

# Ricerca di Sistema elettrico



Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo su scala di laboratorio per il riscaldamento elettrico dei sali fusi (LA1.17)

M. Cagnoli, M. D'Auria, R. Grena, M. Lanchi, V. Lopresto, G. Napoli

Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo su scala di laboratorio per il riscaldamento elettrico dei sali fusi (LA1.17)

M. Cagnoli (ENEA), M. D'Auria (ENEA), R. Grena (ENEA), M. Lanchi (ENEA), V. Lopresto (ENEA), G. Napoli (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: LA1.17

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Michela Lanchi, ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

## 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	Descrizione del dispositivo sperimentale .....	10
7.2	Caratterizzazione termica del dispositivo sperimentale.....	12
7.3	Caratterizzazione elettromagnetica del dispositivo sperimentale .....	13
7.4	Prove di riscaldamento elettrico dei sali mediante microonde .....	14
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	19
9	Pubblicazioni scientifiche .....	20
10	Eventi di disseminazione .....	21

## Indice delle figure

Figura 1. Dispositivo sperimentale installato presso i laboratori del C.R. ENEA di Casaccia ...	10
Figura 2. Schema del dispositivo sperimentale installato presso i laboratori del C.R. ENEA di Casaccia.....	11
Figura 3. Schema della disposizione delle termocoppie: (a) posizione assiale e radiale e (b) posizione lungo la direzione azimutale.....	12
Figura 4. Caratterizzazione delle perdite termiche dal dispositivo sperimentale in funzione della temperatura dei sali, al netto della temperatura ambiente .....	13
Figura 5. Potenza riflessa misurata in funzione della frequenza di emissione delle microonde e della temperatura media della miscela di sali.....	14
Figura 6. Test A: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde.....	16
Figura 7. Test B: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde.....	16
Figura 8. Test C: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde.....	17
Figura 9. Test D: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde.....	17
Figura 10. Test A: temperatura dei sali misurata durante le pulsate eseguite con il generatore di microonde. Le fasce evidenziate in giallo corrispondono agli intervalli in cui il generatore è stato spento .....	18
Figura 11. Test C: temperatura dei sali misurata durante le pulsate eseguite con il generatore di microonde. Le fasce evidenziate in giallo corrispondono agli intervalli in cui il generatore è stato spento .....	18

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Elenco dei test eseguiti con le microonde.....	15
---	----

## 1 Risultati attesi

L'integrazione di impianti solari a concentrazione (CSP) con altre fonti rinnovabili, come l'eolico e il fotovoltaico, può contribuire ad aumentare in modo significativo la quota di energia rinnovabile immessa in rete. Gli impianti CSP, infatti, grazie ai sistemi di accumulo termico, possono svolgere un ruolo attivo nella stabilizzazione dei flussi energetici nelle reti di distribuzione con un'elevata penetrazione di fonti rinnovabili non programmabili. In particolare, i sistemi di accumulo del CSP, oltre all'energia termica, possono immagazzinare l'elettricità in eccesso prodotta da altre fonti rinnovabili non programmabili attraverso l'integrazione di sistemi di conversione elettro-termica nei serbatoi di accumulo. Nel caso di accumuli termici a sali fusi, comunemente utilizzati nella tecnologia CSP per la loro elevata densità energetica, basso costo e facile reperibilità, la modalità più diretta per la conversione elettro-termica dell'elettricità in eccesso è l'impiego di sistemi resistivi che dissipino l'elettricità in calore. La presente linea di attività si propone di realizzare e testare sperimentalmente una soluzione tecnica innovativa, identificata nel contesto della LA1.15, che utilizza le micro-onde per ottenere un riscaldamento volumetrico dei sali fusi. Tale approccio mira a superare le limitazioni di potenza massima associate ai sistemi di riscaldamento resistivo.

In particolare, in accordo con il capitolato di Progetto, i risultati attesi nell'ambito della linea di attività LA 1.17 sono i seguenti:

- realizzazione di un dispositivo sperimentale su scala di laboratorio per il testing del riscaldamento elettrico dei sali fusi ad elevate prestazioni (elevata rapidità di carica e omogeneità di temperatura);
- esecuzione di test preliminari sul dispositivo sperimentale per la verifica della funzionalità dei sottosistemi (elettrici/controllo);
- svolgimento della campagna sperimentale sul dispositivo sopra menzionato al fine di identificare le caratteristiche di funzionamento della soluzione ingegneristica proposta, valutando tempi di risposta del volume di controllo, potenza elettrica massima scaricabile per unità di massa dei sali fusi e omogeneità del meccanismo di riscaldamento.

## 2 Risultati ottenuti

I risultati attesi per la linea di attività LA1.17 sono stati pienamente raggiunti. In particolare, il dispositivo sperimentale progettato nell'ambito della linea di attività LA1.15 è stato realizzato e installato presso la hall tecnologica F23 del Centro Ricerche ENEA di Casaccia.

La progettazione del dispositivo è stata supportata dall'attività modellistica portata avanti nell'ambito della LA1.16. Il dispositivo sperimentale è stato inizialmente sottoposto alla verifica della funzionalità dei diversi sottosistemi di impianto, quali il sistema elettrico, il sistema di acquisizione dati e controllo, e il circuito di raffreddamento. Successivamente è stata avviata un'articolata campagna sperimentale, i cui risultati sono riportati nel presente report, al fine di verificare la fattibilità tecnica della soluzione proposta ed individuarne preliminarmente le prestazioni e gli eventuali limiti.

