

Ricerca di Sistema elettrico



Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili – Realizzazione e sperimentazione di un prototipo di sistema di accumulo termoclineo ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.13)

V. Russo, G. Petroni, M. D'Auria, P. Di Ascenzi, A. Benedetti, G. Cara, M. Giorgetti, G. Crocenzi, F. Rovense, W. Gaggioli

Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili – Realizzazione e sperimentazione di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.13)

V. Russo, G. Petroni, M. D'Auria, P. Di Ascenzi, A. Benedetti, G. Cara, M. Giorgetti, G. Crocenzi, F. Rovense, W. Gaggioli (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: LA1.13

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Valeria Russo

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 26

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Realizzazione prototipo	11
7.2	Commissioning e prove funzionali.....	17
7.3	Prove sperimentali	20
7.4	Procedure operative.....	27
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	31
9	Pubblicazioni scientifiche	32
10	Eventi di disseminazione	33

Indice delle figure

Figura 1 – Schema serbatoio di stoccaggio termico con scambiatori di calore immersi.....	11
Figura 2 – Schema del nuovo impianto composto serbatoio di stoccaggio collegato con impianto solare a concentrazione e caldaia elettrica	12
Figura 3 – Design degli scambiatori di a) carica e di b) scarica	12
Figura 4 – Realizzazione del canale centrale dello scambiatore di carica	13
Figura 5 – a) Tubi dello scambiatore avvolti a spirale b) assemblaggio dei tubi dello scambiatore	13
Figura 6 – Dettaglio della realizzazione del coperchio del serbatoio di stoccaggio	14
Figura 7 – a) vista del serbatoio di stoccaggio, vaso di espansione, pompa di circolazione e riscaldatore, b) vista generale serbatoio	14
Figura 8 – Dettagli del serbatoio di stoccaggio termico	15
Figura 9 – Schema per il controllo dell’impianto “ENEASHIP”	16
Figura 10 – Schema per il controllo del prototipo di stoccaggio termico ibridizzato	16
Figura 11 – Posizione delle termocoppie interne al serbatoio	17
Figura 12 – Andamento temperature pettine interno al serbatoio durante lo scioglimento dei Sali	18
Figura 13 – Caratterizzazione impeller durante la fase di carica	19
Figura 14 – Caratterizzazione impeller durante la fase di scarica	20
Figura 15 – Stratificazione interna del serbatoio durante la fase di carica con un solo scambiatore di carica	21
Figura 16 – Portata di olio e sale nello scambiatore.....	21
Figura 17 – Temperature ingresso e uscita dello scambiatore di carica	22
Figura 18 – Potenza termica scambiata	22
Figura 19 – Stratificazione interna del serbatoio durante la fase di carica	23
Figura 20 – Condizioni di portata e temperatura nello scambiatore lato SHIP.....	24
Figura 21 – Condizioni di portata e temperatura nello scambiatore lato PV	24
Figura 22 – Andamento della potenza termica dei due scambiatori di carica e dell’energia fornita e accumulata	25
Figura 23 – Stratificazione interna al serbatoio durante la fase di scarica.....	26
Figura 24 – Portata di olio e sale all’interno dello scambiatore	26
Figura 25 – Andamento temperature ingresso e uscita dei due fluidi dallo scambiatore e potenza termica scambiata.....	27
Figura 26 – Andamento della potenza termica dello scambiatore di scarica e dell’energia scaricata	27

Figura 27 – Schema semplificato del sistema di accumulo termico alimentato da CSP (sezione 1) e da altra fonte rinnovabile (sezione 2).....	28
Figura 28 – Schema dei flussi energetici del prototipo di stoccaggio termico ibridizzato	29

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Condizioni della prova di carica con un solo scambiatore	20
Tabella 2 – Condizioni di test di carica combinata lato SHIP e PV	23
Tabella 3 – Condizioni della prova di scarica	25

1 Risultati attesi

Lo scopo della linea di attività LA1.13 era quello di realizzare un prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzato tra solare a concentrazione (CSP) ed altre fonti energetiche rinnovabili e caratterizzarne il funzionamento.

Nel dettaglio i risultati attesi per questa linea di attività sono riassunti come segue:

- realizzazione del prototipo di accumulo termico ibridizzato tra CSP ed altre fonti rinnovabili;
- caratterizzazione e analisi del comportamento del prototipo di accumulo termico ibridizzato realizzato;
- definizione delle procedure operative per la gestione del prototipo di sistema di accumulo termico ibridizzato asservito all'impianto Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, con l'obiettivo di massimizzare la produzione di energia termica da sola fonte solare.

2 Risultati ottenuti

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.13 è stato realizzato il prototipo di sistema di stoccaggio termico, di tipo termocline, ibridizzato progettato nella precedente LA1.11.

È stato eseguito il collaudo di tutti i componenti del circuito e di tutta la strumentazione presente in campo e sono state portate a termine tutte le attività di commissioning dell'intero prototipo.

Il nuovo sistema di accumulo termico è stato collegato con l'impianto CSP di tipo Fresnel, denominato "ENEA-SHIP", già presente presso il C.R. ENEA di Casaccia.

Sono state definite, testate ed ottimizzate le procedure di start-up e shut-down dei due circuiti che alimentano il sistema di stoccaggio termico.

È stata effettuata la calibrazione del sistema di puntamento e conseguente allineamento degli specchi del campo solare dell'impianto "ENEA-SHIP".

Una volta terminate le operazioni di messa a punto dei due circuiti, sono state definite le condizioni di prova al fine di caratterizzare il comportamento dei componenti.

È stata portata a termine una campagna di prove sperimentali con l'obiettivo di studiare il comportamento del sistema di accumulo alimentato da due differenti fonti di energia rinnovabili.

Da un'analisi dei dati ottenuti durante la fase di sperimentazione sono state definite le procedure operative per la gestione dell'impianto.

3 Prodotti attesi

In accordo con il capitolato di Progetto, i prodotti attesi per la linea di attività LA1.13 sono costituiti da n° 1 report tecnico, n° 1 prototipo, dall'up-grade di una facility sperimentale e da procedure:

- Report: "Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili – Realizzazione e sperimentazione di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali" (Dicembre 2024).
- Prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzato tra CSP ed altre fonti energetiche rinnovabili.
- Up-grade dell'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, per asservire il prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato tra CSP ed altre tecnologie FER.
- Procedure operative di gestione di un impianto CSP ibridizzato con altra tecnologia FER per la fornitura di energia per processi industriali.

4 Prodotti sviluppati

In accordo con il capitolato di Progetto, i prodotti sviluppati nella linea di attività LA1.13 sono costituiti dal presente report tecnico, da un prototipo, dall'up-grade di una facility sperimentale e da procedure:

- V. Russo, G. Petroni, M. D'Auria, P. Di Ascenzi, A. Benedetti, G. Cara, M. Giorgetti, G. Crocenzi, W. Gaggioli, "Ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili - Realizzazione e sperimentazione di un prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all'impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali", Dicembre 2024, Report RdS_PTR 22-24_PR1.9_LA1.13_305.
- Prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termocline, ibridizzato tra CSP ed altre fonti energetiche rinnovabili.
Caratteristiche dimensionali: serbatoio di accumulo termico, contenente una miscela di sali ternari (Hitec-XL), di altezza pari a 2.5 m e diametro pari 1.3 m, dotato di tre scambiatori interni a fascio tubiero in cui circola olio diatermico (Therminol-66), due di carica realizzati con 5 tubi dal diametro pari a 9.53 mm disposti su 7 spire, ed uno di scarica realizzato con 7 tubi dello stesso diametro disposti su 7 spire.
Caratteristiche prestazionali nominali: energia immagazzinata pari a 200 kWh; potenza di scambio in fase di carica per ogni singolo scambiatore pari a 17.8 kW (con portata di olio di 0.15 kg/s); potenza in fase di scarica pari a 19,6 kW (con portata di olio pari di 0.15 kg/s).
Caratteristiche prestazionali sperimentali: energia immagazzinata pari a circa 80 kWh; potenza di scambio in fase di carica per ogni singolo scambiatore pari a circa 14 kW (con portata di olio di 0.13 kg/s) e pari a circa 25 kW (con portata di olio di 0.2 kg/s); potenza in fase di scarica pari a circa 10 kW (con portata di olio di 0.13 kg/s).
- Up-grade dell'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia, con asservito il prototipo di sistema di accumulo termocline ibridizzato tra CSP ed altre fonti energetiche rinnovabili.
La facility sperimentale ENEA-SHIP, a seguito di up-grade, costituisce un dimostratore tecnologico di un impianto CSP ibridizzato con altre tecnologie FER per la fornitura di energia per processi industriali.
L'up-grade della facility sperimentale è ispezionabile presso il C.R. ENEA di Casaccia.
- Procedure operative di gestione di un impianto CSP ibridizzato, ottimizzate per massimizzare la generazione e l'accumulo di energia termica da fonte solare, per l'alimentazione di processi industriali che necessitano di calore e/o energia elettrica.
Le procedure operative, come previsto, sono descritte e comprese nel presente report RdS_PTR 22-24_PR1.9_LA1.13_305.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

La linea di attività LA1.13 è iniziata al mese 26 (Febbraio 2024) e non, come previsto, al mese 19 (Luglio 2023) a causa della ritardata conclusione della precedente LA1.11 (i cui risultati costituivano l'input per l'espletamento della LA1.13).

