



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi termo-fluidodinamica del sistema di
stoccaggio di energia solare a sali fusi per
CSP a singolo scambiatore (termoclino) con
l'integrazione di inserti di materiale a
cambiamento di fase

M. Cagnoli, W. Gaggioli, A. Giaconia, R. Liberatore, V. Russo,
R. Zanino

Analisi termo-fluidodinamica del sistema di stoccaggio di energia solare a sali fusi per CSP a singolo scambiatore (termoclino) con l'integrazione di inserti di materiale a cambiamento di fase

M. Cagnoli, R. Zanino (Politecnico di Torino)
W. Gaggioli, A. Giaconia, R. Liberatore, V. Russo (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – 3ª annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Progetto 1.9 Solare Termodinamico

Linea di attività: LA 1.29 - *Sviluppo di componentistica avanzata per impianti CSP: modellazione di sistema di accumulo termico termoclino a sali fusi a singolo scambiatore*

Responsabile del Progetto: Alberto Giaconia, ENEA

Responsabile del Work package: Alberto Giaconia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 MODELLO CFD.....	7
3 INSERTI DI MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM)	9
4 MODELLAZIONE DEL SERBATOIO DI ACCUMULO CON GLI INSERTI DI PCM	11
4.1 MODELLO CFD CON INSERTI PCM	11
4.2 VERIFICA DEL MODELLO DI CONVEZIONE NATURALE	12
5 RISULTATI	14
6 CONCLUSIONI.....	18
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	19

Sommario

Nell'ambito degli impianti a concentrazione solare, il sistema di accumulo termico a termoclino è una alternativa, potenzialmente vantaggiosa dal punto di vista economico, al più diffuso sistema di accumulo basato su due serbatoi, uno caldo e uno freddo. In un sistema di accumulo termico di tipo termoclino, il fluido caldo e quello freddo non sono fisicamente separati in due serbatoi diversi, ma sono contenuti in uno stesso serbatoio e separati per mezzo della stratificazione termica che si viene a creare a causa della diversa densità tra il fluido caldo e quello freddo.

L'ENEA, nell'ambito del progetto europeo ORC-Plus, ha proposto un sistema di accumulo a sali fusi innovativo basato sulla tecnologia del termoclino, di cui si è costruito un prototipo in scala 1:100 presso l'impianto di Prova Collettori Solari (PCS) alla Casaccia. Il prototipo è stato oggetto di una campagna sperimentale nel 2019. Il sistema di accumulo dell'ENEA è adatto per impianti a concentrazione solare di taglia compresa nell'intervallo 1-5 MWe, operanti con olio minerale a temperature medio-basse (180-300 °C). La caratteristica principale del sistema di accumulo proposto dall'ENEA è la presenza al suo interno di due scambiatori di calore, uno per la carica e uno per la scarica, posizionati rispettivamente nella parte inferiore e superiore del serbatoio e collegati per mezzo di un canale verticale. Scopo del canale è quello di guidare il moto dei sali durante i transitori di carica e scarica, impedendo che questi vadano a perturbare la stratificazione termica stabilitasi nel serbatoio.

Questa attività di ricerca segue la precedente linea di attività LA 1.29, in cui si è sviluppato e convalidato un modello CFD assialsimmetrico del sistema di accumulo termoclino proposto dall'ENEA. L'obiettivo della presente linea di attività è quello di valutare numericamente le potenzialità date dall'inserimento nel serbatoio di inserti contenenti materiale a cambiamento di fase (PCM), in termini di prestazioni termiche.

A tal fine, si determina (1) in quale regione del serbatoio di accumulo sia conveniente inserire i PCM, (2) quale materiale a cambiamento di fase sia il più idoneo, in funzione della temperatura di fusione, e (3) quale geometria adottare per gli inserti contenenti il materiale a cambiamento di fase. Si decide di inserire il PCM nella parte alta del serbatoio, dove la temperatura dei sali è maggiore, adottando il nitrito di sodio (NaNO₂) come materiale a cambiamento di fase, la cui temperatura di fusione (270 °C) risulta compatibile con quella attesa dei sali. Gli inserti contenenti il materiale a cambiamento di fase corrispondono ad un banco tubiero costituito da tubi toroidali, opportunamente dimensionato sulla base di una analisi preliminare.

Si procede quindi modificando il modello CFD precedentemente sviluppato per includere la presenza dei tubi toroidali. Per mantenere un costo di calcolo accettabile, il dominio computazionale del modello CFD non include le pareti dei tubi e il PCM, che vengono sostituite da una condizione al contorno di tipo Robin governata da un modello a parametri concentrati accoppiato al modello CFD. Quest'ultimo risolve l'equazione 0D dell'energia considerando la conduzione radiale nella parete dei tubi e lo scambio termico con il materiale a cambiamento di fase.

Il modello CFD accoppiato al modello a parametri concentrati viene impiegato per simulare un transitorio di carica, i risultati ottenuti vengono confrontati con quelli del sistema di accumulo privo di PCM. Nel report vengono presentati e discussi i risultati di tale confronto, da cui si evince che l'introduzione del materiale a cambiamento di fase ha delle potenzialità in termini di stabilizzazione della temperatura dei sali.

1 Introduzione

L'ENEA, in collaborazione con partner nazionali e internazionali, ha realizzato negli ultimi anni una serie di attività di ricerca allo scopo di promuovere lo sviluppo di impianti basati sulla tecnologia del solare a concentrazione (CSP) di piccola e media taglia con accumulo termico (TES) al fine di disaccoppiare la sorgente solare intermittente dalla produzione di elettricità. In particolare, l'ENEA ha concentrato i suoi sforzi nello sviluppo di sistemi di accumulo termico innovativi capaci di garantire una sufficiente affidabilità, un elevato rendimento termico e un basso costo di investimento. Tra i sistemi di accumulo termico, quello più diffuso a livello commerciale per impianti CSP è il sistema a due serbatoi (uno caldo e uno freddo) riempiti con sali fusi come mezzo di accumulo. Una alternativa promettente dal punto di vista economico è la configurazione a singolo serbatoio di tipo termoclino, che permette (potenzialmente) una riduzione del costo di circa il 30% a causa della riduzione del numero di serbatoi necessari per l'accumulo [1], [2]. In un sistema di accumulo termico di tipo termoclino, il fluido caldo e quello freddo non sono fisicamente separati in due serbatoi diversi, ma sono contenuti in uno stesso serbatoio e separati per mezzo della stratificazione termica che si viene a creare a causa della diversa densità del fluido caldo e freddo. Il fluido freddo staziona sul fondo del serbatoio a causa della maggiore densità, mentre il fluido caldo stratificherà nella parte superiore; la regione tra questi due strati è caratterizzata da un gradiente termico e prende il nome di termoclino (vedi Figura 1).

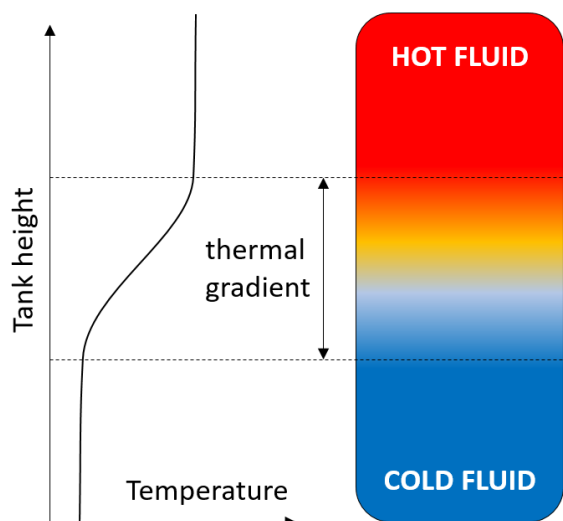


Figura 1. Rappresentazione schematica di sistema di accumulo termico di tipo termoclino con la regione caratterizzata dal gradiente di temperatura evidenziata

Nell'ambito del progetto europeo (H2020) denominato ORC-Plus [3], l'ENEA ha proposto un sistema di accumulo innovativo a singolo serbatoio di tipo termoclino (Figura 2) adatto per impianti CSP di taglia compresa nell'intervallo 1-5 MWe operanti con olio minerale a temperature medio-basse (180-300 °C) e abbinati a cicli di potenza di tipo Rankine organico (ORC). Il mezzo di accumulo corrisponde ad una miscela di sali fusi; si noti che i sali fusi non riempiono completamente il serbatoio, esiste infatti uno strato di aria a pressione ambiente nella parte superiore del serbatoio. La principale novità nel design di questo sistema di accumulo è l'integrazione di due scambiatori di calore, posizionati nella parte bassa e alta del serbatoio, collegati per mezzo di un canale interno verticale. Gli scambiatori di calore hanno forma conica e sono di tipo elicoidale. Lo scambiatore di calore posto nella parte bassa del serbatoio si usa nella fase di carica; l'olio caldo proveniente dal campo solare percorre la serpentina cedendo calore ai sali che, una volta scaldati, risalgono, a causa delle forze di galleggiamento, il canale interno verso la parte alta del serbatoio dove stratificano. Similmente, durante la fase di scarica si usa lo scambiatore posizionato nella parte alta del serbatoio in cui scorre l'olio diretto al ciclo ORC che assorbe calore dai sali; quest'ultimi, una volta raffreddati, scendono, a causa della maggiore densità, attraverso il canale interno verso la parte bassa del

serbatoio dove stratificano. Il ruolo del canale interno è quello di preservare la qualità del termoclino; infatti, esso evita la movimentazione dei sali nel volume del serbatoio evitando che venga perturbata la stratificazione termica stabilitasi nel serbatoio. Il canale interno è isolato termicamente per evitare che la distribuzione della temperatura dei sali nel volume del serbatoio possa essere perturbata dallo scambio termico con i sali contenuti nel canale. All'interno del canale è anche presente una girante, la quale può girare in entrambe le direzioni consentendo di rallentare o accelerare il flusso di sali nel canale (regolazione della portata massica). Il serbatoio è inoltre munito di riscaldatori elettrici, che hanno una funzione anti-congelamento, un tubo di scarico sul fondo e un certo numero di flange nella calotta superiore del serbatoio, compresa una flangia aperta verso l'ambiente esterno che assicura il funzionamento in condizioni ambiente del serbatoio. Sulla parte superiore del serbatoio, sono anche presenti i tubi che collegano gli scambiatori di calore ai rispettivi circuiti dell'olio.

