



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



RICERCA DI
SISTEMA ELETTRICO



Ministero dell'Ambiente
e della Sicurezza Energetica



Progetto 1.9 “Solare termodinamico” / PTR 2022-2024

Sistemi di accumulo termico ibridizzati, alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili

Stati Generali del Solare Termico a Concentrazione, 29 gennaio 2023

Michela Lanchi - Responsabile Laboratorio Sviluppo Componenti e Impianti Solari

Valeria Russo, Mattia Cagnoli

ENEA - Dipartimento "Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili"

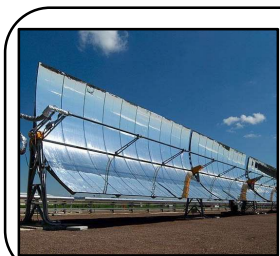


1101 0110 1100
0101 0010 1101
0001 0110 1110
1101 0010 1101
1111 1010 0000



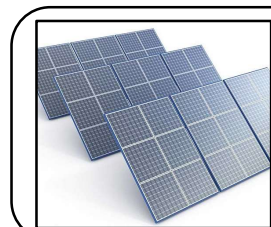
Ibridizzazione CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili

Perchè



Integrazione con accumuli di energia termica (TES) che fanno uso di materiali non strategici e reperibili

+



Costo competitivo dell'elettricità immessa direttamente in rete

Energia programmabile a costi competitivi (rispetto a PV+BESS se copertura carico >40%)^[1,2]

Come

Funzionamento complementare (integrazione a livello di rete)

- ❖ PV genera elettricità durante le ore di sole
- ❖ CSP carica il TES → elettricità in assenza di sole

Funzionamento integrato a livello di tecnologia

- ❖ PV
 - genera elettricità durante le ore di sole
 - contribuisce a caricare il TES nelle ore di picco
 - (fornisce elettricità per gli ausiliari del CSP)
- ❖ CSP carica il TES → elettricità in assenza di sole

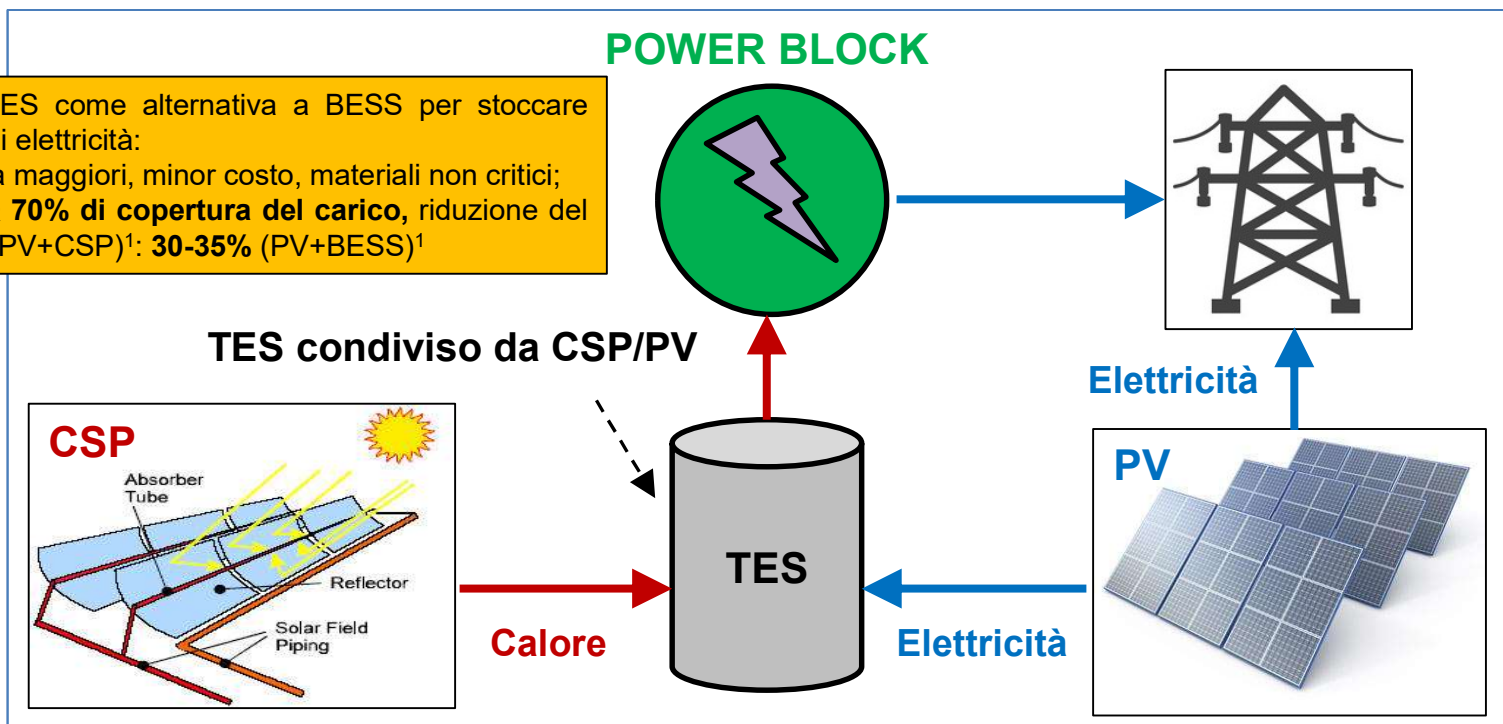
Update 2023 CSP/CST Implementation Plan del set Plan:
Activity 7.3: Reliable CSP, PV and other renewables integration,
Activity 7.4: Promoting the utilization of CSP with thermal storage to facilitate variable RE penetration in the electrical system