Nonostante il suddetto ritardato inizio, per la linea di attività LA1.13 non si sono riscontrati scostamenti sulle attività e sui risultati.

In merito agli scostamenti economici, i costi totali (escluse spese generali) sostenuti e rendicontati per l'esecuzione della LA1.13, pari a circa 278,4 k€, sono minori rispetto a quelli a preventivo, pari a circa 322,4 k€. Le principali motivazioni degli scostamenti sono:

- I costi di personale (cat. A) a consuntivo, pari a circa 67,8 k€, sono minori del preventivo, pari a 71,1 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 3,2 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° 4 unità di personale rendicontate nella LA1.13.
- I costi per strumenti, attrezzature e software specifico (cat. B) a consuntivo, pari a circa 2,5 k€, sono minori del preventivo, pari a circa 13,3 k€, a causa di: (i) minor durata della LA1.13 rispetto a quella prevista (da 18 a 11 mesi) con minor numero di giorni di utilizzo dei software acquistati (cfr. applicazione del criterio quota d'uso per determinazione costi ammissibili di cat. B); (ii) minor importo di acquisto e ritardi nell'entrata in funzione di una strumentazione per la calibrazione del campo solare.
- I costi di esercizio (cat. C) a consuntivo, pari a circa 208,1 k€, sono minori del preventivo, pari a 238 k€, per economie ottenute nella procedura di affidamento dell'appalto relativo alla realizzazione e fornitura di un prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termoclino a sali fusi, ibridizzato tra CSP e altre tecnologie FER (e sua implementazione nell'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" opportunamente modificato), con minor importo dei relativi SAL intermedio e saldo contrattuale.

6 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.13 è stato realizzato il prototipo di sistema di stoccaggio termico, di tipo termoclino, ibridizzato progettato nella linea LA1.11, è stato effettuato il collaudo di tutte le apparecchiature installate, della strumentazione e del relativo sistema di controllo ed infine è stato portato a termine il commissioning dell'intero sistema. Successivamente è stata condotta una campagna sperimentale al fine di studiare il comportamento del sistema di accumulo termico alimentato da solare a concentrazione e da altra fonte rinnovabile. A tal scopo è stata definita una matrice di prove e sono state acquisite tutte le grandezze necessarie all'analisi del sistema. Sulla base dei dati sperimentali sono state definite le procedure operative per la gestione di un impianto CSP ibridizzato con altra tecnologia FER, mediante il prototipo di sistema di stoccaggio termoclino a sali fusi, al fine di massimizzare la generazione e l'accumulo di energia termica da fonte solare per soddisfare le esigenze di eventuali processi industriali che necessitano di calore e/o energia elettrica.

7 Dettaglio delle attività svolte

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.13 è stata data esecuzione al Contratto di Appalto relativo alla realizzazione del prototipo di sistema di accumulo termico, di tipo termocline, ibridizzato (progettato nella precedente LA1.11) alimentabile da CSP e altra tecnologia FER, e al suo asservimento all'impianto sperimentale Fresnel "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia. La società appaltatrice è stata la NUOVA S.TE.I.M. S.r.l..

La sperimentazione del dimostratore tecnologico, costituito dall'impianto "ENEA-SHIP" dotato del prototipo, ha consentito di studiare il comportamento del sistema di accumulo termico alimentato da due differenti tecnologie FER e di definire le procedure operative per la gestione dell'impianto CSP ibridizzato.

7.1 Realizzazione prototipo

L'appalto prevedeva la realizzazione di un serbatoio contenente 3 scambiatori di calore a fascio tubiero, all'interno del serbatoio rimane confinata come mezzo di accumulo una miscela di sali ternari (Hitec-XL), all'interno dei tubi degli scambiatori, invece, scorre olio diatermico (Therminol-66) come fluido termovettore. Nel dettaglio, abbiamo 2 scambiatori di carica posti nella parte bassa del serbatoio ed uno di scarica posto nella parte alta. Il sistema così composto (Figura 1) è stato poi collegato, da una parte attraverso uno scambiatore di carica al campo solare "ENEA-SHIP" e dall'altra attraverso il secondo scambiatore di carica ad una caldaia elettrica che simula l'impianto fotovoltaico.

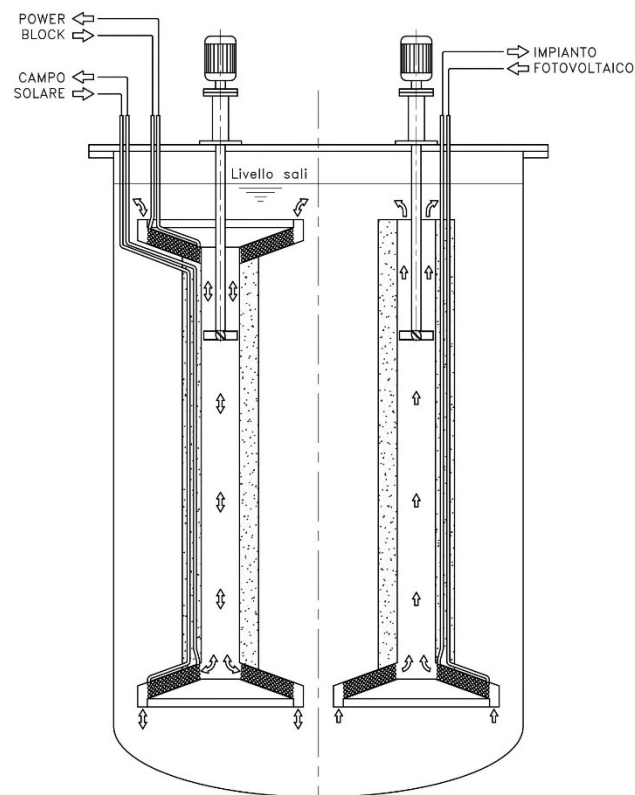


Figura 1 - Schema serbatoio di stoccaggio termico con scambiatori di calore immersi

In questo modo è possibile alimentare il sistema di stoccaggio termico sia con tecnologia solare a concentrazione sia attraverso una differente fonte rinnovabile. Lo scambiatore di scarica invece viene collegato con un aerotermo che sostituisce l'utenza termica (Figura 2).

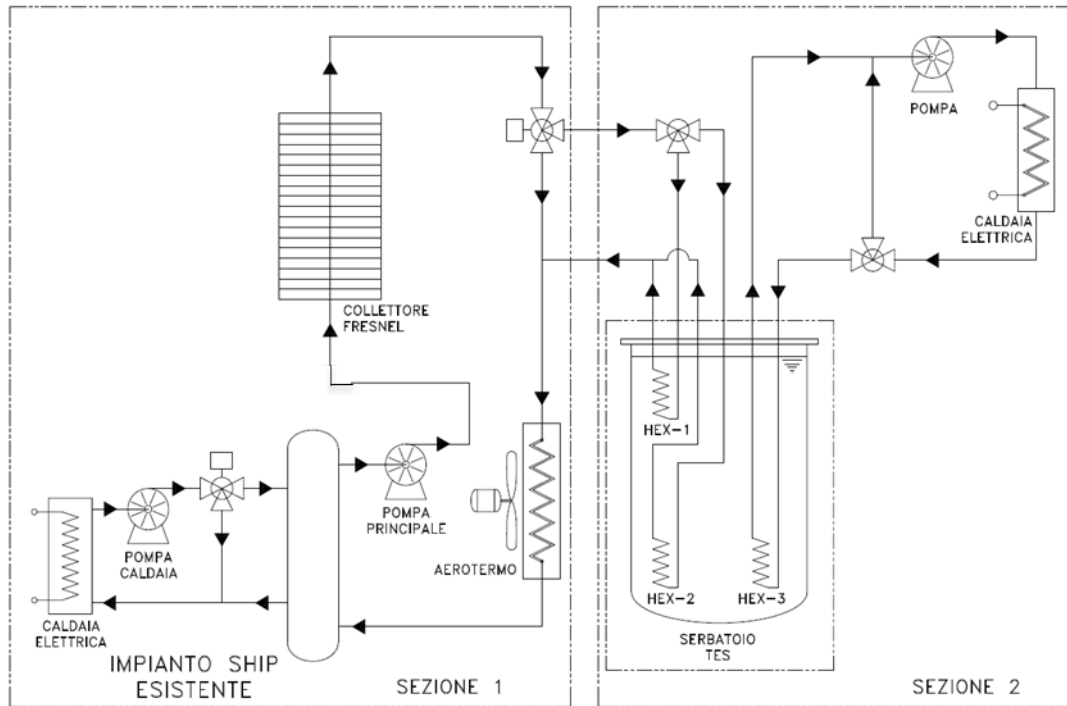


Figura 2 - Schema del nuovo impianto composto serbatoio di stoccaggio collegato con impianto solare a concentrazione e caldaia elettrica

Durante la realizzazione degli scambiatori di calore, componenti principali del sistema (Figura 3), sono stati effettuati diversi sopralluoghi presso la ditta appaltatrice e nelle immagini di seguito è stato documentato l'avanzamento dei lavori. La Figura 4 mostra l'assemblaggio del canale sul quale è montato lo scambiatore di carica collegato alla caldaia elettrica, la Figura 5 mostra i singoli tubi degli scambiatori appena piegati a spirale ed il loro assemblaggio.