In aggiunta a quanto previsto dal capitolato di Progetto, l'attività condotta nella presente LA1.17 (e LA collegate), ha permesso di elaborare una prima proposta di accumulo termico con integrata la tecnologia di riscaldamento elettrico mediante microonde. Tale studio è stato oggetto di un articolo scientifico che sarà sottoposto ad una rivista internazionale per la pubblicazione (si veda la sezione Pubblicazioni scientifiche<sup>9</sup> del presente report).

### 3 Prodotti attesi

Coerentemente con il capitolato di Progetto, i prodotti attesi nell'ambito della linea di attività LA 1.17 sono i seguenti:

- N° 1 Report tecnico: “Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo su scala di laboratorio per il riscaldamento elettrico dei sali fusi” .
- N° 1 dispositivo sperimentale per il riscaldamento elettrico ad alta efficienza dei sali fusi. esecuzione di test preliminari sul dispositivo sperimentale per la verifica della funzionalità dei sottosistemi (elettrici/controllo).

## 4 Prodotti sviluppati

Come previsto nel capitolato di Progetto, i prodotti sviluppati nella LA1.17 sono costituiti dal presente report tecnico e da un dispositivo sperimentale:

- M. Cagnoli, M. D'Auria, R. Grena, M. Lanchi, V. Lopresto, G. Napoli, "Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo su scala di laboratorio per il riscaldamento elettrico dei sali fusi", Dicembre 2024, Report RdS\_PTR 22-24\_PR1.9\_LA1.17\_307.
- Dispositivo sperimentale per il riscaldamento elettrico ad alta efficienza dei sali fusi realizzato, installato e testato presso il Centro Ricerche ENEA di Casaccia.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il lavoro svolto nell'ambito della presente Linea di attività è stato articolato nelle seguenti fasi: (i) realizzazione del dispositivo sperimentale per il riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante micro-onde presso il C.R. ENEA di Casaccia; (ii) verifica della funzionalità dei sottosistemi dell'impianto, principalmente costituito da un generatore di micro-onde e un serbatoio di sali fusi; (iii) caratterizzazione termica del serbatoio contenente i sali fusi; (iv) caratterizzazione elettromagnetica del serbatoio contenente i sali fusi; (v) prove di riscaldamento elettrico dei sali fusi attraverso le micro-onde. La principale difficoltà riscontrata nello svolgimento delle attività sperimentali ha riguardato la gestione del circuito integrato generatore di micro-onde/serbatoio sali fusi, con problemi principalmente associati al controllo del loop di raffreddamento. Tali criticità sono state comunque efficacemente risolte, e non hanno comportato ritardi significativi nel completamento della campagna sperimentale. Non sono quindi evidenziabili scostamenti tecnici rispetto alle attività previste o ai risultati attesi.

In merito agli scostamenti economici, i costi totali (escluse spese generali) sostenuti e rendicontati per l'esecuzione della LA1.17, pari a circa 100,9 k€, sono minori rispetto a quelli a preventivo, pari a circa 109,1 k€. Le principali motivazioni degli scostamenti sono:

- I costi di personale (cat. A) a consuntivo, pari a circa 67,9 k€, sono minori del preventivo, pari a 70,2 k€, in quanto ENEA ha sostenuto ma non ha potuto esporre a consuntivo, causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato vigente di Progetto, ulteriori circa 9,1 k€ di costi di personale dovuti, tra l'altro, al nuovo inquadramento giuridico-economico, con passaggio da ricercatore (costo std. Liv. Medio) a primo ricercatore (costo std. Liv. Alto), di n° 5 unità di personale rendicontate nella LA1.17.
- I costi di esercizio (cat. C) a consuntivo, pari a circa 23,3 k€, sono minori del preventivo, pari a 29,8 k€, per una miglior quantificazione dell'importo stimato di acquisto ed economie ottenute nella procedura di affidamento dell'appalto relativo alla fornitura del serbatoio, inclusi materiali accessori, per la realizzazione del dispositivo sperimentale per il riscaldamento elettrico dei sali fusi mediante micro-onde.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.17, è stato realizzato, installato e caratterizzato sperimentalmente il dispositivo di laboratorio, progettato nella precedente LA1.15, per valutare l'efficacia del riscaldamento a microonde dei sali fusi. La campagna sperimentale è stata articolata in tre fasi: (i) caratterizzazione termica del serbatoio contenente sali fusi; (ii) caratterizzazione elettromagnetica dello stesso serbatoio; (iii) prove di riscaldamento elettrico dei sali fusi attraverso micro-onde.

I risultati ottenuti hanno confermato la fattibilità tecnica della soluzione proposta. In particolare, è stata riscontrata una potenza elettrica dissipata nei sali di circa 100 W/kg (valore che può essere incrementato in condizioni operative ottimali) e una velocità di riscaldamento superiore del 37% rispetto all'uso delle resistenze elettriche. Inoltre, dalle prove è emerso che la distribuzione della potenza dissipata nei sali non è uniforme, con un gradiente verticale che diminuisce con la quota, come previsto dai modelli sviluppati nella LA1.16.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

La presente linea di attività LA1.17, insieme alle linee LA1.15, LA1.16 e LA1.18, confluisce nella linea di ricerca sui "sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili". Nell'ambito della presente linea di attività LA1.17, è stato realizzato, installato e caratterizzato sperimentalmente il dispositivo sperimentale su scala di laboratorio ideato e progettato nel corso della precedente LA1.15. Tale dispositivo consente di osservare il fenomeno del riscaldamento elettrico dei sali mediante microonde.

In questo documento viene presentato il dispositivo sperimentale installato presso il C.R. ENEA di Casaccia (sezione 7.1), la caratterizzazione sperimentalmente del dispositivo dal punto di vista termico (sezione 7.2) ed elettrico (sezione 7.3) ed infine le prove sperimentalmente di riscaldamento elettrico dei sali mediante microonde (sezione 7.4).

