

# Ricerca di Sistema elettrico



**Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Analisi preliminare di sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi e progettazione di un dispositivo sperimentale (LA1.15)**

R. Grena, M. Lanchi, G. Napoli, L. Turchetti, W. Gaggioli, M. Cagnoli

IBRIDIZZAZIONE DEL CSP CON ALTRE TECNOLOGIE ENERGETICHE RINNOVABILI - ANALISI PRELIMINARE DI SISTEMI INNOVATIVI DI RISCALDAMENTO ELETTRICO DEI SALI FUSI E PROGETTAZIONE DI UN DISPOSITIVO SPERIMENTALE (LA1.15)

R. Grena, M. Lanchi, G. Napoli, L. Turchetti, W. Gaggioli (ENEA)  
M. Cagnoli (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: LA1.15

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Michela Lanchi, ENEA

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

## 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.....	14
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	15
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	16

## 1 Risultati attesi

L'ibridizzazione tra la tecnologia solare a concentrazione (CSP) e le altre tecnologie energetiche rinnovabili, specialmente l'eolico e il fotovoltaico, può supportare l'incremento della quota di energia rinnovabile nel mix energetico: gli impianti CSP, abbinati a sistemi di accumulo termico, possono infatti generare elettricità on-demand, stabilizzando i flussi energetici nelle reti di distribuzione interessate da un elevato livello di penetrazione di generatori rinnovabili non programmabili. Inoltre, l'accumulo termico del CSP può immagazzinare in modo efficace gli eccessi di produzione elettrica da altre fonti non programmabili. Nel caso di accumuli termici a sali fusi, tipicamente utilizzati nella tecnologia CSP in virtù dell'elevata densità energetica, del basso costo e della facile reperibilità, la modalità più diretta per la conversione elettro-termica e l'accumulo dell'elettricità in eccesso è l'impiego di sistemi resistivi che dissipino l'elettricità in calore. Il maggior limite di tale soluzione tecnica risiede nella necessità di contenere la potenza massima scaricabile nel sistema di accumulo quando il sale fuso è prossimo alla temperatura massima di lavoro, impedendo di fatto il recupero di forti eccessi di produzione elettrica da fonti non programmabili.

La presente linea attività si propone di indagare e sviluppare nuove soluzioni tecniche per una efficace e flessibile conversione elettro-termica/accumulo dell'energia elettrica in eccesso da fonti rinnovabili. In maggior dettaglio, i risultati attesi sono di seguito elencati:

i) ideazione di soluzioni innovative di riscaldamento elettrico dei sali fusi nell'ottica dello sviluppo di nuovi sistemi di accumulo termico che possano operare come versatili hub energetici, capaci di accettare e accumulare elettricità/calore rinnovabile e di alimentare on-demand sia utenze termiche che elettriche;

ii) sviluppo di un'analisi preliminare dei meccanismi di generazione e trasferimento del calore per effetto resistivo/induttivo/micro-onde con identificazione delle principali caratteristiche dei sistemi considerati, anche in termini di rapidità di riscaldamento dei sali fusi e omogeneità delle temperature;

iii) identificazione della tecnologia di riscaldamento elettrico dei sali fusi più promettente;

iv) progettazione preliminare di un dispositivo sperimentale su scala di laboratorio per lo studio del sistema di riscaldamento elettrico dei sali fusi selezionato.