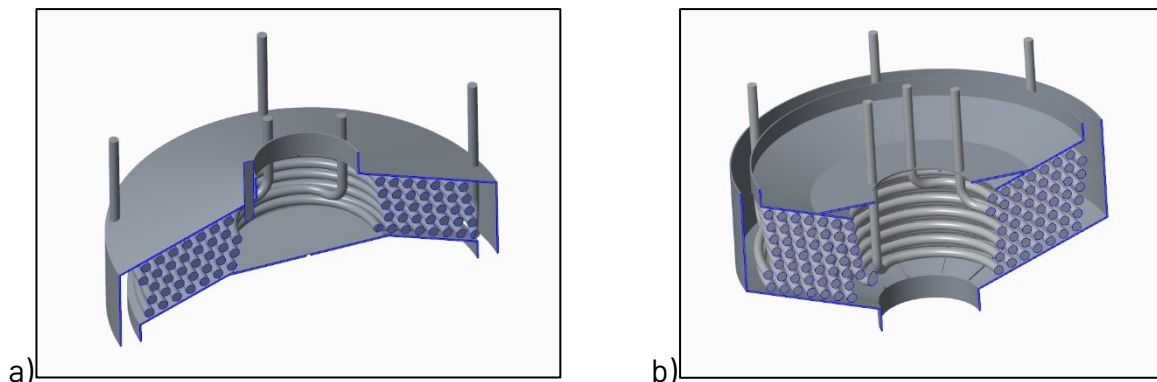


Figura 3 - Design degli scambiatori di a) carica e di b) scarica



Figura 4 – Realizzazione del canale centrale dello scambiatore di carica



a)



b)

Figura 5 – a) Tubi dello scambiatore avvolti a spirale b) assemblaggio dei tubi dello scambiatore

Nella Figura 6 viene mostrato un dettaglio della realizzazione del coperchio del serbatoio di stoccaggio e dei collettori a forma di toro dei tubi degli scambiatori di calore.

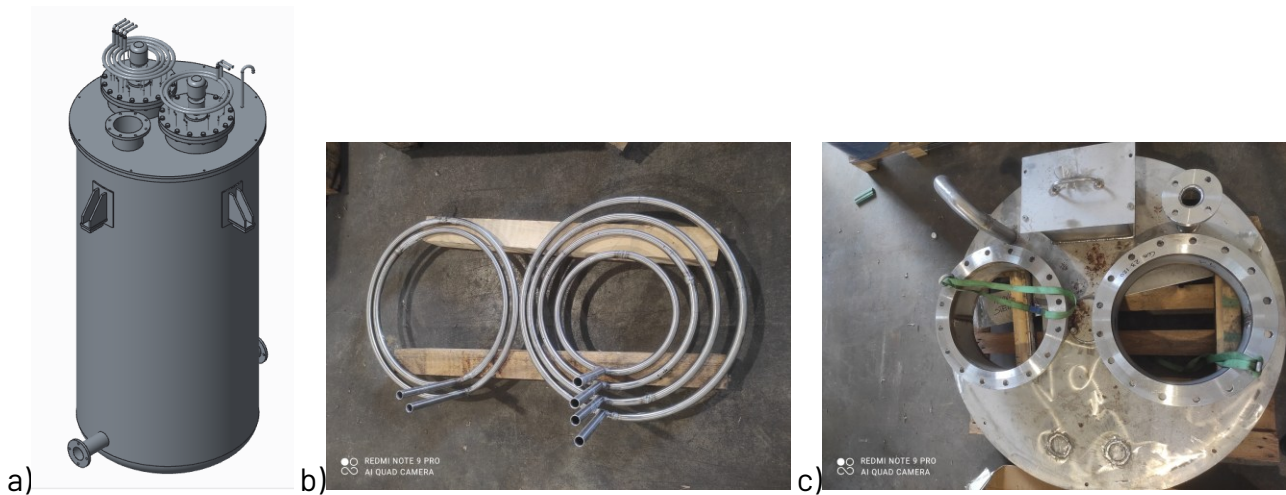


Figura 6 – Dettaglio della realizzazione del coperchio del serbatoio di stoccaggio

Una volta completate la realizzazione e l'assemblaggio dei componenti in officina, la ditta ha trasportato il serbatoio presso il C.R. ENEA di Casaccia ed ha effettuato i collegamenti con l'impianto solare a concentrazione e con la caldaia elettrica, realizzando il piping ed installando tutti gli ausiliari necessari per il balance of plant (Figura 7), come previsto dal progetto originale.



Figura 7 – a) vista del serbatoio di stoccaggio, vaso di espansione, pompa di circolazione e riscaldatore, b) vista generale serbatoio

In Figura 8 sono mostrati dettagli del coperchio del serbatoio con tutta la strumentazione collegata.



Figura 8 - Dettagli del serbatoio di stoccaggio termico

L'intero prototipo è equipaggiato con la strumentazione necessaria a poter valutare le prestazioni del sistema; quindi, sono state installate circa 90 termocoppie e due misuratori di portata, oltre a tutta la strumentazione necessaria al controllo, gestione e sicurezza del circuito.

Le termocoppie sono state installate in ingresso e uscita dei singoli tubi degli scambiatori di calore, sia lato fluido freddo che lato fluido caldo, al fine di poter caratterizzare il comportamento del componente sia in fase di carica che in fase di scarica.

Tutte le grandezze misurate sono state acquisite e riportate al sistema di controllo DCS; nelle figure di seguito vengono mostrate le pagine grafiche del suddetto sistema, in particolare in Figura 9 viene mostrato lo schema dell'impianto "ENEA-SHIP" che alimenta il prototipo di accumulo termico mostrato nella Figura 10, infine in Figura 11 si può notare la disposizione di un pettine di termocoppie posizionato all'interno del serbatoio attraverso il quale valutare la stratificazione termica della miscela di sali durante le fasi di carica e scarica.

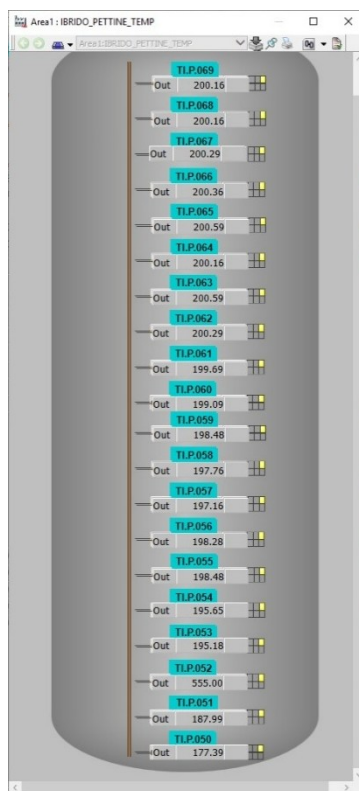


Figura 11 – Posizione delle termocoppie interne al serbatoio

Inoltre, nella Figura 10 si può notare il riscaldatore elettrico utilizzato per simulare l'impianto fotovoltaico con il quale viene alimentato l'accumulo termico ibridizzato.

7.2 Commissioning e prove funzionali

Una volta completati i lavori di realizzazione e la messa a punto del prototipo di accumulo termico si è proceduto con il commissioning e l'esecuzione dei test funzionali per i componenti del circuito.

La prima attività è stato lo scioglimento della miscela di sali ternaria all'interno del serbatoio; quindi, sono state accese le resistenze elettriche posizionate nella parte bassa del serbatoio e negli scambiatori di carica è stato fatto circolare l'olio, preriscaldato dalla caldaia elettrica così da velocizzare il cambiamento di fase. L'intero processo di scioglimento ha impiegato circa 180 ore. Come da procedure definite nella linea di attività LA1.23, i set point delle resistenze elettriche sono stati alzati lentamente al fine di evitare la formazione di stress meccanici dovuti all'aumento di volume della miscela durante il passaggio dallo stato solido allo stato liquido. Dal grafico in Figura 12 si può notare come le resistenze elettriche siano posizionate ad un'altezza dal fondo del serbatoio pari a circa 60 cm, infatti, intorno a quella posizione si ha un innalzamento maggiore della temperatura; inoltre, sempre dallo stesso grafico si può notare l'influenza dell'olio caldo che attraversando gli scambiatori contribuisce principalmente al riscaldamento dei sali nella parte alta del serbatoio.

