

Ricerca di Sistema elettrico



**Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie
energetiche rinnovabili - Sviluppo di modelli numerici
di sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali
fusi (LA1.16)**

M. Cagnoli, R. Grena, M. Lanchi, G. Vecchi, R. Zanino



**Politecnico
di Torino**

IBRIDIZZAZIONE DEL CSP CON ALTRE TECNOLOGIE ENERGETICHE RINNOVABILI - SVILUPPO DI MODELLI NUMERICI DI SISTEMI INNOVATIVI DI RISCALDAMENTO ELETTRICO DEI SALI FUSI (LA1.16)

M. Cagnoli (Politecnico di Torino), R. Grena (ENEA), M. Lanchi (ENEA), G. Vecchi (Politecnico di Torino), R. Zanino (Politecnico di Torino)

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

Progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.16

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Politecnico di Torino (PoliTO)

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

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: Michela Lanchi

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Prof. Roberto Zanino

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	5
4	PRODOTTI SVILUPPATI	6
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	7
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	18
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	19
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	20

1 Risultati attesi

In accordo con il capitolato, i risultati attesi della linea di attività LA1.16 sono:

- sviluppo di modelli numerici semplificati per il riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante un innovativo sistema basato su induzione/microonde/resistenze;
- supporto al dimensionamento del dispositivo sperimentale per mezzo dei modelli sviluppati.

2 Risultati ottenuti

I risultati attesi per la linea di attività LA1.16 sono stati raggiunti. Infatti, si è sviluppato un modello di un dispositivo sperimentale per il riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante microonde, che tiene conto dei fenomeni elettromagnetici, termici e fluidodinamici che si verificano nel dispositivo. Si è quindi utilizzato il modello per fornire supporto al dimensionamento del dispositivo sperimentale, come descritto in questo report.

3 Prodotti attesi

In accordo con il capitolato di Progetto, i prodotti attesi per la linea di attività LA1.16 sono:

- Il presente report tecnico;
- Modello numerico semplificato di un sistema innovativo di riscaldamento elettrico dei sali fusi. Il modello numerico sarà descritto nel suddetto report tecnico emesso nell'ambito della presente LA1.16.

4 Prodotti sviluppati

In accordo con i prodotti attesi, il prodotto sviluppato nella linea di attività LA1.16 corrisponde al presente report tecnico, che descrive il modello numerico semplificato di un sistema innovativo di riscaldamento elettrico dei sali fusi sviluppato nel corso di questa attività. Il report descrive, inoltre, i risultati ottenuti dal modello di supporto alla parallela progettazione del dispositivo sperimentale (LA1.15).

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nell'ambito della LA1.16, rispetto al capitolato vigente di Progetto, non sono stati riscontrati particolari scostamenti rispetto alle attività e ai risultati.

Si evidenzia tuttavia che, come indicato nel piano di rischio, l'assenza di dati sperimentali per le proprietà elettriche dei sali fusi ad alte temperature ($> 360\text{ }^{\circ}\text{C}$) rappresenta un elemento di incertezza per il modello numerico. La campagna sperimentale prevista nella successiva LA1.17 in carico a ENEA, supportata dalle simulazioni condotte dal Politecnico di Torino nella successiva LA1.18, fornirà indicazioni utili a valutare la bontà delle ipotesi qui introdotte e, nel caso, permetterà di calibrare il modello numerico.

Nell'ambito della LA1.16 non sono stati riscontrati scostamenti economici rispetto al preventivo del capitolato vigente di Progetto.

6 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito della presente linea di attività (LA1.16), il Politecnico di Torino ha sviluppato un modello numerico semplificato di supporto alla progettazione del dispositivo sperimentale in carico all'ENEA (LA1.15) per il riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante microonde. Il modello tiene conto dei fenomeni elettromagnetici, termici e fluidodinamici che si verificano nel dispositivo sperimentale ed è costituito da un modello elettromagnetico accoppiato ad un modello termo-fluidodinamico. Il modello elettromagnetico è stato utilizzato per identificare la configurazione dei parametri di progetto che massimizzi la potenza elettrica dissipata nei sali. Una volta identificata la configurazione più performante, si è realizzata una prima simulazione termo-fluidodinamica per valutare la distribuzione di temperatura dopo un breve transitorio. I risultati suggeriscono l'adozione di una girante per uniformare la temperatura dei sali.

7 Dettaglio delle attività svolte

Nell'ambito della presente linea di attività (LA1.16), il Politecnico di Torino ha sviluppato un modello numerico semplificato di supporto alla progettazione del dispositivo sperimentale in carico all'ENEA nella parallela linea di attività LA1.15. Tale dispositivo sperimentale si propone di verificare la fattibilità tecnologica di un innovativo sistema di riscaldamento elettrico dei sali fusi basato sulle microonde.