## 2 Risultati ottenuti

In relazione ai risultati attesi elencati nella Sezione 1, i risultati ottenuti sono di seguito sintetizzati:

i) proposta di tre meccanismi alternativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi (effetto Joule, induzione elettromagnetica, microonde), di cui due mai applicati nel passato (induzione e microonde), con la formulazione di ipotesi su possibili configurazioni di processo finalizzate ad assorbire elevate potenze elettriche, indipendentemente dal livello termico dell'accumulo, e tempi di risposta adeguati.

ii) analisi preliminare della prestazione dei tre sistemi di riscaldamento in esame attraverso modelli fisici basati su dati disponibili in letteratura (dettagli dell'analisi e dei risultati riportati nell'Allegato 1), valutando per ciascuno di essi:

- la possibilità di ottenere configurazioni di accumulo termico che presentino versatilità nelle potenze in ingresso, rapidità nei tempi di risposta, omogeneità nel riscaldamento:

- effetto Joule: scarsa
- induzione: buona
- microonde: molto buona

- la fattibilità concettuale di realizzare impianti su larga scala:

- effetto Joule: certa (tecnologia già applicata)
- induzione: incerta
- microonde: molto probabile

- la possibilità di verificare i risultati teorici dell'analisi attraverso la realizzazione di un dispositivo sperimentale nell'ambito del Progetto:

- effetto Joule: probabile
- induzione: nulla (necessità di altre ricerche preliminari)
- microonde: molto probabile (con incertezze dovute alla scarsità dei dati di letteratura)

iii) selezione, alla luce delle analisi fatte, della scelta più promettente - sia in termini di prestazione energetica, che di futura scalabilità e di immediata possibilità di verifica: riscaldamento a microonde.

iv) progettazione di un sistema sperimentale per lo studio del riscaldamento diretto di un volume di controllo dei sali attraverso le microonde, usando principalmente un generatore di microonde disponibile in commercio e una guida d'onda per trasferire le microonde dal generatore al serbatoio dei sali.

In sintesi, i quattro risultati attesi sono stati pienamente raggiunti. Il lavoro ha posto le basi per la realizzazione di un dispositivo sperimentale, la simulazione dettagliata dei meccanismi di riscaldamento e lo sviluppo dei modelli d'impianto su larga scala, oggetto di ulteriori successive linee di attività (LA1.17 e LA1.18). L'ideazione del nuovo sistema di riscaldamento elettrico dei sali fusi di tipo volumetrico, basato sulle micro-onde e direttamente integrato nel serbatoio di accumulo, può rappresentare un'efficace soluzione per svincolare la potenza elettrica scaricabile nel sistema dalla temperatura dei sali, aprendo la strada all'impiego di sistemi di accumulo a basso costo e di lunga durata, capaci di interfacciarsi con flessibilità sia a generatori elettrici che termici.

### 3 Prodotti attesi

Nella presente linea di attività non è previsto lo sviluppo di prodotti hardware/software. È invece prevista l'elaborazione del Report Tecnico "Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Analisi preliminare di sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi e progettazione di un dispositivo sperimentale".

## 4 Prodotti sviluppati

Non è stato sviluppato alcun prodotto hardware/software, come da previsione. Coerentemente al Capitolato di Progetto, è stato invece elaborato il presente Report Tecnico “Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Analisi preliminare di sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi e progettazione di un dispositivo sperimentale”, i cui elementi di dettaglio sono riportati nell’Allegato 1.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il lavoro svolto nell'ambito della linea di attività LA1.15 si è articolato principalmente nelle seguenti fasi: studio preliminare di diversi sistemi di riscaldamento, valutazione della loro efficacia in termini di incremento della potenza trasferibile, valutazione della loro concreta realizzabilità, selezione del sistema più promettente e progettazione di massima di un apparato sperimentale su scala di laboratorio per determinare le prestazioni del sistema selezionato. La principale criticità del lavoro, anche preventivata nel "piano di rischio" della presente linea di ricerca, è stata la scarsità di dati relativi alle proprietà dielettriche dei sali fusi. Ciò avrebbe potuto compromettere lo studio del sistema di riscaldamento a microonde, rendendo i risultati dell'analisi teorica poco significativi. Tale eventualità non si è verificata poiché, sebbene i dati dielettrici reperiti in letteratura provengano da un'unica fonte, sono abbastanza dettagliati da permettere un'analisi accurata del fenomeno. Pertanto, nell'ambito della linea di attività LA1.15, i tre sistemi di riscaldamento considerati sono stati analizzati al meglio delle attuali conoscenze ed è stato possibile ottenere risultati funzionali alla selezione della migliore soluzione tecnica e al progetto di massima di un dispositivo sperimentale. I risultati, infatti, hanno indicato chiaramente che il riscaldamento dei sali attraverso le microonde è la soluzione tecnica più promettente, sia in termini di prestazioni che di fattibilità pratica, e pertanto si è potuto procedere alla definizione del progetto di massima dell'apparato sperimentale, col supporto dei risultati della linea di attività LA1.16 (in carico al co-beneficiario Politecnico di Torino). Non sono quindi evidenziabili scostamenti tecnici rispetto alle attività previste o ai risultati attesi, né si evidenziano scostamenti rispetto ai tempi di realizzazione.