Un prototipo a scala ridotta (1:100) del sistema di accumulo termico è stato progettato, realizzato, installato e infine testato presso l'impianto sperimentale denominato PCS (Prova Collettori Solari) presso il centro ENEA della Casaccia [4].

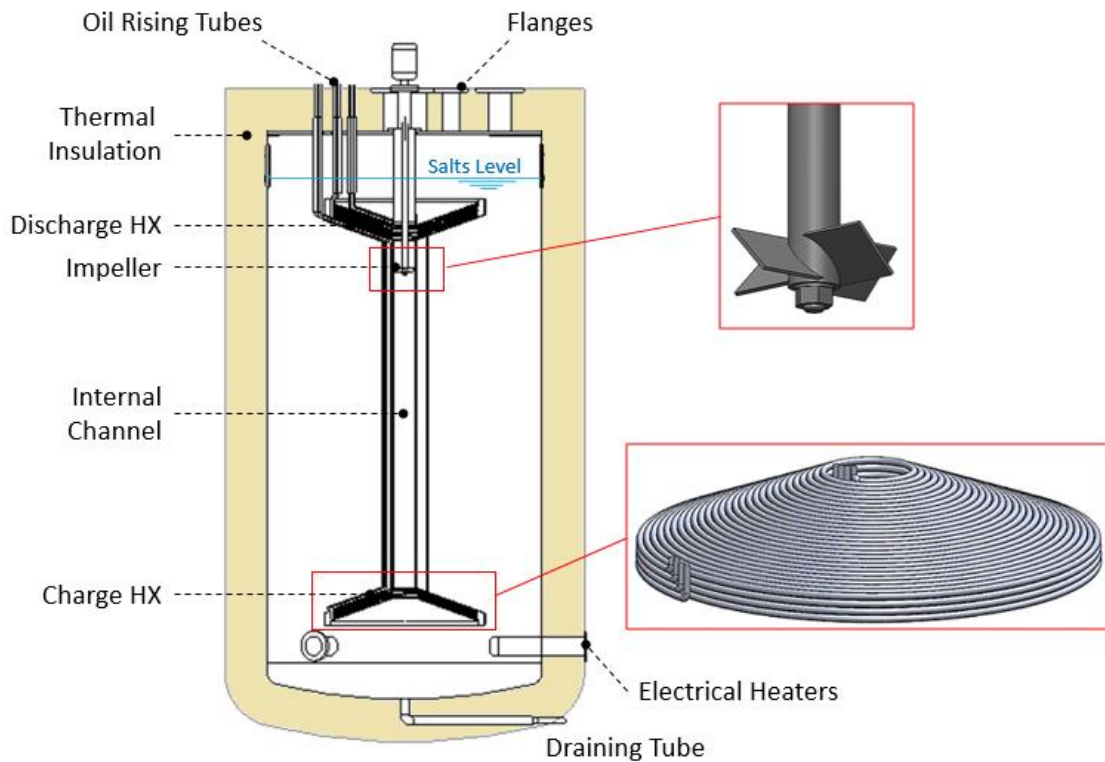


Figura 2. Schema del sistema di accumulo a singolo scambiatore di tipo termoclino. Si possono notare gli ingrandimenti dello scambiatore di calore (HX) di carica e della girante

La presente attività di ricerca segue la linea di attività LA 1.29 relativa alla modellazione numerica del sistema di accumulo termoclino proposto dall'ENEA. Nel corso dell'attività LA 1.29 si è sviluppato e convalidato un modello CFD assialsimmetrico del sistema di accumulo termoclino in grado di predire, con ragionevole accuratezza, il gradiente termico che si instaura all'interno del serbatoio. In questa nuova attività di ricerca, si intende impiegare il modello CFD per valutare i benefici ottenibili dall'inserimento all'interno del serbatoio di accumulo di inserti contenenti materiale a cambiamento di fase (PCM). L'idea di combinare nel sistema termoclino l'accumulo sensibile con quello latente è scarsamente investigata in letteratura [5]–[7]. Il principale vantaggio atteso, vista la letteratura, è la possibilità di stabilizzare la temperatura del termoclino sfruttando il fatto che il cambiamento di fase avviene a temperatura costante. Nel capitolo 2 si descrive brevemente il modello CFD precedentemente sviluppato, nel capitolo 3 si discute della scelta del PCM e della geometria degli inserti, nel capitolo 4 si descrive la modellizzazione numerica

del sistema di accumulo con gli inserti a cambiamento di fase e quindi si presentano i risultati nel capitolo 5. Alla fine, si sintetizzano le conclusioni nel capitolo 6.

2 Modello CFD

In questo capitolo viene brevemente descritto il modello CFD del prototipo del serbatoio di accumulo installato all'ENEA, il quale è stato sviluppato nel corso di una precedente linea di attività (LA 1.29) e qui modificato per considerare la presenza di inserti contenenti PCM (si veda il capitolo 4).

Scopo del modello CFD era quello di riprodurre i transitori di carica e scarica del termoclino; a tal fine, si è sviluppato un modello dinamico 2D assialsimmetrico. La scelta di un dominio di calcolo bidimensionale (Figura 3) è funzionale ad avere un tempo di calcolo accettabile, ovvero compatibile con l'obiettivo di simulare transitori, e non comporta una perdita di accuratezza significativa rispetto ad un dominio di calcolo 3D [8], [9]. L'assialsimmetria del serbatoio di accumulo è sia geometrica, a meno di minori semplificazioni discusse nel report dell'attività LA 1.29, sia del carico termico.

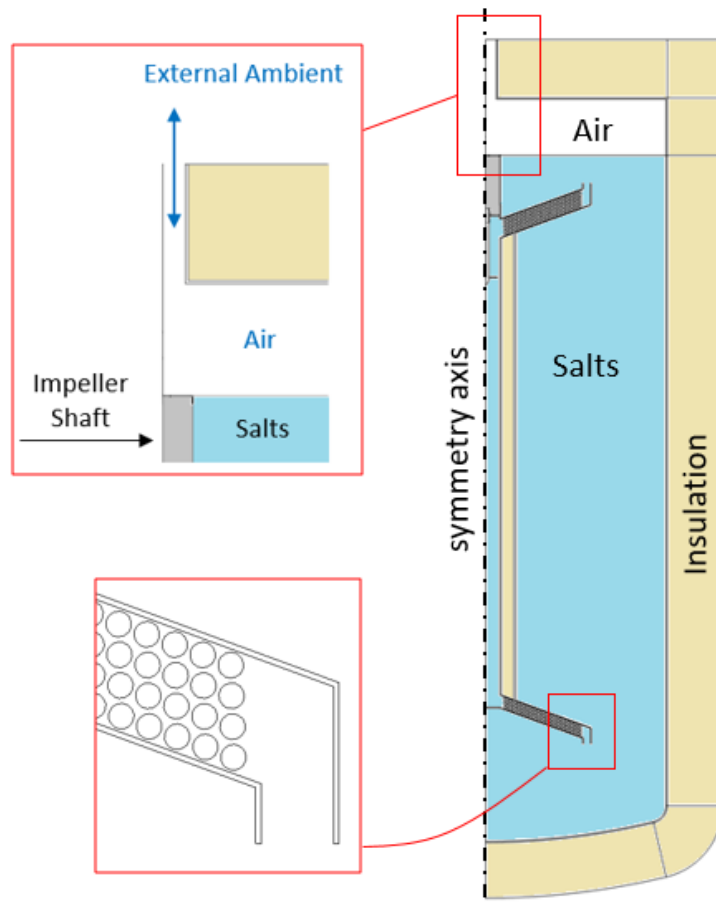


Figura 3. Dominio computazionale 2D (assialsimmetrico) con il particolare della flangia aperta verso l'ambiente esterno e dell'imbocco inferiore del canale interno con le tubazioni della serpentina di carica

Il modello CFD risolve le equazioni dinamiche di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia nella regione dei sali e dell'aria, risolve inoltre l'equazione dinamica di conservazione dell'energia per i solidi e gli scambi termici tra sali, aria e superfici solide. Il modello include l'effetto della gravità, fondamentale per determinare le forze di galleggiamento che sono il driver del moto dei sali all'interno del serbatoio. Il modello di turbolenza implementato è il $k-\omega$ SST, che permette di tener conto del miscelamento dei sali nel volume del serbatoio [8].

