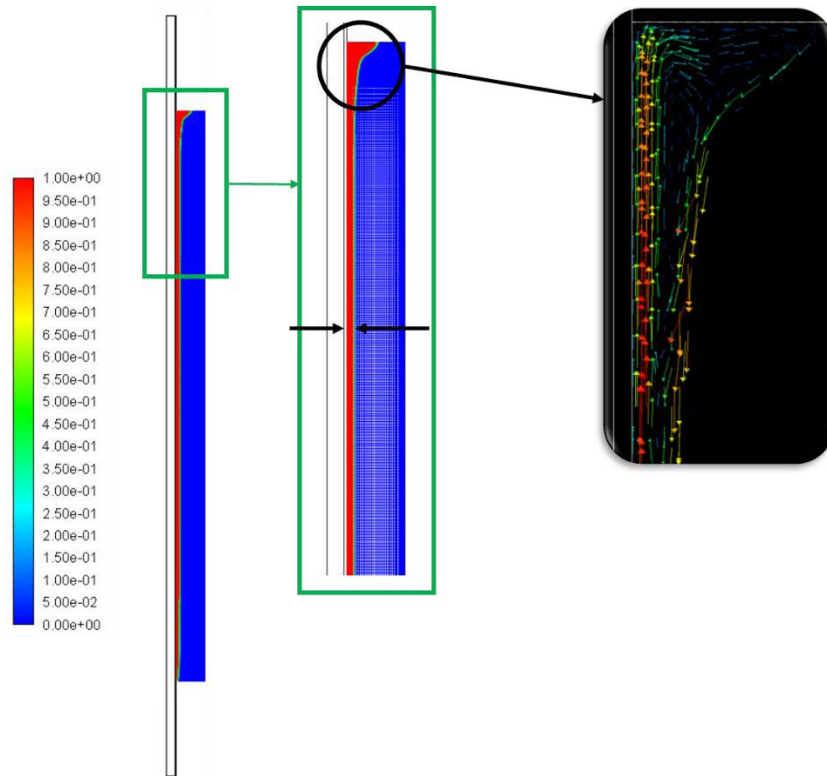


Figura 1: frazione di liquido che risale lungo la parete della tubazione.

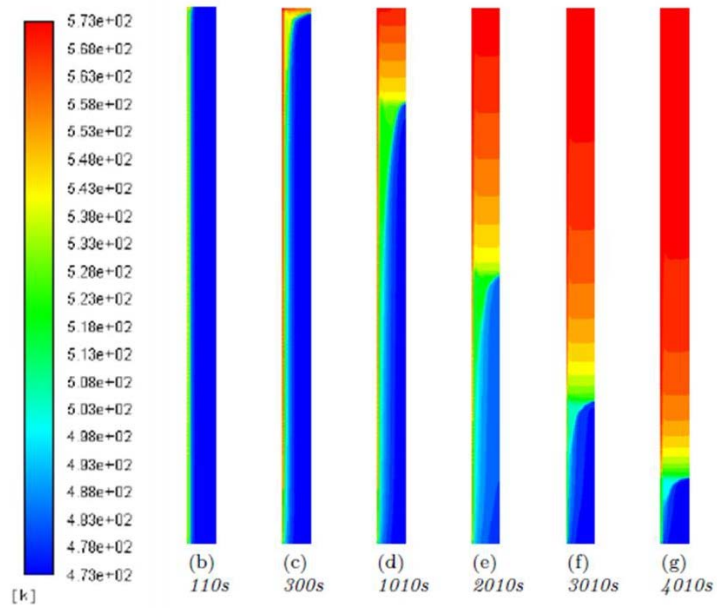


Figura 2: distribuzione della temperatura del materiale a cambiamento di fase durante il processo di carica.