L'unica fonte da cui provengono i dati dielettrici dei sali resta comunque un fattore di rischio: ciò non ha ostacolato l'analisi e le conclusioni della presente linea di attività e non ha probabilità significative di compromettere la fattibilità dell'apparato sperimentale oggetto della linea di attività LA1.17 – gli errori che è lecito aspettarsi dalla fonte dei dati (pubblicazione scientifica CIEMAT) non sono tali da pregiudicare il funzionamento dell'apparato sperimentale – ma potrebbe influire sull'efficienza di riscaldamento, la potenza massima che trasferibile al sale e le temperature raggiunte durante la fase di carica, portando a risultati diversi da quelli attesi. Tali aspetti andranno attentamente considerati nel corso della linea di attività LA1.17.

Con riferimento agli scostamenti economici della LA1.15, i costi di personale (categoria A) a consuntivo, pari a 67.890,00 €, risultano superiori di circa 16,9 k€ ( $\approx +33,2\%$ ) rispetto all'importo preventivato nel capitolato vigente di Progetto, pari a 50.950,00 €. Tale scostamento è dovuto a:

- maggior impegno di personale di sub-categoria A.1 (1650 ore rispetto alle 1550 ore inizialmente previste). Nella fattispecie, le 100 ore aggiuntive esposte a consuntivo ( $\approx +6,4\%$ ) sono risultate necessarie per: (i) un supplemento di analisi sui dati dielettrici di letteratura necessario per il superamento della criticità tecnica sopra evidenziata; (ii) l'effettuazione di un'attenta indagine di mercato (rivelatasi più impegnativa del previsto) per verificare l'effettiva disponibilità di generatori di microonde di taglia adeguata al dispositivo sperimentale da progettare nella presente LA1.15 e, nella fattispecie, all'individuazione di un generatore con potenza regolabile fino a 3 kW, frequenza 2.45 GHz, con uscita per guida d'onda idonea per l'applicazione in oggetto;
- nuovo inquadramento giuridico-economico, a far data dal 1/1/2023, con passaggio da ricercatore EPR (fascia di costo standard "Livello Medio") a primo ricercatore EPR (fascia di costo standard "Livello Alto"), di n° 3 unità di personale rendicontate nella LA1.15.

I costi relativi alle "spese vive" sostenute nella LA1.15, derivanti dall'applicazione del criterio della quota d'uso agli importi per l'acquisizione di software di simulazione (sub-categoria B.3), sono in linea con quanto previsto (1.498,89 € rispetto a 1.416,27 €).

Per quanto sopra, in conclusione, il costo totale (escluse spese generali) effettivamente sostenuto per l'esecuzione della LA1.15 ed esposto a consuntivo, pari a 69.388,89 €, è superiore di circa 17 k€ ( $\approx +32,5\%$ ) rispetto a quello preventivato, pari a 52.366,27 €.

## 6 Sintesi delle attività svolte

I limiti di potenza del riscaldamento Joule dei sali fusi sono stati analizzati con un accurato modello termico.