Le condizioni al contorno applicate al dominio di calcolo sono elencate di seguito:

- *Superficie esterna del serbatoio*: si impone lo scambio termico convettivo con l'ambiente esterno, il coefficiente di scambio termico si calcola sulla base di correlazioni empiriche [10]. Le perdite termiche per irraggiamento si trascurano (temperatura della superficie esterna relativamente bassa).
- *Flangia aperta verso l'ambiente*: si impone la pressione e la temperatura ambiente.
- *Potenza ceduta/assorbita dall'olio*: il dominio di calcolo non include l'olio, la potenza termica ceduta/assorbita dall'olio si impone sulla superficie esterna della serpentina.

Per quanto riguarda la griglia di calcolo, si è adotta una griglia poligonale (Figura 4) che si adatta bene alle geometrie complesse come la sezione degli scambiatori di calore. I gradienti a parete sono stati risolti accuratamente inserendo 3 prism layer ($y^+ \approx 1$). Si è valutato che un numero di celle pari a 10^5 sia sufficiente a garantire l'indipendenza dei risultati dalla griglia di calcolo. Si è inoltre verificata l'indipendenza della soluzione dalla discretizzazione temporale. Un passo di tempo di 2.5 secondi risulta essere il miglior compromesso tra accuratezza della soluzione e tempo di calcolo.

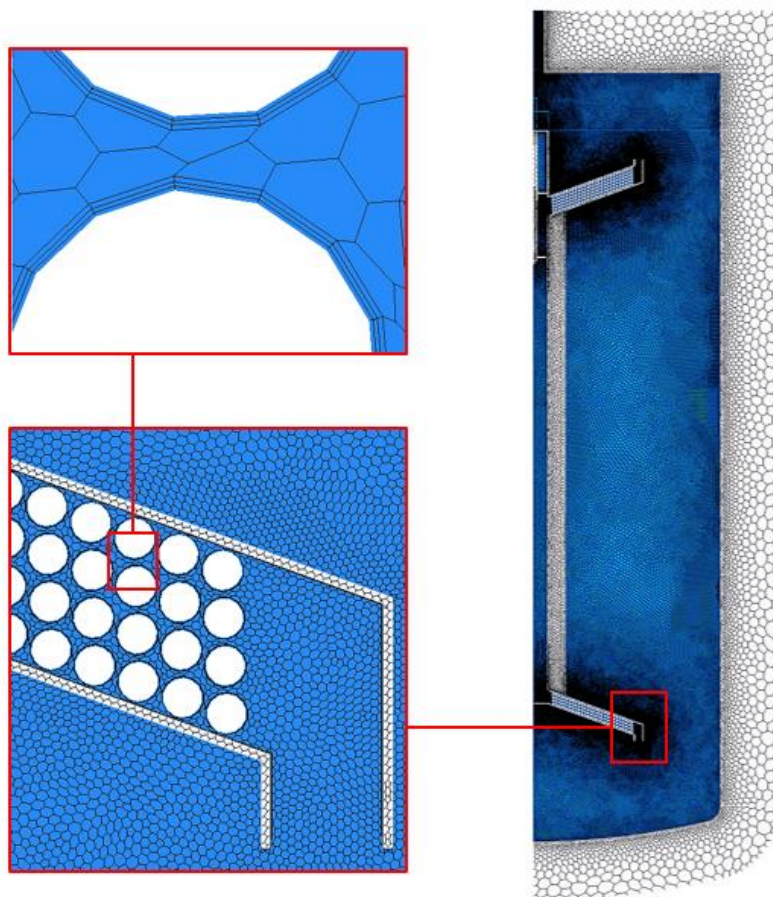


Figura 4. Griglia di calcolo con il particolare della regione dello scambiatore di calore di carica

Il modello CFD non permette di simulare il sistema di accumulo con la girante in funzione; infatti, quest'ultima non si è dimostrata funzionale a regolare la portata massica durante la campagna sperimentale. I dati sperimentali ottenuti dai test condotti sul prototipo (con la girante ferma) sono stati utilizzati per convalidare il modello CFD. L'esercizio di convalida del modello ha richiesto di introdurre l'ipotesi che tra le pareti del canale e gli scambiatori di calore sia presente un gap in grado di spiegare

l'elevata portata massica dei sali nel canale ottenuta dai test. La convalida del modello e le ipotesi introdotte sono dettagliatamente discusse nel report della linea di attività LA 1.29. Per quanto concerne la presente attività di ricerca, si considererà il serbatoio di accumulo come dai disegni di progetto, ovvero senza il gap tra il canale e gli scambiatori di calore.

3 Inserti di materiale a cambiamento di fase (PCM)

In questo capitolo si descrive la scelta del materiale a cambiamento di fase (PCM) da adottare, la geometria impiegata per gli inserti di materiale PCM e il relativo dimensionamento.

Riguardo il materiale a cambiamento di fase, si intende inserire tale materiale nella parte alta del serbatoio, dove le temperature sono maggiori, in questo modo si può massimizzare l'energia termica accumulata durante la fase di carica che viene poi rilasciata al ciclo di potenza durante la fase di scarica. Infatti, inserendo il materiale a cambiamento di fase nella parte superiore del serbatoio, i sali caldi che stratificano nella parte alta del serbatoio inducono il cambiamento di fase del materiale PCM che inizia ad accumulare calore latente. Affinché il sistema operi correttamente, è necessario che il materiale a cambiamento di fase abbia una temperatura di fusione prossima alla temperatura dei sali, che è pari a 285 °C nella parte superiore del serbatoio, secondo le specifiche del progetto del sistema di accumulo. Sulla base di questa condizione, si procede a selezionare un materiale a cambiamento di fase idoneo all'accumulo termico qui considerato. In Tabella 1 si riassumono le proprietà termofisiche di una selezione di PCM particolarmente adatti ai sistemi di accumulo termico in base a studi precedenti [11]. Tra questi, si seleziona il nitrito di sodio (NaNO₂) la cui temperatura di fusione è di 270 °C e quindi ben compatibile con il termoclino in esame.

Tabella 1. Proprietà termofisiche di una selezione di PCM adatti ai sistemi di accumulo [11], con evidenziato in rosso il nitrito di sodio la cui temperatura di fusione (270 °C) ben si adatta al termoclino in esame

PCM (wt%)	Temperatura di fusione [°C]	Densità solido / liquido [kg/m ³]	Cal. Specifico solido / liquido [kJ/kg/°C]	Cal. Latente [kJ/kg]	Conducibilità termica [W/m/°C]
NaNO ₃ /KNO ₃ (54/46)	222	1850 / 1850	1.51 / 1.55	117	0.50 / 0.55
NaNO ₃ /KNO ₃ (60/40)	223	2008 / 1920	1.43 / 1.54	105	0.78 / 0.45
LiNO ₃	253	2163 / 1780	1.70 / 2.10	373	0.60 / 0.70
NaNO₂	270	2109 / 1810	1.65 / 1.77	180	0.53 / 0.67
NaNO ₃	306	2110 / 1908	1.78 / 1.70	175	0.60 / 0.51
NaOH	318	2106 / 1785	2.15 / 2.15	165	0.92 / 0.92
KNO ₃ /KCl (95.5/4.5)	320	2100 / 2100	1.21 / 1.21	74	--- / ---
KNO ₃	325	2106 / 1880	1.43 / 1.38	116	0.50 / 0.42

Una volta scelto il materiale a cambiamento di fase da impiegare, si prosegue definendo la geometria degli inserti da collocare nel serbatoio di accumulo. La configurazione qui adottata è quella di un banco di tubi toroidali riempiti con il nitrito di sodio e collocati nella parte superiore del serbatoio, in corrispondenza della zona in cui la temperatura dei sali è prossima a quella di fusione del PCM (vedi Figura 5). L'estensione verticale del banco tubiero è stata determinata con l'ausilio del modello CFD precedentemente sviluppato, verificando la zona del termoclino caratterizzata da una temperatura dei sali maggiore di 270 °C al termine del transitorio di carica, ovvero quando la temperatura dei sali nello strato più alto raggiunge il valore di progetto (285 °C). Si ottiene così una altezza di circa 400 mm, mentre la larghezza corrisponde alla porzione di raggio del serbatoio compresa tra il canale e la parete esterna (≈ 540 mm).

I vantaggi della configurazione a tubi toroidali degli inserti di PCM sono:

1. Si preserva l'assialsimmetria del serbatoio

2. E' possibile collocare gli inserti all'altezza desiderata, ovvero solo nella zona in cui la temperatura dei sali è compatibile con la temperatura di fusione del PCM.
3. Si imita uno scambiatore di calore in flusso trasverso, essendo il moto dei sali lungo la direzione verticale, che si traduce in uno scambio termico per quanto possibile efficace.

Le file dei tubi toroidali sono sfalsate a formare dei triangoli equilateri (vedi Figura 5). Questa configurazione garantisce una migliore prestazione termica nel caso di bassi numeri di Reynolds ($Re \approx 200$) [10], [12]; infatti, la turbolenza risulta aumentata rispetto alla configurazione con tubi allineati.