Ad oggi, la tecnologia più matura per la conversione dell'energia elettrica in calore è rappresentata dalle resistenze elettriche; si veda ad esempio [1]. Lo scambio termico avviene sulla superficie delle resistenze e, all'aumentare della potenza elettrica scaricata, si possono formare punti caldi tali da causare il deterioramento dei sali fusi. Per ovviare a questo limite sulla potenza scaricabile, è possibile adottare un sistema di riscaldamento elettrico basato sulle microonde o l'induzione, che realizzano uno scambio termico di tipo volumetrico. Nel corso della LA1.15, l'ENEA ha identificato il riscaldamento elettrico mediante microonde come il miglior compromesso tra prestazioni, maturità della tecnologia e fattibilità del dispositivo sperimentale.

Il dispositivo sperimentale, schematizzato in Figura 1, è costituito da

- un generatore di microonde da 3 kW, con frequenza 2.45 GHz
- una guida d'onda del tipo WR340, dotata di un raccordo curvo a 90° e di una finestra ceramica che separa il volume d'aria nella guida d'onda da quello contenuto nel serbatoio
- un serbatoio di forma cilindrica, di altezza pari a 500 mm, parzialmente riempito con una miscela di sali fusi (Solar Salt: 60% NaNO₃, 40% KNO₃ in peso)

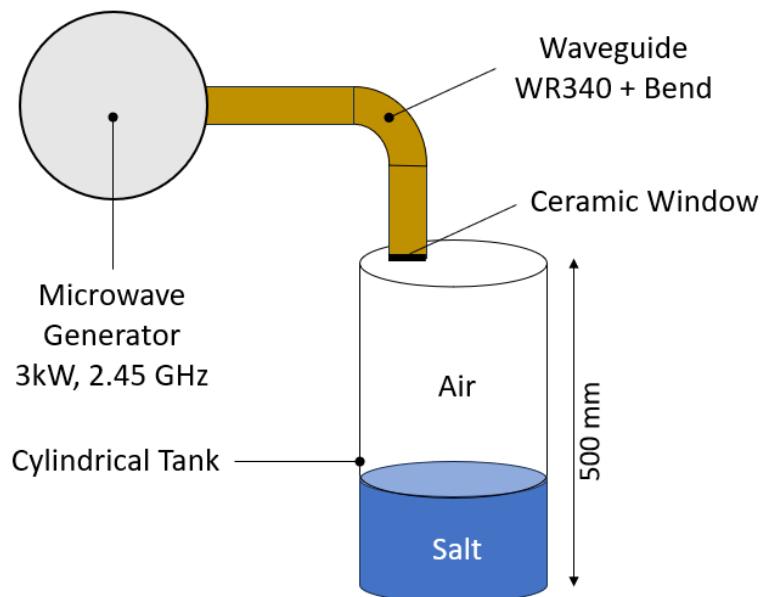


Figura 1. Schema del dispositivo sperimentale progettato nella parallela linea di attività LA1.15

Il modello numerico, sviluppato con COMSOL, intende simulare i fenomeni elettromagnetici, fluidodinamici e termici che si verificano nel dispositivo sperimentale. A tal fine, si costruisce un modello elettromagnetico accoppiato ad un modello termo-fluidodinamico (paragrafo 7.1). Il modello elettromagnetico risolve le equazioni di Maxwell nel dominio computazionale costituito da una porzione rappresentativa della guida d'onda e dal serbatoio cilindrico, calcolando la potenza dissipata dalle microonde nei sali. Il modello termo-fluidodinamico risolve le equazioni di conservazione della massa, quantità di moto ed energia nel solo volume

dei sali fusi, imponendo, come forzante termica, il carico termico volumetrico calcolato dal modello elettromagnetico.

Il modello elettromagnetico è stato utilizzato per identificare la configurazione dei parametri di progetto che massimizza il valore assoluto del coefficiente di riflessione, si veda il paragrafo 7.2. Una volta identificata la configurazione più performante, si è realizzata una prima simulazione termo-fluidodinamica per valutare la distribuzione di temperatura dopo un breve transitorio (paragrafo 7.3).

7.1 Descrizione del modello numerico

7.1.1 Modello elettromagnetico

Il dominio computazionale e le condizioni al contorno adottate nel modello elettromagnetico sono mostrati in Figura 2a. Il dominio computazionale corrisponde a metà dispositivo sperimentale in virtù della simmetria geometrica. Le pareti del serbatoio cilindrico, in acciaio, sono sostituite da una condizione al contorno di impedenza elettrica, mentre le pareti della guida d'onda, tipicamente in rame o ramate, si approssimano a conduttori elettrici perfetti. La forzante elettromagnetica applicata è una porta rettangolare di tipo TE₁₀ con potenza totale di 3 kW e frequenza pari a 2.45 GHz.

La griglia di calcolo adottata è di tipo estruso, a partire dalla mesh generata sulla superficie superiore del serbatoio, mediante elementi triangolari. Il numero totale di celle è circa 7×10^5 . Figura 2b mostra un particolare della griglia di calcolo generata.