La fenomenologia del riscaldamento dei sali per induzione è stata analizzata con un dettagliato modello fisico, concludendo che l'induzione diretta è inadatta al riscaldamento dei sali fusi, l'induzione indiretta presenta vantaggi marginali rispetto al riscaldamento a resistenze, altre possibili soluzioni (come l'uso di particelle in sospensione suscettibili all'induzione) non sono esplorabili nei tempi e costi previsti dalla presente attività.

La fenomenologia del riscaldamento con microonde è stata analizzata sulla base delle proprietà dielettriche dei sali alle frequenze delle microonde, concludendo che il riscaldamento volumetrico è fattibile e che si presta a test sperimentali su scala di laboratorio.

È stato progettato un apparato sperimentale per il riscaldamento a microonde di un serbatoio di sali fusi su scala laboratorio, da realizzare nella linea di attività LA1.17.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

La maturità e il basso costo di tecnologie energetiche rinnovabili come il solare fotovoltaico e l'eolico, in cui la produzione di elettricità è correlata alla disponibilità della sorgente e non al fabbisogno, rendono cruciale lo sviluppo di sistemi di accumulo. Per assicurare un'elevata penetrazione nel mercato energetico delle rinnovabili è quindi necessario sviluppare sistemi d'accumulo che abbiano sufficiente capacità (approvvigionamento energetico di almeno qualche giorno), costi contenuti, facile reperibilità dei materiali, potenza di carica sufficientemente alta da permettere l'assorbimento dei picchi di potenza.

L'accumulo termico a calore sensibile che utilizza la miscela di sali fusi detta Solar Salt (60%  $\text{NaNO}_3$ , 40%  $\text{KNO}_3$  in peso) è un sistema realizzabile su larga scala e con costi contenuti. Tale accumulo è già impiegato in impianti solari a concentrazione (CSP) e può essere applicato anche per lo stoccaggio dell'elettricità nella prospettiva di realizzare sistemi ibridi CSP/PV in cui il fotovoltaico abbia la funzione primaria di fornire potenza nelle ore diurne, il CSP la funzione primaria di caricare l'accumulo a sali fusi per il fabbisogno notturno, e gli eccessi di produzione fotovoltaica siano trasferiti nello stesso serbatoio termico contenente i sali fusi attraverso meccanismi di dissipazione elettro-termica (ad es. attraverso resistenze elettriche).

Una criticità significativa di tale tecnologia è la potenza massima trasferibile al serbatoio, nel caso di improvvisi picchi di produzione elettrica. I sali devono sfruttare il massimo salto termico possibile per accumulare energia, in modo da aumentare la capacità di accumulo specifica (W/kg), e l'efficienza del ciclo termodinamico per la produzione di energia elettrica. Nel caso del sale solare, le temperature limiti di lavoro sono date dall'inizio del congelamento, a circa 240 °C, e dalla decomposizione termica dei nitrati, che diviene significativa oltre i 580 °C. Tipicamente l'intervallo termico operativo è fissato cautelativamente tra 270 °C e 550 °C, con temperature locali non superiori a 565 °C. La massima temperatura di lavoro rende problematico il riscaldamento dei sali per contatto diretto con le resistenze elettriche: il film di sali a contatto con l'elemento scaldante ha infatti la stessa temperatura dell'elemento, che deve quindi restare sotto i 565 °C. La potenza trasferibile, proporzionale alla differenza di temperatura tra l'elemento scaldante e la temperatura di bulk, si riduce pertanto al crescere della temperatura dell'accumulo fin quasi ad annullarsi. Il riscaldamento per contatto può fornire ai sali potenze elevate solo quando il sale è lontano dalla temperatura massima di accumulo.

La linea di attività LA1.15 ha lo scopo di studiare possibili soluzioni tecniche per superare tale problema, prendendo in esame le principali opzioni disponibili per il riscaldamento elettrico dei sali nel serbatoio, valutandone i limiti e la fattibilità.

