

# Ricerca di Sistema elettrico



Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili -  
Sviluppo di un modello numerico di un sistema di accumulo  
termoclino ibridizzato con due serpentine e resistenze elettriche  
immerse nei sali: confronto con il sistema termoclino ibridizzato con  
tre serpentine e caldaia elettrica (LA1.14)

Roberto Zanino, Mehdi Shokrnia, Mattia Cagnoli, Aleksandra Milic, Giuseppe Petroni,  
Valeria Russo



**Politecnico  
di Torino**

Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Sviluppo di un modello numerico di un sistema di accumulo termoclino ibridizzato con due serpentine e resistenze elettriche immerse nei sali: confronto con il sistema termoclino ibridizzato con tre serpentine e caldaia elettrica(LA1.14)

Roberto Zanino (Politecnico di Torino), Mehdi Shokrnia (Politecnico di Torino), Mattia Cagnoli (ENEA), Aleksandra Milic (Politecnico di Torino), Giuseppe Petroni (ENEA), Valeria Russo (ENEA)

Dicembre 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: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.14

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Prof. Roberto Zanino, Politecnico di Torino (PoliTO)

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione, tra ENEA e PoliTO, dal titolo: "Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Sviluppo di modelli numerici e simulazione di sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e altre tecnologie FER, e di innovativi sistemi di riscaldamento elettrico dei sali fusi"

Responsabile scientifico ENEA: Valeria Russo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Prof. Roberto Zanino

## Indice

1	Risultati attesi .....	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi .....	6
4	Prodotti sviluppati .....	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte .....	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Simulazione del sistema di accumulo termoclineo con tre serpentine .....	10
7.2	Sviluppo del modello CFD del sistema di accumulo termoclineo con resistenze immerse .....	14
7.3	Confronto tra il sistema di accumulo termoclineo con tre serpentine e il sistema con resistenze immerse.....	16
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	18
9	Pubblicazioni scientifiche.....	19
10	Eventi di disseminazione .....	20

## Indice delle figure

Figura 1. Distribuzione della temperatura dei sali per diversi istanti di tempo nel corso del transitorio (A).....	11
Figura 2. Stratificazione termica misurata lungo l'asse del serbatoio per i transitori di carica A-D in Tabella 1 .....	12
Figura 3. Stratificazione termica misurata lungo l'asse del serbatoio per il transitorio di scarica (E) in Tabella 1 .....	12
Figura 4. Portata dei sali nel canale (transitorio A) nel caso con (IMPELLER ON) e senza (IMPELLER OFF) girante. Nel caso IMPELLER ON, la caduta di pressione imposta alla girante aumenta nel tempo fino ad ottenere una buona approssimazione della portata nominale.....	13
Figura 5. Stratificazione termica lungo l'asse del serbatoio per il transitorio A: confronto tra il caso con (IMPELLER ON) e senza (IMPELLER OFF) girante .....	13
Figura 6. Sistema di accumulo termoclineo con resistenze immerse .....	14
Figura 7. Dominio computazionale e condizioni al contorno applicate al modello del sistema di accumulo con resistenze immerse .....	15
Figura 8. Effetto della variazione del passo (a) longitudinale e (b) trasversale sul coefficiente di scambio termico convettivo tra le resistenze e i sali .....	16
Figura 9. Evoluzione della portata massica dei sali nel transitorio A. Confronto tra portata nell'intercapedine (resistenze immerse) e nel canale (sistema a tre serpentine) senza l'ausilio della girante.....	17
Figura 10. Stratificazione termica alla fine del transitorio A. Confronto tra sistema di accumulo termoclineo con resistenze immerse e sistema con tre serpentine .....	17

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Transitori di carica e scarica simulati .....	11
--	----

# 1 Risultati attesi

I risultati attesi della linea di attività LA1.14 sono:

- simulazione del prototipo del sistema di accumulo termoclino realizzato dall'ENEA (1) durante i transitori di carica e scarica: stima delle prestazioni termiche e identificazione dei test di maggiore interesse per la dimostrazione della fattibilità della tecnologia;
- sviluppo di un modello termo-fluidodinamico di un innovativo sistema di accumulo termoclino con serpentine e resistenze elettriche direttamente immerse nei sali all'interno del serbatoio(2);
- prima ottimizzazione della disposizione e della geometria delle resistenze elettriche immerse nei sali fusi;
- confronto tra le prestazioni termiche (1) del sistema di accumulo termoclino munito di serpentina ad olio diatermico collegata con la caldaia elettrica e (2) del sistema di accumulo termoclino equipaggiato con resistenze elettriche immerse nel mezzo di accumulo. Valutazione del vantaggio prestazionale ottenibile con la tecnologia delle resistenze immerse.