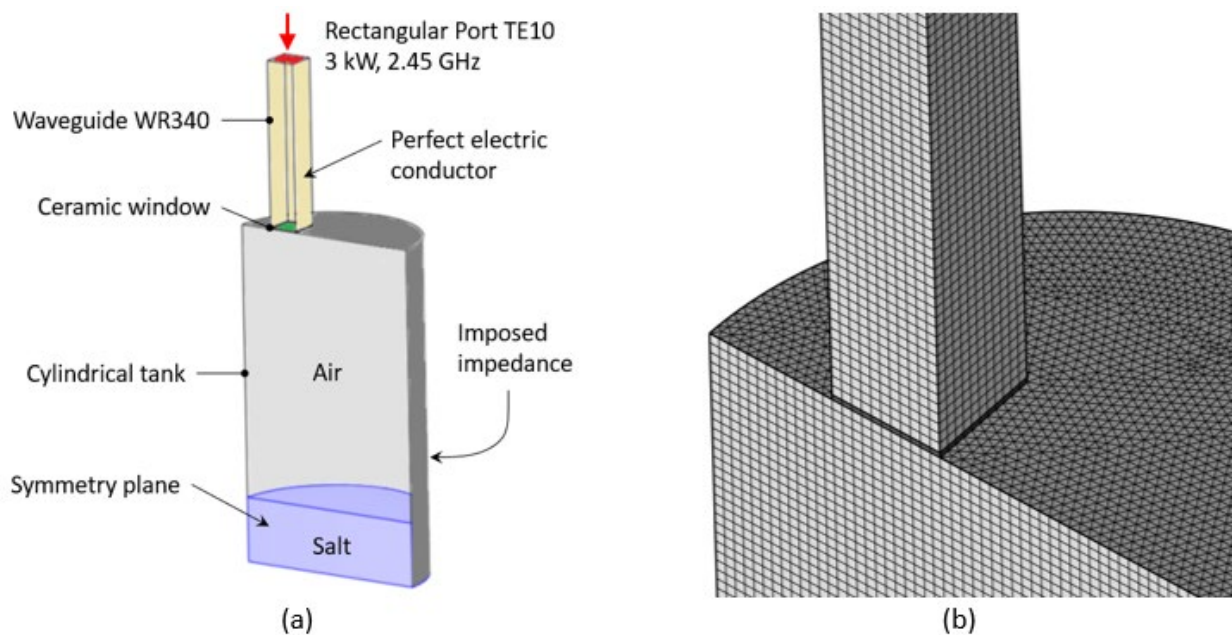


Figura 2. (a) Dominio computazionale e condizioni al contorno applicate al modello elettromagnetico e (b) particolare della griglia di calcolo generata

L'aria si assume trasparente alla radiazione elettromagnetica, così come la finestra ceramica. Per i sali fusi, si considera la permittività elettrica (ϵ) misurata in [2] al variare della temperatura. L'intervallo massimo operativo per la miscela dei sali è nel range di temperatura 260 – 620 °C [3]. Tuttavia, le misure sperimentali disponibili in letteratura arrivano fino a 360 °C [2], molto al di sotto della temperatura massima operativa; ciò introduce una incertezza sul comportamento dei sali a temperature più alte. La permittività elettrica nell'intervallo 260-360°C varia poco (Figura 3); per cui nel modello si assume una permittività costante pari

al valor medio dei dati sperimentali ($\varepsilon = 16.4 - 1.06j$). Si osserva che, con l'ipotesi di permittività costante, il modello elettromagnetico non risente della temperatura dei sali, calcolata dal modello termo-fluidodinamico.

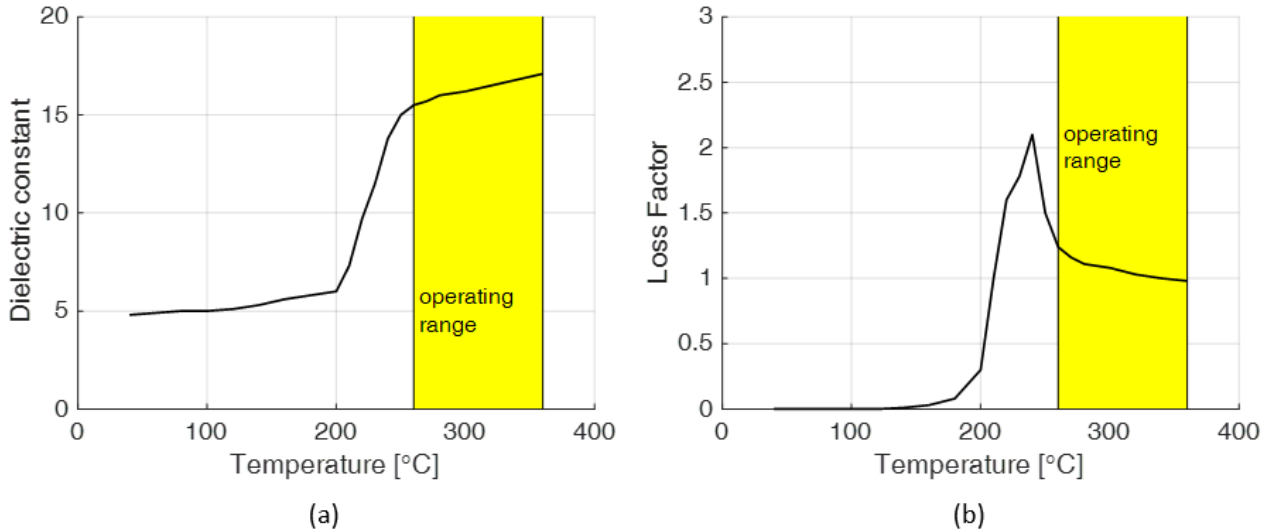


Figura 3. Permittività elettrica della miscela di sali al variare della temperatura [2], con evidenziata la regione operativa dei sali fusi coperta dai dati sperimentali (260 – 360 °C): (a) costante dielettrica, che corrisponde alla parte reale della permittività e (b) fattore di perdita, che è la parte immaginaria

