

# Ricerca di Sistema elettrico



*Analisi CFD sulla caratterizzazione termo fisica  
di un mezzo di accumulo PCM*

Prof. Adrover Alessandra

Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente



## *Analisi CFD sulla caratterizzazione termo fisica di un mezzo di accumulo PCM*

A. Adrover, Sapienza Università di Roma

Giugno 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

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

Linea di attività: LA4.18

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile del Work Package: Raffaele Liberatore, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Alessandra Adrover

Mese inizio previsto: 25

Mese inizio effettivo: 25

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

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

## Indice

1	Risultati attesi .....	4
2	Risultati ottenuti.....	4
3	Prodotti attesi .....	4
4	Prodotti ottenuti.....	4
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	4
6	Sintesi delle attività svolte .....	5
7	Dettaglio delle attività svolte.....	5
7.1	Prototipo del dispositivo.....	6
7.2	Conseguenze della asimmetria del flusso.....	9
7.3	Analisi del modello a confronto con i dati di simulazione.....	10
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	13
9	Pubblicazioni scientifiche .....	13
10	Eventi di disseminazione .....	14
11	Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale.....	14

## Indice delle figure

Figure 1 : Schema di insieme del prototipo realizzato nei laboratori ENEA Casaccia. ....	6
Figure 2: Schema del blocco C1 riportato in Figura 1. ....	6
Figure 3: Schema del blocco C2 riportato in Figura 1. ....	7
Figure 4: Schema del blocco C3 riportato in Figura 1. ....	7
Figure 5: Schema del blocco C4 riportato in Figura 1. ....	8
Figure 6: Confronto tra geometria originaria (sinistra) e del prototipo (destra). ....	8
Figure 7: Sonde aggiuntive S3 e S4 in rosso. ....	9
Figure 8: Spessori e salti termici considerati per il calcolo del coefficiente di ripartizione del flusso. ....	10
Figure 9: Temperatura rilevata dalle sonde S3 (rosso) ed S4 (blu), per $T_0=250\text{ }^\circ\text{C}$ , $h=500\text{ W/m}^2\text{ K}$ e $P=20\text{ W}$ . ....	11
Figure 10: Errore percentuale per la conducibilità termica del Solar Salt al variare del tempo di simulazione per $T_0=250\text{ }^\circ\text{C}$ , $h=500\text{ W /m}^2\text{K}$ . ....	11
Figure 11: Direzione del flusso termico al tempo $t=600\text{ s}$ e $T_0=250\text{ }^\circ\text{C}$ . ....	12
Figure 12: Contour plot dell'incremento di temperatura nella zona centrale del dispositivo, per $t=600\text{ s}$ e $T_0=250\text{ }^\circ\text{C}$ e $h=500\text{ W / m}^2\text{K}$ . ....	12
Figure 13: Errore percentuale al variare della temperatura iniziale per $r=3\text{ mm}$ . ....	13

## 1 Risultati attesi

Analisi CFD del dispositivo di misura della conducibilità termica del PCM.

## 2 Risultati ottenuti

- (1) Nuova analisi CFD per analizzare il dispositivo microfluidico.
- (2) Valutazione l'effetto delle modifiche geometriche al progetto originale.
- (3) Sviluppo di un modello unidimensionale per la ripartizione della potenza erogata dal filo scaldante.
- (4) valutare l'eventuale possibilità di inserire nuove sonde di temperatura.
- (5) ottimizzare la posizione delle sonde di temperatura.

Tutti i risultati attesi sono stati ottenuti

## 3 Prodotti attesi

Nessun prodotto hardware/software era atteso per la LA 4.18.

## 4 Prodotti ottenuti

Nessun prodotto hardware/software è stato sviluppato nella LA 4.18

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nella LA 4.18 si è affrontato il problema della misura della conducibilità termica dei Sali Fusi, che presenta alcune difficoltà intrinseche quali la necessità di lavorare ad alte temperature e la presenza di moti convettivi che alterano l'affidabilità del risultato.

È stata poi proposto un nuovo dispositivo meso-fluidico, che prende i punti di forza del dispositivo precedente adattando materiali e struttura agli scopi della determinazione della conducibilità termica di Sali fusi operanti anche ad alta temperatura. Le prove computazionali svolte hanno prodotto ottimi risultati, sia con un fluido per il quale il dispositivo è stato in primis pensato, quale il Solar Salt, sia con un fluido dalle caratteristiche diverse, ma che potrebbe essere impiegato per future prove sperimentali.

Il dispositivo progettato presenta anche un altro importante punto di forza, ossia quello di poter stimare la conducibilità termica senza la necessità di conoscere i flussi termici in gioco, grazie all'aggiunta di una seconda cella di misura. Questo, in apparenza un dettaglio sperimentalmente superabile, rappresenta una grossa fonte di errore di misura, particolarmente rilevante soprattutto ad alte temperature, quando la stima del flusso termico conduttivo diventa complessa per via dell'incremento dei flussi radianti.

Il prototipo del dispositivo, realizzato nei laboratori del C.R. ENEA Casaccia, presenta una modifica a livello strutturale che altera la simmetria del dispositivo. Per questo, è stata necessaria l'aggiunta di due sonde di temperatura alle interfacce quarzo/rame, in maniera tale da poter bypassare la stima della ripartizione dei flussi termici, indipendentemente dalle

condizioni operative e dal fluido impiegato. Le prove computazionali hanno mostrato come, anche in questo caso, si possano ottenere risultati soddisfacenti; tuttavia, occorre raddoppiare i tempi di misura, che in ogni caso rimangono piuttosto brevi, dell'ordine dei 45 minuti.