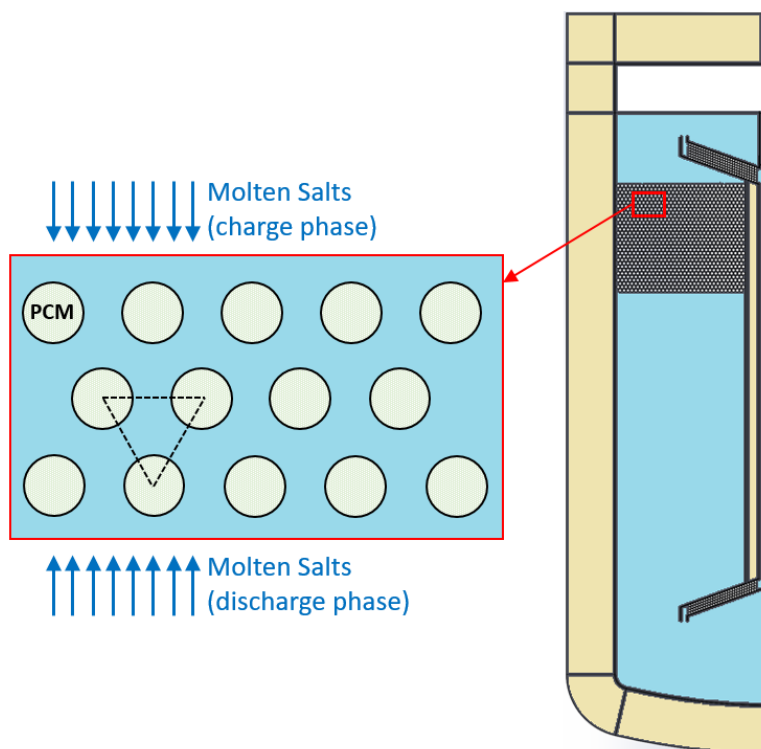
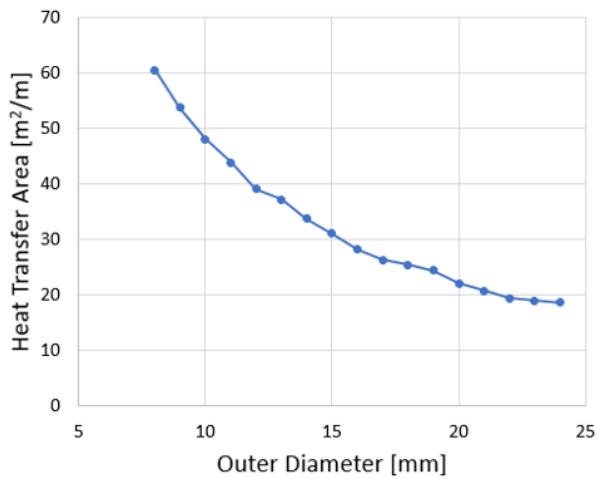
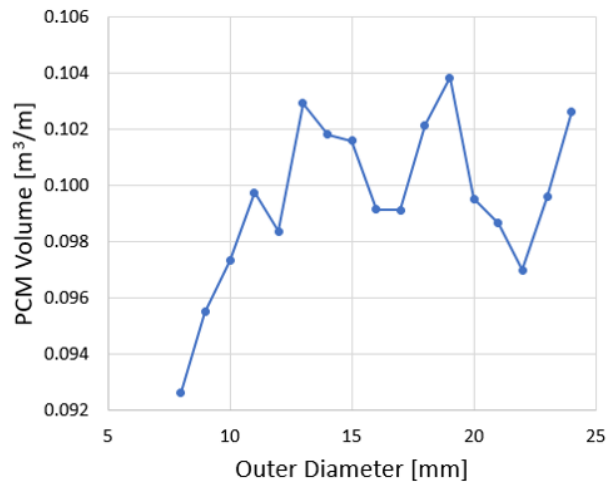


Figura 5. Sezione del serbatoio di accumulo termocline con gli inserti di materiale a cambiamento di fase rappresentati da un banco tubiero composto da tubi toroidale a righe sfalsate (disposizione a triangolo equilatero). Nella figura si rappresenta la direzione del flusso dei sali nella fase di carica e scarica

Si assume che lo spessore della parete di acciaio dei tubi sia di 1 mm, mentre il rapporto tra il passo e il diametro dei tubi si impone pari a 1.25 al fine di massimizzare lo scambio termico [12]. Il diametro esterno dei tubi si è determinato come un compromesso tra la superficie di scambio termico, che diminuisce all'aumentare del diametro

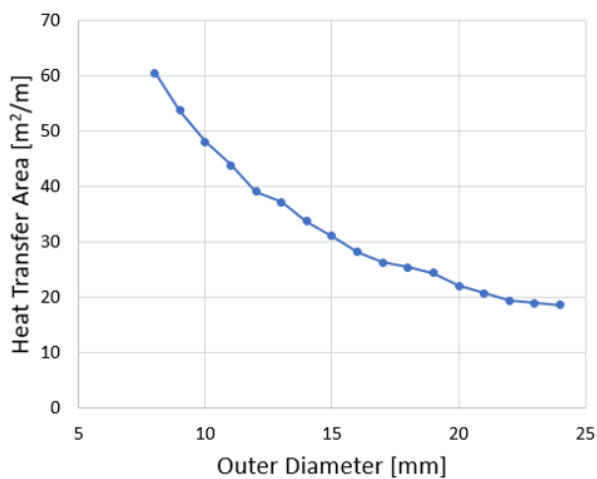


(a)

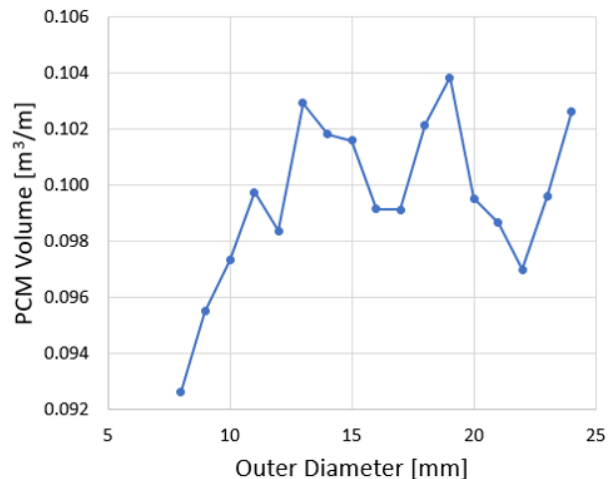


(b)

(Figura 6a), e il volume di PCM introdotto, il quale ha un andamento non monotono con il diametro poiché all'aumentare di quest'ultimo si riduce il numero di tubi che possono essere collocati nella regione del serbatoio precedentemente identificata



(a)



(b)

(Figura 6b). Un diametro esterno di 13 mm permette di contenere un elevata quantità di materiale a cambiamento di fase senza sacrificare eccessivamente la superficie di scambio termico. Il banco tubiero risulta così formato da 910 tubi di diametro esterno 13 mm. L' 8% del volume del serbatoio è destinato al materiale a cambiamento di fase, il volume dei sali rimosso è maggiore, pari a circa l'11 % del totale, a causa della presenza della parete dei tubi. L'energia termica accumulabile senza gli inserti di PCM è di 861 MJ, con i PCM si arriva 975 MJ (+ 13%) grazie alla possibilità di accumulare il calore latente in aggiunta a quello sensibile.

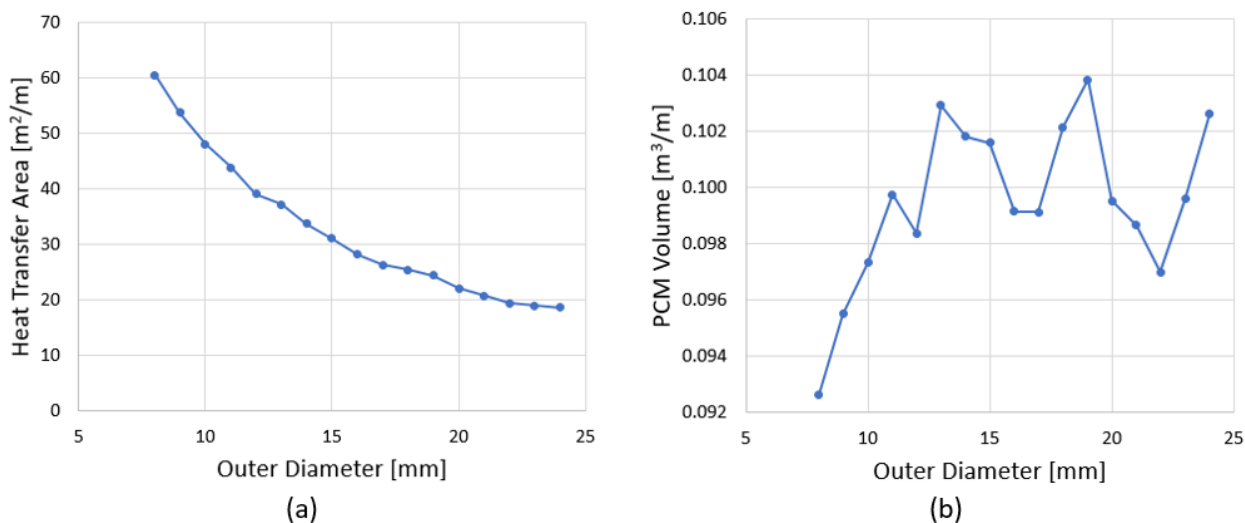


Figura 6. (a) Area di scambio termico e (b) volume introdotto di PCM al variare del diametro esterno dei tubi per unità di lunghezza del tubo

4 Modellazione del serbatoio di accumulo con gli inserti di PCM

Questo capitolo descrive le modifiche apportate al modello CFD (sezione 2) per introdurre gli inserti di materiale a cambiamento di fase e la relativa fisica. Nella sezione 4.1 si presenta il nuovo modello CFD che include la presenza del banco tubiero; tuttavia, a causa dell’elevato costo computazionale, il PCM e la parete del tubo non vengono inclusi nel modello CFD, ma la fisica del cambiamento di fase viene risolta da un modello a parametri concentrati accoppiato al modello CFD (sezione 4.2).