## 2 Risultati ottenuti

I risultati attesi nel capitolato per la linea di attività LA1.14 sono stati raggiunti. In particolare:

- Il sistema di accumulo termocline con tre serpentine, sviluppato dall'ENEA, è stato simulato mediante il modello CFD sviluppato nella precedente LA1.12. I transitori simulati corrispondono ai test di maggiore interesse da realizzare nella LA1.13.
- Si è sviluppato il modello CFD del sistema di accumulo termocline con resistenze immerse. La disposizione delle resistenze è stata oggetto di una prima ottimizzazione.
- Sulla base dei risultati delle simulazioni, si è confrontato il comportamento del sistema di accumulo termocline munito di tre serpentine con quello del sistema di accumulo con resistenze immerse.

In aggiunta a quanto previsto dal capitolato, sono stati ottenuti anche i seguenti risultati:

- Il sistema di accumulo a due serpentine, senza resistenze immerse, è stato analizzato numericamente mediante un modello CFD dedicato. Tale analisi ha consentito di ottimizzare la geometria del sistema di accumulo e di verificare l'impatto sulle prestazioni del termocline dell'inserimento di inserti di materiale a cambiamento di fase all'interno del mezzo di accumulo (sali fusi). I risultati di questo studio sono stati pubblicati; si veda la sezione 9.

### 3 Prodotti attesi

In accordo con il capitolato, i prodotti attesi per la linea di attività LA1.14 sono:

- Il presente report tecnico;
- Modello numerico di un sistema di accumulo termocline ibridizzato con due serpentine e resistenze elettriche immerse nei sali fusi. Il modello numerico sarà descritto nel suddetto report tecnico emesso nell'ambito della presente LA1.14

## 4 Prodotti sviluppati

In accordo con il capitolato, il prodotto sviluppato per la linea di attività LA1.14 corrisponde al presente report, in cui si descrive il modello numerico del sistema di accumulo termoclino ibridizzato con due serpentine e resistenze elettriche immerse nei sali fusi.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si riscontrano scostamenti su attività e risultati.

## 6 Sintesi delle attività svolte

La presente attività riguarda la modellazione termo-fluidodinamica e la simulazione di sistemi di accumulo termocline ibridizzati. Sulla base del modello termo-fluidodinamico (CFD) sviluppato nella precedente LA1.12, si è proceduto a simulare il sistema di accumulo termocline con tre serpentine considerando i transitori di interesse che verranno riprodotti sperimentalmente nella LA1.13. Si è quindi sviluppato un modello termo-fluidodinamico (CFD) del sistema di accumulo termocline con resistenze immerse. La disposizione delle resistenze è stata oggetto di una prima ottimizzazione mediante analisi parametrica. Infine, si è confrontato il sistema di accumulo termocline munito di tre serpentine (LA1.11 e LA1.12) con il sistema di accumulo termocline con resistenze immerse, per un dato transitorio di carica. I risultati indicano che è necessario aumentare significativamente l'impedenza idraulica nel caso di resistenze immerse per ottenere un sistema di accumulo termocline performante.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

La presente attività riguarda la modellazione termo-fluidodinamica e la simulazione di sistemi di accumulo termocline ibridizzati. I sistemi di accumulo termocline qui considerati sono di tipo indiretto, il mezzo di accumulo corrisponde ad una miscela di sali ternari (HITEC XL), mentre il fluido termovettore è un olio diatermico. Le temperature nominali di esercizio sono 190 °C (sali freddi) e 280 °C (sali caldi).

L'attività di ricerca si divide in tre sezioni:

- Sezione 7.1: Sulla base del modello termo-fluidodinamico (CFD) sviluppato nella precedente LA1.12 mediante il software Star-CCM+, si è proceduto a simulare il sistema di accumulo termocline con tre serpentine (LA1.11 e LA1.12). Le simulazioni condotte includono i transitori di carica e scarica di maggiore interesse, i quali saranno poi replicati nella campagna sperimentale (LA1.13).
- Sezione 7.2: Sviluppo del modello termo-fluidodinamico (CFD) del sistema di accumulo termocline con resistenze immerse, per mezzo del software Star-CCM+. La disposizione delle resistenze è stata oggetto di una prima ottimizzazione mediante analisi parametrica.
- Sezione 7.3: Confronto tra il sistema di accumulo termocline munito di tre serpentine (LA1.11 e LA1.12) con il sistema di accumulo termocline con resistenze immerse, per un dato transitorio di carica.

### 7.1 Simulazione del sistema di accumulo termocline con tre serpentine

Nella precedente LA1.12 si è sviluppato il modello del sistema di accumulo termocline con tre serpentine (2 carica e 1 scarica) immerse nei sali. Nell'ambito della presente LA1.14 si intende simulare i transitori di maggiore interesse al fine di fornire indicazioni utili per la campagna sperimentale (LA1.13). La Tabella 1 riassume i transitori simulati in questa attività. L'energia termica scaricata nei sali durante i transitori di carica è sempre la stessa: la durata del transitorio cambia al variare della potenza applicata alle serpentine.