### 7.1 Descrizione del dispositivo sperimentale

Il dispositivo sperimentale, ideato nell'ambito della LA1.15, è realizzato/installato presso i laboratori del C.R. ENEA di Casaccia, si veda Figura 1. In Figura 2, è rappresentato uno schema funzionale dell'impianto. L'impianto consiste in un generatore di microonde da 3 kW con frequenza di  $2450 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$  collegato, mediante una guida d'onda, ad un serbatoio cilindrico parzialmente riempito con 12 kg di una miscela di sali binari (Solar Salt). Il generatore di microonde è stato sostituito, in alcune fasi dell'attività sperimentalmente, da un analizzatore di rete (VNA) per caratterizzare il comportamento elettromagnetico del serbatoio come cavità risonante.



Figura 1. Dispositivo sperimentale installato presso i laboratori del C.R. ENEA di Casaccia

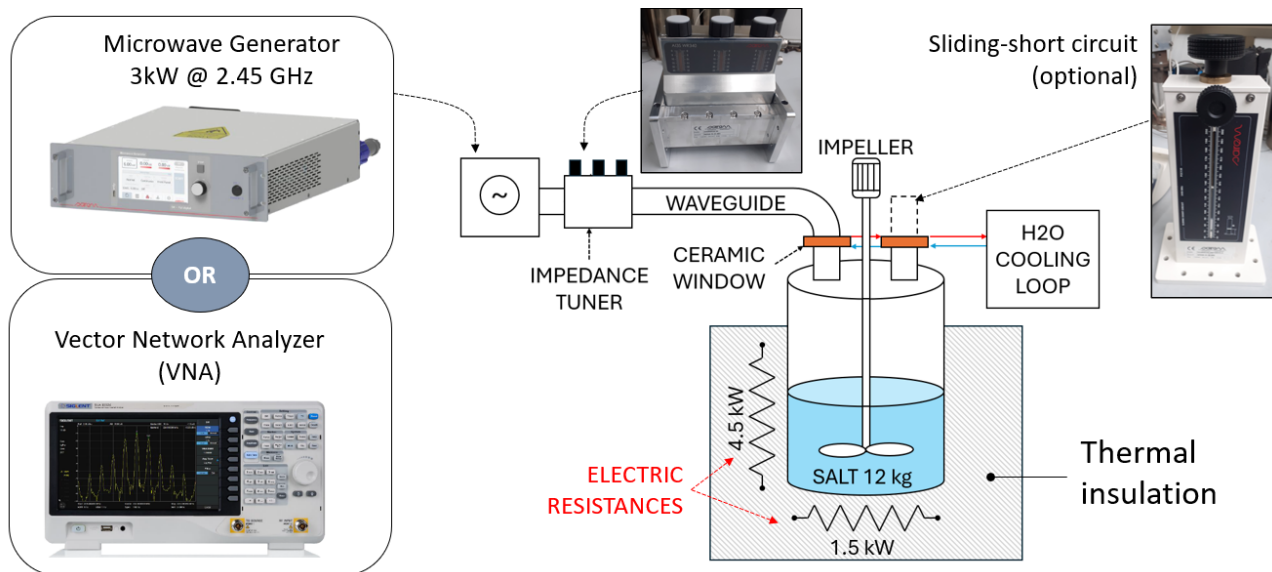


Figura 2. Schema del dispositivo sperimentale installato presso i laboratori del C.R. ENEA di Casaccia

Il circuito, inoltre, comprende anche uno sliding short circuit, ovvero un dispositivo utile a regolare il coefficiente di riflessione elettromagnetico nella cavità, ed un impedance tuner, ossia un regolatore dell'impedenza elettromagnetica del circuito costituito dalla guida d'onda e dalla cavità risonante, montato a valle del generatore di microonde. Tuttavia, lo sliding short circuit non è stato utilizzato nel corso della campagna sperimentale della LA1.17 alla luce dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche eseguite nella parallela LA1.18, che hanno evidenziato come il suo impatto sia trascurabile nel dispositivo qui realizzato.

Riguardo al serbatoio cilindrico contenente i sali binari, esso è provvisto dei seguenti elementi:

- flange sulla calotta superiore per il collegamento del serbatoio con la guida d'onda e lo sliding short circuit. Ogni flangia è provvista di una finestra ceramica che separa il volume del serbatoio dal volume della guida d'onda e dello sliding short circuit. Questi dispositivi sono infatti ramati all'interno e non sono chimicamente compatibili con i vapori di sali che saturano il serbatoio;
- girante assiale con inverter per la regolazione del numero di giri, al fine di promuovere il miscelamento dei sali e di omogeneizzarne la temperatura;
- due blocchi di resistenze, collocate rispettivamente sotto (1.5 kW) e ai lati (4.5 kW) del serbatoio. Tali resistenze permettono di fondere i sali (trasparenti alle microonde allo stato solido) e di eseguire i test che non richiedono l'uso di microonde in potenza, come quelli relativi alla caratterizzazione termica ed elettromagnetica del dispositivo;
- tubo di sfiato nella parte superiore, per garantire condizioni di pressione atmosferica;
- tubo di drenaggio sul fondo del serbatoio, chiuso all'estremità da un tappo a vite. All'interno del tubo di drenaggio i sali rimangono relativamente freddi e si forma un tappo di sali solidi. Una resistenza elettrica avvolta sul tubo permette di sciogliere i sali nella fase di drenaggio;
- sistema di isolamento termico.

Il dispositivo sperimentale è completato da un circuito di raffreddamento ad acqua diviso in due rami. Il primo ramo, collegato ad un circolatore da raffreddamento, assicura che la temperatura delle finestre ceramiche collocate sulle flange del serbatoio sia sempre inferiore al massimo valore operativo (170 °C). Il secondo circuito è invece alimentato direttamente dalla rete idrica e serve a refrigerare il generatore di microonde.