Ibridizzazione CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili

Ibridizzazione CSP/PV: funzionamento integrato a livello di tecnologia



- CSP+TES come alternativa a BESS per stoccare eccessi di elettricità:
- capacità maggiori, minor costo, materiali non critici;
Costi: @ 70% di copertura del carico, riduzione del 10-15% (PV+CSP)¹: 30-35% (PV+BESS)¹



Ibridizzazione CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili

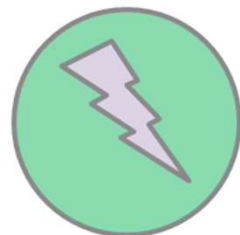
Obiettivi e Attività di Ricerca del Progetto 1.9

1) Offrire **soluzioni tecnicamente** fattibili per l'ibridizzazione degli **accumuli termoclini** con innovazioni a **TRL 5-7**

Attività: Sviluppo di sistemi di accumulo termoclineo ibridizzato

Come progettare e gestire un serbatoio termoclineo alimentato da doppia tecnologia energetica

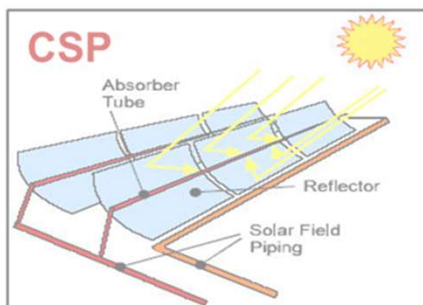
POWER BLOCK



2) Incrementare la **versatilità e la risposta dinamica** dei sistemi di accumulo ibridi, con innovazioni a **TRL 2-3**

Attività: Sviluppo di sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Come convertire efficacemente l'elettricità in calore e trasferirla direttamente nel serbatoio



Calore



Elettricità



Sistemi di accumulo termoclino ibridizzati

1) Obiettivi e attività di ricerca del Progetto 1.9

- Rendere disponibile un dimostratore tecnologico per la validazione sperimentale di sistemi di **accumulo termoclino a sali fusi ibridizzati, alimentabili da CSP e da PV (in questo caso mediante caldaia elettrica).**
- Testare il prototipo e **definire procedure di gestione di sistemi di accumulo termoclini ibridi** per la produzione e fornitura di calore/elettricità a processi industriali.