Il modello elettromagnetico risolve le equazioni di Maxwell nel dominio computazionale permettendo di determinare (1) la potenza dissipata nella miscela di sali e (2) il coefficiente di riflessione, o scattering-parameter, che misura, in dB, la quota parte di onde elettromagnetiche riflesse indietro attraverso la porta. La potenza dissipata nei sali viene fornita come dato di input al modello termo-fluidodinamico.

7.1.2 Modello termo-fluidodinamico

Il dominio computazionale del modello dinamico termo-fluidodinamico include il solo volume dei sali fusi; si considera solo metà dominio in virtù della simmetria geometrica e del carico termico. Per quanto riguarda le condizioni al contorno, il pelo libero dei sali si rappresenta come una parete libera di slittare, mentre, dal punto di vista termico, tutte le superfici sono considerate adiabatiche. Tale ipotesi semplificativa si giustifica in quanto le pareti esterne del serbatoio saranno adeguatamente isolate. La forzante termica corrisponde ad una sorgente volumetrica di energia non uniforme, che si ottiene dal modello elettromagnetico. Figura 4a mostra il dominio computazionale con le condizioni al contorno applicate.

Il modello include le forze di galleggiamento innescate dalla convezione naturale mediante l'approssimazione di Boussinesq, che considera i gradienti di densità solo nelle forze volumetriche di gravità nell'equazione di conservazione della quantità di moto, mentre si assume una densità costante nei rimanenti termini delle equazioni di conservazione. Il regime di moto si assume laminare, in virtù delle basse velocità attese. Le proprietà termofisiche dei sali fusi, in funzione della temperatura, si ricavano da [3].

La griglia di calcolo consiste di celle tetraedriche con trattamento a parete (5 layers) per l'accurata soluzione dei gradienti termici e fluidodinamici. Il numero totale di celle è di circa 3.6×10^5 . Figura 4b mostra un particolare della griglia generata.

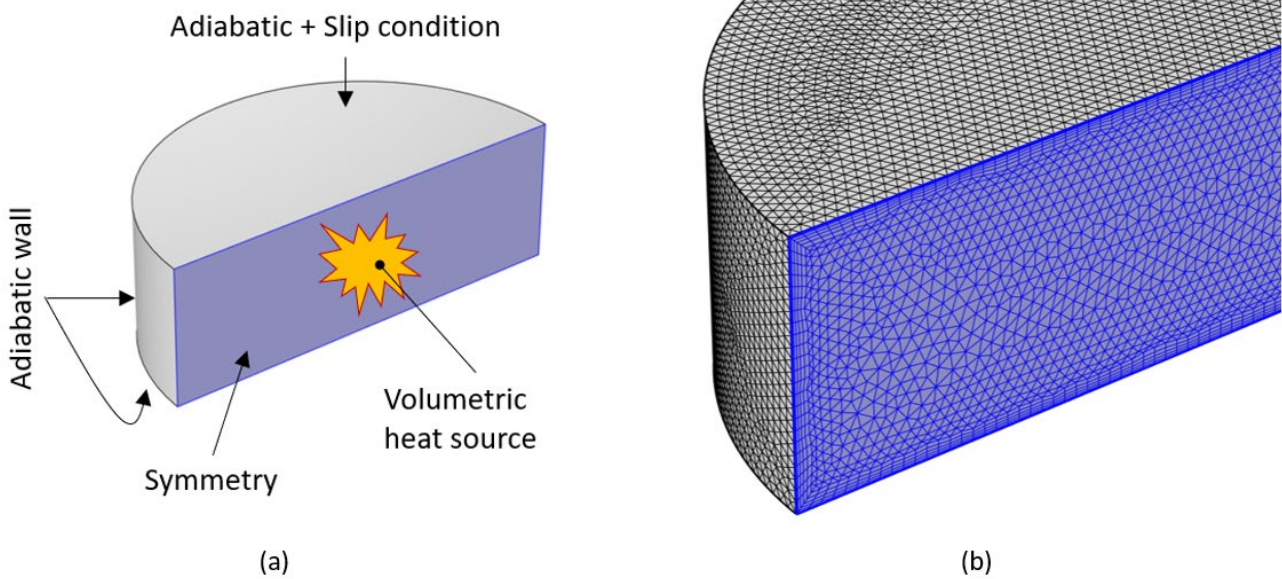


Figura 4. (a) Dominio computazionale del modello termo-fluidodinamico, coincidente con il volume dei Sali fusi, e condizioni al contorno applicate. (b) Particolare della griglia di calcolo adottata

Il modello termo-fluidodinamico permette di studiare la distribuzione della temperatura dei sali fusi e la sua evoluzione nel tempo.