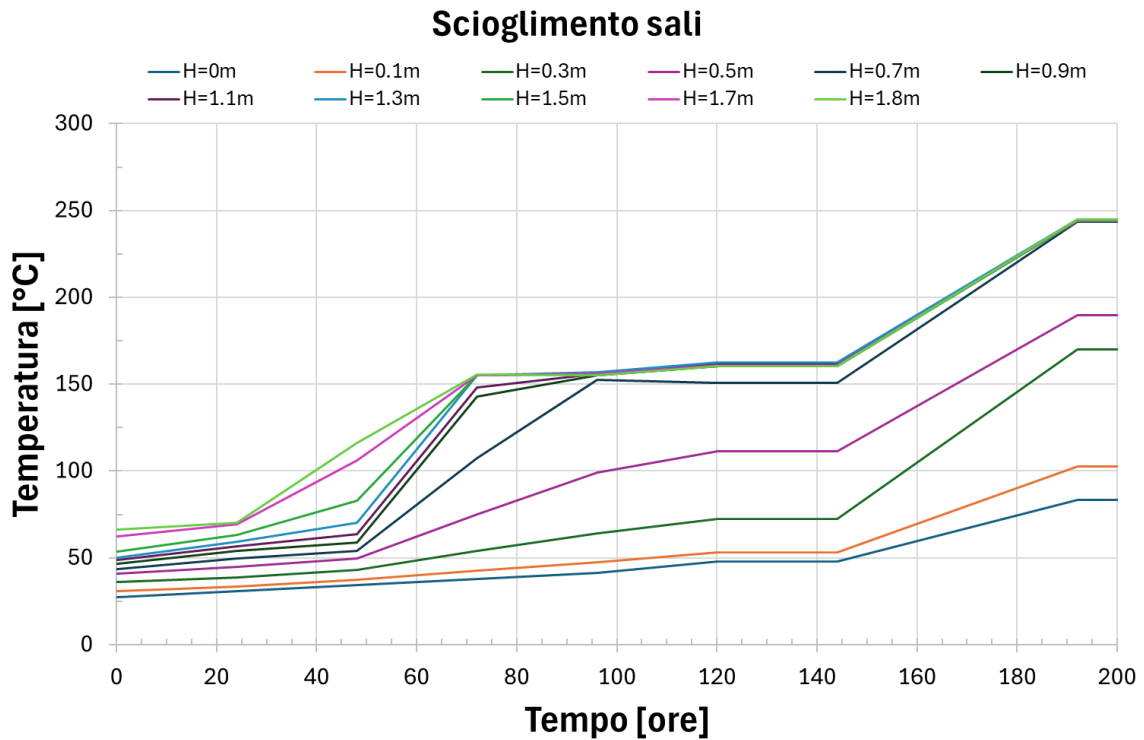


Figura 12 - Andamento temperature pettine interno al serbatoio durante lo scioglimento dei Sali

Una volta sciolti i sali all'interno del serbatoio è stato possibile azionare gli impeller posizionati all'interno dei canali degli scambiatori che verranno poi utilizzati per regolare la portata dei sali al fine di ottimizzare lo scambio termico.

È stata quindi effettuata una caratterizzazione degli impeller sia in condizioni di carica del sistema di stoccaggio che in condizioni di scarica.

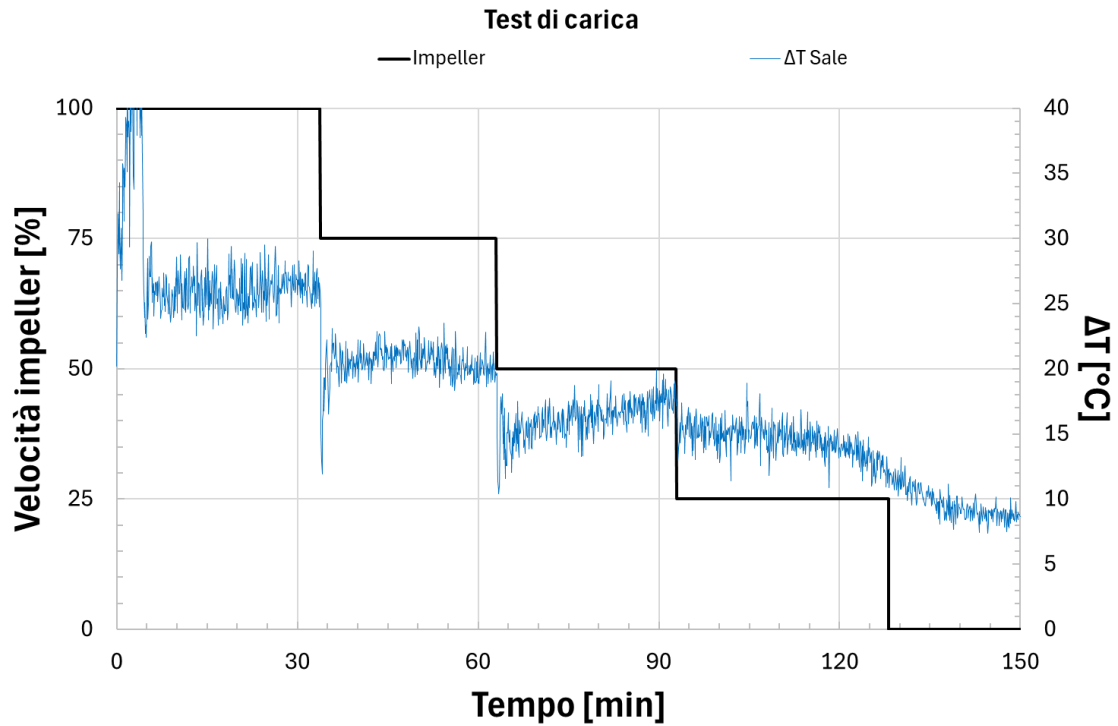


Figura 13 - Caratterizzazione impeller durante la fase di carica

In Figura 13 viene mostrato il comportamento della differenza di temperatura del sale tra l'ingresso e l'uscita dello scambiatore di carica al variare della velocità di rotazione in senso orario dell'impeller.

Analoga prova è stata effettuata con l'impeller posizionato nel canale dello scambiatore di scarica; in Figura 14 viene mostrata la sua influenza sulla differenza di temperatura ΔT del sale, in questo caso l'impeller ruota in senso antiorario.

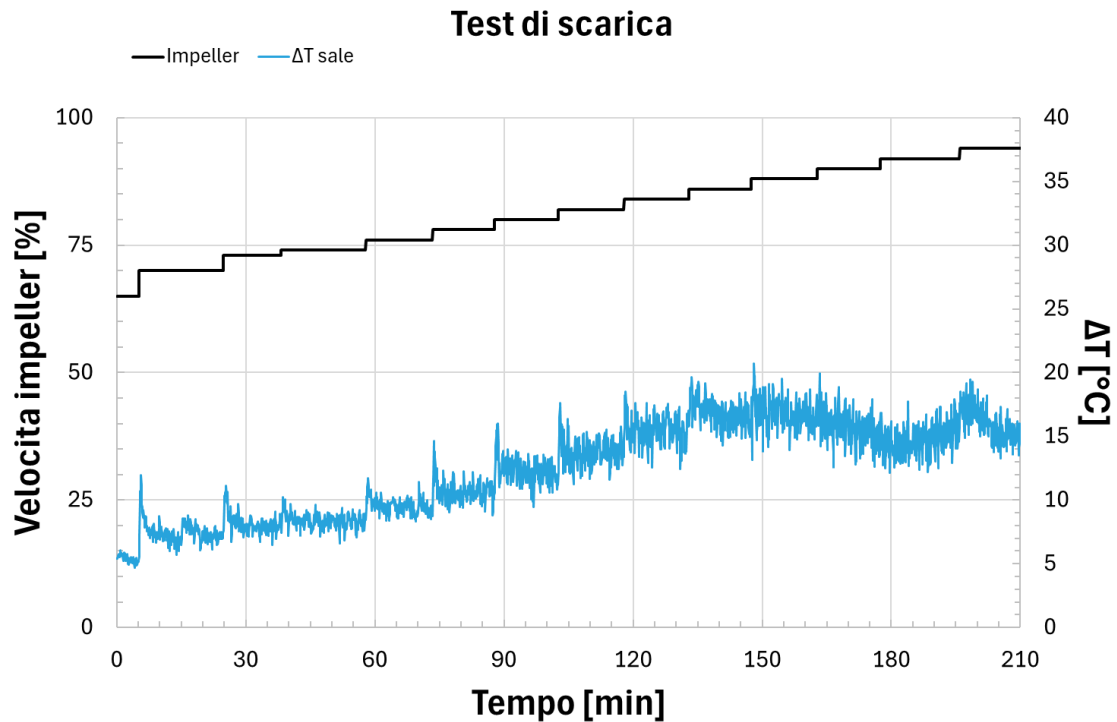


Figura 14 – Caratterizzazione impeller durante la fase di scarica

7.3 Prove sperimentali

A valle dei test funzionali sono state eseguite le prove di carica e scarica del sistema di accumulo. Per quanto riguarda la carica con un solo scambiatore alimentato, di seguito si riportano le condizioni di test:

	U.M.	Valore
T media serbatoio	°C	200
T media olio ingresso scambiatore	°C	303
Portata olio	kg/s	0.2
Impeller	%	100

Tabella 1 – Condizioni della prova di carica con un solo scambiatore

Nelle figure seguenti viene mostrato il comportamento del sistema, in particolare: in Figura 15 la stratificazione termica all'interno del serbatoio; nella Figura 16 la portata di olio e sali nello scambiatore; nella Figura 17 le temperature dei due fluidi; infine, nella Figura 18 la potenza scambiata che risulta essere pari a circa 25 kW fino a quando la temperatura della parte bassa del serbatoio non inizia a crescere.