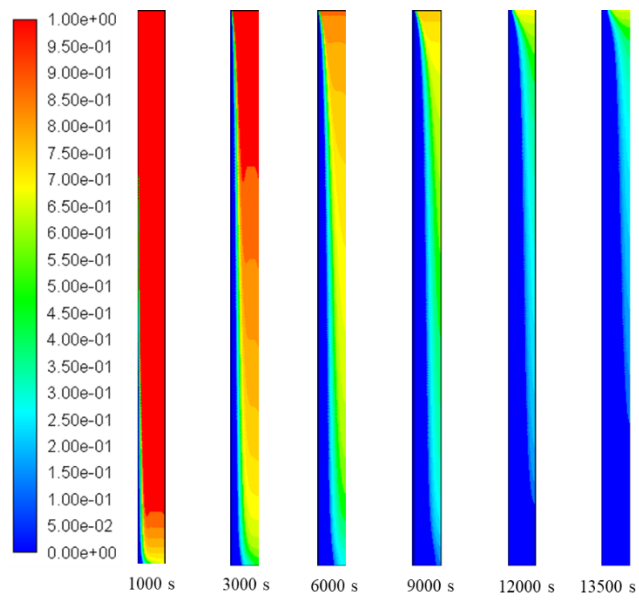


Figura 3: contour plots della frazione di liquido.

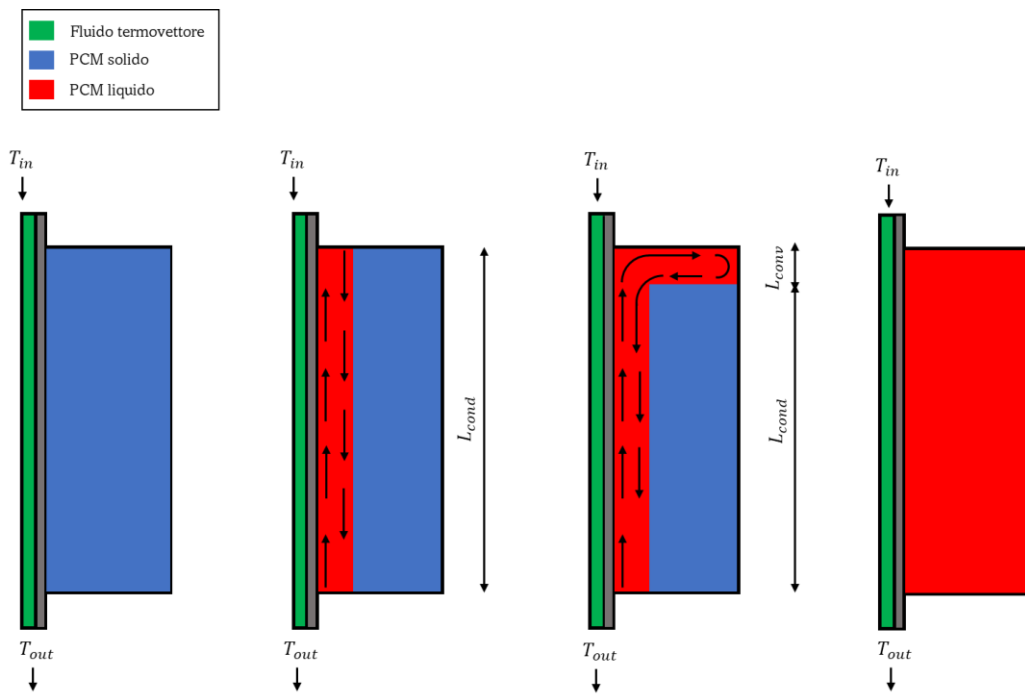


Figura 4: schema del modello 0D.

7.1.1 Schematizzazione del processo di carica

L'analisi condotta permette di poter analizzare e impostare le configurazioni assunte del materiale a cambiamento di fase all'interno del LHTES durante i processi di carica e scarica. Lo script OD in input prevederà l'inserimento delle caratteristiche del materiale a cambiamento di fase, della tubazione e del fluido termovettore. Lo schema della fase di carica è raffigurato in figura 4.

Il modello OD terrà conto di 4 fasi durante il processo di carica:

1. Nella prima fase, il PCM è completamente solido, per cui qualora la temperatura del fluido termovettore sia più elevata della temperatura della parete di scambio termico, e la frazione di liquido sia nulla, si innesca il processo di innalzamento della temperatura del PCM solido. Questo calore si traduce in un contributo sensibile. La temperatura di uscita del fluido termovettore è stimata ipotizzando per ogni step temporale una temperatura costante della parete di scambio termico:

$$T_{OUT} = T_{WALL} - (T_{WALL} - T_{IN}) \cdot e^{-\frac{U_{1,2}}{cp_f \cdot \dot{m}}}$$