Tabella 1. Transitori di carica e scarica simulati

Identificativo	Transitorio	Durata [minuti]	Descrizione
A	Carica	60	Solo serpentina PV a potenza nominale
B	Carica	60	Solo serpentina CSP a potenza nominale
C	Carica	40	Serpentina PV a carico parziale (50 %) e serpentina CSP a potenza nominale
D	Carica	30	Serpentina PV e CSP a potenza nominale
E	Scarica	30	Serpentina di scarica a potenza nominale

La potenza nominale per le serpentine di carica corrisponde a 110 kW, mentre la potenza nominale asportata dalla serpentina di scarica è pari a 220 kW. La condizione iniziale applicata è di temperatura uniforme, pari a 190 °C (carica) e 280 °C (scarica). La Figura 1 mostra la distribuzione della temperatura dei sali al variare del tempo durante il transitorio (A).

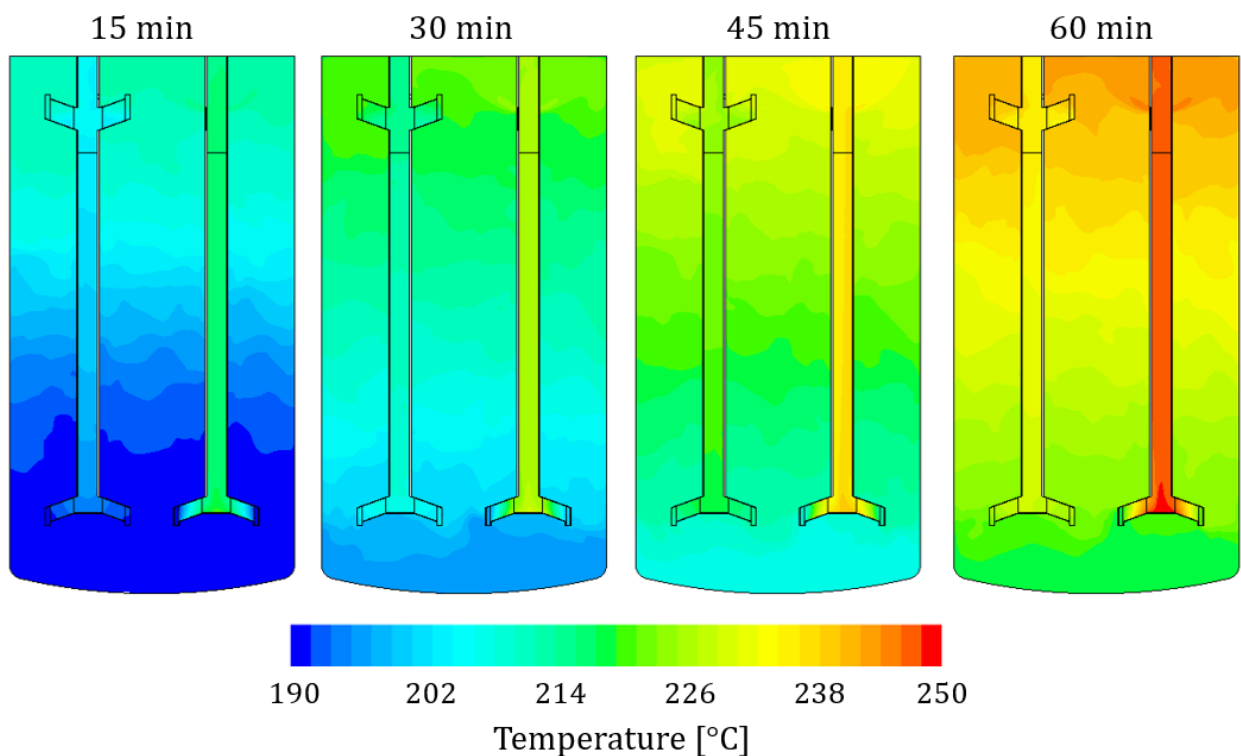


Figura 1. Distribuzione della temperatura dei sali per diversi istanti di tempo nel corso del transitorio (A)

La Figura 2 mostra la stratificazione termica per i transitori di carica (A-D). La temperatura è stata rilevata su 21 punti equidistanti lungo l'asse del serbatoio. Poiché l'energia in ingresso al sistema non varia, la temperatura media dei sali è sempre la stessa. La Figura 3 mostra la stratificazione termica al termine del transitorio di scarica (E).