Nel presente rapporto si descrivono sinteticamente l'analisi svolta e i risultati ottenuti. Una descrizione tecnica più dettagliata dell'attività è riportata nell'Allegato 1 al rapporto.

### 7.1 Potenza di trasferimento richiesta per un accumulo full-scale

Lavori in letteratura [1] stimano che la capacità richiesta per un accumulo destinato a compensare le variazioni di potenza di una fonte variabile è nell'ordine di 3 – 4 ore di produzione alla potenza di picco dell'impianto. Nell'ambito del presente lavoro è stata stimata la massima potenza specifica (W/kg) trasferibile ai sali fusi contenuti in singolo serbatoio per un accumulo di 3h, considerando la capacità termica dei sali [2] ed un salto termico di 270°C: dai calcoli descritti nell'Allegato 1 è stato ottenuto, per la massima potenza specifica, un valore pari a circa 27 W/kg.

Questo calcolo suppone che la potenza sia distribuita in tutta la massa di sali. Se però il riscaldatore è localizzato, la potenza da trasferire alla massa di sali nelle sue vicinanze è molto più alta: ad esempio, se solo 1/10 della massa di sali partecipa allo scambio termico, la potenza specifica supera i 250 W/kg. Come ordine

di grandezza, un sistema di riscaldamento efficace per un accumulo termico a sali dovrebbe permettere di trasferire energia ai sali con potenze specifiche  $> 100 \text{ W/kg}$ .

## 7.2 *Analisi del riscaldamento a resistenze*

Nel caso in esame, l'energia elettrica viene convertita in calore nella resistenza, e successivamente trasferita per conduzione/convezione ai sali fusi. L'aspetto più critico di tale soluzione tecnica è il trasferimento di calore dalla parete esterna della resistenza ai sali.

L'analisi dello scambio termico tra una resistenza cilindrica posta orizzontalmente in un serbatoio e la massa di sali fusi è stata svolta usando la legge di scambio termico per convezione naturale da cilindri orizzontali [3]. Una trattazione numerica ha permesso di ottenere la potenza scambiata in dipendenza del diametro dell'elemento scaldante, della temperatura di bulk dei sali e della differenza di temperatura tra la parete della resistenza e i sali.

In particolare, ipotizzando un diametro di 1 cm per l'elemento scaldante e una temperatura di parete di  $565 \text{ }^\circ\text{C}$ , si può ottenere l'andamento della potenza trasferita ai sali in funzione della loro temperatura, per unità di lunghezza dell'elemento scaldante; la potenza va da  $9 \text{ kW/m}$  per sali "freddi" ( $270 \text{ }^\circ\text{C}$ ) fino a poco più di  $300 \text{ W/m}$  per sali a  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ . In un sistema scaldante composto da un reticolo di resistenze parallele poste su una griglia con passo di 20 cm, ad ogni metro di resistenza corrisponde una massa di sali da scaldare di circa 70 kg; la potenza massima trasferibile ai sali sarà quindi accettabile per sali freddi (circa  $140 \text{ W/kg}$ ), ma si ridurrà fino a scendere sotto i  $5 \text{ W/kg}$  per sali a  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ . Non si può quindi pensare di portare i sali a temperature vicine a  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  con questo sistema, a meno di limitare molto la potenza nelle ultime fasi di riscaldamento. Si dovrebbe aumentare di molto la densità di resistenze presenti nel serbatoio, con griglie fitte o opportuni avvolgimenti, ma ciò aumenterebbe significativamente i costi. In caso di stratificazione efficace, si potrebbe applicare una potenza maggiore nella parte più bassa del serbatoio, diminuendola con l'altezza. Il progetto di sistemi di questo tipo – reticoli fitti di resistenze o modulazione della potenza – potrebbe avere elementi innovativi, ma non promette avanzamenti tecnologici qualitativi.