ove $U_{1,2}$ è il coefficiente di scambio termico globale, T_{WALL} la parete della tubazione, T_{IN} la temperatura del fluido termovettore in ingresso. Note le condizioni di ingresso e uscita del fluido termovettore, è possibile ottenere la potenza termica scambiata $\dot{Q}_{WALL} = cp_f \cdot \dot{m} \cdot (T_{IN} - T_{OUT})$, la quale è una frazione di quella totale. Infatti, si stima un'ulteriore potenza termica che contribuisce all'incremento della temperatura del materiale in fase solida. Questa potenza viene calcolata attraverso la stima del numero di Biot e le temperature dell'intero sistema. In formule:

$$Rapp = Biot \cdot \frac{(T_{Mean} - T_{WALL})}{(T_{WALL} - \bar{T})}$$

in cui \bar{T} , temperatura media del solido, T_{Mean} , temperatura media del fluido termovettore. Da quest'ultima relazione si può scrivere:

$$\dot{Q}_{PCM} = \dot{Q}_{WALL} / Biot$$

Da questo si stima la potenza termica totale scambiata:

$$\dot{Q}_{TOT} = \dot{Q}_{PCM} + \dot{Q}_{WALL}$$

Note le singole potenze termiche, si possono ottenere gli incrementi di temperatura della tubazione esterna e del materiale solido:

$$\Delta T_{WALL} = \frac{\dot{Q}_{WALL} \cdot dt}{cp_t \cdot Massa_{Acciaio}}$$

$$\Delta T_{PCM} = \frac{\dot{Q}_{PCM} \cdot dt}{cp_{PCM} \cdot Massa_{PCM}}$$

Le variabili T_{OUT} , T_{WALL} e T_{PCM} vengono aggiornate per ogni istante temporale.

2. La seconda fase consiste per la formazione della fase liquida a ridosso della parete di scambio termico della tubazione qualora venga soddisfatta la relazione $T_{WALL} = T_{LIQ}$. In questo caso, considerando il profilo di temperatura di tipo logaritmico, $T(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2$, che si è potuto osservare durante le simulazioni CFD 2D, è possibile calcolare la quantità di frazione di liquido oltre il quale si instaureranno i moti convettivi. La risoluzione del profilo di temperatura logaritmico per il calcolo delle costanti di C_1 e C_2 è ottenibile imponendo le seguenti condizioni al contorno.

$$T_{LIQ} = C_1 \cdot \ln(r_e) + C_2$$

$$T_{PCM} = \bar{T} = C_1 \cdot \ln(r_{PCM}) + C_2$$

Dal calcolo delle costanti, imponendo la temperatura caratteristica di solido nella seguente relazione $T_{SOL} = C_1 \cdot \ln(r) + C_2$, si ottiene la distanza s^* a cui corrisponde la distanza radiale per il calcolo della massa liquida di materiale a cambiamento di fase (β_{s^*}) oltre la quale si innescano i moti convettivi. Uno schema semplificato del modello è rappresentato in figura 5.

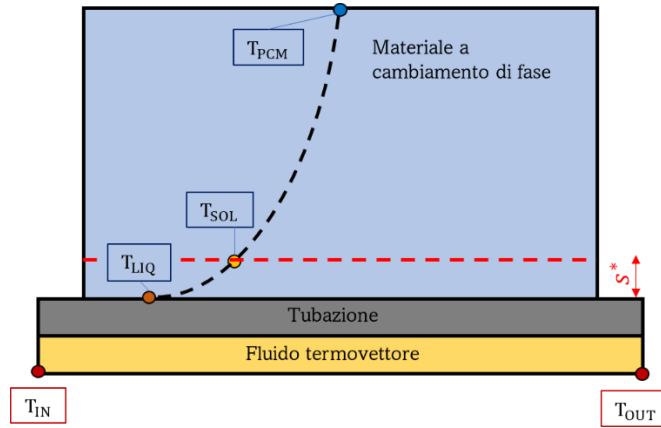


Figura 5: Profilo logaritmico della temperatura all'interno del materiale a cambiamento di fase.