Per quanto riguarda l'acquisizione dati, il serbatoio cilindrico è stato equipaggiato con 6 termocoppie di tipo K nel volume dei sali, a differenti posizioni assiali, azimutali e radiali, come rappresentato in Figura 3. Altre due termocoppie sono state installate a contatto con la parete metallica del serbatoio, tra la parete e l'isolante termico (Figura 3). Inoltre, è stato possibile acquisire la potenza elettrica fornita dalle resistenze elettriche e dal generatore di microonde. Infine, durante le prove, è stata monitorata la temperatura ambiente.

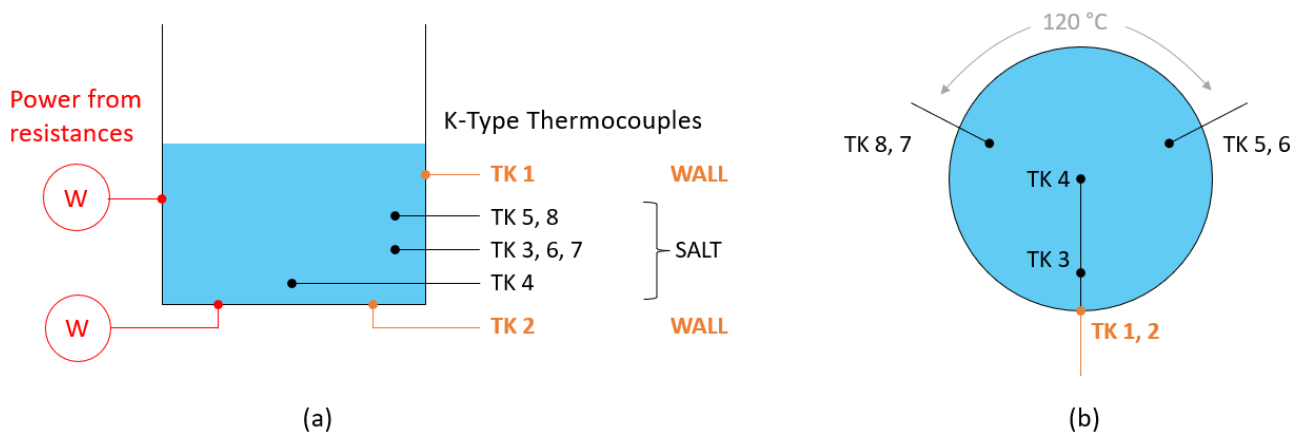


Figura 3. Schema della disposizione delle termocoppie: (a) posizione assiale e radiale e (b) posizione lungo la direzione azimutale

Le termocoppie 7 e 8 hanno fornito, fin dalla prima acquisizione, valori della temperatura non in linea con le altre termocoppie e per questo sono state escluse dall'analisi. Le resistenze elettriche sono governate da un sistema di controllo che insegue una temperatura di set-point. Questa temperatura corrisponde alla temperatura di parete in prossimità della posizione delle resistenze elettriche, che viene letta da due termocoppie dedicate.

## 7.2 Caratterizzazione termica del dispositivo sperimentale

Le dissipazioni termiche dal serbatoio cilindrico, al variare della temperatura media del sale, sono state caratterizzate per mezzo di specifiche prove sperimentali condotte con l'ausilio delle resistenze elettriche. Tali prove consistono nel riscaldare i sali e mantenerli ad una temperatura fissata; in condizioni stazionarie, la potenza elettrica fornita dalle resistenze per mantenere i sali in temperatura corrisponde alla potenza termica dissipata verso l'ambiente esterno. Tali prove hanno consentito di misurare la potenza dispersa dal serbatoio al variare della temperatura e di poter chiudere in modo rigoroso i bilanci di energia nelle successive prove di riscaldamento con le micro-onde. Le temperature dei sali considerate coprono gran parte dell'intervallo operativo dei sali binari (290 - 550 °C). Figura 4 riporta l'andamento delle perdite termiche in funzione della differenza tra la temperatura media dei sali e la temperatura ambiente. I dati sperimentali cadono su una retta ( $R^2 \approx 0.99$ ); ciò implica che le perdite termiche sono dominate dalla convezione.

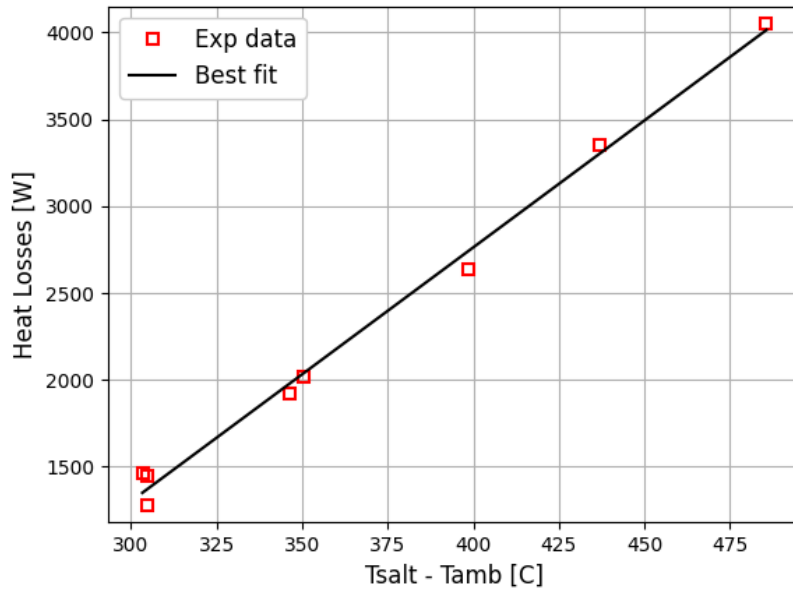


Figura 4. Caratterizzazione delle perdite termiche dal dispositivo sperimentale in funzione della temperatura dei sali, al netto della temperatura ambiente