4.1 Modello CFD con inserti PCM

Il modello CFD viene modificato includendo la presenza del banco tubiero. Il nuovo dominio computazionale non comprende le pareti di acciaio dei tubi e il materiale a cambiamento di fase, i quali sono sostituiti da una opportuna condizione al contorno, come chiarito nel seguito di questo capitolo. Poiché i tubi sono toroidali, l’assialsimmetria geometrica e termica del dominio di calcolo viene mantenuta. La griglia di calcolo viene ricostruita poiché il dominio computazionale è stato modificato, ma si mantengono gli stessi parametri della griglia sviluppata per il precedente modello. La nuova griglia di calcolo è raffinata presso i tubi toroidali al fine di risolvere accuratamente i gradienti a parete (Figura 7); questo comporta un deciso aumento del numero di celle totali (2.0×10^5), che raddoppiano rispetto al caso precedente.

Le condizioni al contorno applicate al modello sono quelle presentate nel capitolo 2, si aggiunge a queste una condizione di scambio termico tra i sali fusi e la parete esterna dei tubi toroidali, che viene governata da un modello a parametri concentrati discusso nel prossimo paragrafo.

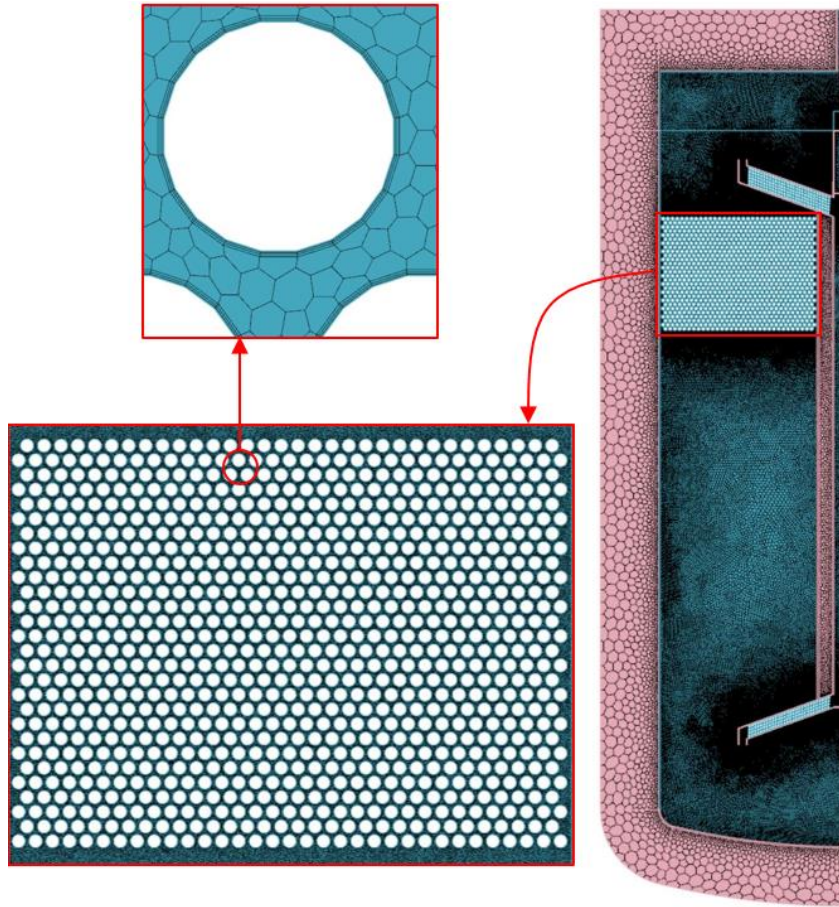


Figura 7. Griglia di calcolo per il serbatoio di accumulo con gli inserti di PCM (tubi toroidali) costituita da circa 2.0×10^5 celle; particolare del banco tubiero e del singolo tubo.

4.2 Verifica del modello di convezione naturale

In questa sezione si presenta il modello 0D a parametri concentrati che risolve il problema dello scambio termico tra i sali fusi e gli inserti contenenti il PCM considerando la fisica del cambiamento di fase e quindi l'accumulo di calore latente. Il sistema di equazioni risultante viene risolto con il metodo di Eulero all'indietro.

Il modello risolve l'equazione dinamica di conservazione dell'energia applicata al materiale a cambiamento di fase (Eq. 1). Il calore accumulato nella parete metallica del tubo si trascura essendo di scarsa entità, mentre si considera la resistenza termica offerta dalla parete del tubo.

$$M \frac{de}{dt} = q \quad (1)$$

In Eq. 1, M è la massa del PCM nel tubo, e indica l'energia specifica in [J/kg], t è il tempo e q rappresenta il flusso termico in [W] scambiato tra i sali e il materiale a cambiamento di fase. In funzione della fase del PCM, l'equazione dell'energia si scrive per mezzo di Eq. 2 (solido), Eq. 3 (in cambiamento di fase) o Eq. 4 (liquido).

$$M c_{ps} \frac{dT_{PCM}}{dt} = q \quad (2)$$

$$M \frac{dL}{dt} = q \quad (3)$$

$$M c_{pl} \frac{dT_{PCM}}{dt} = q \quad (4)$$

Dove, T_{PCM} è la temperatura del PCM, L è il calore latente, c_p è il calore specifico, mentre i pedici s, l indicano rispettivamente se la quantità si riferisce al solido o al liquido.

Gli scambi termici considerati nel modello sono riassunti in Figura 8. Partendo dalla parete esterna del tubo, si calcola la conduzione radiale nel tubo e quindi lo scambio termico tra la superficie interna del tubo e il materiale a cambiamento di fase, che avviene per conduzione o convezione a seconda della fase del PCM.

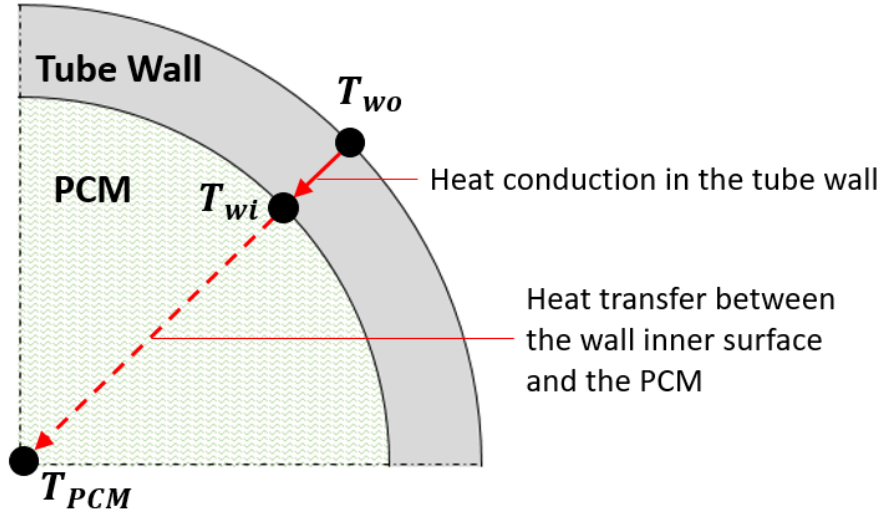


Figura 8. Schema degli scambi termici considerati nel modello a parametri concentrati: scambio termico per conduzione radiale e scambio termico tra parete interna e PCM in funzione della fase di quest'ultimo

La conduzione radiale nel tubo si calcola come

$$q = k_w \frac{2\pi x}{\ln(D_o/D_i)} (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (5)$$

Dove, k_w è la conducibilità termica della parete in acciaio AISI 316, D è il diametro del tubo, x rappresenta la lunghezza dell'asse del tubo e T_w corrisponde alla temperatura di parete; i pedici o, i indicano rispettivamente la superficie esterna ed interna della parete.

Lo scambio termico tra la parete interna e il PCM si calcola per mezzo di Eq. 6 (solido), Eq. 7 (in cambiamento di fase) oppure Eq. 8 (liquido).

$$q = k_s \times 2\pi x (T_{w,i} - T_{PCM}) \quad (6)$$

$$q = h_0 \times \pi D_i x (T_{w,i} - T_m) \quad (7)$$

$$q = h_l \times \pi D_i x (T_{w,i} - T_{PCM}) \quad (8)$$

Dove, k_s è la conducibilità termica del PCM in fase solida, h_l e h_0 sono, rispettivamente, il coefficiente di scambio termico convettivo per il liquido e per la transizione di fase e T_m è la temperatura di fusione.