7.2 Studio parametrico: Effetto dei parametri di progetto sulle prestazioni elettromagnetiche del dispositivo sperimentale

Il modello elettromagnetico è stato utilizzato per valutare l'effetto dei parametri di progetto sull'efficienza del dispositivo sperimentale nel dissipare nei sali l'energia associata alle microonde. L'efficienza viene misurata in termini di coefficiente di riflessione (scattering-parameter). I parametri di progetto considerati in questo studio, e il corrispondente spazio dei parametri esaminato, sono riassunti in Tabella 1; l'altezza del serbatoio è fissa, pari a 500 mm.

In aggiunta ai parametri in Tabella 1, si considera anche la presenza (o meno) di una griglia metallica, posizionata in corrispondenza del pelo libero dei sali, che delimita la zona in cui propagano le microonde. Infatti, una griglia metallica con i fori sufficientemente piccoli agisce come una parete solida per le microonde. Nel caso si consideri la griglia metallica, il modello descritto nel paragrafo 7.1.1 viene ulteriormente semplificato, riducendo il dominio computazionale alla sola guida d'onda e al volume dei sali, non essendo possibile per le microonde propagare nel volume di aria sopra i sali.

Tabella 1. Parametri di progetto considerati e spazio dei valori dei parametri esaminato

Parametro	Valori	Note
Diametro del serbatoio	200, 241.4, 282.8 mm	Rispetto a 200 mm, un diametro di 282.8 mm duplica il volume del serbatoio. 241.4 mm è il valore medio tra i precedenti due.
Posizione verticale della porta d'uscita della guida d'onda	Immersa nei sali (75 %), immersa nei sali (50 %), sul pelo libero dei sali, a filo del serbatoio (sopra i sali). Si veda Figura 5	La finestra ceramica è sempre posizionata presso la porta d'uscita
Posizione orizzontale della porta d'uscita della guida d'onda	Sull'asse del serbatoio, ad una distanza pari a metà del raggio ($r/2$) dall'asse del serbatoio. Si veda Figura 5	La finestra ceramica è sempre posizionata presso la porta d'uscita
Volume dei sali	6, 12 litri	6 litri corrisponde ad un bilancio di energia preliminare; ridurre tale valore aumenterebbe il rischio di punti caldi nei sali

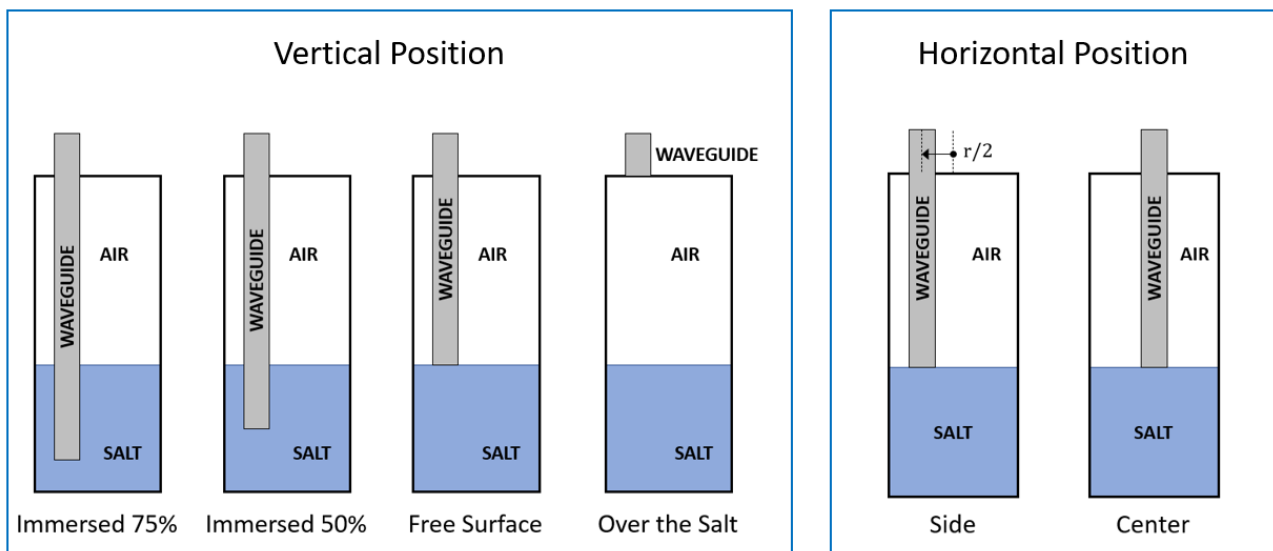


Figura 5. Posizioni verticali (sinistra) e orizzontali (destra) della porta di uscita della guida d'onda considerate nel presente studio parametrico