In questa fase poiché il gradiente di temperatura è perpendicolare alla direzione con cui la velocità risale verso l'alto, il contributo per la trasmissione di calore sarà solo di natura conduttiva e contribuirà ad aumentare la frazione di liquido. Il contributo del calore è di natura latente. Effettuando l'ipotesi di temperatura della parete d'acciaio costante ($T = T_{LIQ}$), per un fluido che scorre all'interno di una tubazione è possibile calcolare la temperatura di uscita del fluido poiché è noto il coefficiente di scambio termico globale pari a $U_g = 1/R_{TOTALE}$. Quando la frazione di liquido totale supera il valore di β_{s^*} si innesca la fase successiva del processo di carica caratterizzata dai moti convettivi. Tuttavia, finché $\beta < \beta_{s^*}$, si può dedurre la generica ascissa curvilinea "s" del fronte di liquefazione sulla base del volume di liquido prodotto per ogni istante di tempo. Così facendo, il fronte di liquefazione si sposta gradualmente fino a s^* e tramite una relazione proporzionale, si può calcolare la temperatura T_s alla generica ascissa "s".

$$T_s = \frac{(s - r_e)}{(s^* - r_e)} \cdot (T_{PCM} - T_{WALL}) + T_{WALL}$$

Lo scambio termico è stato modellato prevedendo convezione tra fluido termovettore e tubazione, conduzione lungo la tubazione d'acciaio a temperatura $T_{WALL} = T_{LIQ}$ e scambio termico conduttivo tra la parete esterna della tubazione e la generica ascissa "s": Questo approccio permette di calcolare la potenza termica come segue:

$$\dot{Q} = \frac{T_{htf,mean} - T_s}{R_{totale}}$$

R_{totale} è la resistenza termica totale. Nel caso specifico, la resistenza totale sarà calcolata come segue:

$$R_{totale} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{h_f \cdot A_L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_t \cdot L_{cond}} + \frac{\ln\left(\frac{s}{r_e}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{PCM} \cdot L_{cond}}$$

ove h_f è il coefficiente di scambio termico convettivo, A_L è l'area di scambio termico conduttiva longitudinale, $\frac{r_e}{r_i}$ il rapporto tra il raggio esterno e interno della tubazione, k_t la conducibilità termica dell'acciaio, L_{cond} la lunghezza longitudinale del tratto conduttivo, k_{PCM} la conducibilità termica del materiale a cambiamento di fase, s la generica ascissa curvilinea.

La temperatura di uscita del fluido termovettore verrà calcolata nel seguente modo:

$$T_{OUT} = T_s - (T_s - T_{IN}) \cdot e^{-\frac{U_g}{cp_f \cdot \dot{m}}}$$

In questo modo è possibile calcolare la potenza termica scambiata nel tratto conduttivo.

$$\dot{Q}_{beta} = cp_f \cdot \dot{m} \cdot (T_{IN} - T_{OUT})$$

$$Q_{beta} = \dot{Q}_{beta} \cdot \Delta t$$

La seconda parte per la fase conduttiva consiste nell'innalzamento della temperatura del PCM solido fino alla temperatura di solidus oltre la quale avverrà il passaggio di fase. La stima della potenza

termica necessaria all'innalzamento della temperatura del PCM solido prevede il calcolo del numero di Biot corretto per la parte solida, le cui dimensioni sono influenzate dall'ascissa curvilinea "s":

$$Biot_s = Biot \cdot \frac{(r_{pcm} - s)}{(r_{pcm} - r_e)}$$

e quindi si ricava il rapporto delle potenze termica di scioglimento e di riscaldamento come effettuato in precedenza

$$Rapp = Biot_s \cdot \frac{(T_{Mean} - T_{WALL})}{(T_{WALL} - \bar{T})}$$

Di conseguenza,

$$\dot{Q}_{pcm} = \frac{\dot{Q}_{beta}}{Rapp}$$

Anche in questa parte, la temperatura media del materiale a cambiamento di fase solido, \bar{T} , subisce un incremento di temperatura ΔT_{PCM} per ogni istante temporale. Quando la temperatura del materiale solido di PCM tenderà a superare quella di solido T_{SOL} , una porzione di materiale solido tenderà a diventare liquida e a salire verso l'alto contribuendo all'innalzamento della frazione liquida complessiva.

$$\Delta M_{L,2} = \left(1 - \frac{T_{LIQ} - \bar{T}}{T_{LIQ} - T_{SOL}}\right) \cdot \frac{\dot{Q}_{pcm} \cdot dt}{H_{PCM}}$$

Il materiale a cambiamento di fase liquido verrà stimato come segue

$$M_L = \Delta M_L + \Delta M_{L,2} = \frac{Q_{beta}}{H_{PCM}} + \left(1 - \frac{T_{LIQ} - \bar{T}}{T_{LIQ} - T_{SOL}}\right) \cdot \frac{\dot{Q}_{pcm} \cdot dt}{H_{PCM}}$$