Dai grafici si può notare come azionando l'impeller si riesca a mantenere costante la portata del sale ed il suo ΔT a cavallo dello scambiatore, quando poi la temperatura nella parte bassa

del serbatoio incomincia a salire, diminuisce la differenza di temperatura ΔT e, di conseguenza, aumenta la portata del sale e diminuisce la potenza scambiata.

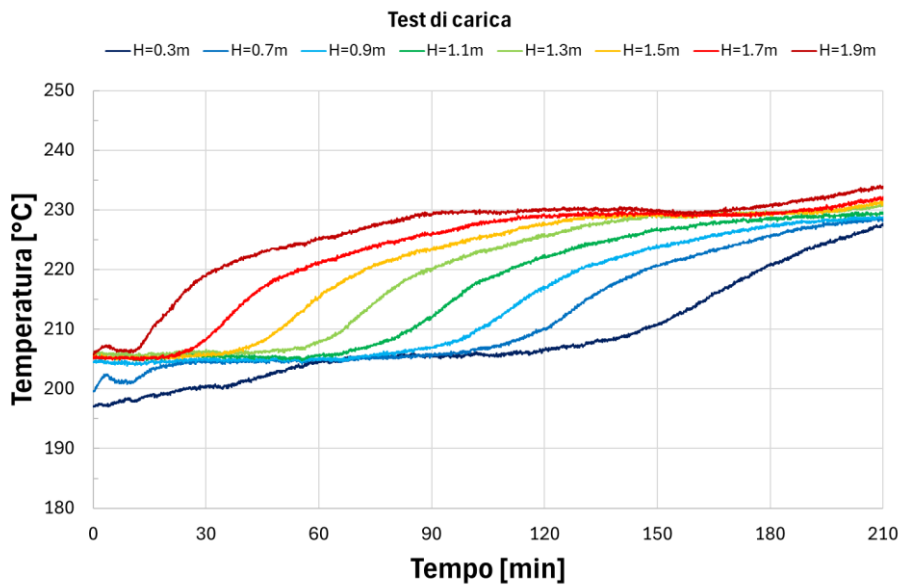


Figura 15 – Stratificazione interna del serbatoio durante la fase di carica con un solo scambiatore di carica

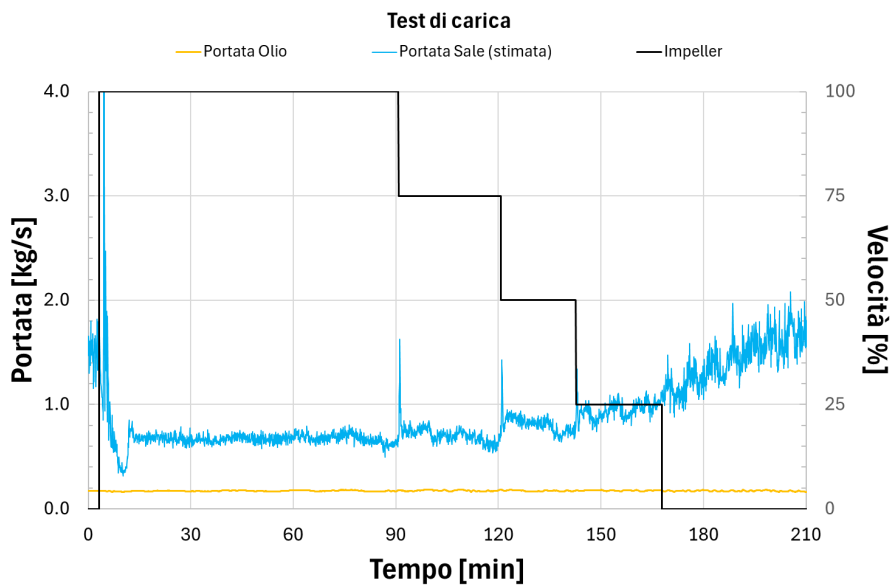


Figura 16 – Portata di olio e sale nello scambiatore

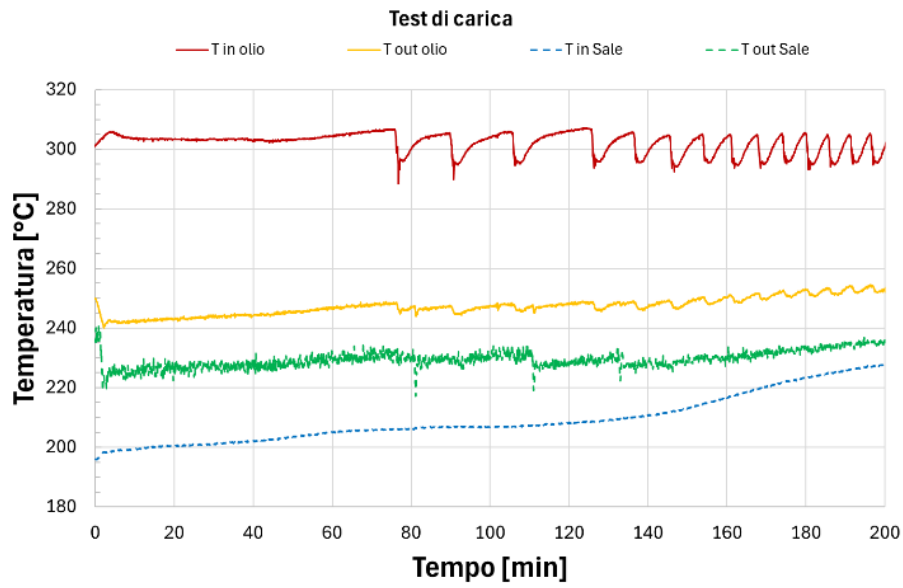


Figura 17 – Temperature ingresso e uscita dello scambiatore di carica

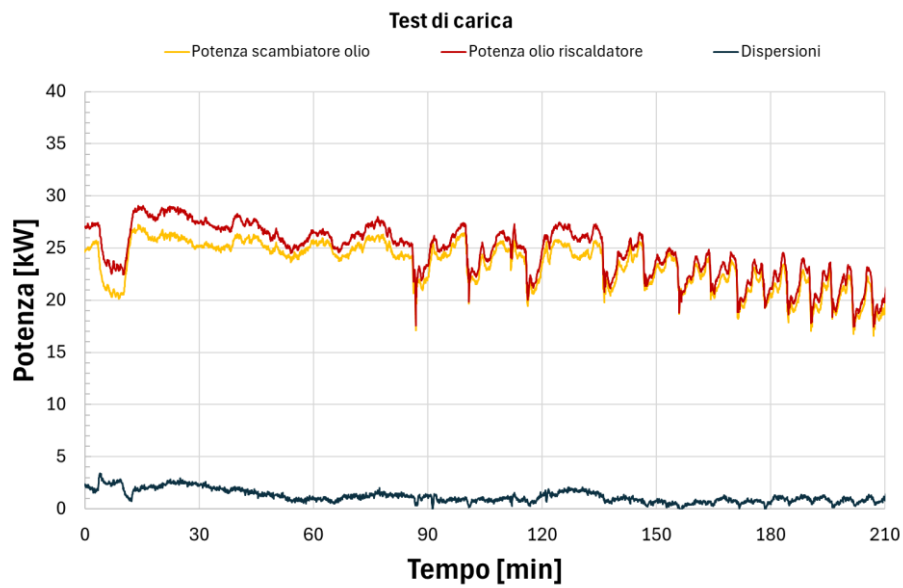


Figura 18 – Potenza termica scambiata

Successivamente sono state effettuate le prove di carica con tutti e due gli scambiatori; nella Tabella 2 sono riassunte le condizioni di test.

	U.M.	Valore
T media serbatoio	°C	195
T media olio ingresso scambiatore lato SHIP	°C	280
T media olio ingresso scambiatore lato PV	°C	290
Portata olio SHIP	kg/s	0.125
Portata olio PV	Kg/s	0.13

Tabella 2 – Condizioni di test di carica combinata lato SHIP e PV

In Figura 19 viene riportato l'andamento della stratificazione che si ottiene all'interno del serbatoio di accumulo durante la fase di carica.