Non appena verranno avviate le prove sperimentali con il prototipo realizzato, si potranno analizzare i risultati e confrontarli con quelli ottenuti dalle simulazioni effettuate in COMSOL Multiphysics.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Obiettivo del lavoro della LA 4.18 del PTR22/24 è stato: (1) svolgere una nuova analisi CFD per analizzare il dispositivo microfluidico che è stato realizzato in ENEA; (2) valutare l'effetto delle modifiche geometriche al progetto originale. (3) sviluppare un nuovo modello unidimensionale per ovviare alla non equa ripartizione della potenza erogata dal filo scaldante; (4) valutare l'eventuale possibilità di inserire nuove sonde di temperatura; (5) ottimizzare la posizione delle sonde di temperatura al fine di avere una stima accurata dei salti di temperatura che, inseriti nel nuovo modello unidimensionale, permettano di stimare, con sufficiente accuratezza, la conducibilità termica del fluido in analisi.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Nell'ambito dell'attività di ricerca delle WP4 - LA5: e WP4 - LA7 è stato previsto l'utilizzo di un mezzo accumulo misto sensibile/latente (SH/LH) a media temperatura per lo sviluppo di prototipi per accumulo termico. Al fine di caratterizzare il materiale PCM determinandone la conducibilità termica, il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente dell'Università "La Sapienza" nel precedente PTR19/22 ha avviato una linea di attività sull'"ottimizzazione geometrica di un dispositivo sperimentale per la misura della conducibilità termica di fluidi ad alta T". Il lavoro prevedeva lo studio (tramite tecniche CFD) di un dispositivo proposto in letteratura e l'implementazione di un modello agli elementi finiti, descrittivo del sistema su scala reale, al fine di valutarne la validità. Lo studio preliminare ha condotto ad un miglioramento del modello proposto in letteratura. È stato eseguito lo scale-up del dispositivo micro-fluidico, la progettazione del dispositivo meso-fluidico e successivamente sono state determinate la geometria e le dimensioni della cella di misura al fine di garantire l'assenza di fenomeni convettivi. Il dispositivo di misura della conducibilità termica di fluidi ad alta temperatura è stato realizzato in ENEA, ma durante la lavorazione meccanica del quarzo è stato necessario apportare delle modifiche strutturali che riguardano sia la cava di alloggiamento dell'elemento scaldante, sia l'impiego di un cavo scaldante di sezione diversa da quella prevista dal progetto iniziale. Sono state quindi effettuate delle prove sperimentali utilizzando come fluido termovettore un olio diatermico: da tali prove è emerso che il valore di conducibilità termica stimato attraverso l'applicazione del modello proposto è inferiore al valore reale. Questo perché le modifiche apportate in sede realizzativa influiscono sulla ripartizione della potenza erogata dal filo scaldante tra la porzione superiore e la porzione inferiore del dispositivo di misura, dove sono posizionate le due celle di allocazione del fluido a cambiamento di fase di cui si vuole misurare la conducibilità termica.

## 7.1 Prototipo del dispositivo

Il prototipo realizzato nei laboratori ENEA presenta una piccola ma significativa differenza, a livello costruttivo, rispetto al dispositivo originariamente progettato. Nel modello originariamente proposto la resistenza viene incastrata tra i due blocchi di quarzo centrali realizzando dunque un alloggiamento profondo metà del diametro del filo che costituisce la resistenza su ciascun blocco. Nel prototipo effettivamente realizzato in ENEA, invece, l'alloggiamento è stato scavato interamente sul blocco inferiore, creando un incavo di sezione quadrata per l'alloggiamento della resistenza profondo 1.05 mm e largo 1.1 mm. Il motivo della seguente modifica strutturale risiede nelle oggettive difficoltà di lavorazione del materiale, motivo per il quale si è preferito dover scavare un solo blocco. Gli schemi del prototipo sono mostrati nelle Figure 1-5, dove tutte le grandezze sono espresse in millimetri.

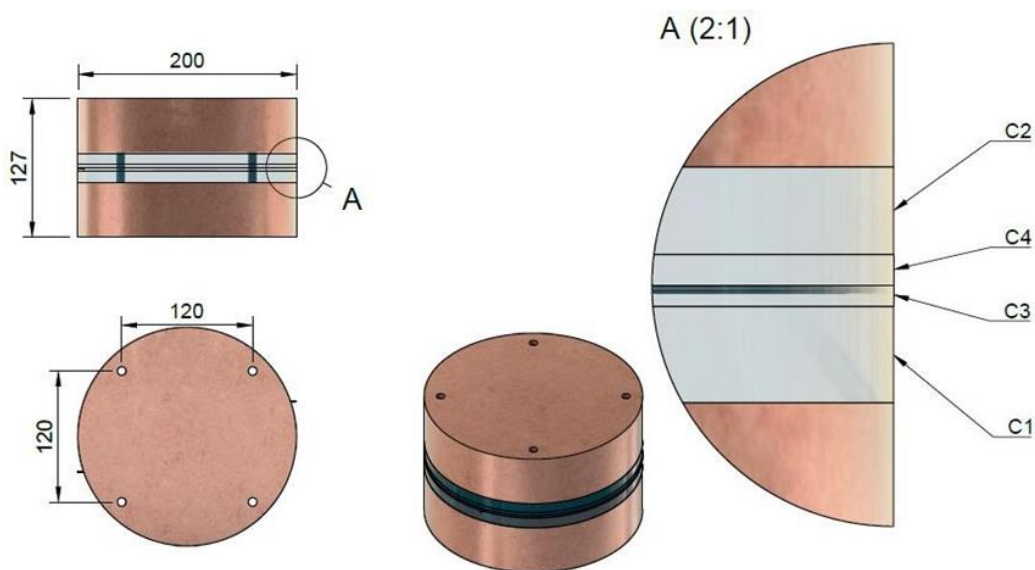


Figure 1 : Schema di insieme del prototipo realizzato nei laboratori ENEA Casaccia.