Integrando ΔM_L nel tempo si ottiene la frazione di liquido totale prodotta:

$$\beta = \frac{M_L}{M_{TOTALE}}$$

3. La terza fase prevede la modellazione dei moti convettivi. Nella parte superiore del PCM si instaurerà la stratificazione del liquido con conseguente innalzamento della temperatura del PCM a causa dello scambio termico col fluido termovettore. Lo schema semplificato è rappresentato dalla figura 6. Inoltre, appare chiaro come la superficie di scambio termico conduttivo tende a diminuire a causa di una riduzione della lunghezza longitudinale conduttiva L_{cond} e un incremento della lunghezza longitudinale convettiva L_{conv} .

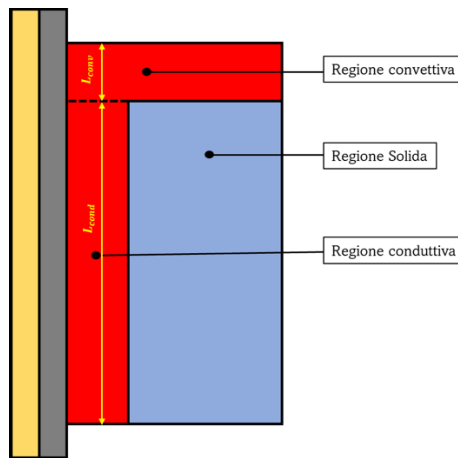


Figura 6: schematizzazione del dominio nel modello 0D per la terza fase del processo di carica.

Lo scambio termico convettivo è valutato stimando il numero adimensionale di Rayleigh, il quale influenza direttamente il coefficiente di scambio termico convettivo:

$$Ra = \frac{g \cdot L_{conv}^3 \cdot \gamma \cdot (\overline{T_{HTF}} - T_{LIQ_CONV})}{\left(\frac{\mu_{PCM}}{\rho_{PCM}}\right)^2 \cdot \frac{1}{Pr}}$$

$$Nu_{fp2} = 0.68 + \frac{(0.67 \cdot Ra^{0.25})}{\left(1 + \frac{0.492^{9/16}}{Pr}\right)^{4/9}}$$

$$h_{conv} = \frac{k_{PCM} \cdot Nu_{fp2}}{L_{conv}}$$

Il coefficiente di scambio termico globale per il tratto convettivo è ottenuto considerando le seguenti resistenze termiche:

$$R_{totale} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{h_f \cdot A_{conv}} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_t \cdot L_{conv}} + \frac{1}{h_{conv} \cdot A_{conv}}$$

In questa condizione è possibile stimare la temperatura del fluido termovettore uscente dal tratto convettivo che risulterà entrante nel tratto conduttivo.

$$T_{OUT} = T_{LIQ_CONV} - (T_{LIQ_CONV} - T_{IN}) \cdot e^{-\frac{U_{g,conv}}{cp_f \cdot \dot{m}}}$$

Di conseguenza è nota la potenza termica trasmessa, il calore rilasciato dal fluido termovettore e l'incremento di temperatura del fluido nella regione convettiva.

$$\dot{Q}_{conv} = cp_f \cdot \dot{m} \cdot (T_{OUT} - T_{OUT,2})$$

$$Q_{conv} = \dot{Q}_{conv} \cdot \Delta t$$

$$\Delta T_{PCM} = \frac{Q_{conv}}{cp_{PCM}}$$

Per ogni istante di tempo, la temperatura della regione liquida sarà calcolata come segue:

$$T_{LIQ_CONV} = T_{LIQ_CONV} + \Delta T_{PCM}$$

- La quarta fase consiste nell'aumento della temperatura del PCM liquido fino alla temperatura massima consentita. La modellazione di quest'ultima fase è contenuta all'interno dello schema riportato al punto 3.

7.2 Schematizzazione del processo di scarica

La schematizzazione del processo di scarica prevede lo spostamento radiale del fronte di liquefazione. Anche in questo caso, il processo di scarica è diviso in diverse configurazioni che innescano scenari differenti:

- Materiale a cambiamento di fase allo stato solido ma caratterizzato da una temperatura superiore a quello del fluido termovettore in ingresso alla tubazione. In questo caso, lo scambio termico sarà di natura sensibile.
- Fase di scarica con presenza di materiale liquido all'interno del sistema di accumulo. In questa fase si avrà uno scambio termico latente.
- Fase di scarica con scambio termico sensibile quando il materiale a cambiamento di fase è totalmente liquido e il fluido termovettore ha una temperatura inferiore a quella del PCM. In questo scenario, lo scambio termico è di natura sensibile.