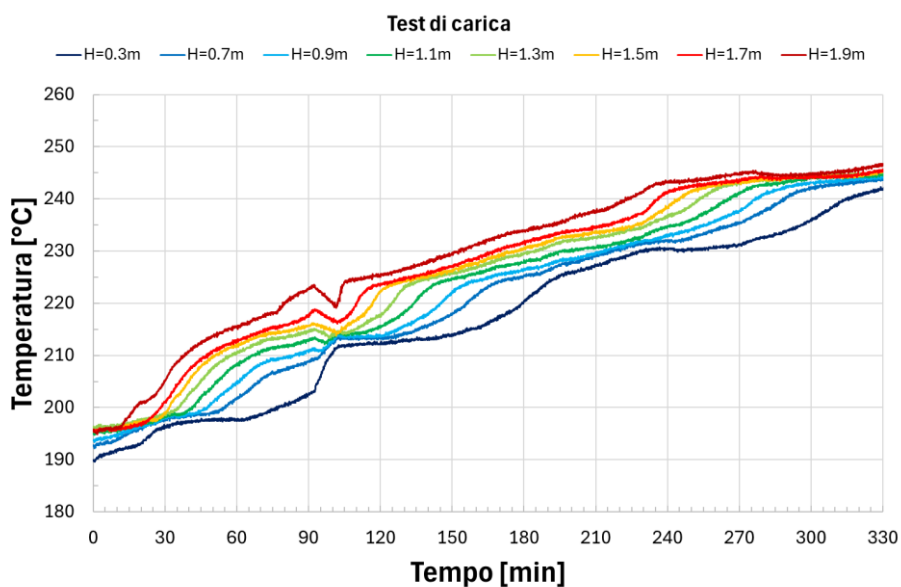


Figura 19 – Stratificazione interna del serbatoio durante la fase di carica

Nella Figura 20 e nella Figura 21 vengono riportate le portate e le temperature nei due scambiatori, si può notare come verso la fine del processo di carica il delta temperatura sia lato olio che lato sali tende a diminuire a causa del fatto che la temperatura della parte bassa del serbatoio incomincia ad aumentare.

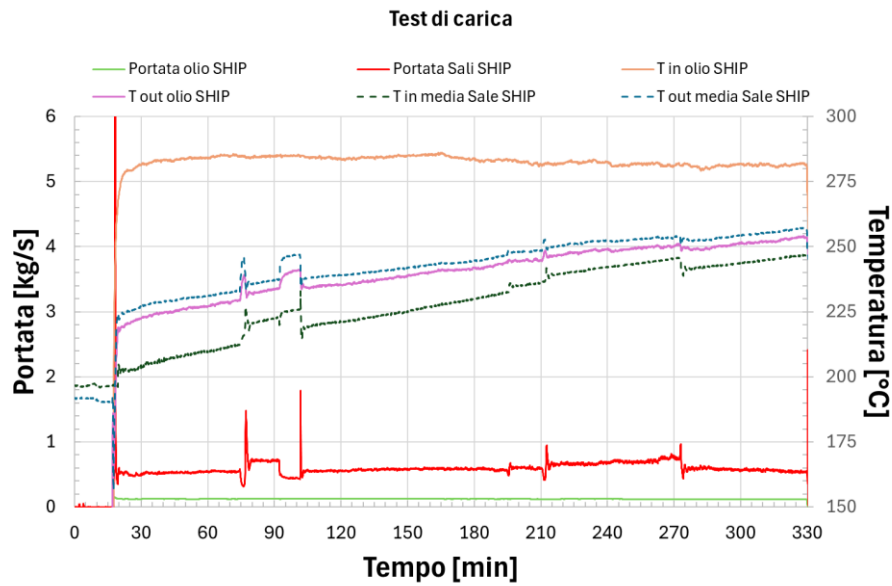


Figura 20 - Condizioni di portata e temperatura nello scambiatore lato SHIP

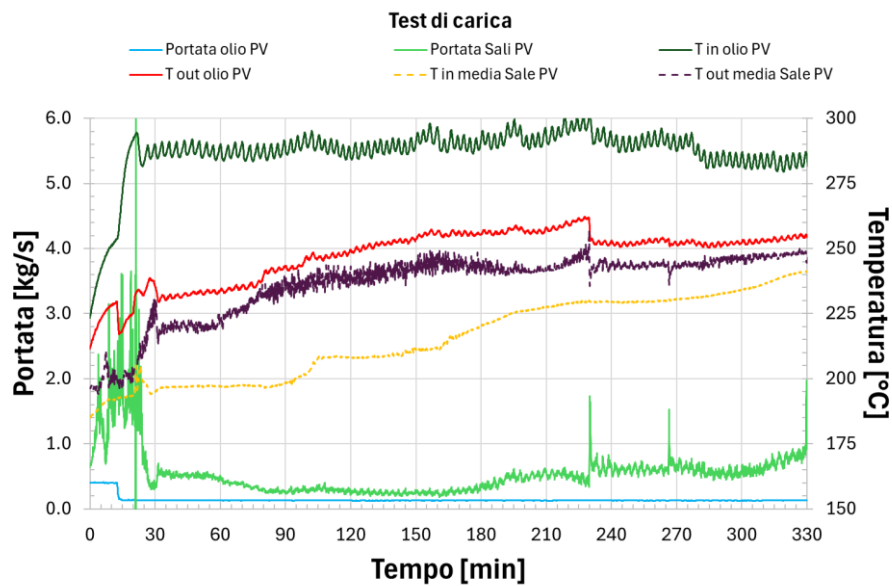


Figura 21 - Condizioni di portata e temperatura nello scambiatore lato PV

In Figura 22 sono mostrate le potenze scambiate dai due scambiatori che presentano lo stesso andamento essendo gli scambiatori uguali; il loro valore medio, pari circa a 14kW risulta inferiore al caso della carica con un solo scambiatore perché la temperatura dell'olio in ingresso al sistema e la sua portata sono più bassi. Nella stessa figura, inoltre, vengono mostrate l'energia accumulata all'interno del serbatoio, pari circa ad 80 kWh, e quella fornita dagli scambiatori pari circa a 135 kWh.

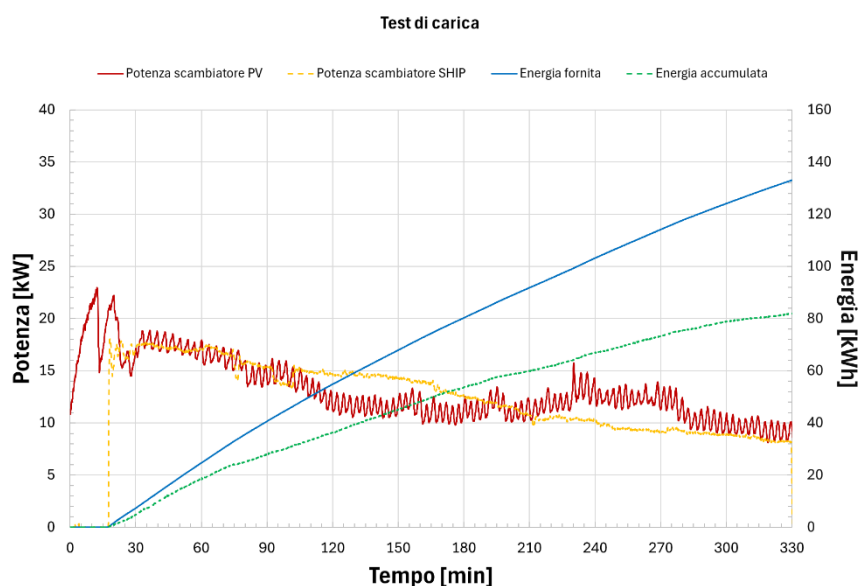


Figura 22 – Andamento della potenza termica dei due scambiatori di carica e dell'energia fornita e accumulata

Completate le prove di carica sono state effettuate delle analoghe prove di scarica del sistema di stoccaggio termico; nella Tabella 3 vengono riassunte le condizioni della prova.

	U.M.	Valore
T media serbatoio	°C	260
T media olio ingresso scambiatore lato SHIP	°C	190
Portata olio	kg/s	0.13

Tabella 3 – Condizioni della prova di scarica

In Figura 23 viene riportato l'andamento della stratificazione che si ottiene all'interno del serbatoio di accumulo durante la fase di scarica; in Figura 24 vengono mostrate le portate dei due fluidi all'interno dello scambiatore ed in Figura 25 vengono riportate le condizioni operative dello scambiatore e la potenza termica scambiata che risulta inizialmente pari circa a 10 kW per poi diminuire a causa dell'abbassamento della temperatura dei sali all'interno del serbatoio. Infine, in Figura 26 viene mostrata l'energia scaricata dall'accumulo pari circa a 30 kWh.