## 7.3 *Analisi del riscaldamento a induzione*

Il riscaldamento è ottenuto generando un campo magnetico variabile che induce correnti di spostamento in un materiale conduttore. In genere, il campo magnetico è generato da un solenoide alimentato da corrente alternata, tra le cui spire viene posto il materiale da scaldare. Il riscaldamento può essere diretto, se il materiale da scaldare ha proprietà elettromagnetiche adeguate, oppure indiretto, scaldando un recipiente contenente il materiale che poi viene scaldato per conduzione/convezione.

Nel presente lavoro, l'induzione diretta è stata trattata analiticamente usando l'approssimazione quasi-statica delle equazioni di Maxwell, nell'ipotesi di scaldare i sali con un solenoide ideale infinito e nell'approssimazione di bassa conducibilità elettrica del materiale da scaldare, giustificata dal fatto che i sali fusi sono cattivi conduttori. Se si applica una corrente alternata sinusoidale, si arriva a una formula analitica che esprime la potenza trasferita in funzione della conducibilità dei sali, della frequenza e dell'intensità della corrente applicata, del raggio e del numero di spire per metro del solenoide. Purtroppo, le stime ottenute considerando di trasferire qualche centinaio di  $\text{W/kg}$  ai sali portano a richieste di corrente difficilmente gestibili ( $> 1000 \text{ A}$ ): con questi valori di corrente, un solenoide in rame di sezione  $0.25 \text{ cm}^2$  si scalderebbe di decine di gradi al secondo per effetto Joule, arrivando facilmente a temperature critiche, e l'interazione del campo magnetico generato – e non perfettamente confinato entro il solenoide, in condizioni reali – con le strutture esterne in acciaio del serbatoio potrebbe essere problematica.

In alternativa, il riscaldamento indiretto (induzione che scalda volumetricamente un elemento metallico, entro il quale possono scorrere i sali) è senz'altro fattibile. In questo caso, però, si ripropone il problema della differenza di temperatura tra la parete dell'elemento scaldante e i sali, poiché il trasferimento di calore finale avviene sempre per conduzione/convezione. Non sembrano esservi molti vantaggi rispetto all'uso di resistenze. Le differenze principali, a vantaggio dell'induzione, sono:

- l'uso di elementi scaldanti irregolari (es: spugne metalliche), con riscaldamento volumetrico abbastanza uniforme;
- posizionamento del solenoide all'esterno dei tubi contenenti l'elemento scaldante, senza portare componenti elettricamente attive a contatto con i sali; questa possibilità però può essere sfruttata solo se si ipotizza un riscaldamento esterno al serbatoio.

Nel caso di serbatoio a tank singolo, l'elemento scaldante non deve offrire resistenza alla circolazione dei sali che impedisca la convezione naturale e la conseguente stratificazione nel serbatoio. Questo esclude l'uso di mezzi porosi o altre configurazioni volumetriche che offrano resistenza considerevole alla circolazione dei sali, a meno di ipotizzare qualche forma di circolazione forzata; le possibilità restanti non sono troppo diverse dalla realizzazione di una fitta griglia di resistenze come quella descritta a proposito del riscaldamento per effetto Joule. Il riscaldamento indiretto a induzione offre quindi vantaggi marginali rispetto al riscaldamento a resistenze.

L'induzione è un'opzione interessante per ricerche future: ad esempio, l'aggiunta di particelle metalliche in sospensione alla miscela di sali, suscettibili al riscaldamento a induzione, potrebbe rendere possibile il riscaldamento diretto dei sali. Tali studi però richiederebbero lo sviluppo di materiali ad-hoc e una tempistica non allineata con lo svolgimento del presente Progetto.