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 :

$$R_S = \sqrt{r_e^2 \cdot (1 - \beta_s) + r_{pcm}^2 \cdot \beta_s}$$

Mentre l'area di scambio termico associata alla quota R_S , sarà pari a:

$$A_S = 2\pi \cdot R_S \cdot L$$

con L l'altezza del tratto convettivo. Nel caso di frazione di liquido pari a 1, la quota radiale R_S sarà pari alla quota r_e , cioè raggio esterno della tubazione. La schematizzazione del processo di scarica è riportata in figura 7.

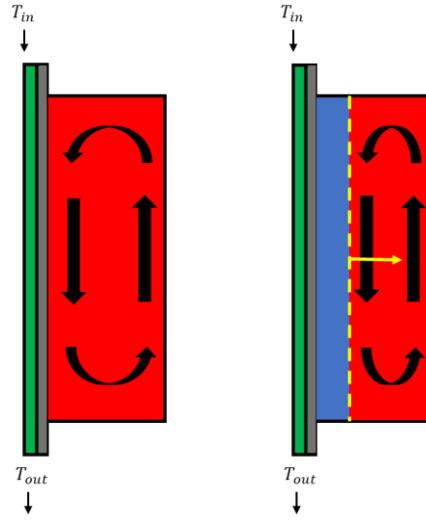


Figura 7: Schematizzazione del processo di scarica.

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. Inoltre, R_3 sarà funzione di R_S . La resistenza termica per lo scambio termico convettivo, R_4 , è calcolata stimando il numero di Rayleigh (Ra) utile al calcolo del coefficiente di scambio termico convettivo h_{pcm} . La stima della potenza termica trasmessa dal materiale a cambiamento di fase 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:

$$T_{OUT} = T_{WALL_HTF} - (T_{WALL_HTF} - T_{IN}) \cdot e^{-\frac{U_g}{cp_f \cdot \dot{m}}}$$

da cui

$$\dot{Q}_{wall} = cp_f \cdot \dot{m} \cdot (T_{IN} - T_{OUT})$$

Nota la temperatura del fluido PCM liquido, T_{LIQ_CONV} , e della tubazione, T_{wall} , è possibile calcolare la potenza termica che viene trasmessa dal PCM liquefatto verso la tubazione se $\beta = 1$:

$$\dot{Q}_{pcm,liquido} = \frac{(T_{LIQ_CONV} - T_{wall})}{R_4}$$

o dal PCM liquido a quello solidificato se $\beta \neq 1$:

$$\dot{Q}_{pcm,solido} = \frac{(T_{melting} - T_{wall})}{R_3}$$

considerando la $T_{melting}$ è pari a $(T_{sol} + T_{liq}) \times 0,5$. Nota la potenza termica \dot{Q}_{pcm} , si può calcolare la temperatura aggiornata del materiale a cambiamento di fase allo stato liquido:

$$T_{LIQ_CONV} = T_{LIQ_CONV} - \frac{(\dot{Q}_{pcm} \cdot dt)}{M_L \cdot cp_{PCM}}$$

La potenza termica trasmessa dal materiale a cambiamento di fase verso il fluido termovettore descrive una variazione della temperatura della tubazione media d'acciaio:

$$\overline{T}_{wall} = \overline{T}_{wall} + \frac{(\dot{Q}_{pcm} + \dot{Q}_{wall})}{cp_t \cdot Massa_{Acciaio}}$$

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:

$$\dot{Q}_{tube} = Massa_{Acciaio} \cdot cp_t \cdot (\overline{T}_{wall} - \overline{T}_{wall,old})$$

Effettuato il bilancio tra \dot{Q}_{wall} , $\dot{Q}_{pcm,liquido}$, \dot{Q}_{tube} , e $\dot{Q}_{pcm,solido}$ è possibile aggiornare la temperatura la frazione di liquido come:

$$\beta = \beta_{old} - \frac{\dot{Q}_{pcm,liquido}}{h_{pcm} \cdot dt}$$

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state previste consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state fatte pubblicazioni scientifiche