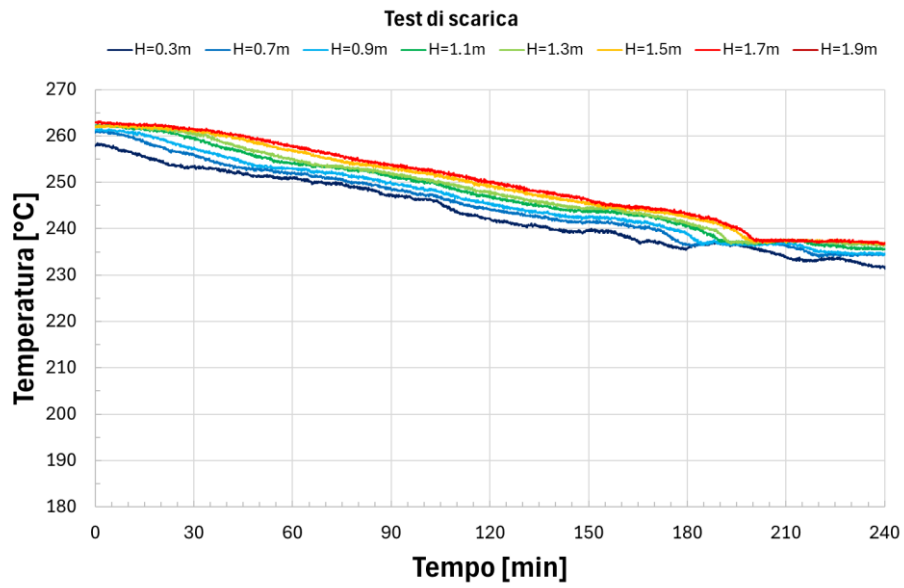


Figura 23 - Stratificazione interna al serbatoio durante la fase di scarica

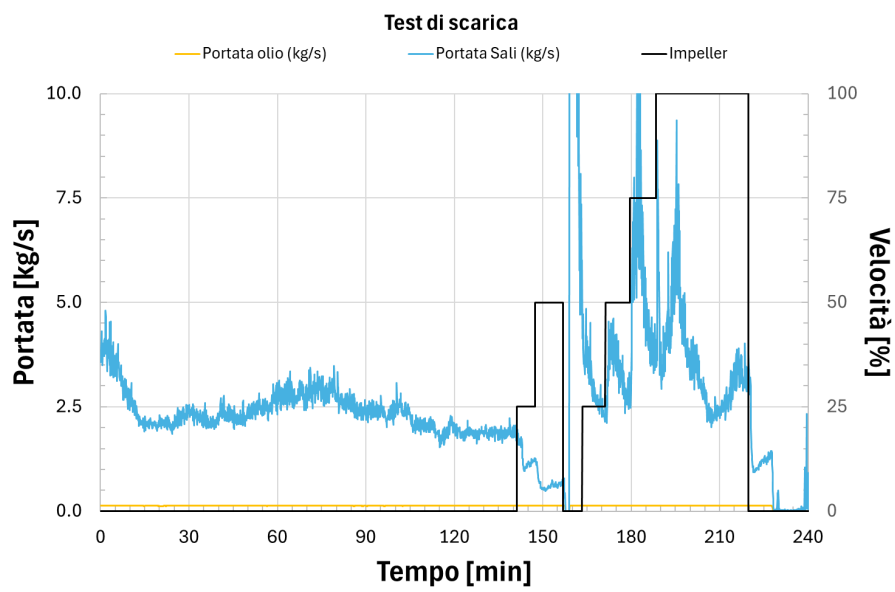


Figura 24 - Portata di olio e sale all'interno dello scambiatore

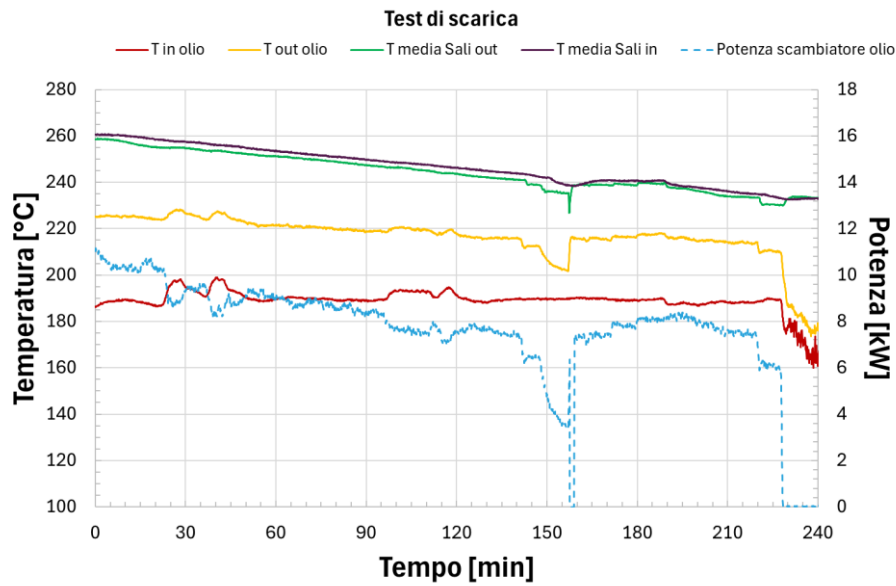


Figura 25 - Andamento temperature ingresso e uscita dei due fluidi dallo scambiatore e potenza termica scambiata

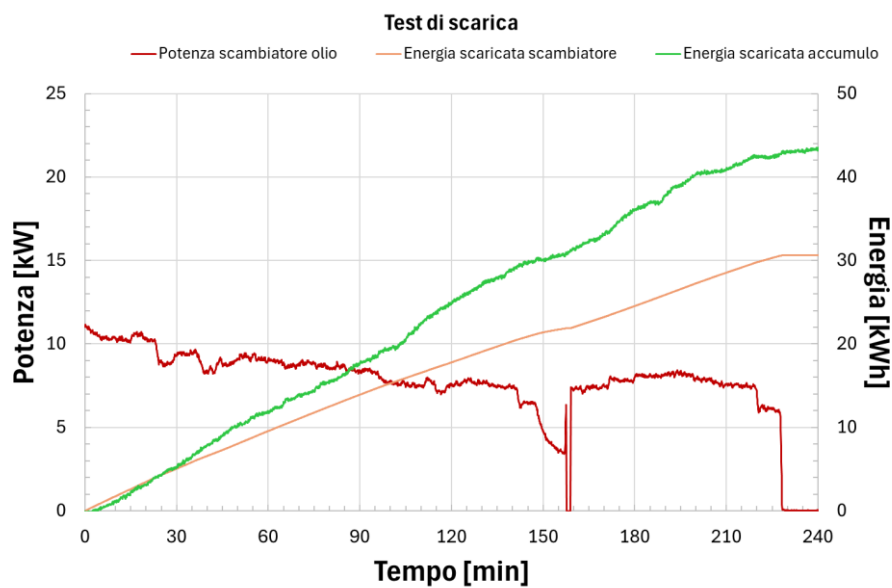


Figura 26 - Andamento della potenza termica dello scambiatore di scarica e dell'energia scaricata

7.4 Procedure operative

A valle della campagna sperimentale e sulla base dell'esperienza acquisita, sono state definite alcune procedure operative per la gestione del sistema di accumulo termico. Il prototipo è alimentato sia da CSP che da una caldaia elettrica che simula l'impianto fotovoltaico; quindi, è formato da due circuiti indipendenti, uno relativo all'impianto "ENEA-SHIP" e l'altro al fotovoltaico (Figura 27).

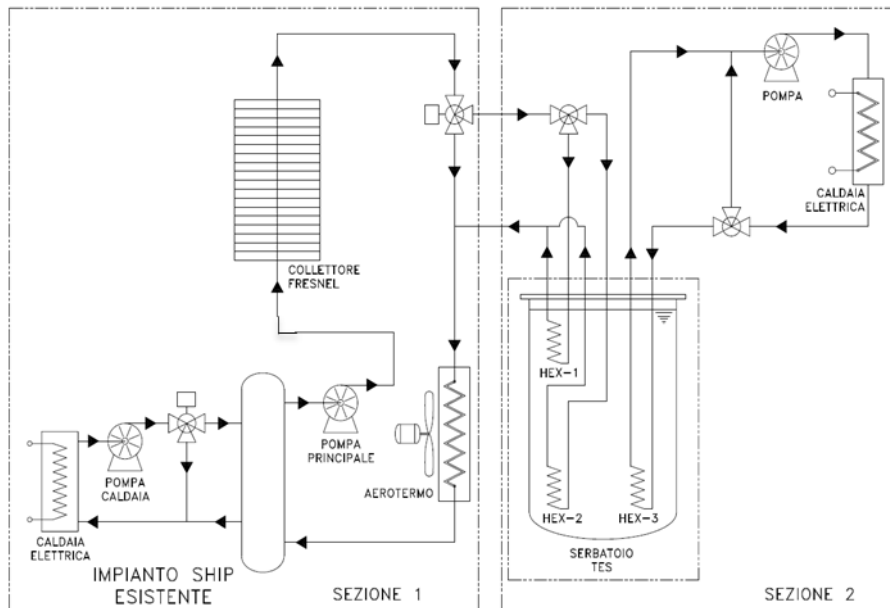


Figura 27 – Schema semplificato del sistema di accumulo termico alimentato da CSP (sezione 1) e da altra fonte rinnovabile (sezione 2)

Di seguito viene riportata la procedura di start-up lato CSP:

- Accensione servizi/azoto per pressurizzare il circuito;
- Accensione caldaia elettrica e settaggio della temperatura di uscita dell'olio in base al test da effettuare;
- Avvio pompa di ricircolo per preriscaldare l'olio;
- Settaggio delle valvole del circuito in base al test da effettuare;
- Se la temperatura dell'olio è maggiore di 60°C avvio pompa di circolazione e settaggio della portata di olio in base al test da effettuare;
- Settaggio del campo solare in inseguimento.

L'avviamento del circuito che simula l'impianto fotovoltaico è il seguente:

- Posizionamento valvola a tre vie in modalità ricircolo per il preriscaldamento dell'olio;
- Accensione pompa di circolazione;
- Accensione riscaldatore elettrico e settaggio della temperatura di uscita dell'olio in base al test da effettuare;
- Quando la temperatura dell'olio in uscita dal riscaldatore ha raggiunto il set-point per la prova settare il numero di giri della pompa al fine di avere la portata di olio richiesta dalle condizioni di test;
- Apertura circolazione dell'olio nel serbatoio di accumulo termico.

Per quanto riguarda la fermata del sistema lato CSP, questa impiega circa 20-30 minuti e richiede l'esecuzione delle seguenti fasi sull'impianto "ENEA-SHIP":

- Defocalizzazione dei collettori;
- Spegnimento della caldaia elettrica;

- Settaggio della velocità della pompa di circolazione al 100%;
- Settaggio dell'aerotermostato in raffreddamento al 100%;
- Se la temperatura dell'olio è minore di 150°C spegnimento delle pompe di circolazione e di ricircolo;
- Chiusura servizi aria/azoto.

Per lo spegnimento del circuito che simula il fotovoltaico di seguito le azioni:

- Posizionamento valvola a tre vie in modalità ricircolo;
- Spegnimento riscaldatore elettrico;
- Quando la temperatura dell'olio è inferiore a 150°C spegnimento della pompa di circolazione.

Le diverse procedure sopra riportate e le prove sperimentali sul prototipo vengono eseguite operando principalmente sulle schermate della consolle del DCS (Figura 9 e Figura 10).

Una volta ottimizzate le procedure di avvio e spegnimento dei due circuiti si è passati alla definizione del funzionamento combinato.

In Figura 27 viene mostrato lo schema dei flussi energetici che si hanno in condizioni di funzionamento a regime del prototipo di stoccaggio termico.

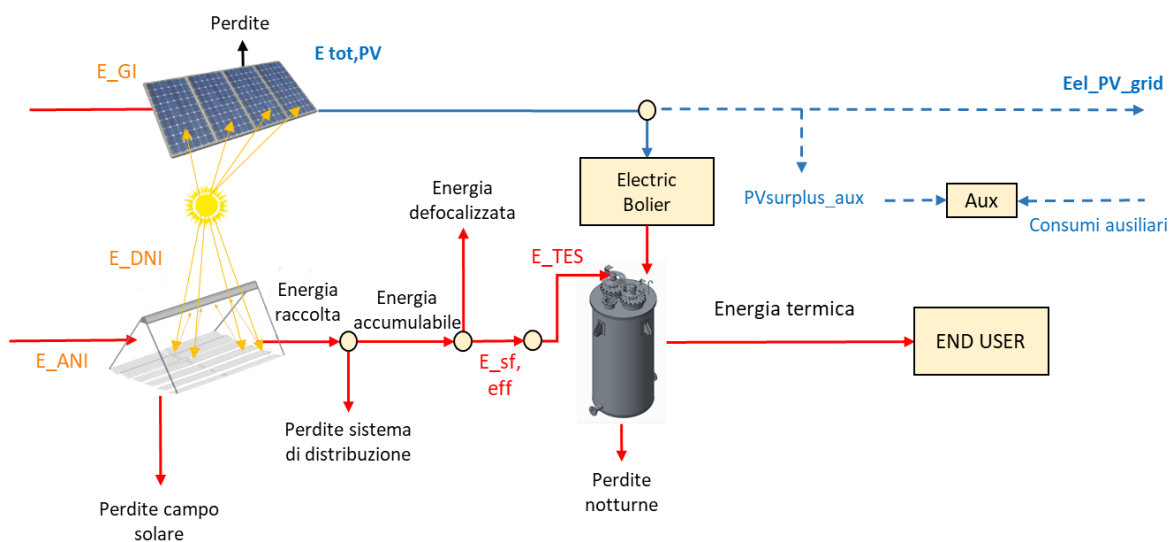


Figura 28 - Schema dei flussi energetici del prototipo di stoccaggio termico ibridizzato

L'energia proveniente dal sole viene concentrata dal campo specchi verso il ricevitore al cui interno scorre il fluido termovettore (Therminol-66), che viene riscaldato e mandato nello scambiatore di calore presente all'interno del serbatoio di stoccaggio termico.

L'energia che arriva al serbatoio, da un lato, è quella raccolta dal campo specchi decurtata delle perdite intrinseche dei collettori solari, delle dispersioni associate alla rete di distribuzione ed infine di quelle dovute ad un eventuale defocalizzazione dovuta al raggiungimento dei limiti di portata all'interno dei ricevitori o al riempimento del serbatoio di stoccaggio.

Una volta che l'olio scaldato arriva al sistema di stoccaggio, fluisce all'interno dello scambiatore di carica posto nella parte bassa del serbatoio e cede la sua energia alla miscela di sali che in questo modo si scalda ed incomincia a stratificarsi.

Contemporaneamente l'energia solare viene raccolta anche dai pannelli fotovoltaici, in questo caso sostituiti da un riscaldatore elettrico, che a sua volta scalda l'olio del secondo circuito. L'olio così riscaldato viene mandato al serbatoio di stoccaggio ed attraverso il secondo scambiatore di carica interno al serbatoio, cede la sua energia al sale contribuendo quindi ad accumulare calore nel sistema di stoccaggio termico.

Come sappiamo il fotovoltaico lavora sia con la radiazione solare diretta che con la sua componente diffusa, mentre il CSP lavora esclusivamente con la componente diretta; quindi, il range operativo del fotovoltaico è più ampio, questo implica che il serbatoio di stoccaggio inizierà a caricarsi già dalle prime ore della mattina, mentre il CSP inizierà a contribuire all'accumulo solo quando la radiazione diretta DNI raggiunge il valore minimo di soglia, tipicamente intorno ai 250-300W/m². Superato quindi il valore di soglia minimo della DNI, il sistema di stoccaggio viene alimentato da ambedue le fonti rinnovabili.

Nel momento in cui il sistema di accumulo ha raggiunto il suo valore massimo e c'è ancora energia solare disponibile, il campo specchi del CSP viene defocalizzato e l'energia prodotta dal fotovoltaico viene immessa in rete. Se invece, durante l'arco della giornata, il valore della DNI scende al di sotto della soglia minima, il sistema di stoccaggio viene alimentato esclusivamente dal fotovoltaico.

Quando si arriva a fine giornata, il valore della DNI è minore di 250-300W/m² è possibile iniziare a scaricare l'energia termica accumulata facendo fluire l'olio nello scambiatore di scarica posto nella parte alta del serbatoio. In questo modo l'olio si scalda e può alimentare così l'utenza finale che può essere un processo industriale che necessita di calore oppure un ciclo termico per la produzione di energia elettrica.

Quindi, al fine di massimizzare la produzione da fonte solare, i due impianti, CSP e fotovoltaico, vengono resi operativi allo stesso momento riscaldando contemporaneamente il sistema di stoccaggio, anche se il lato PV, avendo un range operativo maggiore rispetto al CSP, inizierà prima ad immettere energia nel serbatoio. Inoltre, quando la DNI risulta bassa, è possibile iniziare a scaricare il calore accumulato anche se il lato fotovoltaico continua ad alimentare il serbatoio. Una volta esaurita la fonte solare, sia la diretta che la diffusa, il sistema di stoccaggio continuerà a lavorare in modalità di scarica dell'energia.

Operando il prototipo durante la campagna sperimentale sono emersi alcuni limiti operativi derivanti dalla particolare configurazione del serbatoio realizzata. In particolare, si è riscontrato l'impossibilità di caricare e scaricare il sistema contemporaneamente con l'impianto CSP in quanto i due scambiatori sono posti sullo stesso asse. Inoltre, il riscaldatore elettrico esterno alimentato da fotovoltaico o altra fonte rinnovabile implica un'ulteriore trasformazione di energia andando così a penalizzare l'efficienza totale del sistema.

Questi aspetti verranno ulteriormente approfonditi ed ottimizzati nel prossimo PTR 2025-2027, sostituendo il riscaldatore esterno con delle resistenze elettriche direttamente immerse nel serbatoio ed alimentate da fotovoltaico.

Il limite derivante dal posizionamento sullo stesso asse dei due scambiatori di carica e scarica può essere superato aumentando le dimensioni del serbatoio di stoccaggio.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze nell'ambito della LA1.13.

9 Pubblicazioni scientifiche

Dalle attività condotte nella LA1.13 è scaturita la seguente pubblicazione:

- R. Grena, "Geometrical Aspects of the Optics of Linear Fresnel Concentrators: A Review", *Energies* 2024, 17, 3564. <https://doi.org/10.3390/en17143564>.

10 Eventi di disseminazione

Dalle attività svolte nella LA1.13 è scaturita la partecipazione ai seguenti eventi:

- Conferenza "30th SolarPACES Conference", Roma, Italia, 8-11 Ottobre 2024.
- "Evento di disseminazione finale del Progetto 1.9 «Solare termodinamico» PTR 2022-2024 della Ricerca di Sistema", Roma, Italia, 16 Dicembre 2024.

In particolare, nell'ambito del secondo evento, sono stati presentati i risultati finali della LA1.13.