Di seguito si riporta l'equazione della curva di interpolazione lineare; essa correla le perdite termiche ( $Q_{th}$ ) alla differenza di temperatura tra la temperatura media dei sali e quella dell'ambiente esterno ( $\Delta T$ ).

$$Q_{th}[W] = 1.4620 \times 10^1 \Delta T[^\circ C] - 3.0848 \times 10^3$$

### 7.3 Caratterizzazione elettromagnetica del dispositivo sperimentale

La caratterizzazione elettromagnetica consiste nel valutare il coefficiente di riflessione elettromagnetico della cavità risonante, rappresentata dal serbatoio cilindrico, nell'intervallo di frequenze di interesse ( $2450 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$ ) al variare della temperatura dei sali. A tale scopo viene usato l'analizzatore di rete (VNA), che emette un segnale a bassa potenza spazzando l'intervallo di frequenze desiderato. La temperatura dei sali viene mantenuta costante per mezzo delle resistenze elettriche.

Figura 5 mostra la potenza elettromagnetica riflessa misurata al variare della frequenza e della temperatura dei sali. Nello spettro di frequenze analizzato, la potenza riflessa varia significativamente, da un minimo inferiore al 5% ad un massimo superiore al 35%. Il minimo di potenza riflessa varia con la temperatura e si raggiunge sempre nell'intervallo di frequenze compreso tra 2430 e 2445 MHz. Tale caratterizzazione suggerisce che per operare efficacemente un sistema di riscaldamento dei sali mediante microonde si rende necessario adottare un generatore preciso ( $\pm 5 \text{ MHz}$ ) e regolabile in frequenza.

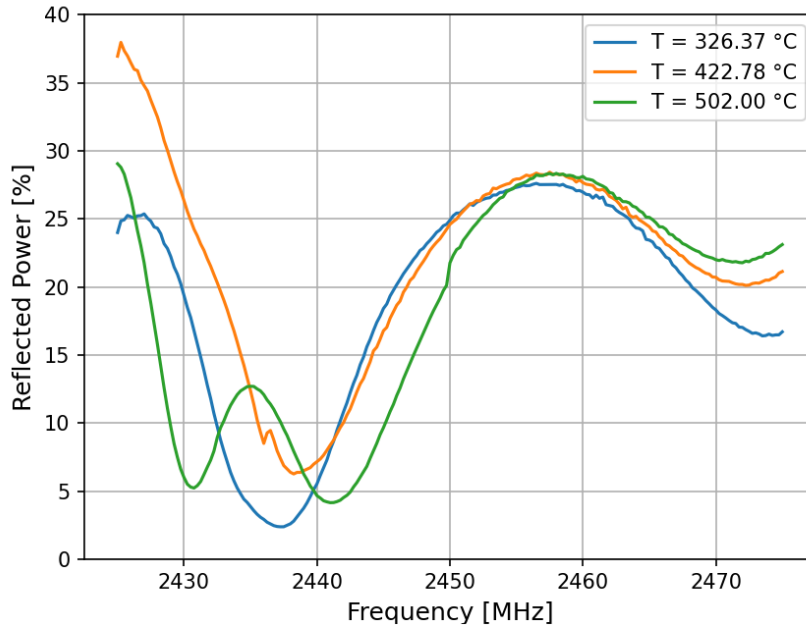


Figura 5. Potenza riflessa misurata in funzione della frequenza di emissione delle microonde e della temperatura media della miscela di sali

#### 7.4 Prove di riscaldamento elettrico dei sali mediante microonde

Per verificare sperimentalmente il riscaldamento elettrico dei sali binari, si è proceduto a fondere i sali e a raggiungere un plateau ad una temperatura di circa 300 °C per mezzo delle resistenze elettriche: Successivamente si è acceso il generatore di microonde aumentando gradualmente la potenza erogata fino al valore nominale previsto dal test. Ove possibile, si è mantenuto il valore nominale della potenza fino al raggiungimento di un nuovo plateau. Al fine di verificare l'eventuale interferenza elettromagnetica causata dal campo elettrico sulle termocoppie immerse nei sali, in alcune prove sperimentali si è proceduto ad eseguire delle veloci pulsate (on/off) con le microonde, per determinare eventuali effetti sulla lettura delle termocoppie.

La Tabella 1 riassume le prove sperimentali eseguite in questa fase.

Tabella 1. Elenco dei test eseguiti con le microonde

<b>Test ID</b>	<b>Potenza nominale microonde [W]</b>	<b>Resistenze elettriche</b>	<b>Pulsate</b>
A	1500	Attive anche a seguito dell'accensione delle microonde, con temperatura di set-point pari a 300 °C	Si
B	2000	Disattivate in seguito all'accensione delle microonde	No
C	2000	Disattivate in seguito all'accensione delle microonde	Si
D	3000	Disattivate in seguito all'accensione delle microonde	No