10 Eventi di disseminazione

Non sono stati effettuati eventi di disseminazione

11 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

I Sistemi di accumulo termico ed in particolare quelli a cambiamento di fase, Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES), sono attualmente molto studiati in diversi ambiti che coinvolgono, ad esempio, l'edilizia residenziale, i processi di generazione dell'energia ed il trasporto termo-controllato di prodotti. La fenomenologia associata a questi sistemi risulta essere particolarmente complessa coinvolgendo diversi aspetti che si influenzano reciprocamente dando origine a comportamenti non lineari di difficile modellizzazione. La ricerca internazionale si divide in diverse linee che coinvolgono: lo sviluppo e la caratterizzazione dei materiali a cambiamento di fase (Cabeza, et al., 2011) (Sadeghi, 2022), la massimizzazione dello scambio termico nei sistemi a cambiamento di fase (Yang, et al., 2015) (Jamshideasli, 2022) (Ghosh, et al., 2022), la modellistica associata al cambiamento di fase solido-liquido (Yang, et al., 2015) (Fadl & Eames, 2019) e l'analisi delle prestazioni del sistema di accumulo (Zalba, et al., 2003) (Kousksou, et al., 2014). I modelli di predizione delle performance dei sistemi di accumulo a cambiamento di fase sono spesso basati su correlazioni empiriche legate ai risultati di numerose prove sperimentali. Esistono anche studi basati sul tempo di scioglimento che quindi tengono in considerazione la sola quota parte di energia latente trascurando l'energia sensibile immagazzinata sia nel materiale di accumulo che nel fluido termovettore (HTF) e nel materiale di cui è costituita la struttura del sistema (Raud, et al., 2017). Si deve quindi fare riferimento allo stato di carica complessivo che sarà legato alla variazione di temperatura dei vari materiali che costituiscono il sistema e dalla percentuale di frazione liquida del materiale a cambiamento di fase (PCM). Molti studi che riguardano i sistemi LHTES fanno infatti riferimento alla sola frazione di liquido trascurando gli altri contributi allo stato di carica (Gasia, et al., 2018). Naturalmente la potenza termica trasferita dal/al fluido termovettore al/dal sistema di accumulo sarà sempre legata a tutti i contributi allo stato di carica (Beyne, et al., 2022). Questo aspetto dovrà essere considerato al fine di una corretta stima dello stato di carica e della potenza trasferita all'interno di un modello di calcolo. Le performance del sistema possono essere valutate considerando la capacità del sistema di completare una fase di carica e/o scarica completa della sola parte latente attraverso un confronto tra diverse geometrie. Questo tipo di analisi porta quindi ad una valutazione dell'influenza delle caratteristiche geometriche sulla risposta del sistema con una stima dello scambio termico medio sia in fase di carica (Fornarelli, et al., 2019) che di scarica (Fornarelli &