- 1 Definizione e progettazione della configurazione del prototipo del sistema di accumulo di tipo termoclino ibridizzato ✓
- 2 Sviluppo di modelli CFD del prototipo ✓
- 3 Realizzazione del prototipo e integrazione con impianto ENEA-SHIP
- 4 Svolgimento campagna sperimentale per valutazione delle prestazioni e definizione delle procedure operative
- 5 Confronto teorico tra prestazioni del prototipo e un nuovo sistema di accumulo ibridizzato con resistenze elettriche interne in luogo di scambiatore di carica



Ricerca di Sistema Elettrico



Sistemi di accumulo termocline ibridizzati

Termocline a sali fusi ibridizzato, alimentabile da CSP e da caldaia elettrica collegata a PV

Serbatoio di accumulo termocline a sali fusi (miscela ternaria) alimentato esclusivamente da tecnologia solare a concentrazione

Serbatoio di accumulo termocline a sali fusi (miscela ternaria) alimentato sia da tecnologia solare a concentrazione che da fotovoltaico

Impianto CSP

Scambiatore di scarica

Grandezza	U.M	Valore
Diametro	m	1.3
Altezza	m	2.5
Massa Sali @320°C	kg	5295.1
Energia (DT=100°C)	kWh	220.6

Scambiatore di carica

Impianto CSP

Scambiatore di scarica



Scambiatore di carica

Impianto PV

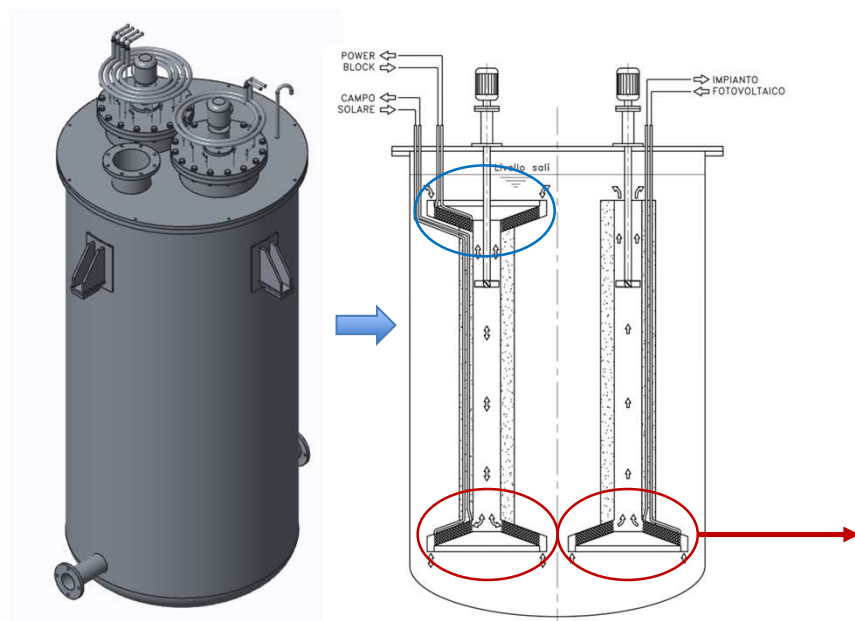
Scambiatore di carica

Configurazione del prototipo → 3 scambiatori elicoidali (serpentine) immersi nei sali fusi:

- (i) nelle 2 serpentine di carica (in rosso) circola olio diatermico riscaldato dal campo solare CSP e da una caldaia elettrica alimentabile da PV;
- (ii) l'olio diatermico che circola nella serpentina di scarica (in blu) si riscalda e fornisce calore di processo all'utenza.

Sistemi di accumulo termocline ibridizzati

Design del termocline a sali fusi ibridizzato



Scambiatore di carica

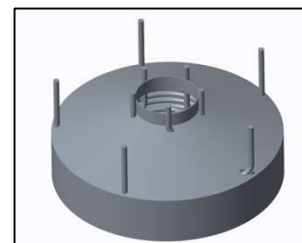
Fascio tubiero (5 tubi);
Tubi avvolti a spirale di forma tronco-conica impilati uno sull'altro, con concavità rivolta verso il basso;
durata carica: 6.2 ore @ 18 kW