In Figura 6 - Figura 9 si riporta l'andamento della temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde insieme alla potenza diretta e riflessa rilevata dal generatore. Nel caso del test A (Figura 6), si ha un contributo medio delle resistenze elettriche durante il periodo di accensione del generatore di microonde di circa 350 W. Complessivamente, la potenza totale (microonde + resistenze) è tale da compensare le perdite termiche e mantenere la temperatura dei sali costante. In Figura 7 e Figura 8 si riportano i test B e C, entrambi con potenza nominale delle microonde pari a 2 kW, senza supporto delle resistenze elettriche. Le microonde dissipano energia nel sale in modo non uniforme, come calcolato nella LA1.16, instaurando un gradiente verticale che diminuisce con la quota. A conferma di ciò, la temperatura misurata vicino al pelo libero (termocoppia 5) aumenta, mentre la temperatura presso il fondo del serbatoio (termocoppia 4) diminuisce per effetto delle perdite termiche. Aumentando la potenza fornita dal generatore di microonde a 3 kW (test D - Figura 9) si riescono a compensare le perdite termiche anche presso il fondo del serbatoio e la temperatura misurata dalla termocoppia 4, dopo un transitorio iniziale, aumenta. Questo effetto si deve sia alla maggiore quantità di energia dissipata dalle microonde, anche negli strati inferiori del sale, che alla conduzione termica nel sale. Quest'ultima assume un ruolo più rilevante rispetto al caso dei test B e C per via della più alta temperatura raggiunta dal pelo libero.