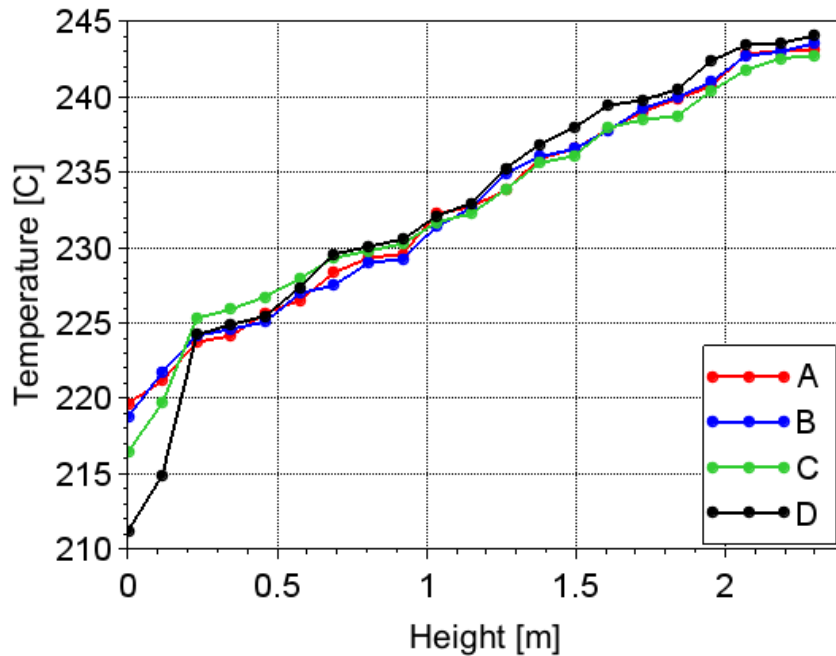


Figura 2. Stratificazione termica misurata lungo l'asse del serbatoio per i transitori di carica A-D in Tabella 1

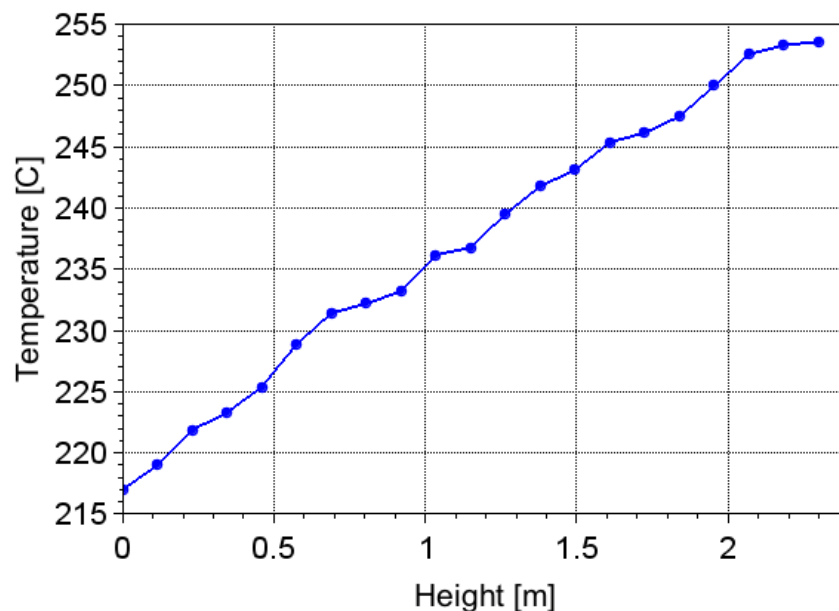


Figura 3. Stratificazione termica misurata lungo l'asse del serbatoio per il transitorio di scarica (E) in Tabella 1

Come si evince da Figura 2, la stratificazione termica non cambia in modo significativo al variare del transitorio di carica considerato. Tale stratificazione termica risulta lontana da

quella ideale, in cui i sali caldi e i sali freddi sono separati da una sottile regione di gradiente termico. Ciò si deve alla elevata portata massica di sali che risale il canale (o i canali) per effetto della convezione naturale e favorisce il miscelamento dei sali nel volume del serbatoio. Inoltre, a causa dell'elevata portata, la temperatura raggiunta dai sali caldi è minore di quella nominale (280 °C). Considerando il transitorio A, con un semplice bilancio di energia si ottiene che la portata necessaria per aumentare la temperatura dei sali da 190 °C a 280 °C, data la potenza nominale di 110 kW, è circa 0.8 kg/s, molto minore di quella calcolata dal modello ( $\approx 3$  kg/s). Per il transitorio di scarica valgono considerazioni simili. Per ridurre tale portata, si può agire sulla girante posta in ciascun canale. A tal fine, si impone all'interfaccia che simula la presenza della girante assiale una caduta di pressione che aumenta progressivamente nel tempo fino ad ottenere una buona approssimazione della portata nominale. Considerando il transitorio A, Figura 4 e Figura 5 confrontano l'andamento della portata all'aumentare della pressione imposta all'interfaccia della girante e la stratificazione termica nel caso con e senza la girante.