Il coefficiente di scambio termico convettivo per la fase liquida si ottiene dalla correlazione proposta da D.R. Oliver in [13] adatta al caso di convezione naturale in tubi orizzontali. Nella transizione di fase, il coefficiente di scambio termico viene valutato sulla base del lavoro di A.R. Archibold [14], che indaga il processo di fusione del nitrato di sodio (NaNO_3) contenuto all'interno di una sfera la cui superficie è mantenuta a temperatura costante. In particolare, Archibold correla l'andamento del numero di Nusselt e della frazione di materiale fuso (melt fraction) ai numeri adimensionali di Grashof, Prandtl, Stefan e Fourier;

da questi dati è possibile risalire all'andamento del numero di Nusselt al variare della frazione di materiale fuso, vedi Figura 9.

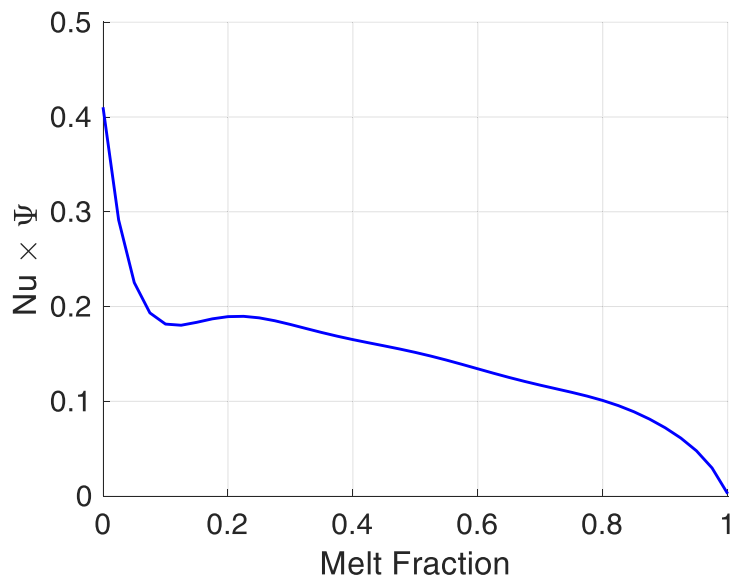


Figura 9. Andamento, al variare della frazione di materiale fuso, del numero di Nusselt moltiplicato per il fattore ψ funzione dei numeri adimensionali di Stefan, Grashof e Prandtl, della conducibilità termica del PCM e della parete e del parametro di sotto-raffreddamento

La curva di Figura 9 fornisce l'andamento del numero di Nusselt al variare della frazione di materiale fuso al netto del fattore Ψ (Eq. 8). Tale fattore è funzione dei numeri adimensionali di Stefan (St), Grashof (Gr) e Prandtl (Pr), nonché della conducibilità termica del PCM e della parete ($\chi = 1 - k_{PCM}/k_w$) e del parametro di sotto-raffreddamento ($\zeta = 1 - T_0/T_m$), con T_0 pari alla temperatura iniziale del sistema.

$$\Psi = \frac{St^{0.66}}{Gr^{0.29}Pr^{0.4}\chi^{0.72}\zeta^{0.02}} \quad (8)$$

Il modello a parametri concentrati viene accoppiato al modello CFD con l'obiettivo di fornire una condizione al contorno per la superficie degli inserti di PCM a contatto con i sali fusi. Al fine di mantenere un costo di calcolo accettabile, l'accoppiamento prevede di risolvere il sistema di equazioni del modello a parametri concentrati non per ogni tubo toroidale, ma accorpendo, tramite la temperatura media di parete, due file adiacenti di tubi. La condizione al contorno applicata è di tipo Robin, quindi il modello a parametri concentrati determina la temperatura del materiale a cambiamento di fase e il coefficiente di scambio termico (comprensivo della parete del tubo) tra sali fusi e materiale a cambiamento di fase.

5 Risultati

In questo capitolo, il modello CFD accoppiato al modello a parametri concentrati viene impiegato per simulare le prestazioni termiche del sistema di accumulo nel caso studio di un transitorio di carica della durata di 130 minuti. I risultati ottenuti vengono confrontati con quelli della configurazione priva degli inserti a cambiamento di fase allo scopo di valutare le potenzialità date dall'inserimento dei PCM.

Le condizioni al contorno applicate al caso studio sono riassunte sotto

- La temperatura ambiente si impone pari a 7 °C
- La velocità del vento si assume pari a 7 m/s

- La potenza termica fornita dalla serpentina di carica si impone pari a 135 kW. La potenza è stata scelta sulla base di un calcolo preliminare al fine di garantire una temperatura dei sali che stratificano nella parte superiore del serbatoio maggiore o uguale a 285 °C.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali, si assume che la temperatura dei sali sia uniforme, pari al valore minimo di design (190 °C), ad eccezione della zona sottostante l’imbocco inferiore del canale interno, in cui la temperatura si riduce fino a 158 °C. Infatti, in accordo con quanto osservato durante la campagna sperimentale condotta dall’ENEA, tale zona non viene coinvolta nel moto di circolazione dei sali e la temperatura si riduce di conseguenza per via delle dissipazioni termiche.

In Figura 10 si riporta la distribuzione calcolata della temperatura e della velocità al termine del transitorio. Si osserva che la velocità dei sali è massima nel canale interno, come è ragionevole che sia in virtù della conservazione della massa, essendo la sezione del canale molto minore di quella del serbatoio. Anche la temperatura dei sali è massima all’interno del canale, ovvero all’uscita dello scambiatore di calore di carica.

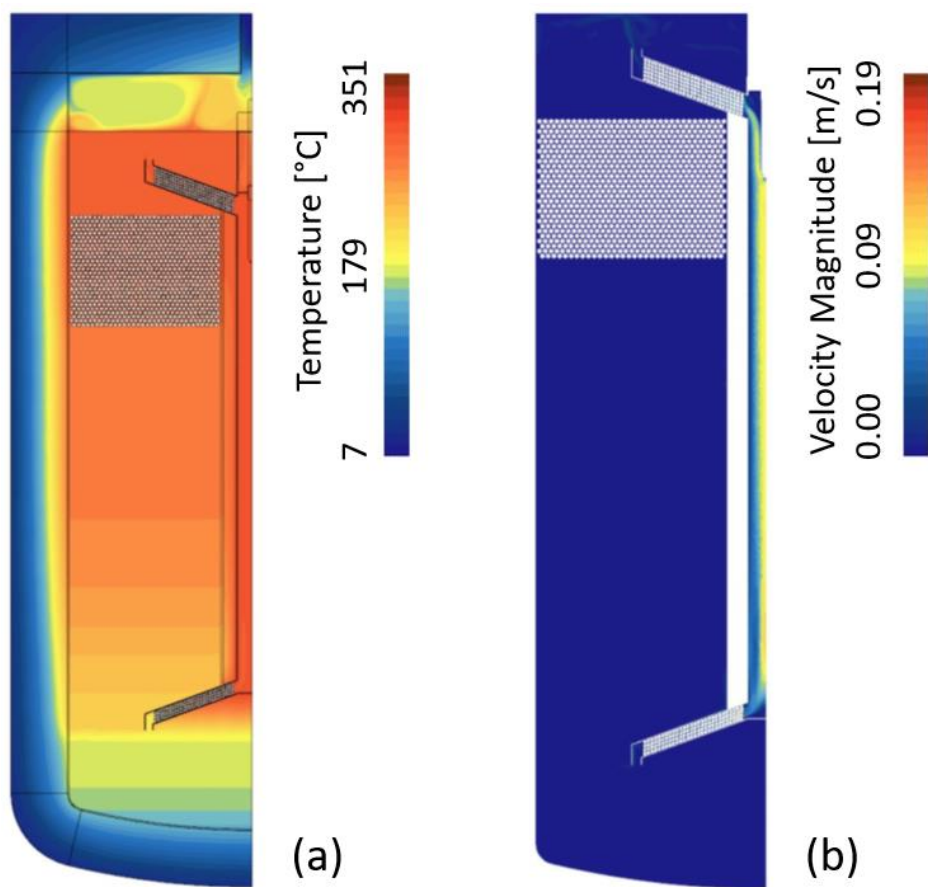


Figura 10. Risultati del modello CFD al termine del transitorio di carica: (a) distribuzione della temperatura nel dominio computazionale e (b) distribuzione della velocità dei sali

L’evoluzione nel tempo della temperatura dei sali per diverse altezze dal fondo del serbatoio è mostrata in Figura 11. Si osserva subito come, per effetto del cambiamento di fase, si hanno dei plateau di temperatura in corrispondenza della temperatura di fusione del PCM (270 °C). La curva più in alto registra la temperatura dei sali al di sopra degli inserti di PCM, per questo non viene interessata dai plateau. Una volta terminata la transizione di fase, a cominciare dalle file di tubi collocate più in alto, la temperatura dei sali torna a crescere. Al di sotto della zona occupata dai tubi toroidali, i plateau di temperatura sono dovuti alla progressiva discesa dei sali a temperatura costante, pari (in buona approssimazione) a quella di fusione del PCM.