Figura 6 mostra il valore calcolato del coefficiente di riflessione al variare della posizione verticale ed orizzontale della guida d'onda, con e senza la griglia metallica. Il volume dei sali è qui fissato a 6 litri e il diametro del serbatoio a 200 mm. Nel caso con la guida d'onda a filo del serbatoio (sopra i sali), non è possibile applicare la griglia metallica, che altrimenti schermerebbe i sali dalle microonde. Un coefficiente di riflessione maggiore, in valore assoluto, indica una minore quantità di onde elettromagnetiche riflesse indietro attraverso la porta. Si osserva che spostando la guida d'onda verso l'alto la prestazione del sistema migliora; in particolare, l'incremento più significativo si ha spostando la porta di uscita a filo del serbatoio. Ciò si spiega osservando Figura 7: il volume di aria sopra i sali aiuta a diffondere le microonde, uniformando il campo elettrico, prima che le onde elettromagnetiche raggiungano i sali fusi, riducendo in questo modo la frazione di potenza riflessa indietro. Per questo motivo, si esclude l'uso della griglia metallica, non applicabile nel caso di guida d'onda a filo del serbatoio. La posizione orizzontale della guida d'onda non comporta

variazioni apprezzabili, ad eccezione del caso della guida d'onda sopra i sali. Infatti, la posizione della finestra d'uscita della guida d'onda impatta sulle riflessioni che avvengono sulle pareti del serbatoio nel volume di aria sopra i sali. La posizione laterale della guida d'onda risulta più performante.

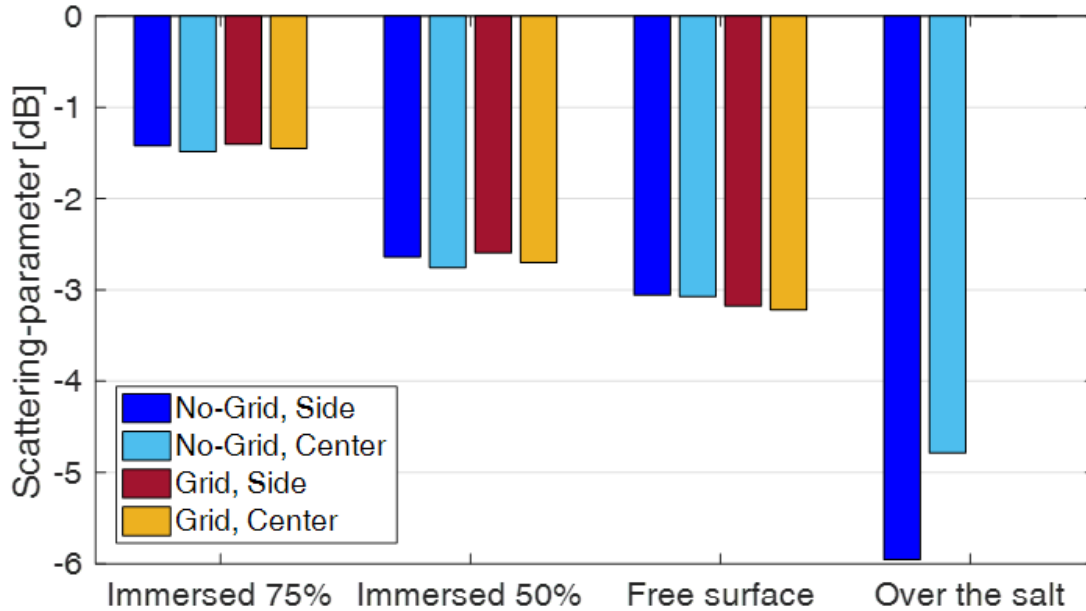


Figura 6. Valore calcolato del coefficiente di riflessione (scattering-parameter) al variare della posizione verticale ed orizzontale della guida d'onda e della presenza o meno della griglia metallica posizionata sul pelo libero dei sali. Quest'ultima non può essere utilizzata nel caso di guida d'onda sopra i sali

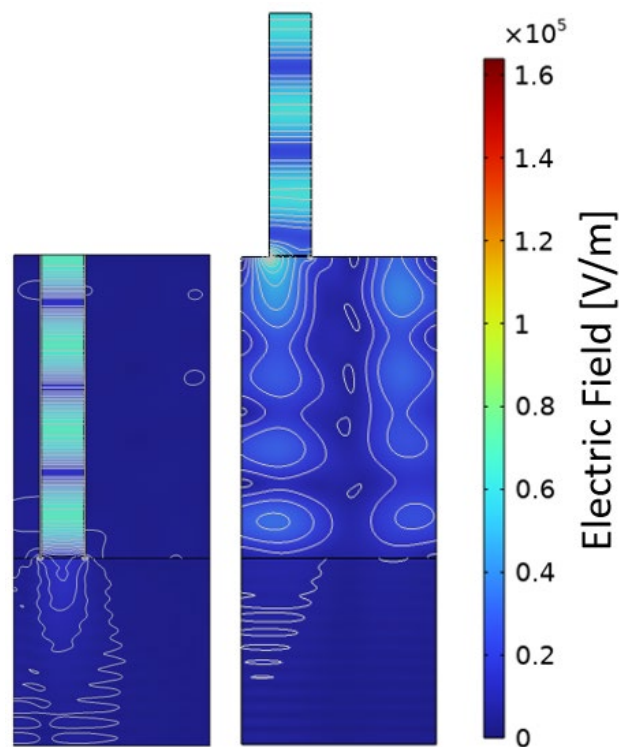


Figura 7. Campo elettrico calcolato nel caso di guida d'onda laterale sul pelo libero dei sali e sopra i sali, senza la griglia metallica. Nel caso di guida d'onda sopra i sali, che il campo elettrico diffonde nel volume di aria sopra i sali fusi