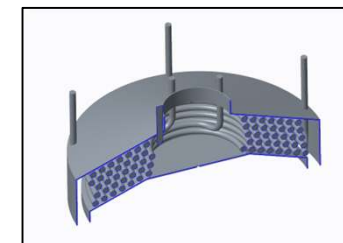
Singolo tubo



Fascio tubiero



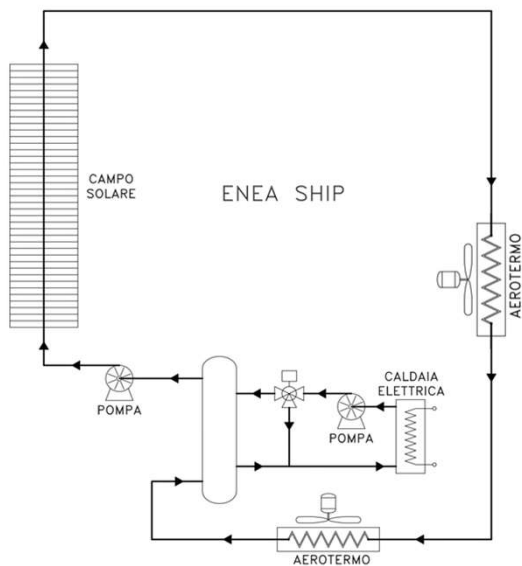
Assieme



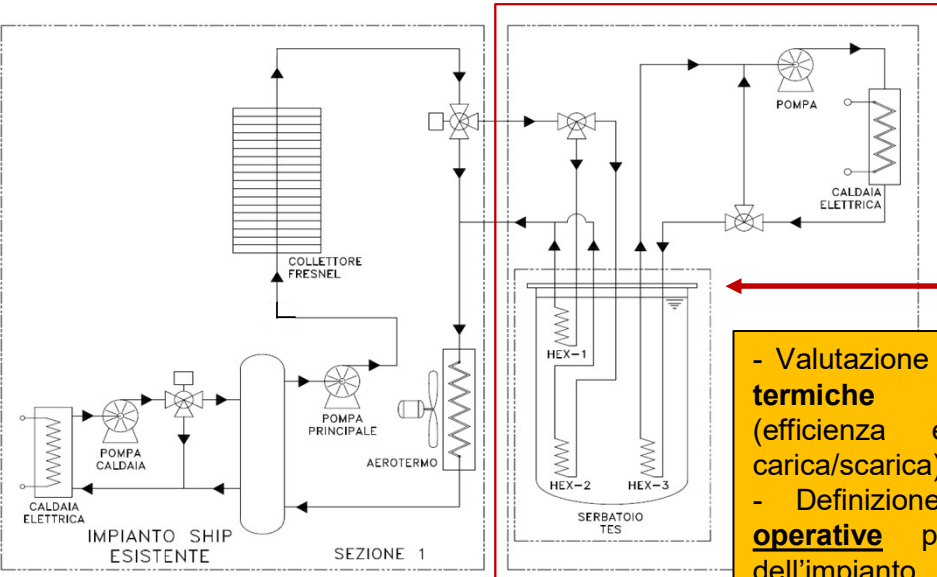
Assieme in sezione

Sistemi di accumulo termocline ibridizzati

Campagna sperimentale sull'impianto ENEA-SHIP con integrato il prototipo di accumulo ibridizzato



Impianto ENEA-SHIP



Nuovo circuito di impianto

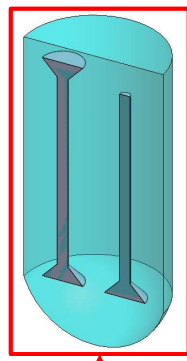
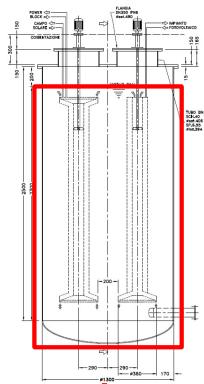


- Valutazione delle **prestazioni termiche** del prototipo (efficienza e transitori di carica/scarica);
- Definizione di **procedure operative** per la gestione dell'impianto ibridizzato ottimizzate per la produzione e fornitura di calore

Sistemi di accumulo termocline ibridizzati

Sviluppo modelli CFD e simulazione numerica

- Sviluppo modello numerico per l'analisi predittiva delle prestazioni e progettazione della campagna sperimentale sul dimostratore
- Elaborazione modello numerico di un dispositivo con resistenze elettriche immerse in luogo della serpentina di carica con prima ottimizzazione del lay-out
- Confronto tra i due sistemi termocline analizzati



Metà dominio per simmetria

Modello CFD di ordine ridotto

Il dominio computazionale include solamente la regione dei sali fusi e si sostituiscono tutti gli altri elementi del termocline con modelli semplificati (scambiatori/pareti/calotta superiore)