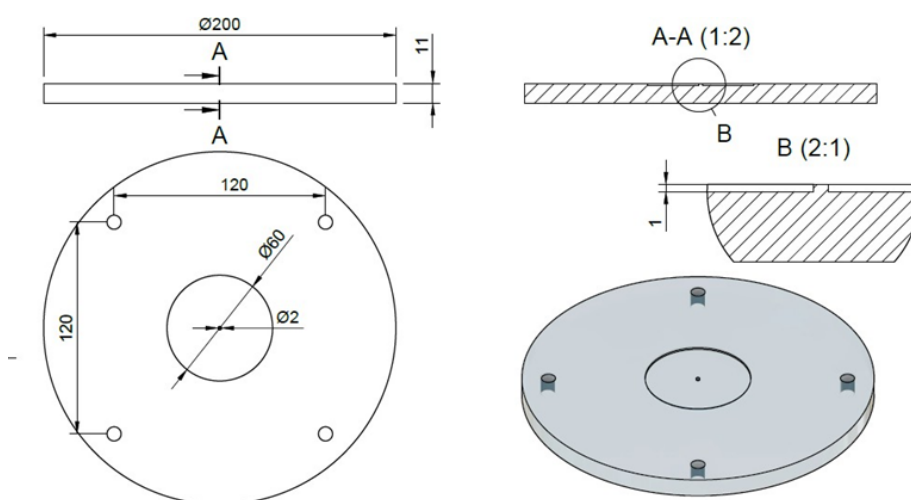


Figure 2: Schema del blocco C1 riportato in Figura 1.

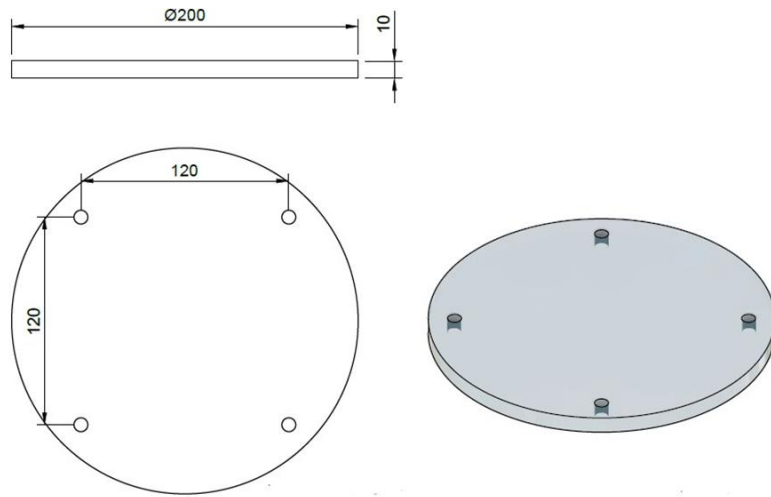


Figure 3: Schema del blocco C2 riportato in Figura 1.

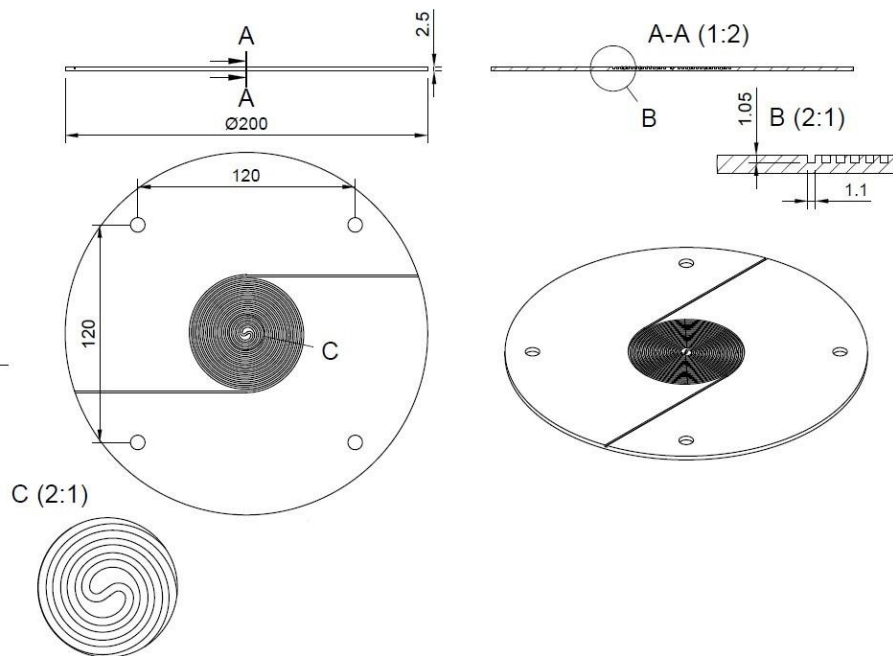


Figure 4: Schema del blocco C3 riportato in Figura 1.