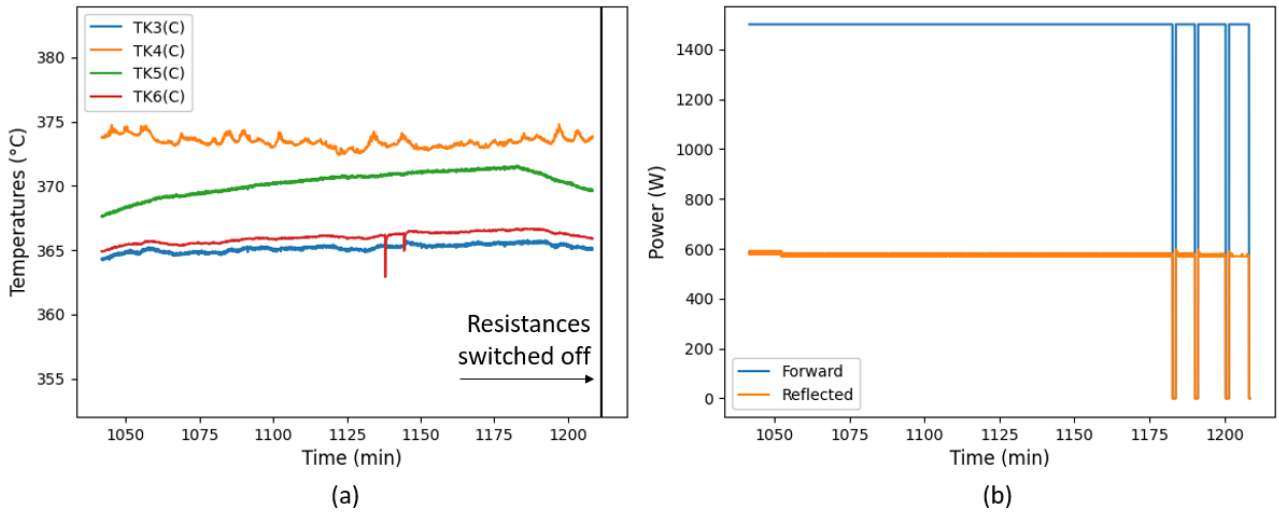


Figura 6. Test A: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde

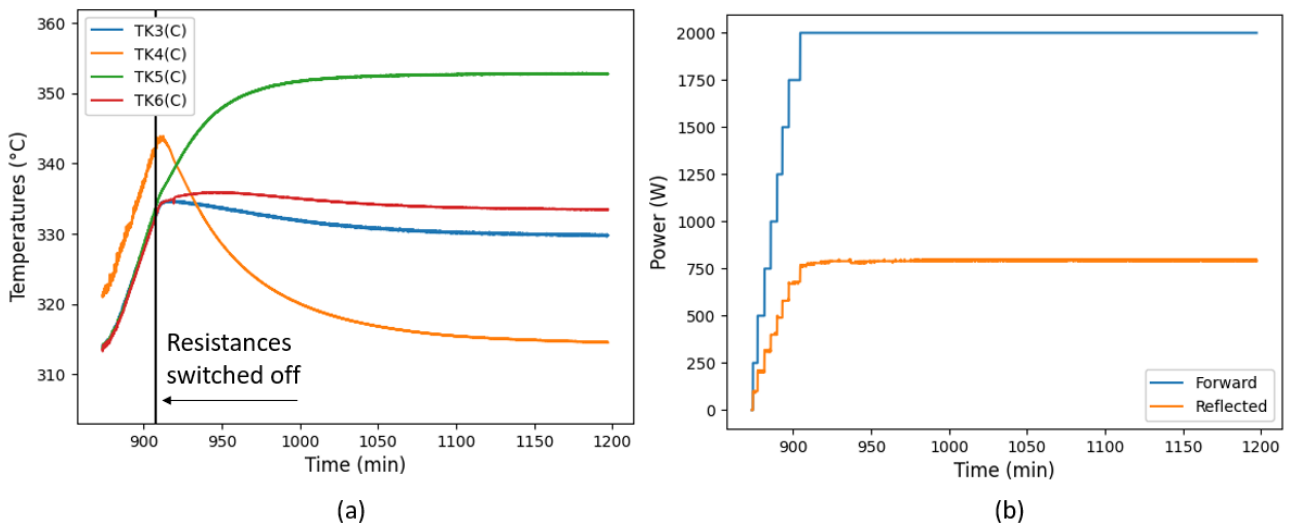


Figura 7. Test B: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde

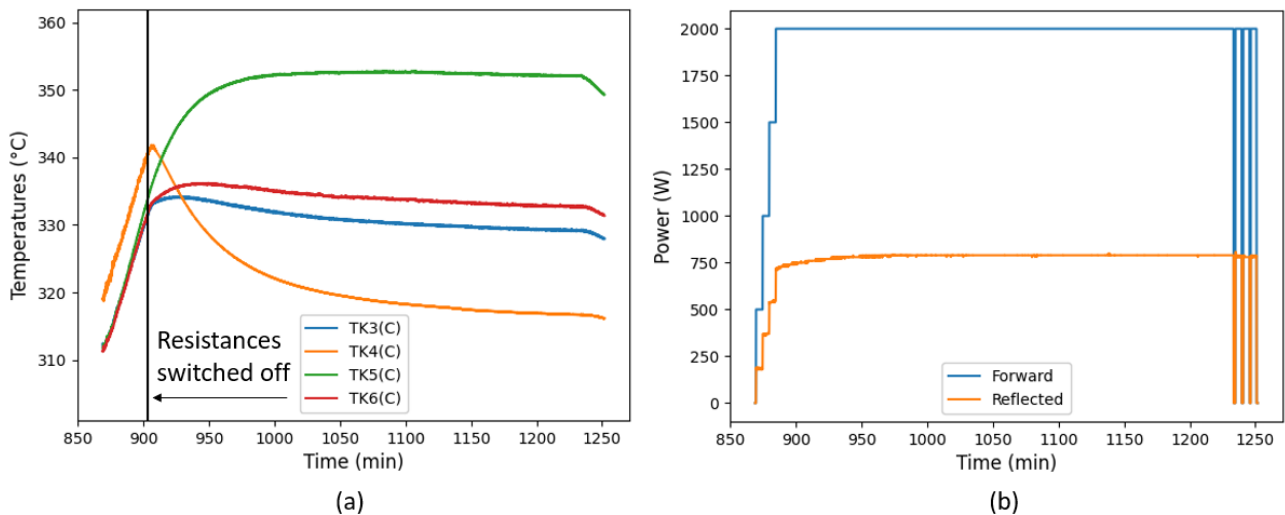


Figura 8. Test C: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde

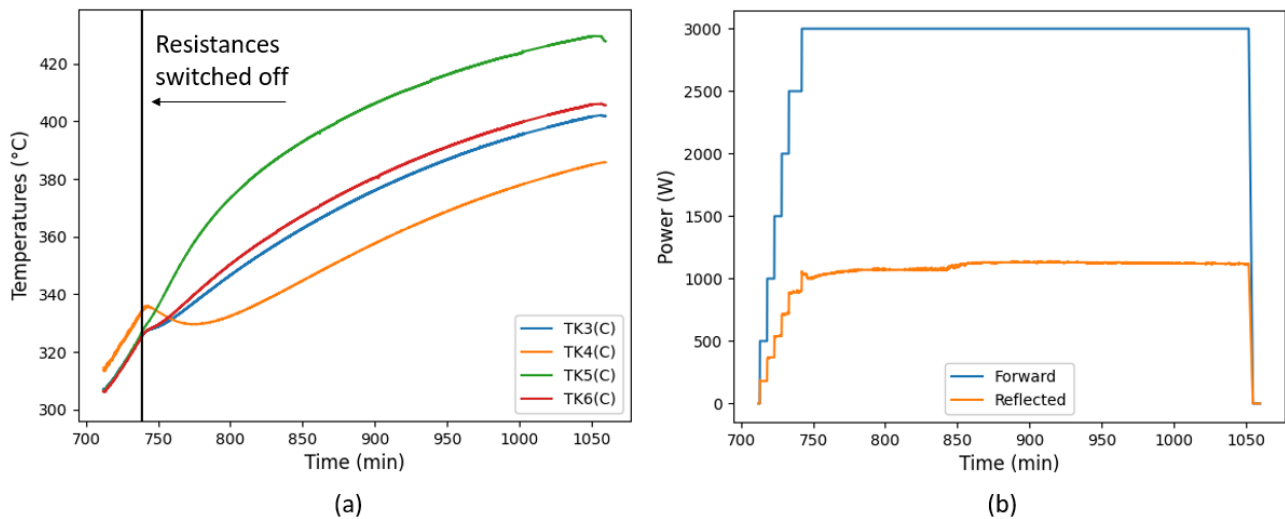


Figura 9. Test D: (a) temperatura misurata nei sali durante il periodo di accensione del generatore di microonde, con indicato il punto in cui le resistenze elettriche vengono disattivate e (b) potenza diretta e riflessa misurata dal generatore di microonde

Per quanto riguarda l'interferenza del campo elettromagnetico sulla lettura delle termocoppie immerse nei sali, Figura 10 e Figura 11 suggeriscono che tale fenomeno non incide in modo significativo nel nostro caso. Infatti, spegnendo per un breve lasso di tempo il generatore di microonde, la lettura delle termocoppie non subisce variazioni rilevabili.

Considerando il test B, in particolare il plateau raggiunto con il solo utilizzo del generatore di microonde, è possibile calcolare la potenza netta scaricata nei sali, nell'ipotesi che le pareti metalliche del serbatoio non assorbano potenza. Sotto tale ipotesi, la potenza assorbita nei sali risulta pari a circa 100 W/kg e, in condizioni operative ottimali, risulta superiore a questo valore.

Inoltre, una prima stima della velocità di riscaldamento indica che, usando le sole microonde, la velocità aumenta di circa il 37 % rispetto al caso di sole resistenze elettriche. Tale valutazione si è ottenuta confrontando due rampe di riscaldamento, della durata di 5 minuti, realizzate con l'uso, rispettivamente, delle sole resistenze e delle sole microonde. La temperatura iniziale per le rampe era di circa 320 °C in entrambi i casi. La velocità di

riscaldamento è stata valutata come °C/s per unità di potenza scaricata nei sali. In particolare, si è ottenuta una velocità di 3.5 °C/s/W per le microonde e 2.2 °C/s/W per le resistenze elettriche.