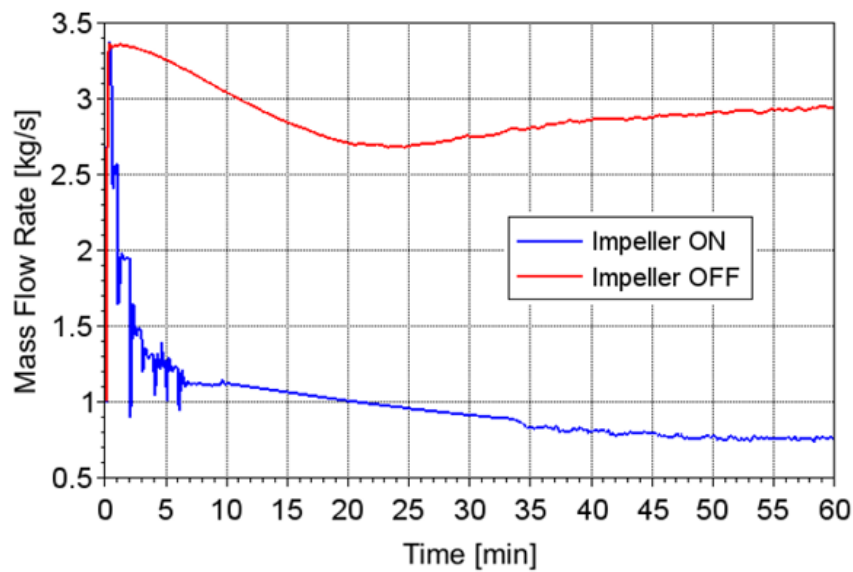


Figura 4. Portata dei sali nel canale (transitorio A) nel caso con (IMPELLER ON) e senza (IMPELLER OFF) girante. Nel caso IMPELLER ON, la caduta di pressione imposta alla girante aumenta nel tempo fino ad ottenere una buona approssimazione della portata nominale

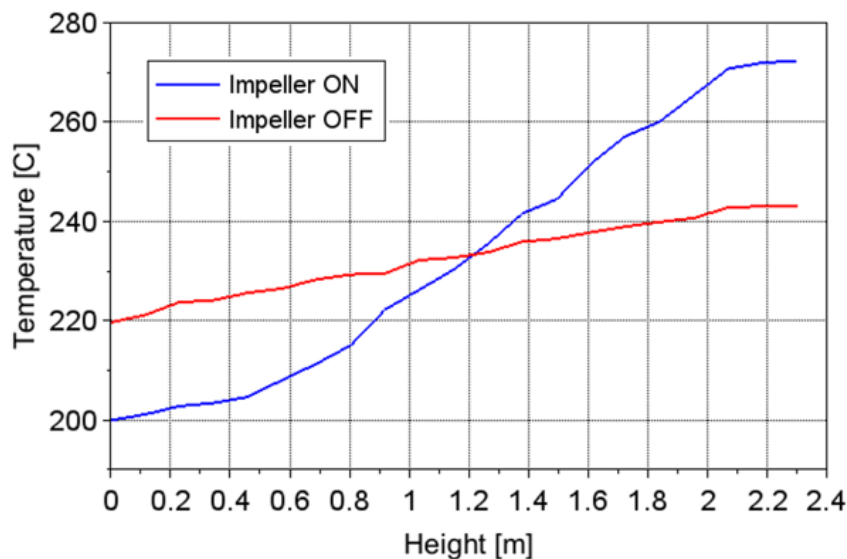


Figura 5. Stratificazione termica lungo l'asse del serbatoio per il transitorio A: confronto tra il caso con (IMPELLER ON) e senza (IMPELLER OFF) girante

Figura 5 dimostra che l'uso della girante permette di ottenere un miglioramento della stratificazione termica nel serbatoio termoclino; tuttavia, il risultato ottenuto non è ancora soddisfacente in termini di separazione tra fluido caldo e freddo. Infatti, anche assicurando la portata nominale si ha un miscelamento tale da compromettere la formazione del termoclino. In prospettiva, si dovranno considerare soluzioni progettuali che tengano conto di questo risultato; ad esempio, è possibile aumentare il numero di canali, riducendo la potenza (e quindi la portata) applicata a ciascun canale.