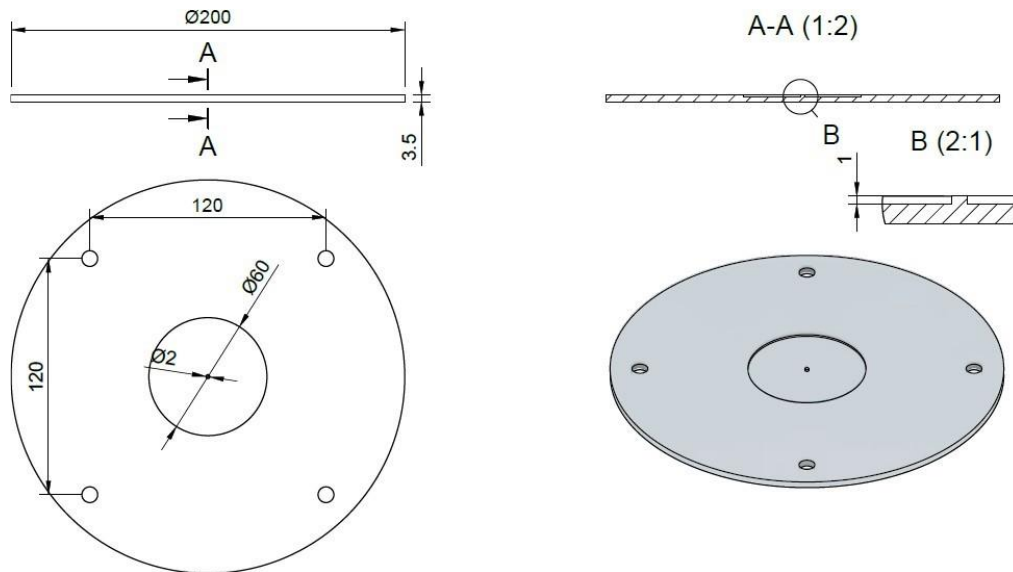


Figure 5: Schema del blocco C4 riportato in Figura 1.

Questa diversa disposizione della resistenza scaldante fa sì che la posizione delle due celle nelle quali è contenuto il fluido non sia più simmetrica rispetto alla sorgente di calore. In particolar modo, la sonda  $S_1$  si troverà più vicina alla sorgente di calore, mentre la sonda  $S_2$  sarà più lontana (Figura 6).

Al di là di questa differenza, il prototipo presenta le stesse dimensioni e proporzioni del dispositivo progettato. Nelle simulazioni, occorrerà considerare anche l'intercapedine di aria presente tra la resistenza e il suo alloggiamento. Per il collocamento delle sonde di temperatura, è stato realizzato un alloggiamento per ciascuna, in modo tale da poter facilmente spostare la posizione della stessa lungo il diametro della cella. Questo permette anche una ottimizzazione nel posizionamento delle sonde stesse, da valutare tramite tecniche CFD.

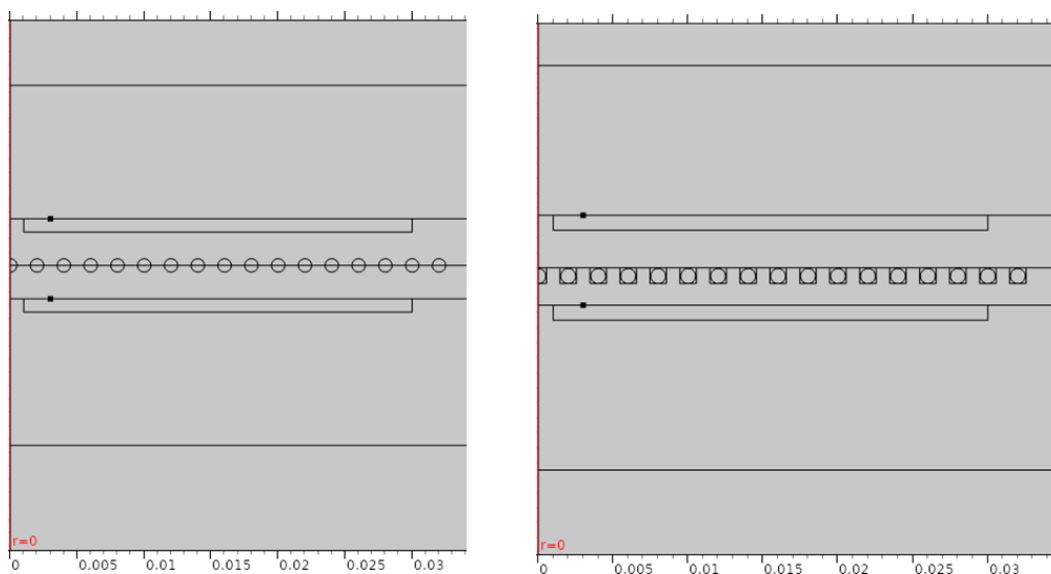


Figure 6: Confronto tra geometria originaria (sinistra) e del prototipo (destra).