Superficie libera del sale:

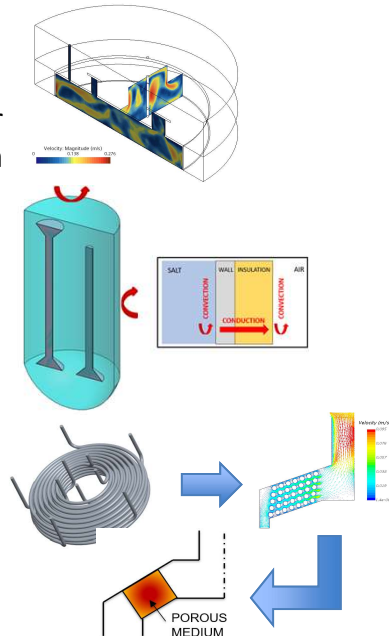
sviluppo di un modello CFD 3D per caratterizzare il calore disperso dalla superficie libera dal sale

Pareti laterali:

valutazione della resistenza termica equivalente offerta dalle pareti del serbatoio

Scambiatori:

assimilati a mezzo poroso tramite lo sviluppo di un modello CFD 2D assialsimmetrico



Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

2. Obiettivi e attività di ricerca del Progetto 1.9

- **Identificare il metodo più promettente** per il riscaldamento elettrico (di tipo volumico) dei sali
- **Verificare sperimentalmente la fattibilità** della tecnologia proposta su scala di laboratorio

1

Valutazione delle tecnologie per il riscaldamento elettrico dei sali:
revisione della letteratura e analisi teorica preliminare



2

Identificazione della tecnologia più promettente



3

Sviluppo di modelli numerici di supporto alla progettazione del dispositivo
sperimentale



4

Realizzazione e assemblaggio del set-up sperimentale

5

Campagna sperimentale



Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Valutazione di possibili soluzioni di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Requisiti: Elevata potenza trasferibile ai sali, Tempi rapidi di risposta, Ampio intervallo termico operativo

Metodologia → tre sistemi di riscaldamento elettrico sono stati analizzati teoricamente con modelli matematici

Tecnologia	Vantaggi 😊	Svantaggi 😞
Effetto Joule	Tecnologia più matura, in studio presso diversi Istituti di Ricerca in ambito CSP (ENEA per fusione sali)	Scambio termico di superficie: la max potenza scaricabile è limitata (quando il sale è vicino alla max temperatura operativa, potenza < 5 W/kg)
Microonde	<ol style="list-style-type: none"> 1. Riscaldamento volumetrico 2. Nessuna particolare limitazione di potenza 3. Disponibili sistemi di generazione commerciali adatti a sperimentazioni di laboratorio (1-3 kW) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si conosce poco delle proprietà dielettriche dei sali alle frequenze delle microonde (1 sola fonte) 2. Ci potrebbero essere difficoltà di integrazione del sistema scaldante nel serbatoio
Induzione (diretta/indiretta)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Riscaldamento volumetrico 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Assenza di letteratura in merito 2. La corrente necessaria per il riscaldamento diretto a induzione del sale è probabilmente troppo alta

Da approx. quasi-statica delle eq. di Maxwell, si ricava la potenza dissipata da correnti di spostamento: Per freq. 10 kHz, corrente richiesta molto alta

$$W = \frac{\pi \sigma (\omega \mu_0 n I R^2)^2}{16}$$

Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Risultati dell'analisi teorica basata su modelli matematici

Tecnologia	Vantaggi		
Effetto Joule	Tecnologia più matura in studio presso diversi Istituti di Ricerca in ambito CSP (ENEA per fusione sali)	Scambio termico scaricabile e limitato (quando il sale è vicino alla max temperatura operativa)	potenza
Microonde	<ol style="list-style-type: none"> 1. Riscaldamento volumetrico 2. Nessuna particolare limitazione di potenza 3. Disponibili sistemi di generazione commerciali adatti a sperimentazioni di laboratorio (1-3 kW) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si conosce poco delle proprietà dielettriche dei sali alle frequenze delle microonde (1 sola fonte) 2. Ci potrebbero essere difficoltà di integrazione del sistema scaldante nel serbatoio 	
Induzione (diretta/indiretta)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Riscaldamento volumetrico 2. Nessuna particolare limitazione di potenza 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Assenza di letteratura in merito 2. Solo l'induzione diretta permette un vero e proprio riscaldamento volumetrico 3. La corrente necessaria per il riscaldamento diretto a induzione del sale è probabilmente troppo alta 	