Figura 12 riporta lo stesso andamento della temperatura nel tempo, ma relativo al sistema di accumulo termocline senza inserti di PCM. La massima differenza di temperatura ottenuta è di 127 °C, circa il 3.6 % in meno del caso con il materiale a cambiamento di fase.

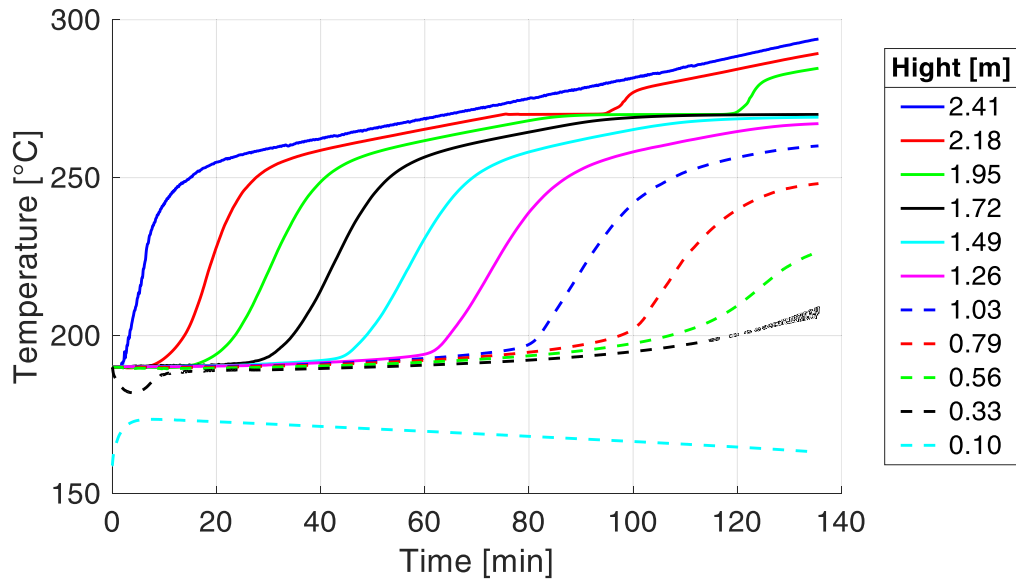


Figura 11. Sistema di accumulo con inserti di PCM: Evoluzione della temperatura dei sali nel tempo durante il transitorio di carica, per diverse altezze dalla base del serbatoio (lato sali)

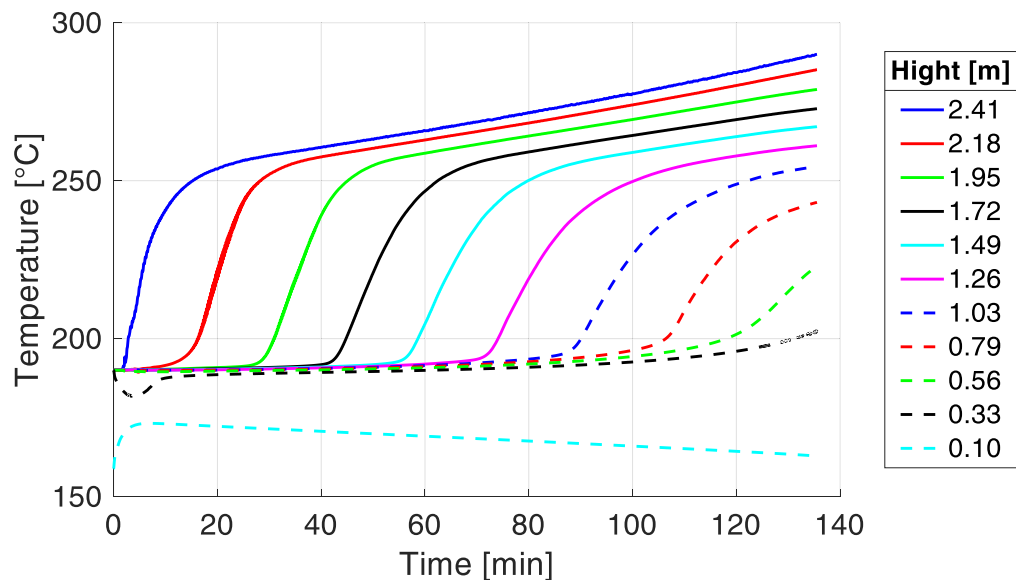


Figura 12. Sistema di accumulo senza inserti di PCM: Evoluzione della temperatura dei sali nel tempo durante il transitorio di carica, per diverse altezze dalla base del serbatoio (lato sali)

La stratificazione termica dei sali alla fine del transitorio di carica è riportata in

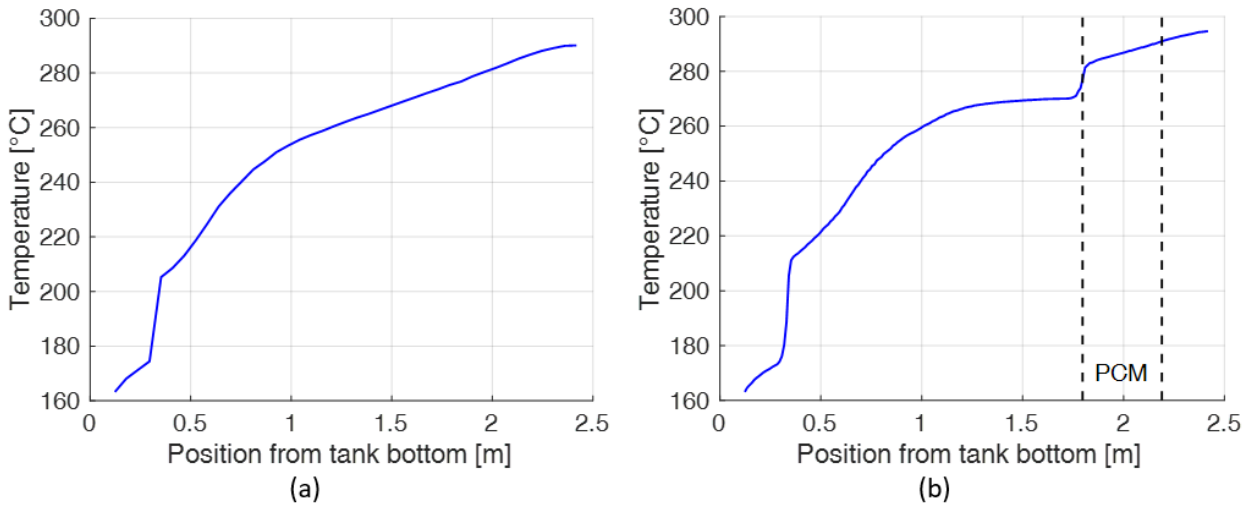


Figura 13, sia per la configurazione senza PCM che per quella con gli inserti contenenti materiale a cambiamento di fase. La durata del transitorio è appena sufficiente a consentire il completamento del cambiamento di fase per tutte le file dei tubi toroidali (Figura 14); l'ultima fila riesce a completare la transizione di fase circa 3 minuti prima della fine del transitorio. Ciò spiega perché nella regione in cui sono collocati i PCM si vede un gradiente termico con temperatura ovunque maggiore di quella di fusione del PCM (270 °C). Al bordo inferiore della zona dei PCM, si osserva invece uno scalino di temperatura alla cui base si ha un plateau di temperatura pari a circa 270 °C, il quale è originato dai sali che sono transitati nella regione dei PCM nei minuti antecedenti la fine del transitorio, quando gli inserti di materiale a cambiamento di fase (almeno le ultime file) accumulavano ancora calore latente a temperatura costante. La presenza dello scalino consente di dividere in modo più efficiente la zona superiore del serbatoio, caratterizzata dalle temperature maggiori, dal resto del termocline.

Alla luce di quanto detto, si comprende come la presenza del materiale a cambiamento di fase consenta di stabilizzare la temperatura dei sali attorno al valore della temperatura di fusione del PCM, nella zona in cui i PCM vengono collocati.

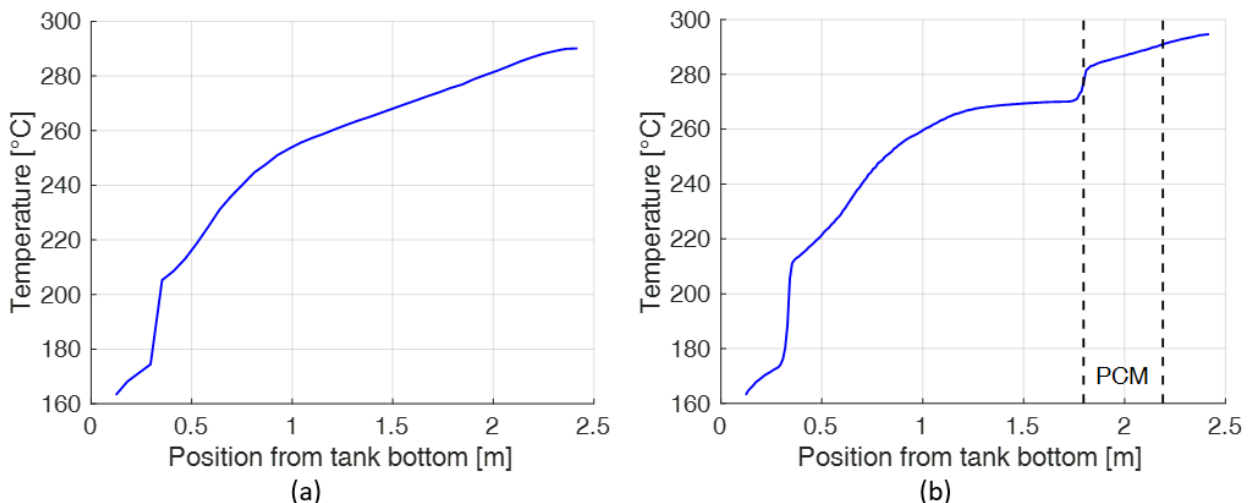


Figura 13. Stratificazione termica dei sali alla fine del transitorio di carica: (a) senza PCM e (b) con inserti contenenti PCM. In quest'ultimo caso si evidenzia la regione in cui sono collocati gli inserti.