## 7.2 Conseguenze della asimmetria del flusso

La nuova geometria del prototipo fa sì che le celle di misura non siano più simmetriche rispetto all'elemento scaldante. Il modello matematico precedentemente sviluppato si basa invece proprio su tale simmetria; infatti, questo consente di considerare uguali i flussi termici in corrispondenza delle sonde, e di semplificarli nell'equazione per il calcolo della conducibilità termica a partire dalle informazioni relative alle temperature delle due sonde  $S_1$  e  $S_2$ . Occorre dunque comprendere come si possa superare la disuguaglianza dei flussi termici al fine di ottenere comunque un modello per la conducibilità termica che tenga conto della non equa ripartizione dei flussi termici. Questo può essere fatto introducendo due ulteriori sonde di temperatura  $S_3$  e  $S_4$ . Le due nuove sonde sono indicate in rosso nella figura 7 sullo stesso asse verticale delle due sonde precedenti

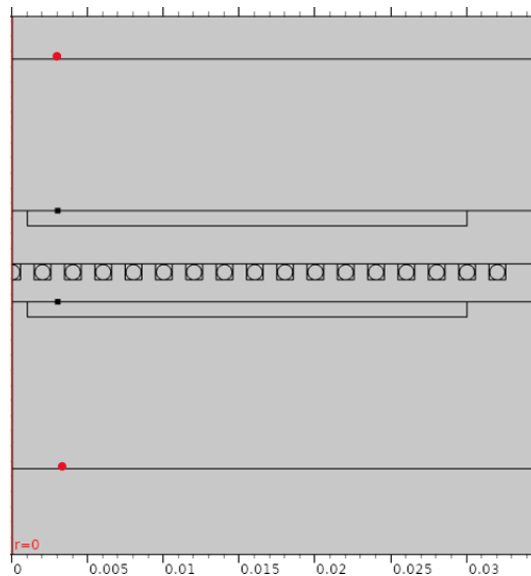


Figure 7: Sonde aggiuntive  $S_3$  e  $S_4$  in rosso.

In questo modo, si può sfruttare il fatto che i blocchi di rame hanno uguale spessore e che, nel modello, la conducibilità termica del materiale è considerata costante.

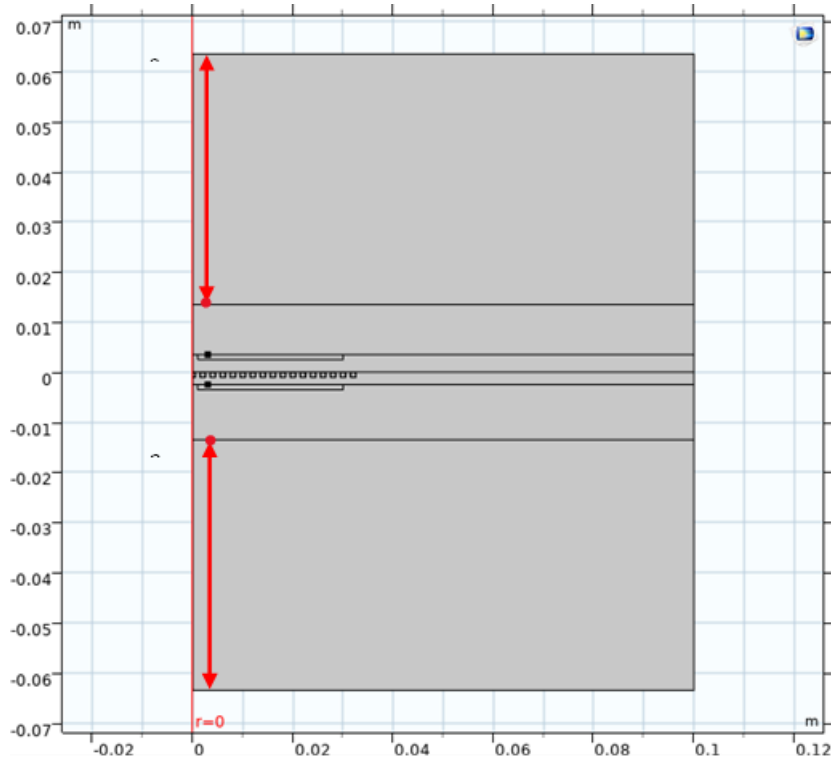


Figure 8: Spessori e salti termici considerati per il calcolo del coefficiente di ripartizione del flusso.

Utilizzando le temperature  $T_3$  e  $T_4$  delle due nuove sonde, oltre alle temperature  $T_1$  e  $T_2$  delle due sonde già presenti, si arriva al modello completo

$$\lambda(T_{av}) = -\delta \cdot \frac{T_2 - T_0}{\beta \cdot \left(1 - \frac{T_4 - T_0}{T_3 - T_0}\right) \cdot (T_2 - T_0) - \frac{T_4 - T_0}{T_3 - T_0} \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2)}$$

$$\beta = \frac{\delta_Q}{\lambda_Q(T_{av})} + \frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu}}$$

in cui  $T_0$  è la temperatura ambiente (temperatura del forno),  $T_{av}$  la temperatura media del fluido in analisi,  $Q$  indica il quarzo,  $Cu$  il rame e  $d$  lo spessore della cella di alloggiamento del fluido. L'aggiunta delle due sonde fa sì, dunque, che il modello unidimensionale mantenga il fondamentale vantaggio di non dover conoscere i flussi termici in gioco.