#### *7.4 Analisi del riscaldamento a microonde*

Il principio del riscaldamento a microonde è ben noto e applicato da tempo sia in ambito domestico che industriale. Per ottenere un riscaldamento efficace il materiale non deve essere un buon conduttore (le microonde verrebbero in larga parte riflesse) e nemmeno un isolante perfetto (trasparente alle microonde). La conducibilità elettrica da considerare è quella alla frequenza delle microonde, che può essere significativamente diversa da quella per campi statici; purtroppo, i dati a disposizione in letteratura per i sali fusi sono limitati, avendo a disposizione una sola fonte [4].

Il riscaldamento a microonde avviene soprattutto in uno strato superficiale il cui spessore è l'inverso del coefficiente di estinzione: usando il valore statico di conduttività per i sali fusi, si otterrebbe uno spessore di pelle di circa 1/20 cm, il che renderebbe impossibile un riscaldamento volumetrico. I dati riportati in [4] sembrano però indicare una conduttività di diversi ordini di grandezza più bassa di quella statica, che porta a uno spessore di pelle di oltre 10 cm alla frequenza di 2.45 GHz; il dato è senz'altro plausibile poiché la conduttività nei sali fusi è dovuta al movimento degli ioni, più lenti degli elettroni e quindi meno reattivi a campi elettromagnetici rapidamente variabili. Le misure riportate in [4] sono quindi del tutto plausibili e sono state usate per lo studio del sistema di riscaldamento.

La possibilità del riscaldamento a microonde sembra confermata da un secondo lavoro [5] in cui due configurazioni sono state proposte. Entrambe prevedono il riscaldamento del sale che scorre in un tubo contenuto in una cavità a microonde. Sebbene la configurazione preveda circolazione esterna, l'aspetto fondamentale – cioè la possibilità di scaldare i sali fusi – sembra confermato, con potenze trasferite alle microonde di circa 2 kW. Il documento riporta inoltre un riassunto di formule empiriche per le proprietà elettriche dei sali alla frequenza di lavoro, che sono state usate come riferimento.

#### *7.5 Selezione del sistema scaldante e progetto di massima dell'apparato sperimentale*

Dalle analisi illustrate, si è concluso che le microonde rappresentano l'opzione più praticabile, per la possibilità di riscaldamento autenticamente volumetrico, per la possibilità di sperimentazioni su piccola scala, e per la disponibilità in commercio di dispositivi di riscaldamento di potenza contenuta e del tutto adeguati alle attività sperimentali da svolgere. Va però segnalato il punto debole di questa opzione: la scarsità di informazioni sulle proprietà dielettriche dei sali alle frequenze di lavoro, ottenute da un'unica fonte. Non essendo fattibili in tempi sufficientemente brevi campagne sperimentali specifiche per verificare i dati, la

validazione dei dati avverrà sui risultati delle prove di riscaldamento nel prototipo sperimentale, e questo è un elemento di rischio, per quanto contenuto (gli errori che è lecito aspettarsi dalla fonte [4] non sono tali da compromettere la fattibilità dell'esperimento, ma possono portare a risultati significativamente diversi da quelli attesi). Sulla base dell'analisi sinteticamente descritta nei precedenti paragrafi, il riscaldamento dei sali attraverso le microonde è stato selezionato come la soluzione tecnica più promettente per la conversione elettro termica/accumulo dell'elettricità in eccesso (dettagli dell'analisi descritti nell'Allegato 1). La disponibilità commerciale di generatori di microonde di potenza adeguata ad un esperimento su piccola scala (3 kW) e l'interazione con la linea di attività LA1.16 hanno permesso di definire l'apparato sperimentale destinato a verificare il metodo di riscaldamento, di cui è mostrato lo schema in Fig. 1. L'apparato sperimentale consiste in un generatore di microonde a 2.45 GHz con potenza di 3 kW, collegato, attraverso una guida d'onda, ad un serbatoio in cui sono contenuti circa 12 kg di sali. La guida d'onda dev'essere sufficientemente lunga perché le elevate temperature del serbatoio non si trasmettano al generatore. La cavità a microonde è il serbatoio stesso, delimitato dalle pareti in acciaio. Il serbatoio è dotato di un sistema di riscaldamento a resistenze per consentire l'iniziale fusione dei sali, poiché i sali solidi, isolanti, sono trasparenti alle microonde. Le microonde entrano dalla parte alta del serbatoio, per evitare contatti tra la guida d'onda e i sali fusi, in modo che non sia necessario usare finestre ceramiche a tenuta.

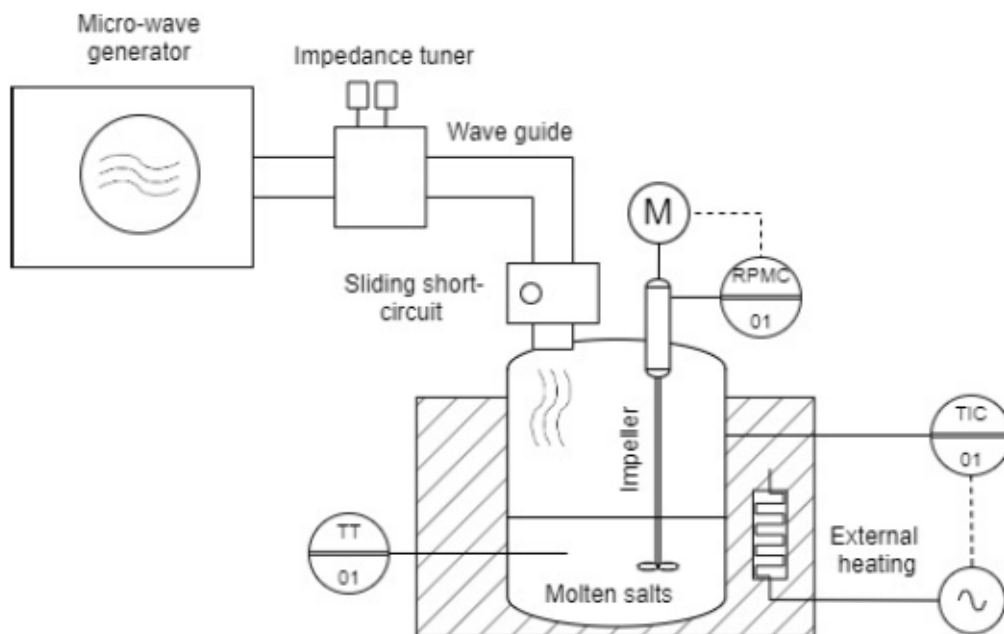


Figura 1: Schema dell'apparato sperimentale per l'analisi del riscaldamento a microonde dei sali fusi.

## 7.6 Riferimenti

- [1] P. Boito, R. Grena, "Do we really need a seasonal energy storage? Results for photovoltaic technology in an unfavourable scenario", *Renewable Energy Focus* 45 (2023) 141–149.
- [2] A. Bonk, T. Bauer, "Report on thermo-physical properties of binary  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$  mixtures in a range of 59-61 wt%  $\text{NaNO}_3$ ", Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Technische Thermodynamik – Standort Stuttgart, Scientific Report: DLR-FB-2021-19 31.08.2021.
- [3] J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V, "A Heat Transfer Textbook, third ed.", Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts (2004).

[4] 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: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, 2021: AIP Publishing.

[5] C. Valverde, M. M. Rodríguez-García, and E. Rojas, "Modeling Microwave Heating of Molten Salt for Thermal Storage Systems", 28th SolarPACES Conference.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

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

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.15 l'ENEA ha collaborato con il Politecnico di Torino (LA1.16) all'elaborazione di n° 1 un abstract sottomesso e accettato a conferenza internazionale:

- 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.

## 10 Eventi di disseminazione

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.15 l'ENEA ha collaborato con il Politecnico di Torino (LA1.16) all'elaborazione di n° 1 un poster sottomesso e accettato a conferenza internazionale:

- 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.