Figura 8 mostra il valore calcolato del coefficiente di riflessione al variare del diametro del serbatoio e del volume dei sali fusi. All'aumentare del diametro si osserva un andamento non monotono del coefficiente di riflessione; tuttavia, si osserva che per il valore massimo del diametro le prestazioni aumentano in modo significativo. Ciò si deve al maggiore volume di aria sopra i sali che aiuta ad uniformare il campo elettrico riducendo la quota di potenza riflessa (Figura 7). Per la stessa ragione, aumentare il volume dei sali (ovvero ridurre il volume di aria) non porta alcun beneficio.

Si conclude quindi che la configurazione che massimizza la prestazione del dispositivo sperimentale corrisponde al caso di diametro massimo (282.8 mm), volume dei sali pari a 6 litri e guida d'onda posizionata sul lato, a filo del serbatoio, senza griglie metalliche.

In aggiunta, l'analisi dei risultati evidenzia che presso la porta d'uscita della guida d'onda si origina un picco del campo elettrico a causa della discontinuità geometrica (Figura 9). Presso la porta di uscita è anche collocata la finestra ceramica; spostando la finestra ceramica verso l'alto di almeno una lunghezza d'onda, allontanandola dalla discontinuità geometrica, si traduce in un netto miglioramento delle prestazioni. Il coefficiente di riflessione passa da circa -12.5 dB a circa 26.5 dB.

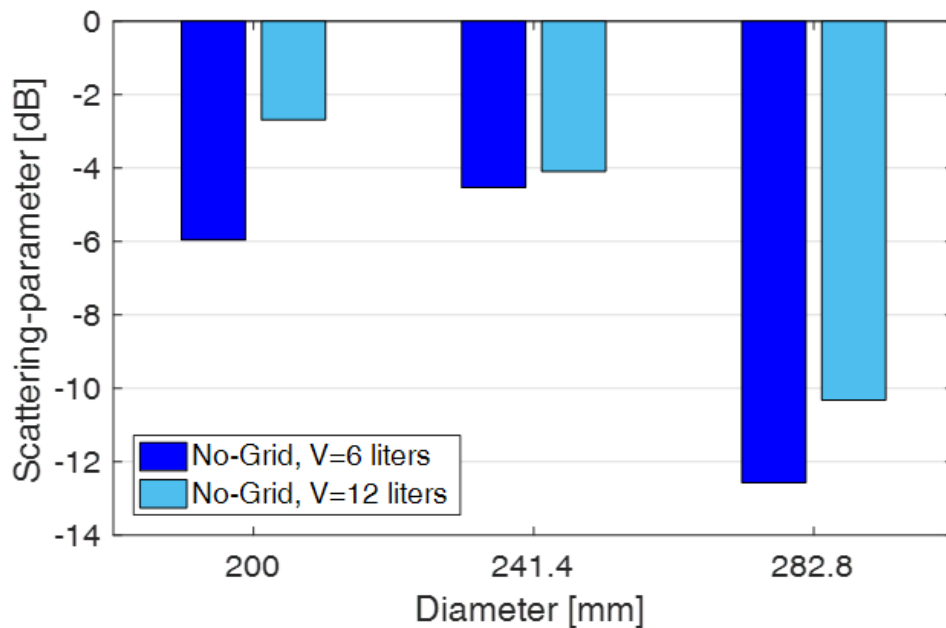


Figura 8. Valore calcolato del coefficiente di riflessione (scattering-parameter) al variare del diametro del serbatoio e del volume dei sali fusi

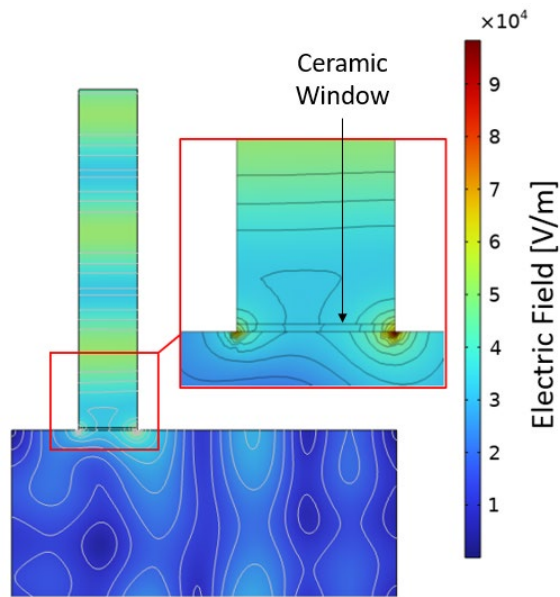


Figura 9. Particolare del campo elettrico presso la porta di uscita della guida d'onda nella configurazione più performante del dispositivo sperimentale

7.3 Distribuzione di temperatura nei sali

Considerando la configurazione del dispositivo sperimentale più promettente (paragrafo 7.2), si procede, mediante il modello termo-fluidodinamico, a valutare la distribuzione di temperatura alla fine di un transitorio di 7 minuti. A tal fine, si considerano i sali inizialmente fermi alla temperatura di 280 °C. La forzante termica è mostrata in Figura 10a, si osserva che la maggior parte della potenza viene dissipata negli strati più alti del volume dei sali. Come conseguenza, la distribuzione della temperatura (Figura 10b) ha un gradiente dall'alto verso il basso che inibisce il miscelamento per convezione naturale. A fronte di questi risultati si suggerisce l'adozione di una girante nel volume dei sali per uniformare la temperatura.