### 7.3 Analisi del modello a confronto con i dati di simulazione

Per le prove computazionali, avendo già osservato che, al variare della potenza termica dissipata dalla resistenza, l'errore di misura rimane pressoché costante, si fissa un valore della stessa pari a  $P = 20 \text{ W}$  per il Solar Salt,  $P = 9.8 \text{ W}$  per il Therminol<sup>®</sup> 66. Si considera, inoltre, un coefficiente di scambio termico esterno pari a  $h = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

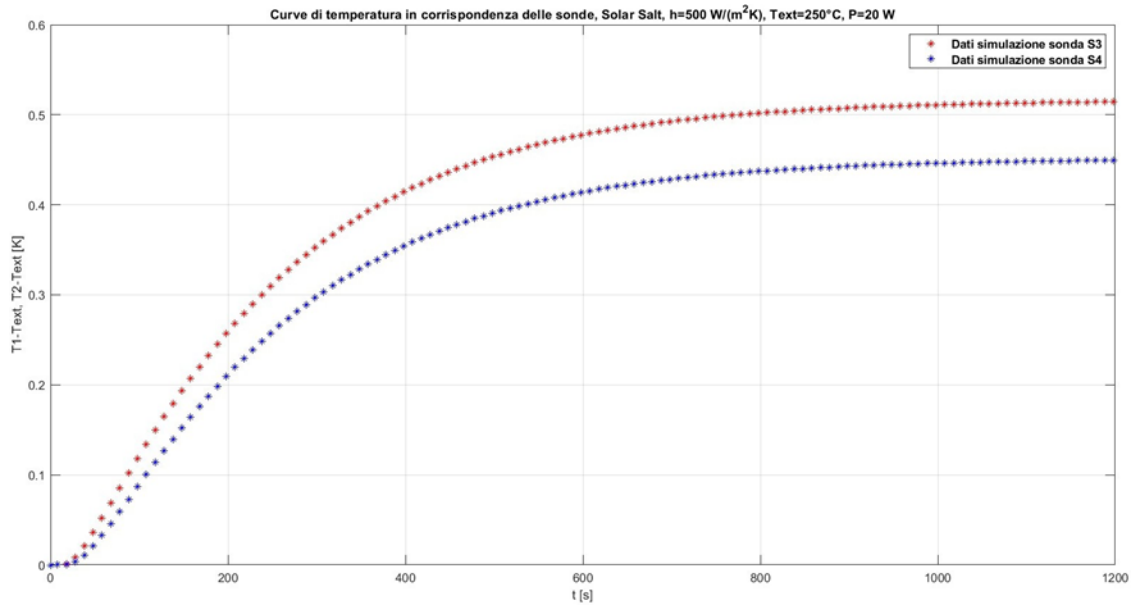


Figure 9: Temperatura rilevata dalle sonde  $S_3$  (rosso) ed  $S_4$  (blu), per  $T_0=250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h=500\text{ W/m}^2\text{ K}$  e  $P=20\text{ W}$ .

La Figura 9 mostra le temperature rilevate dalle sonde  $S_3$  e  $S_4$  in funzione del tempo, evidenziando che occorre attendere un tempo più lungo per arrivare a misurare in maniera accurata la temperatura asintotica  $T_3$  e  $T_4$ . La spiegazione è semplice. Le sonde  $S_3$  ed  $S_4$  sono più lontane dall'elemento scaldante rispetto alle sonde  $S_1$  ed  $S_2$ ; dunque, lo stato stazionario verrà raggiunto più lentamente. Di conseguenza, anche il transiente sarà più lungo; questo, per ottenere una valutazione accurata della temperatura asintotica. Inoltre, sempre per la lontananza di tali sonde dall'elemento scaldante, è chiaro che il salto di temperatura asintotico è molto ridotto. I tempi di misura (tempi dell'esperimento) aumentano necessariamente rispetto al prototipo originale ed una volontaria riduzione dei tempi di misura può quindi influire molto sull'accuratezza del risultato.

Per un tempo di misura  $t = 1200\text{ s}$  si ottiene un errore per difetto pari al 31%, mentre allungando i tempi fino a  $t = 2700\text{ s}$  si un errore, sempre per difetto, pari al 3.81%, quindi estremamente ridotto, come mostrato nelle Figura 10.

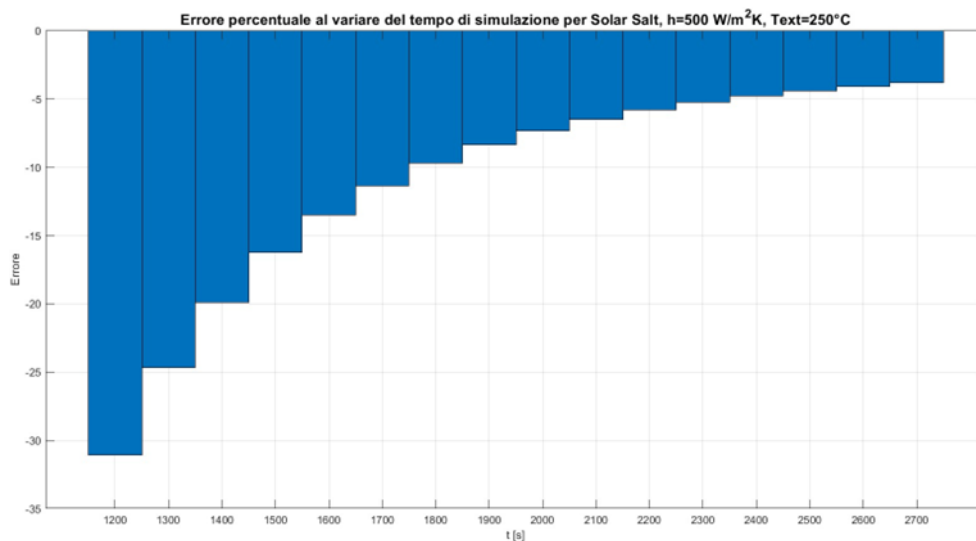


Figure 10: Errore percentuale per la conducibilità termica del Solar Salt al variare del tempo di simulazione per  $T_0=250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h=500\text{ W/m}^2\text{ K}$ .