Miglior compromesso tra innovazione e fattibilità tecnologica (nel «proof of concept» potenza ≥ 100 W/kg)

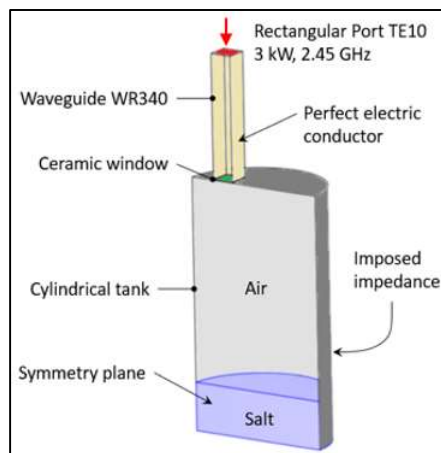
Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Dispositivo sperimentale: progettazione mediante modello numerico

Scopo dispositivo sperimentale: osservare macroscopicamente il fenomeno, verificare la fattibilità dell'utilizzo delle micro-onde per riscaldare i sali in un ampio range di temperatura e all'interno di un volume confinato (sistema termoclino)

PROBLEMA MULTI-FISICO

MODELLO ELETTROMAGNETICO



Dominio computazionale

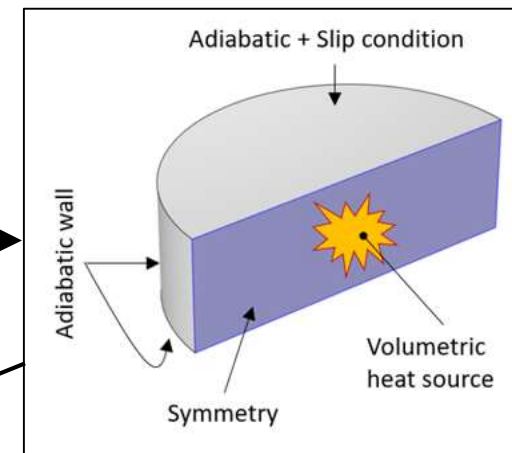
- Sali + aria + tratto guida d'onda
- Metà serbatoio (simmetria)

Studio parametrico su una selezione di parametri

Potenza dissipata (sorgente termica volumetrica)

Distribuzione della temperatura dei sali

MODELLO TERMO FLUIDO-DINAMICO



Dominio computazionale

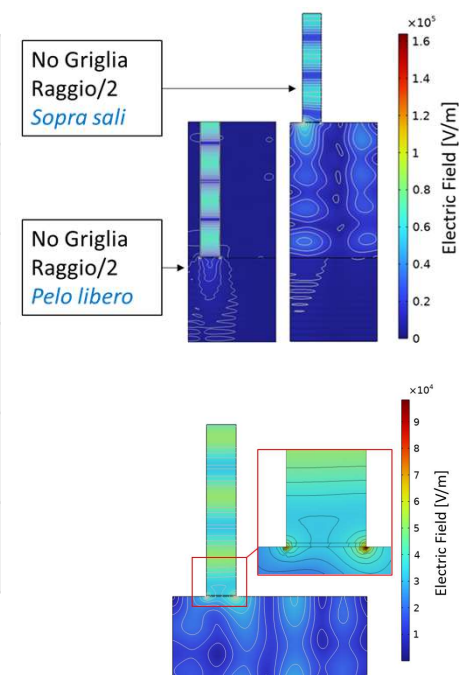
- Sali
- Metà serbatoio (simmetria)

Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Dispositivo sperimentale: analisi parametrica e configurazione finale