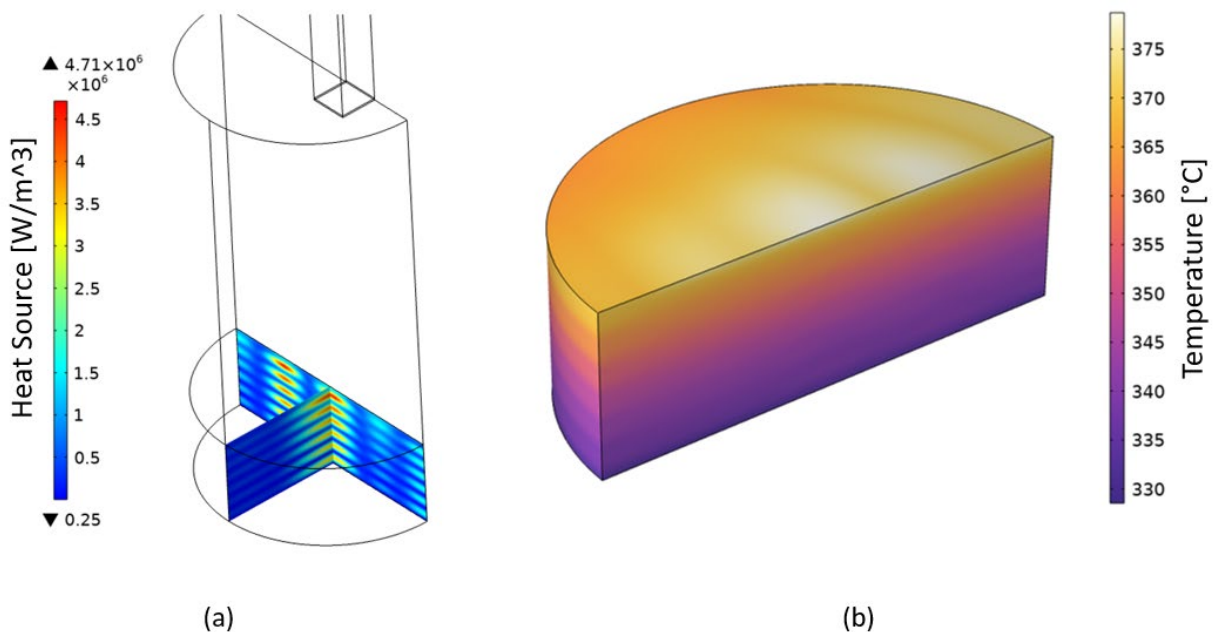


Figura 10. (a) Sorgente volumetrica di energia termica dal modello elettromagnetico. (b) Distribuzione di temperatura nei sali dopo 7 minuti di transitorio

7.4 Bibliografía

- [1] K. J. Riffelmann, G. Weinrebe, and M. Balz, "Hybrid CSP-PV plants with integrated thermal storage," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2445, pp. 030020-1–9, 2022.
- [2] M. M. Rodríguez-García, R. Bayón, E. Alonso, and E. Rojas, "Experimental and Theoretical Investigation on Using Microwaves for Storing Electricity in a Thermal Energy Storage Medium," in *SolarPACES 2021 proceedings*, 2021.
- [3] A. Zavoico, "Solar Power Tower: Design Basis Document - Report SAND2001-2100," San Francisco, California, USA, 2001.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze nell'ambito della LA1.16

9 Pubblicazioni scientifiche

E' stato sottomesso e accettato a conferenza internazionale n° 1 abstract avente per oggetto i risultati ottenuti nella presente linea di attività LA1.16:

- M. Cagnoli, R. Grena, M. Lanchi, G. Napoli, G. Vecchi, R. Zanino, "Numerical Modelling of a Lab-Scale Device for Studying the Microwave Heating of the Solar Salt for Thermal Storage Applications", 29th SolarPACES Conference (2023), abstract accepted.

All'elaborazione dell'abstract ha collaborato l'ENEA nell'ambito della LA1.15.

10 Eventi di disseminazione

E' stato sottomesso e accettato a conferenza internazionale n° 1 poster avente per oggetto i risultati ottenuti nella presente linea di attività LA1.16:

- M. Cagnoli, R. Grena, M. Lanchi, G. Napoli, Mehdi Shokrnia, G. Vecchi, R. Zanino, "Numerical Modelling of a Lab-Scale Device for Studying the Microwave Heating of the Solar Salt for Thermal Storage Applications", 29th SolarPACES Conference (2023), poster accepted.

All'elaborazione del poster ha collaborato l'ENEA nell'ambito della LA1.15.