Questo risultato, già estremamente confortante, è ottenuto mantenendo tutte le sonde in linea, in una posizione pari a quella ottimale precedentemente determinata in presenza delle sole sonde  $S_1$  e  $S_2$ . In realtà, per il prototipo realizzato in ENEA, la posizione ottimale deve tener conto anche delle sonde aggiuntive; sarà, dunque, una combinazione dell'ottimo per le singole coppie di sonde,  $S_1$ - $S_2$  ed  $S_3$ - $S_4$ . La posizione ottimale delle sonde deve tenere conto della zona in cui il flusso termico sia il più possibile verticale, non solo in corrispondenza delle celle di alloggiamento del fluido, ma anche in corrispondenza delle interfacce quarzo/rame. Come si può osservare in Figura 11 e 12, la zona di massima verticalità dei flussi è proprio quella in corrispondenza dell'asse di simmetria

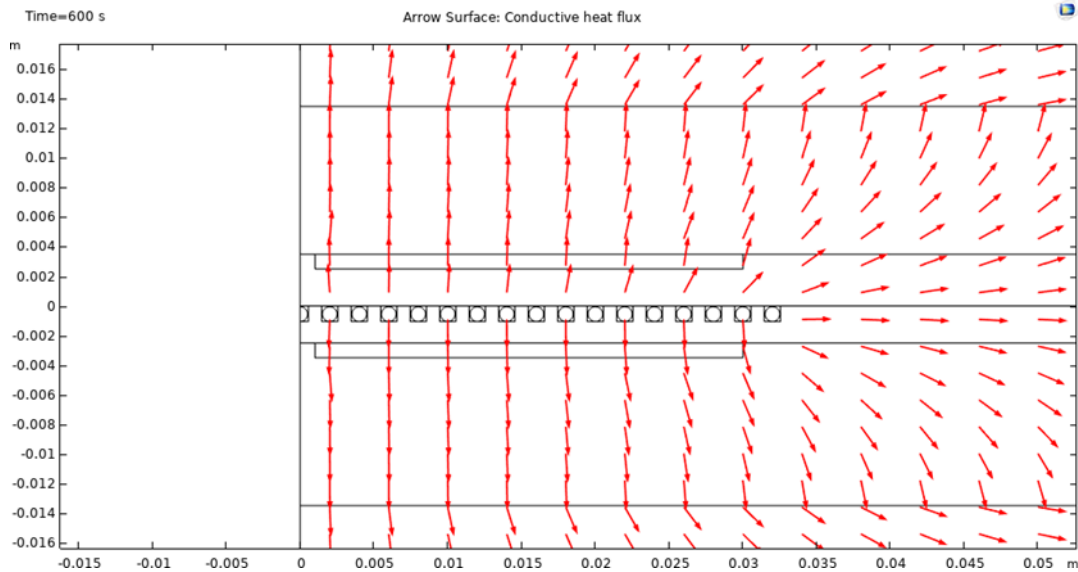


Figure 11: Direzione del flusso termico al tempo  $t=600$  s e  $T_0=250$  °C.