## 7.2 Sviluppo del modello CFD del sistema di accumulo termoclino con resistenze immerse

Il serbatoio di accumulo termoclino con resistenze immerse si ottiene a partire dal serbatoio di accumulo con tre serpentine applicando le seguenti modifiche (si veda Figura 6)

- Si elimina la serpentina collegata al campo fotovoltaico e il relativo canale
- Si sposta il canale collegato all'impianto CSP in corrispondenza dell'asse del serbatoio
- Si inserisce una intercapedine concentrica al cui interno vengono disposte le resistenze costituite da bobine a spirale cilindrica

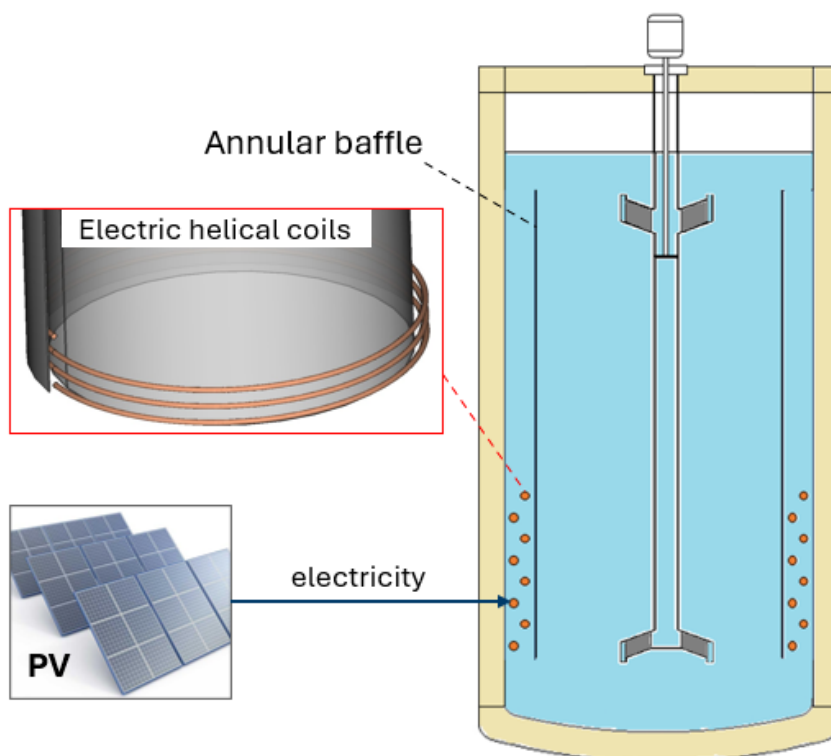


Figura 6. Sistema di accumulo termoclino con resistenze immerse

In considerazione della nuova geometria, il dominio computazionale del modello CFD risulta 2D con simmetria assiale. Adottando lo stesso approccio modellistico già applicato nell'ambito della LA1.12, il dominio computazionale comprende il solo volume dei sali fusi, mentre la struttura del serbatoio è sostituita da opportune condizioni al contorno; si veda il report tecnico emesso nell'ambito della LA1.12 per maggiori dettagli. La parete dell'intercapedine non è inclusa nel dominio computazionale, si trascura quindi il trasferimento di calore per

conduzione termica attraverso parete. La serpentina di carica e quella di scarica sono state sostituite da un mezzo poroso equivalente, il cui modello è stato sviluppato nell'ambito della LA1.12. Il riscaldamento elettrico mediante resistenze immerse viene simulato imponendo un flusso termico uniforme sulla superficie delle resistenze. Analogamente al modello sviluppato nella LA1.12, il sistema si considera laminare e si adotta l'approssimazione di Boussinesq per tenere conto delle forze di galleggiamento. Figura 7 rappresenta il dominio computazionale e le condizioni al contorno applicate al modello CFD del sistema di accumulo con resistenze immerse.

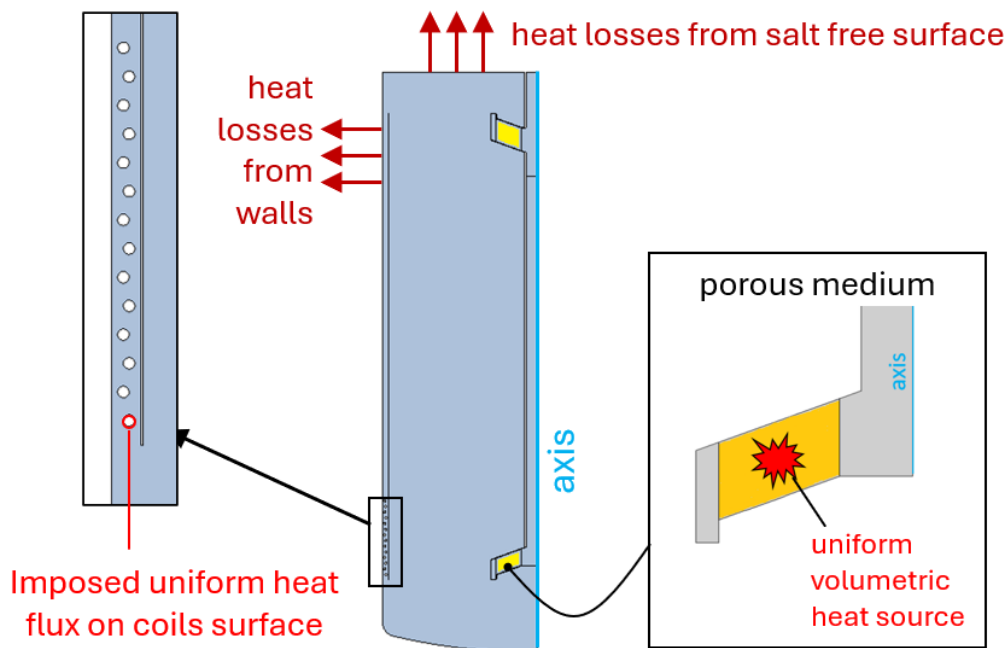


Figura 7. Dominio computazionale e condizioni al contorno applicate al modello del sistema di accumulo con resistenze immerse

La discretizzazione spaziale e temporale si basano sui parametri considerati nella precedente LA1.12, in cui si era verificata l'indipendenza dei risultati dalla risoluzione spaziale e temporale.

Per quanto riguarda le resistenze immerse, si assume un diametro di 3/8", per il quale esistono prodotti commercialmente disponibili. Si ipotizza una configurazione con due bobine in parallelo, sfalsate tra loro. Il passo longitudinale e trasversale è stato oggetto di una ottimizzazione preliminare mediante un modello CFD dedicato che tiene conto della sola intercapedine. L'ottimizzazione consiste nel massimizzare il coefficiente di scambio termico convettivo tra la superficie delle resistenze e i sali, mantenendo costante la superficie totale di scambio termico, che si impone circa uguale a quella della serpentina di carica collegata al campo fotovoltaico nella configurazione del sistema di accumulo con tre serpentine. I risultati di questo studio sono riassunti in Figura 8. Il passo longitudinale si pone pari a 5 volte il diametro, essendo che un ulteriore aumento non porta benefici, mentre il passo trasversale si pone pari a 0.5 volte il diametro, essendo che per questo valore si ha un massimo del coefficiente di scambio termico.

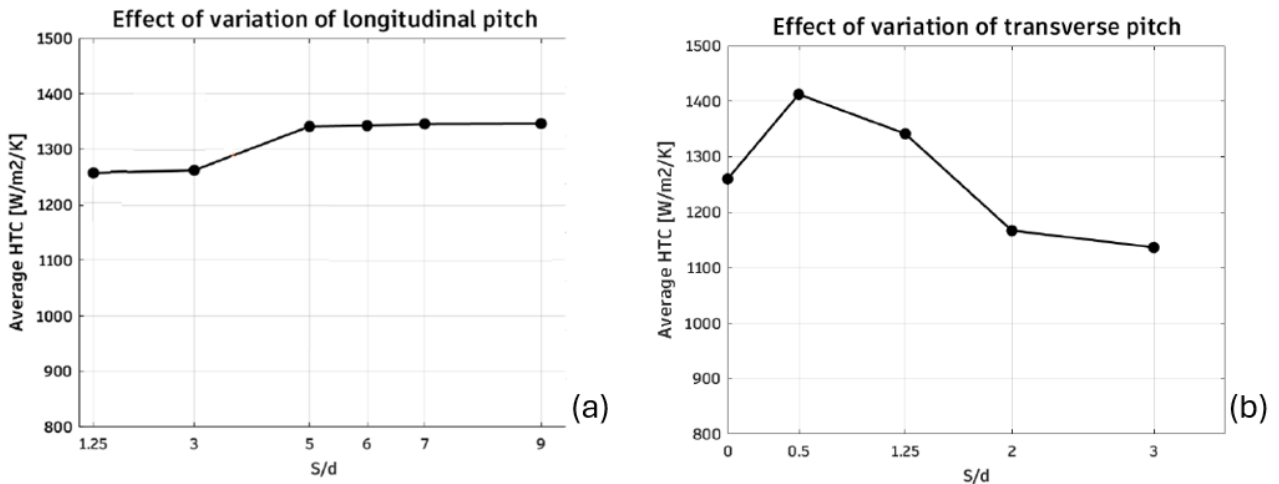


Figura 8. Effetto della variazione del passo (a) longitudinale e (b) trasversale sul coefficiente di scambio termico convettivo tra le resistenze e i sali