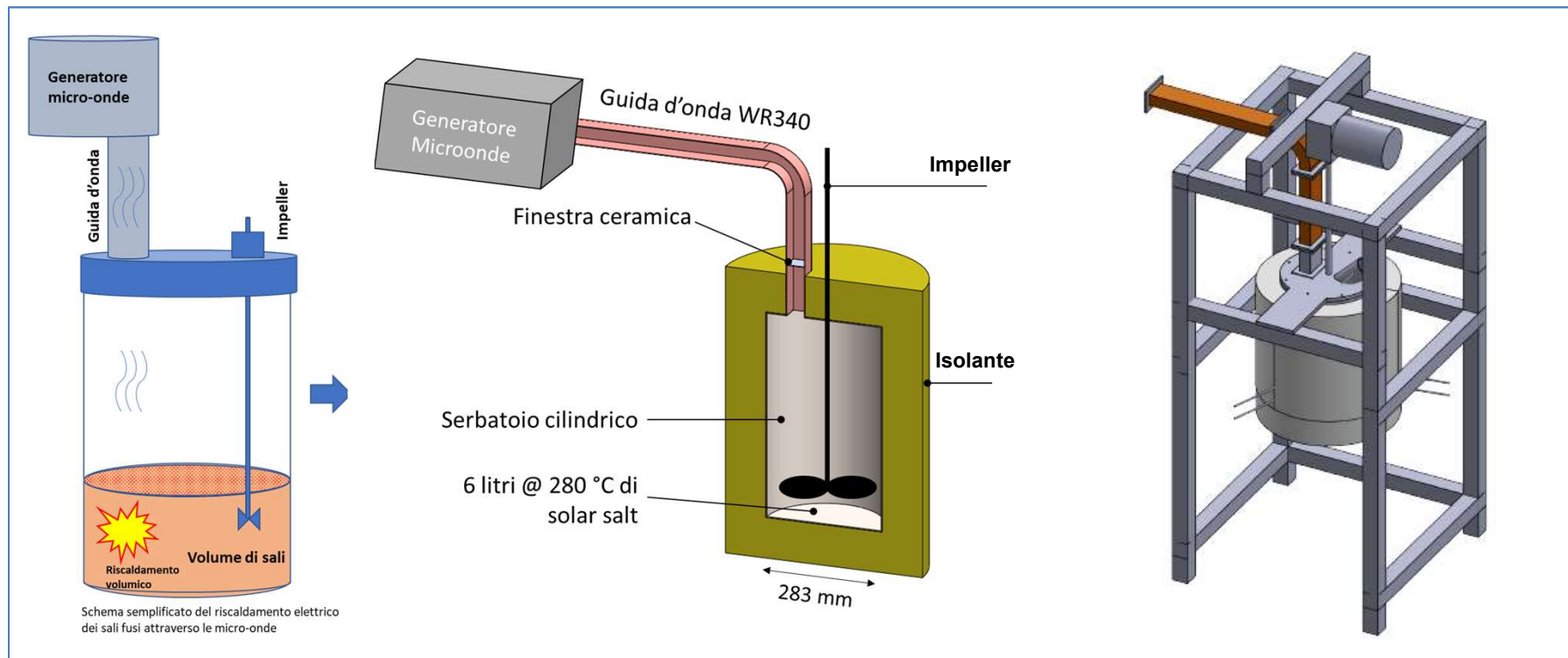
Parametri	Sotto-Parameteri	Valore finale	Note
Griglia	Inclusa Si/No	No	A causa dell'incremento di efficienza ottenibile grazie al volume d'aria sopra i sali
Guida d'onda	Posizione verticale	Sopra i sali	Il volume d'aria sopra i sali aiuta a ridurre la potenza riflessa
	Posizione orizzontale	Raggio/2	
Diametro		282.8 mm	Un diametro grande aiuta d uniformare il campo elettrico nella cavità
Volume		6 litri	Tanto più grande quanto minore il volume (utile) d'aria sopra i sali

Caratteristiche dimensionali e progettuali del dispositivo



Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Dispositivo sperimentale: set-up sperimentale



Sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi

Attività future nell'ambito del Progetto 1.9 (PTR 2022-2024)

- ❖ Assemblaggio del set-up sperimentale, comprensivo di generatore di micro-onde e serbatoio di accumulo dei Sali
- ❖ Esecuzione della campagna sperimentale per la comprensione del comportamento dei sali fusi sotto l'azione delle microonde a medio-alta temperatura
- ❖ **Studio delle prestazioni del sistema su dispositivi di accumulo** (dinamica fase di carica, potenza trasferibile ai Sali)



Ing. Michela Lanchi

michela.lanchi@enea.it