Camporeale, 2020) con la derivazione di modelli analitici legati al comportamento fisico del materiale di accumulo. Un sistema a calore latente per poter funzionare in modo efficiente ha la necessità di sfruttare la fase di passaggio di fase rispetto al riscaldamento o raffreddamento sensibile del sistema. Per tale ragione nella sua progettazione risulta rilevante considerare un processo di carica e scarica parziale rispetto alla massima capacità del sistema (McKenna, et al., 2021). Superare il 90% della capacità termica del sistema comporta la riduzione delle prestazioni in termini di scambio termico considerevole. Anche la regolazione delle portate del fluido termovettore influisce sulle prestazioni del sistema per cui lo studio del sistema. Le evidenze sperimentali e numeriche sottolineano come le fasi di carica e scarica del sistema durante il cambiamento di fase siano influenzate dalla diversa organizzazione fluidodinamica del PCM. Questo comporta una maggiore o minore efficacia di scambio termico del sistema a seconda del verso della potenza termica scambiata. Numerosi studi riportano nel caso di PCM solido/liquido la diversa distribuzione spaziale del fronte di scioglimento che rende il processo caratterizzato da una sensibile isteresi nella sua risposta alla forzante termica esterna. L'integrazione di un modello di risoluzione del comportamento di un sistema di accumulo termico a calore latente in un sistema di trasformazione dell'energia per fini energetici deve quindi essere in grado di gestire il comportamento non stazionario del componente. In questo lavoro di ricerca il modello che ci si prefigge di sviluppare dovrà quindi essere in grado di predire il comportamento del sistema in un qualsiasi punto di funzionamento stimando opportunamente la potenza termica scambiata e lo stato di carica del sistema compatibilmente ai tempi di calcolo richiesti da un modello di analisi complessivo di un impianto di conversione dell'energia. In letteratura vengono proposti modelli a conducibilità modificata per evitare di dover risolvere le equazioni di conservazione della quantità di moto all'interno del PCM. Questo porta ad una maggiore efficienza del calcolo, ma di contro la complessità e l'accuratezza del metodo dipendono dalla corretta stima della conducibilità modificata attraverso correlazioni empiriche basate sul problema specifico (Rocha, et al., 2023). Questo tipo di approccio è quindi legato ad una ricostruzione dei risultati sperimentali e non tiene in considerazione le relazioni fisiche tra i parametri del problema. Un recente studio (Shete, et al., 2021) affronta il problema tramite un'analisi di primo principio dello stato di carica di un sistema di accumulo LHTES identificando ben 12 numeri adimensionali alla base del problema e riuscendo a stimare dalle relazioni tra i vari parametri fisici del problema un deterioramento delle capacità di scambio termico del sistema per valori della frazione liquida di PCM superiori al 90%. A ogni modo lo studio è limitato alla sola carica e fornisce solo delle indicazioni qualitative sulla progettazione del sistema, suggerendo per esempio l'utilizzo di HTF in grado di mantenere una temperatura costante nell'attraversamento del modulo. Tale approccio, già evidenziato in altri lavori (Fornarelli, et al., 2019) (Fornarelli & Camporeale, 2020) è orientato all'ottimizzazione del dispositivo e non alla modellizzazione del componente all'interno di un sistema di conversione dell'energia. In questo studio il problema verrà affrontato in ottica di integrazione di sistema tramite un modello fisico in grado di approssimare con un'accuratezza adeguata lo stato di carica e il flusso termico trasferito nel tempo sia in fase di carica che in fase di scarica.

12 Bibliografia

- Beyne, W. et al., 2022. Estimating the state of charge in a latent thermal energy storage heat exchanger based on inlet/outlet and surface measurements. *Applied Thermal Engineering*, p. 117806.
- Cabeza, L. et al., 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1675-1695.
- Fadl, M. & Eames, P., 2019. 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. 90-99.
- Fornarelli, F. & Camporeale, S. M., 2020. Simplified prediction model of the discharging time of a shell-and-tube LHTES. *Applied Thermal Engineering*, p. 115709.

Fornarelli, F., Camporeale, S. M. & Fortunato, B., 2019. Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube LHTES. *Applied Thermal Engineering*, pp. 51-57.

Gasia, J. et al., 2018. Use of partial load operating conditions for latent thermal energy storage management. *Applied Energy*, pp. 234-242.

Ghosh, D. et al., 2022. Strategies for phase change material application in latent heat thermal energy storage enhancement: Status and prospect. *Journal of Energy Storage*, pp. 1-20.

Jamshideasli, D., 2022. Heat transfer enhancement in thermal energy storage applications: A systematic review and data management in salts. *Journal of Energy Storage*, pp. 1-18.

Kousksou, T. et al., 2014. Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, pp. 59-80.

McKenna, P., Turner, W. & Finn, D., 2021. Thermal energy storage using phase change material: Analysis of partial tank charging and discharging on system performance in a building cooling application. *Applied Thermal Engineering*, Volume 198, pp. 1-12.

Raud, R. et al., 2017. Design optimization method for tube and fin latent heat thermal energy storage systems. *Energy*, pp. 585-594.

Rocha, T. T. M., Trevizoli, P. V. & de Oliveira, R. N., 2023. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970's to 2022. *Solar Energy*, Volume 250, pp. 248-284.

Sadeghi, G., 2022. Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. *Energy Storage Materials*, pp. 192 - 222.

Yang, J., Yang, L., Xu, C. & Du, X., 2015. Numerical analysis on thermal behavior of solid-liquid phase change within copper foam with varying porosity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 1008-1018.

Yang, J., Yang, L., Xu, C. & Du, X., 2015. Numerical analysis on thermal behavior of solid-liquid phase change within copper foam with varying porosity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 1008-1018.

Zalba, B., Marín, J., Cabeza, L. & Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, pp. 251-283.