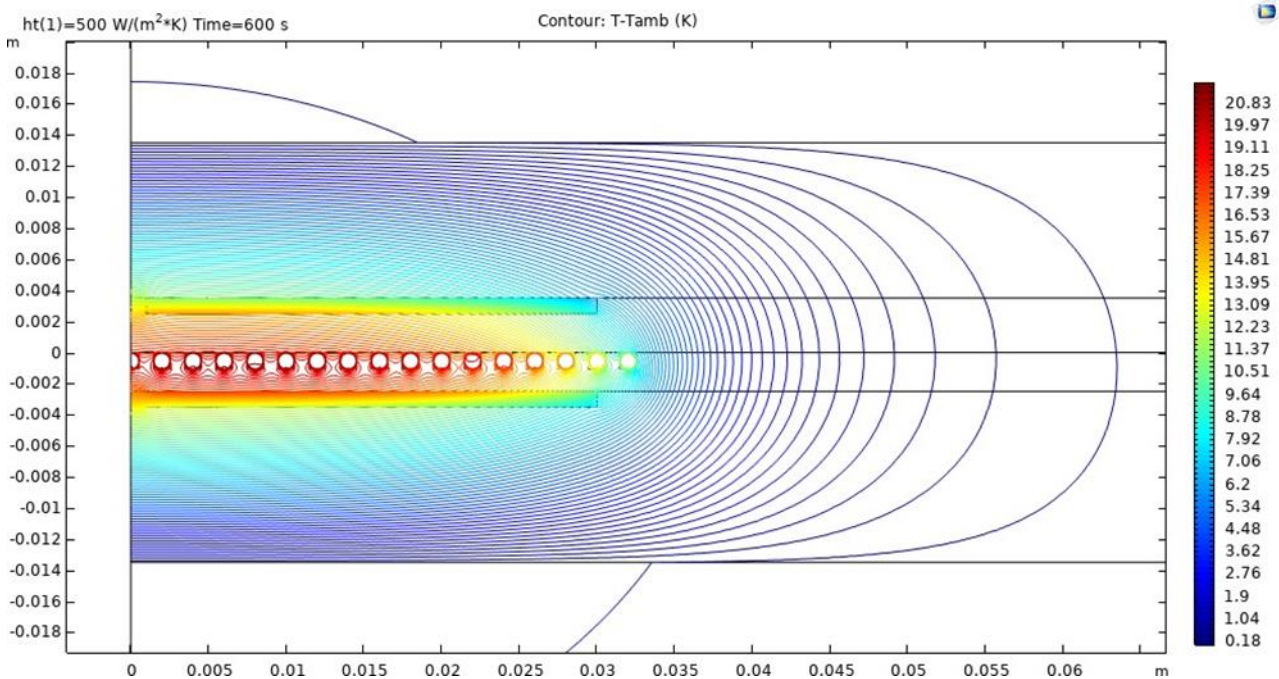


Figure 12: Contour plot dell'incremento di temperatura nella zona centrale del dispositivo, per  $t=600$  s e  $T_0=250$  °C e  $h=500$  W /  $m^2K$ .

Per quanto riguarda la dipendenza dell'errore dalla temperatura iniziale, si osserva lo stesso andamento già evidenziato in precedenza: all'aumentare di questa il risultato sembra essere più accurato. Per  $T_0 = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  si ottiene un errore per difetto pari al 3.53%, mentre per  $T_0 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  si ottiene un errore, sempre per difetto, pari al 2.66%, come mostrato in Figura 13.

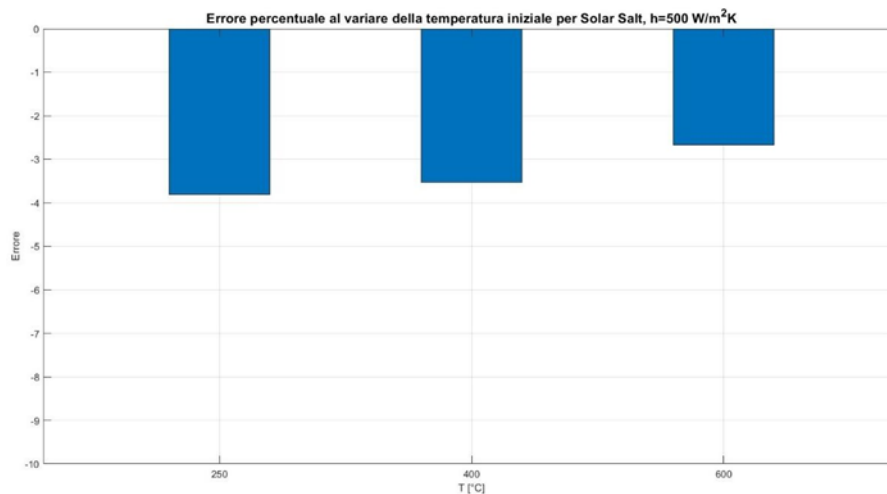


Figure 13: Errore percentuale al variare della temperatura iniziale per  $r=3\text{ mm}$ .

Per quanto riguarda l'olio diatermico, avendo già determinato i tempi necessari per la misura ed una posizione ottimale per le sonde di temperatura, si procede a riportare i risultati esclusivamente per  $t = 2700\text{ s}$  e  $r = 3\text{ mm}$ .

In questo caso, si ottiene un errore per eccesso nella stima della conducibilità termica pari al 10.35%. Il risultato non cambia effettuando le prove con un diverso valore della potenza termica, come già visto nel caso del dispositivo originario. Aumentando la potenza termica a  $P = 20\text{ W}$ , infatti, si ottiene un errore pressoché uguale, pari al 10.8%.

Il fatto che, in questo caso, venga commesso un errore per eccesso può dipendere dal fatto che i due fluidi impiegati, come già menzionato, presentano una dipendenza della conducibilità termica dalla temperatura differente: mentre la conducibilità termica del Solar Salt aumenta all'aumentare della temperatura, quella del Therminol<sup>®</sup> 66 diminuisce.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Al momento nessuna pubblicazione scientifica è risultata dall'attività svolta.

## 10 Eventi di disseminazione

1. Tesi di Laurea Magistrale di Virginia Tumminello, a.a. 2021/2022
2. Presentazione a Congresso Nanoinnovation 2024

## 11 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

Si è partiti dall'analisi di un dispositivo microfluidico ideato da Kuvshinov et al. (\*), che presenta delle caratteristiche utili allo scopo del lavoro (in primis, la capacità di minimizzazione dei moti convettivi), e del quale, dopo un'accurata analisi computazionale, sono stati evidenziati punti deboli e punti di forza. Il punto debole principale si è rivelato essere il fatto di non considerare il contributo dei blocchi di rame nel modello unidimensionale, motivo per il quale è stata proposta una modifica dello stesso.

(\*)Thermal conductivity measurement of liquids in a microfluidic device, Kuvshinov, Dmitriy and Bown, MR and MacInnes, JM and Allen, RWK and Ge, Rile and Aldous, Leigh and Hardacre, Christopher and Doy, Nicola and Newton, MI and McHale, Glen, *Microfluidics and Nanofluidics*,10, 123–132,2011, Springer.