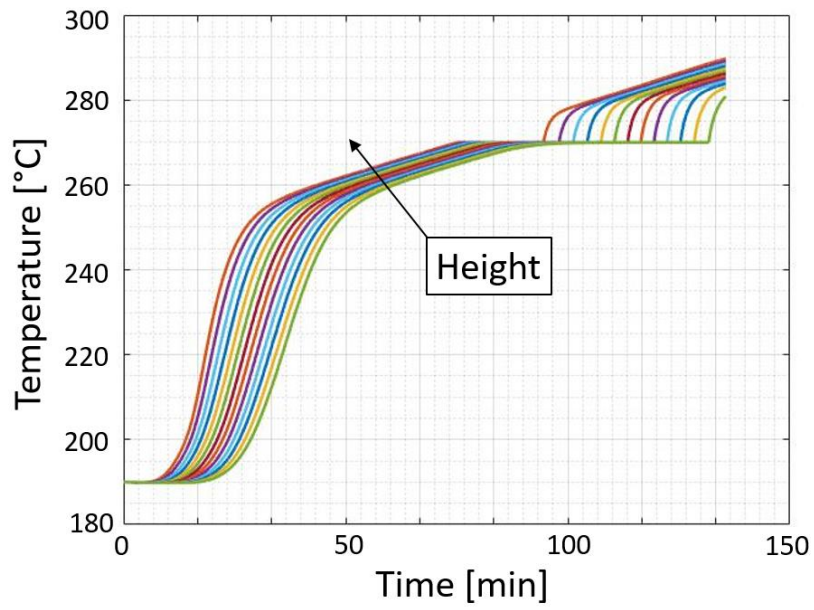


Figura 14. Evoluzione nel tempo della temperatura del materiale a cambiamento di fase al variare dell'altezza a cui sono collocati i tubi toroidali

6 Conclusioni

In questa attività di ricerca si considera un sistema di accumulo termocline a sali fusi proposto dall'ENEA nell'ambito del progetto europeo ORC-Plus. Tale sistema di accumulo si caratterizza per la presenza al suo interno di un canale verticale, alle cui estremità vengono collocati gli scambiatori di calore di carica (estremità inferiore) e di scarica (estremità superiore). Il ruolo del canale è quello di preservare il gradiente termico del serbatoio durante le fasi di carica e scarica. L'ENEA ha costruito e testato presso l'impianto di Prova Collettori Solari (PCS) alla Casaccia un prototipo in scala 1:100 del suddetto sistema di accumulo.

Un modello CFD assialsimmetrico del sistema di accumulo termocline proposto dall'ENEA è stato sviluppato e convalidato contro i dati sperimentali in una precedente linea di attività (LA 1.29). Partendo da questo modello, la presente attività di ricerca si è posta l'obiettivo di studiare numericamente le potenzialità date dall'inserimento di inserti contenenti materiale a cambiamento di fase (PCM) all'interno del sistema di accumulo termocline.

Si è deciso di inserire i PCM nella parte superiore del serbatoio, dove la temperatura dei sali è più alta, quindi si è valutato il materiale a cambiamento di fase più idoneo in base alla temperatura di fusione. La scelta è ricaduta sul nitrito di sodio (NaNO_2), la cui temperatura di fusione, pari a $270\text{ }^\circ\text{C}$, risulta ben compatibile con la temperatura dei sali, che raggiungono una temperatura massima di $285\text{ }^\circ\text{C}$ secondo il progetto del termocline. La geometria degli inserti contenenti il materiale a cambiamento di fase corrisponde ad un banco tubiero composto di tubi toroidali disposti a file sfasate a formare dei triangoli equilateri; tale configurazione garantisce le migliori prestazioni di scambio termico a bassi numeri di Reynolds e consente, inoltre, di mantenere l'assialsimmetria del serbatoio. Il banco tubiero è stato dimensionato per mezzo di un'analisi preliminare, esso consta di 910 tubi disposti su 28 file con rapporto passo su diametro pari a 1.25 e diametro esterno dei tubi pari a 13 mm (1 mm di spessore della parete). La posizione all'interno del serbatoio è stata valutata in modo tale che i tubi si trovino nella zona in cui la temperatura attesa dei sali è prossima alla temperatura di fusione dei PCM.

Definito il materiale a cambiamento di fase e la geometria degli inserti, si è provveduto a modificare il modello CFD sviluppato nella precedente attività di ricerca al fine di includere il banco tubiero. Tuttavia, per garantire un costo computazionale accettabile, il dominio computazionale del modello CFD non include il PCM e la parete del tubo, che vengono invece sostituiti da una opportuna condizione al contorno. Quest'ultima viene fornita da un modello a parametri concentrati che risolve l'equazione OD di conservazione dell'energia, considerando la conduzione radiale nella parete del tubo e lo scambio termico con il PCM.

Il modello CFD accoppiato al modello a parametri concentrati viene impiegato per simulare un transitorio di carica e i risultati vengono confrontati con quelli del sistema di accumulo privo degli inserti di PCM. Si ottiene che il materiale a cambiamento di fase permette di stabilizzare la temperatura dei sali nella parte superiore del serbatoio, determinando anche una separazione più netta tra i sali caldi e il resto del termocline.

In prospettiva, il modello di calcolo sviluppato potrà essere impiegato per ottimizzare la posizione e la geometria degli inserti di materiale a cambiamento di fase, al fine di sfruttare le potenzialità offerte dalla stabilizzazione della temperatura dei sali che si ottiene mediante l'inserimento dei PCM.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] W. Gaggioli, F. Fabrizi, F. Fontana, L. Rinaldi, and P. Tarquini, "An innovative concept of a thermal energy storage system based on a single tank configuration using stratifying molten salts as both heat storage medium and heat transfer fluid, and with an integrated steam generator," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 780 – 789, 2014.
- [2] J. E. Pacheco, S. K. Showalter, and W. J. Kolb, "Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 124, pp. 1–7, 2002.
- [3] ENEA, "ORC-PLUS Project," 2020. [Online]. Available: <https://www.orc-plus.eu/>.
- [4] W. Gaggioli, R. Liberatore, P. Di Ascenzi, D. Mazzei, and V. Russo, "Experimental test of characterization of an innovative thermal energy storage system based on low melting molten salt thermocline tank integrated with an oil exchanger," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2303, pp. 1–8, 2020.
- [5] B. Muñoz-Sánchez, I. Iparraguirre-Torres, V. Medina-Arrese, U. Izagirre-Etxeberria, A. Unzurrunzaga-Iturbe, and A. García-Romero, "Encapsulated High Temperature PCM as Active Filler Material in a Thermocline-based Thermal Storage System," *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 937–946, 2015.
- [6] P. A. Galione, C. D. Pérez-Segarra, I. Rodríguez, O. Lehmkuhl, and J. Rigola, "A new thermocline-PCM thermal storage concept for CSP plants. Numerical analysis and perspectives," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 790–799, 2014.
- [7] N. Ahmed, K. E. Elfeky, L. Lu, and Q. W. Wang, "Thermal performance analysis of thermocline combined sensible-latent heat storage system using cascaded-layered PCM designs for medium temperature applications," *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 684–697, 2020.
- [8] A. Pizzolato, F. Donato, V. Verda, and M. Santarelli, "CFD-based reduced model for the simulation of thermocline thermal energy storage systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 76, p. 391e399, 2015.
- [9] E. Rivas, E. Rojas, R. Bayón, W. Gaggioli, L. Rinaldi, and F. Fabrizi, "CFD model of a molten salt tank with integrated steam generator," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 956–964, 2014.
- [10] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth. 2012.
- [11] A. Miliozzi *et al.*, "Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico, Report di Ricerca Sistema Elettrico," 2013.
- [12] Y. Q. Wang, L. A. Penner, and S. J. Ormiston, "Analysis of laminar forced convection of air for crossflow in banks of staggered tubes," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 38, no. 8, pp. 819–845, 2000.
- [13] D. R. Oliver, "The effect of natural convection on viscous-flow heat transfer in horizontal tubes," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 17, no. 5, pp. 335–350, 1962.
- [14] A. R. Archibold, M. M. Rahman, D. Y. Goswami, and E. K. Stefanakos, "Analysis of heat transfer and fluid flow during melting inside a spherical container for thermal energy storage," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 64, no. 1–2, pp. 396–407, 2014.