### 7.3 Confronto tra il sistema di accumulo termoclino con tre serpentine e il sistema con resistenze immerse

Il confronto tra le due configurazioni di sistema di accumulo termoclino viene svolto considerando il transitorio A di Tabella 1. Figura 9 mostra l'andamento della portata dei sali nel canale (sistema con tre serpentine), senza considerare la girante, e nell'intercapedine (sistema con resistenze immerse). Come si può osservare, la portata nel sistema con resistenze immerse è molto maggiore, ciò comporta un maggiore miscelamento dei sali nel volume del serbatoio con conseguente peggiore stratificazione termica (Figura 10). In Figura 10 si osserva che la temperatura, nel caso di resistenze immerse, diminuisce repentinamente nella parte inferiore del serbatoio, sotto al livello dell'imbocco dell'intercapedine. Infatti, il fluido al disotto di tale livello viene tagliato fuori dal moto di circolazione naturale che si instaura nel serbatoio; per questo motivo rimane pressappoco alla temperatura iniziale. La maggiore portata nell'intercapedine si deve alla minore impedenza idraulica rispetto al canale, in cui le serpentine di carica e scarica comportano una forte caduta di pressione. In prospettiva, si devono implementare soluzioni progettuali per aumentare l'impedenza idraulica dell'intercapedine, come l'inserimento di perdite di carico concentrate, al fine di rendere questo sistema performante.

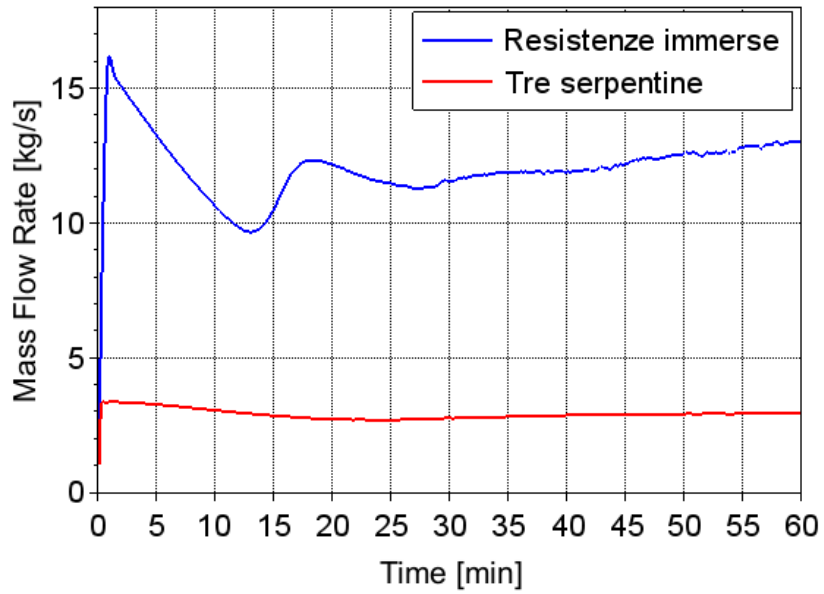


Figura 9. Evoluzione della portata massica dei sali nel transitorio A. Confronto tra portata nell'intercapedine (resistenze immerse) e nel canale (sistema a tre serpentine) senza l'ausilio della girante

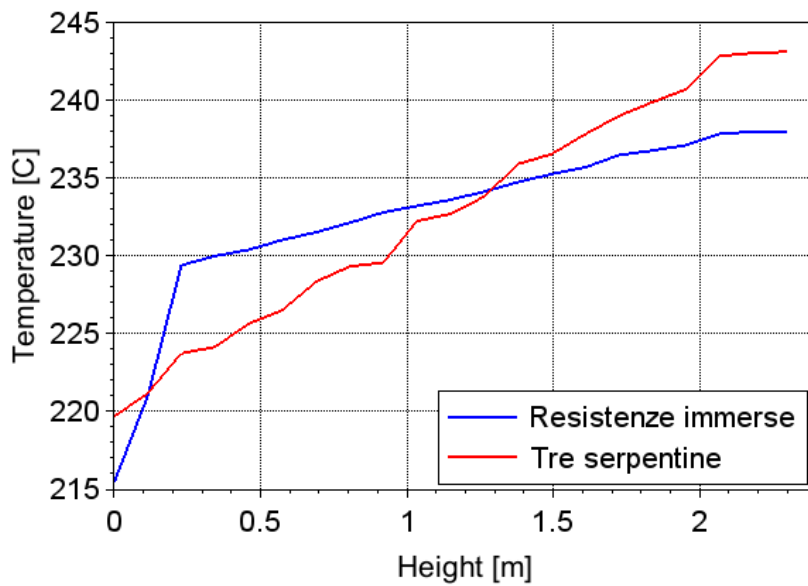


Figura 10. Stratificazione termica alla fine del transitorio A. Confronto tra sistema di accumulo termoclino con resistenze immerse e sistema con tre serpentine

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze nell'ambito della LA 1.14.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

- M. Shokrnia, M. Cagnoli, W. Gaggioli, R. Liberatore, V. Russo and R. Zanino, Geometrical and PCM optimization of a thermocline energy storage system, Journal of Energy Storage 98 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113070>

## 10 Eventi di disseminazione

- 30<sup>th</sup> SolarPACES Conference, Rome (Italy), October 8-11, 2024