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti, è possibile concludere che la miscela binaria  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$  (60/40wt%), anche denominata Solar Salt, può essere efficacemente riscaldata attraverso le micro-onde, e che il volume di sali interessato dalla dissipazione elettro-termica, a parità di geometria della cavità risonante, dipende principalmente dalla frequenza di generazione delle micro-onde e dalla potenza generata.

Ai fini dell'applicazione di questo sistema di riscaldamento sugli accumuli termici a sali fusi, è pertanto necessario disporre di un sistema di generazione dotato di regolazione fine della frequenza. Tale regolazione deve consentire, al variare della temperatura dei sali, di operare nell'intervallo di frequenza ottimale (2430-2445 MHz), dove il coefficiente di riflessione è minimo (circa 5%). Poiché tale intervallo può variare in base alle caratteristiche della cavità risonante e alla composizione dei sali, la caratterizzazione elettromagnetica del serbatoio va considerata una fase propedeutica essenziale per l'ottimizzazione del riscaldamento con micro-onde.

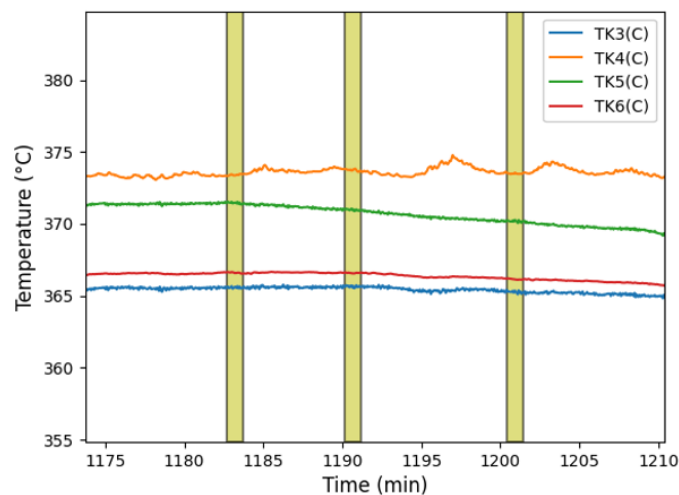


Figura 10. Test A: temperatura dei sali misurata durante le pulsate eseguite con il generatore di microonde. Le fasce evidenziate in giallo corrispondono agli intervalli in cui il generatore è stato spento

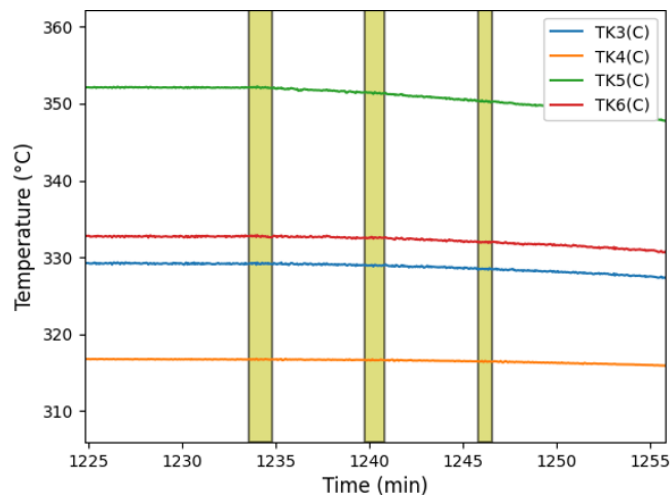


Figura 11. Test C: temperatura dei sali misurata durante le pulsate eseguite con il generatore di microonde. Le fasce evidenziate in giallo corrispondono agli intervalli in cui il generatore è stato spento

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della presente linea di attività non sono state utilizzate consulenze.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

- M. Cagnoli, R. Grena, M. Lanchi, G. Vecchi, R. Zanino, "Numerical investigation about the electrical heating of a molten salt mixture for thermal energy storage applications", Proceedings of the 16th IEA ES TCP International Conference on Energy Storage (ENERSTOCK 2024). DOI: 10.5281/zenodo.13790499, <https://zenodo.org/records/13790499>.
- R. Grena, M. Cagnoli, R. Zanino and M. Lanchi, "Overcoming power limitations of electric heating in a Solar Salt thermal storage: from Joule heating to microwaves", to be submitted to Energies, Special Issue - Advanced Solar Technologies and Thermal Energy Storage.

## 10 Eventi di disseminazione

- Evento "Stati Generali del Solare Termico a Concentrazione", Roma, Italia, 29 Gennaio 2024, organizzazione e partecipazione con presentazioni orali - Si è tenuta una presentazione orale sui risultati intermedi della linea di ricerca di Progetto sui "sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili".
- Conferenza "30th SolarPACES Conference", Roma, Italia, 8-11 Ottobre 2024 - Si è tenuta una presentazione orale dal titolo "A Lab-Scale Experimental Device to Study the Microwave Heating of Solar Salt for Thermal Energy Storage Applications".
- Conferenza "ENERSTOCK 2024", Lione, Francia, 5-7 giugno 2024. Si è tenuta una presentazione orale dal titolo "Numerical investigation about the electrical heating of a molten salt mixture for thermal energy storage applications".
- "Evento di disseminazione finale del Progetto 1.9 «Solare termodinamico» PTR 2022-2024 della Ricerca di Sistema", Roma, Italia, 16 Dicembre 2024 - Si è tenuta una presentazione orale sui risultati finali della linea di ricerca di Progetto sui "sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili".