

# Ricerca di Sistema elettrico



Realizzazione di prototipi TEES in calcestruzzo e loro caratterizzazione termica sperimentale da poter utilizzare in applicazioni del tipo "Power to Heat" (P2H). Caratterizzazione sperimentale fisica del mezzo di accumulo cementizio con materiale PCM e termica del TES ibrido sensibile/latente (SH/LH TES) a media temperatura  
(deliverable della LA4.7: Accumulo termico a media temperatura: realizzazione e installazione di prototipi TEES in calcestruzzo e del sistema sensibile/latente (SH/LH TES) e prove sperimentali di caratterizzazione termica)

A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Nicolini, E.M. Veca, A. Scotini, G. Giorgi, G. Napoli



Realizzazione di prototipi TEES in calcestruzzo e loro caratterizzazione termica sperimentale da poter utilizzare in applicazioni del tipo "Power to Heat" (P2H). Caratterizzazione sperimentale fisica del mezzo di accumulo cementizio con materiale PCM e termica del TES ibrido sensibile/latente (SH/LH TES) a media temperatura

A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Nicolini, E.M. Veca, G. Giorgi, 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: Tema di ricerca 1.2 – Progetto integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

Linea di attività: 4.7

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile del Work Package: Raffaele Liberatore, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Adio Miliozzi, ENEA

Mese inizio previsto: gennaio, 2023

Mese inizio effettivo: gennaio, 2023

Mese fine previsto: dicembre, 2024

Mese fine effettivo: dicembre, 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

## Indice

1	Risultati attesi .....	5
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi .....	6
4	Prodotti sviluppati .....	6
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	7
6	Sintesi delle attività svolte .....	7
7	Dettaglio delle attività svolte.....	7
7.1	Accumulo Termo-Elettrico (TEES).....	7
7.2	Accumulo Termico Ibrido Sensibile-Latente (SH-LH TES).....	12
7.2.1	Piano di prove .....	16
7.2.2	TEST 1: Prova a carico e scarico totale;.....	17
7.2.3	TEST 2: Prova a carico e scarico parziale .....	19
7.2.4	TEST 3: Analisi di più cicli carica/scarica .....	21
7.3	Caratterizzazione Fisica del Mezzo di Accumulo Cementizio .....	22
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	26
9	Pubblicazioni scientifiche .....	26
10	Eventi di disseminazione .....	26
10.1	IEA ES TCP .....	26
10.1.1	Energy Storage Technology Collaboration Platform – ExCO meetings .....	26
10.2	UniRoma1 06 novembre 2023 .....	28
10.3	UniRoma1 31 ottobre 2024 .....	28
10.4	Enerstock 2024 International Congress .....	28
10.5	Zeroemission .....	29
10.6	Salina .....	30
10.7	Nanoinnovation Congress .....	30
10.8	Missione a Narni (TR) - 16 aprile 2024.....	31
10.9	Missione a Padova - 28-30 maggio 2024.....	32
10.10	Missione a Bari - 16-18 settembre 2024.....	32
11	Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale.....	32

## Indice delle figure

Figura 1: Sezione sperimentale TEES con due dispositivi connessi in serie: a) schema, b) schema tridimensionale e c) dispositivo realizzato. ....	8
Figura 2: Impianto ATES: a) aggiornato pronto per accogliere la sezione di prova, b) con la sezione di prova non coibentata e c) con la sezione di prova coibentata. ....	10
Figura 3: Prova di carica/scarica - Andamento delle temperature sulla superficie esterna del guscio in calcestruzzo: a) con carica elettrica e b) con carica con HTF. ....	11
Figura 4: Prova a carico parziale - Andamento delle temperature sulle superfici interna a) ed esterna b) del guscio in calcestruzzo. ....	11
Figura 5: Prova ciclica - Andamento delle temperature sulle superfici interna a) ed esterna b) del guscio in calcestruzzo. ....	11
Figura 6: Solteca3 con riscaldatore (a) e raffreddatore preesistenti (b).....	12
Figura 7: rimozione del circuito di riscaldamento (a) e raffreddamento (b).....	13
Figura 8: installazione nuove linee olio dall'impianto (a) verso il nuovo aeroterma esterno (b)...	13
Figura 9: impianto Solteca3 dopo installazione nuovi componenti (A: fronte; B: retro; C: accoppiato al modulo cementizio e a quello a cambiamento di fase, sulla sinistra è visibile anche l'alimentatore per il riscaldamento dello scambiatore ad olio tramite effetto Joule e a destra è in evidenza il modulo cementizio).....	14
<i>Figura 10: particolare dei flussi dell'olio in carica nei moduli da e per modulo cementizio (A), da e per modulo a calore latente (B). ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 11: interfaccia LabView che mostra temperatura delle termocoppie all'interno dei moduli di accumulo.....</i>	<i>16</i>
Figura 12: Particolare di due dei quattro morsetti per accoppiamento scambiatore/alimentatore e più in alto delle 4 valvole con attuatore elettrico. ....	16
<i>Figura 13: Set point della temperatura di ingresso del HTF per le fasi di riscaldamento (A) e di carico/scarico (B). ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 14: Andamenti della temperatura ambiente e di quella del mantello del SHTES, delle temperature di ingresso e uscita del serbatoio dell'olio e del riscaldatore, della velocità del fluido termovettore e del numero di Reynolds.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 15: Andamenti della temperatura di ingresso e uscita del HTF da HyTES da sistemi costituenti, delle temperature interne e esterne a SH02 ed LH02.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 16: Andamenti della temperatura di ingresso e uscita del HTF da HyTES da sistemi costituenti, delle temperature interne ed esterne a SH02 ed LH02. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 17: andamenti delle temperature di ingresso e uscita del HTF in HyTES e nei suoi componenti.....</i>	<i>21</i>
Figura 18: (A) temperature nel tempo per il test sperimentale con olio diatermico mentre è acceso il circuito del cavo scaldante, (B) schema delle 4 termocoppie all'interno della cella di	

misura,  $T_1 - T_4$ , (C-D) i cerchi rossi rappresentano i dati sperimentali  $T_1 - T_4$ , le curve a tratto pieno in blu e nero il best fit con le funzioni  $f(x)$  e  $g(x)$ , la temperatura del forno è  $T_0=25.5^\circ\text{C}$ ..24

Figura 19: (A) temperature nel tempo per il test sperimentale con glicerina, (B) temperature relative all'accensione del circuito del cavo scaldante, (C-D) i cerchi rossi rappresentano i dati sperimentali  $T_1 - T_4$ , le curve a tratto pieno in blu e nero il best fit con le funzioni  $f(x)$  e  $g(x)$ , la temperatura del forno è  $T_0=100^\circ\text{C}$ ..... 25

## Indice delle tabelle

Tabella 1- Composizione dei nuovi mix-design di calcestruzzo sviluppati.....	9
Tabella 2 – Prova di carica/scarica sistema TEES.....	10
Tabella 3 – Prova ciclica (4 cicli) sistema TEES.....	11
Tabella 4 – Dati acquisiti dalle termocoppie relative ad ingressi ed uscita dei moduli di accumulo.....	15
Tabella 5 – parametri test 1.....	17
Tabella 6 – principali risultati test 1.....	19
Tabella 7 – principali risultati test 2.....	20
Tabella 8 – parametri test prova ciclica.....	21
Tabella 9- caratteristiche fisiche dei provini di materiale cementizio in riferimento alla diversa composizione. ....	22
Tabella 10- caratteristiche fisiche dei provini di materiale cementizio in riferimento alla diversa composizione a $100^\circ\text{C}$ . ....	23
Tabella 11- Parametri di best fit $\Delta T$ , e conducibilità termica per la glicerina e l'olio diatermico. ....	25
Tabella 12 - ExC096 15-17 novembre 2023 .....	27
Tabella 13 - ExC097 03-04 giugno 2024 .....	27
Tabella 14 - ExC098 12-14 novembre 2024.....	28
Tabella 15- Enerstock 5-7 giugno 2024.....	29
Tabella 16- Zeroemission 10-12 ottobre 2023 .....	29
Tabella 17- Malfa – Salina (ME) 1-2 ottobre 2023.....	30
Tabella 18- Nanoinnovation 18-22 settembre 2023 .....	31
Tabella 19- Nanoinnovation 10-13 settembre 2024.....	31

## 1 Risultati attesi

In relazione all'accumulo di energia termica proveniente da calore e da corrente elettrica (TEES) e del sistema di accumulo di energia per via sensibile e latente (SH/LH TES) con moduli in serie, la presente attività ha mirato alla realizzazione, installazione e prove sperimentali dei primi, nonché a prove sperimentali di caratterizzazione termica dei secondi utilizzando moduli di accumulo a base cementizia e materiali a cambiamento di fase (PCM) costituiti da nitrati di sodio e potassio.

I risultati attesi da questa attività sono, principalmente, i seguenti:

- realizzazione dei prototipi adatti ad una alimentazione mista termica ed elettrica in calcestruzzo;
- caratterizzazione fisica del mezzo di accumulo cementizio con materiale PCM ed elaborazione dei risultati sperimentali ottenuti dall'impiego della cella di misura della conducibilità termica.
- completa caratterizzazione termica di un sistema Concrete/TEES tramite l'impianto sperimentale ATES aggiornato, attraverso un programma di dettaglio delle prove sperimentali, con la finalità di una valutazione della sua applicazione in sistemi di tipo "Power to Heat";
- realizzazione di un sistema di accumulo ibrido sensibile/latente (SH/LH TES) a media temperatura;
- aggiornamento impianto Solteca3 con predisposizione TES ibrido e programmazione delle prove sperimentali;
- caratterizzazione termica del sistema TES ibrido sensibile/latente proposto ed una valutazione della sua applicabilità generale.

## 2 Risultati ottenuti

Tutti i risultati previsti, precedentemente elencati, sono stati raggiunti.

I possibili benefici per il sistema elettrico nazionale e i suoi utenti possono essere così sintetizzati:

- per quanto riguarda i sistemi ibridi a calore latente e sensibile, si possono riscontrare effetti positivi nella gestione del sistema di accumulo grazie alla stabilizzazione della temperatura di uscita del fluido termovettore per un elevato numero di ore, nonché per fornire calore di alta qualità all'utente stabilizzandone la potenza;
- per quanto concerne i sistemi che ricevono calore sia termico che elettrico, possono essere sicuramente utili a contrastare la cosiddetta over-generation di energia elettrica dovuta alla sempre maggiore produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, aumentando la flessibilità. Questi sistemi possono essere parte integrante delle cosiddette batterie di Carnot;
- infine, la riduzione dei costi del sistema TES ibrido rispetto a uno tradizionale, dovuto ad una maggiore efficienza e stabilità della temperatura, potrà attivamente promuovere questa tecnologia, guadagnando la fiducia degli investitori.

### 3 Prodotti attesi

- Realizzazione prototipi;
- upgrade impianti sperimentali;
- prove sperimentali di caratterizzazione termica dei prototipi TEES e SH/LH TES comprendenti carica completa e parziale, scarica completa e parziale e ciclabilità per almeno 4 cicli consecutivi;
- caratterizzazione fisica del mezzo di accumulo cementizio con materiale PCM ed elaborazione dei risultati sperimentali ottenuti dall'impiego della cella di misura della conducibilità termica

### 4 Prodotti sviluppati

Realizzazione prototipi TEES integrabili all'impianto ATES, per accumulo di calore fino a 300°C in grado di assorbire energia mediante fluido termico e mediante fonte elettrica attraverso il tubo di scambio ad esso connesso. Sono stati realizzati un prototipo contenente 10% di PCM ed uno senza, entrambi con tubo di scambio integrato e con morsetti in grado di ricevere differenza di potenziale fino a 630 V e corrente fino a 40 A per il riscaldamento del mezzo di accumulo.

60 provini TEES di 10 tipologie (si veda Tabella 1 di dimensioni cubiche con lato di 150 mm.

Moduli TESS provati in ATES (Figura 1). Si tratta di elementi di accumulo termico in calcestruzzo connessi in serie. Essi sono stati realizzati per lavorare in un intervallo di temperatura compreso tra i 200°C e 280°C. Ogni dispositivo consta di un tubo metallico immerso assialmente in un guscio cilindrico di calcestruzzo (mezzo di accumulo) in configurazione "tube and shell". Il tubo di scambio è in acciaio inox AISI 304 con lunghezza di 1 m, diametro esterno di 21.3 mm e spessore di 1.65 mm. Il guscio cilindrico ha lunghezza pari a 0.7m e diametro esterno 120mm.

Aggiornamento impianto ATES con inserimento nuova tubazione per installazione modulo di accumulo termico. Contestualmente è stata realizzata una nuova interfaccia di visualizzazione e controllo.

Impianto aggiornato SOLTECA3, per la circolazione, riscaldamento e raffreddamento dell'olio diatermico con inserimento nuovo scambiatore ad olio riscaldabile per effetto Joule e nuovo raffreddatore ad aria per l'olio di circolazione. Contestualmente è stata realizzata una nuova interfaccia di visualizzazione e controllo.

Prove sperimentali di caratterizzazione termica dei prototipi TEES e SH/LH TES comprendenti carica completa e parziale, scarica completa e parziale e ciclabilità per 4 cicli consecutivi;

Caratterizzazione fisica del mezzo di accumulo cementizio con materiale PCM ed elaborazione dei risultati sperimentali ottenuti dall'impiego della cella di misura della conducibilità termica denominato Hot Disk.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nessuno scostamento tecnico/economico o criticità rispetto al preventivo è stato riscontrato.

## 6 Sintesi delle attività svolte

La presente LA prosegue la LA 4.5 ed ha riguardato:

- Aggiornamento e implementazione degli impianti ATES e Solteca3, per la caratterizzazione sperimentale rispettivamente dei TES ad alimentazione mista termica-elettrica (TEES) e del TES ibrido sensibile-latente (HyTES).
- Realizzazione di calcestruzzi con o senza l'aggiunta di PCM micro-incapsulati.
- Realizzazione e caratterizzazione del sistema di accumulo ibrido ad alimentazione termica ed elettrica con prove sperimentali a carico totale, parziale e ciclico.
- Realizzazione e caratterizzazione del sistema di accumulo sensibile-latente con elaborazione dei dati sperimentali su energia accumulata e scaricata dal sistema e dai singoli componenti a carico totale e parziale. È stata inoltre eseguita una prova di quattro cicli consecutivi di carico e scarico, con tempistiche costanti.
- Caratterizzazione fisica del mezzo di accumulo cementizio, utilizzato sia nel TEES che nel HyTES. tramite la tecnica del "Hot Disk".

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Nel seguito si descrivono le attività svolte dividendole in tre macro-sezioni:

- Accumulo Termo-Elettrico (TEES);
- Accumulo Termo Ibrido Sensibile-Latente (SH-LH TES);
- Caratterizzazione fisica del mezzo di accumulo cementizio.

### 7.1 Accumulo Termo-Elettrico (TEES)

La sezione sperimentale del TEES realizzata è composta da due dispositivi di accumulo termico in calcestruzzo connessi in serie. Detti dispositivi devono lavorare in un intervallo di temperatura compreso tra i 200°C e 280°C. La massima temperatura di riferimento per la progettazione è di 350°C.

Ogni dispositivo consta di un tubo metallico immerso assialmente in un guscio cilindrico di calcestruzzo (mezzo di accumulo) in configurazione "tube and shell". Il tubo di scambio è in acciaio inox AISI 304 con lunghezza di 1 m, diametro esterno di 21.3 mm e spessore di 1.65 mm. Il guscio cilindrico ha lunghezza pari a 0.7m e diametro esterno 120mm.

Il mezzo di accumulo termico è costituito da un calcestruzzo base appositamente formulato per garantirne il funzionamento ad alte temperature ed il mantenimento di buone prestazioni termiche a cui è aggiunto il 10% in peso di un PCM (sali solari - miscela di nitrati di sodio e

potassio, 60/40%wt) stabilizzato in forma in una matrice porosa di diatomite (mEPCM), il cui fine è quello di incrementare la densità di energia accumulata nel mezzo stesso (sistema ibrido sensibile/latente).

PCM micro-incapsulati (mEPCM) sono stati studiati, in termini di composizione e processo produttivo dall'Università di Perugia in una linea di attività parallela (WP4-LA10). Il PCM è incapsulato in diatomite, una farina fossile altamente porosa, in un rapporto in peso 80-20%.

La sezione di prova è realizzata collegando in serie tra loro per saldatura i due dispositivi, lasciando scoperto il tubo di scambio nelle parti estreme ed in quella centrale. Questa configurazione permette, nella fase di carica elettrica, di collegare il polo positivo di un generatore di corrente continua nella zona scoperta centrale e il polo negativo sia all'inizio che alla fine del tubo metallico. In questo modo la parte iniziale e finale del tubo sono allo stesso potenziale, non dovendo quindi prevedere un isolamento elettrico tra tubo e resto dell'impianto. L'elemento TEES è stato isolato termicamente per avere una temperatura di superficie a norma di legge ed impedire una eccessiva fuoriuscita di calore. È stata utilizzata lana di roccia con spessore 100 mm. L'intero sistema di coibentazione è facilmente rimovibile e consente la fuoriuscita dei cavi di misura presenti (termocoppie). Tutta la coibentazione è protetta da un lamierino in alluminio (Figura 1).

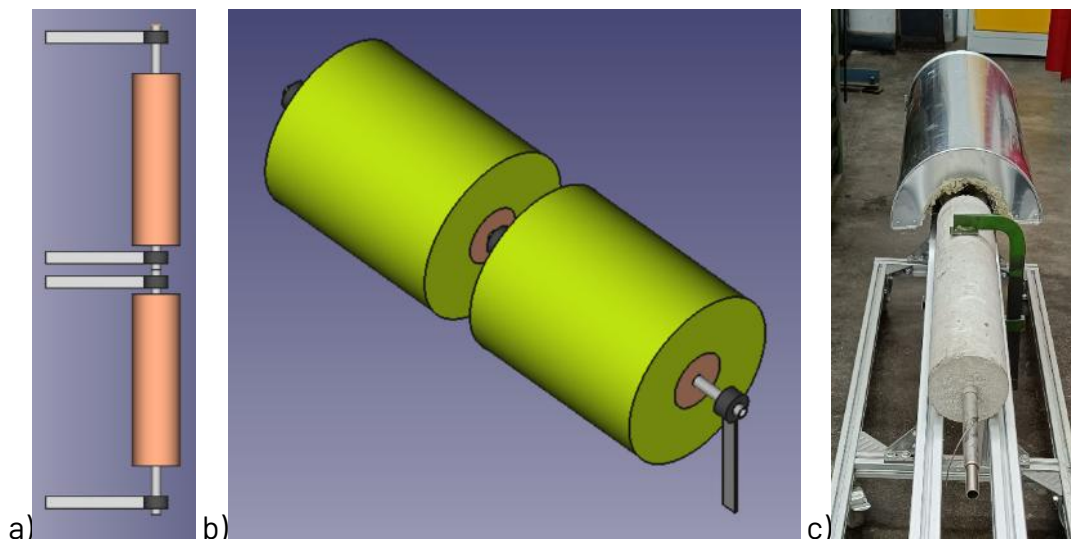


Figura 1: Sezione sperimentale TEES con due dispositivi connessi in serie: a) schema, b) schema tridimensionale e c) dispositivo realizzato.

L'ENEA ha sviluppato, in collaborazione con Cipiccia Calcestruzzi SpA e l'Università di Perugia i materiali cementizi utilizzati. Cipiccia Calcestruzzi ha poi provveduto alla realizzazione dei dispositivi.

La formulazione di nuove miscele si è resa necessaria per vari motivi, tra cui il principale è la necessità di sostituire il cemento tipo Portland, non ecocompatibile e verso la dismissione, con altre tipologie di cementi più attenti all'ambiente. A completamento di ciò, nel quadro di una economia circolare, si sono anche selezionati ed utilizzati una serie di materiali (fibre e aggregati) derivati da scarti industriali (scorie di acciaieria, fibre di carbonio estratte di filtri, etc.). Tale attività è stata condotta con il sostanziale supporto dell'Università di Perugia.

Nella seguente Tabella 1 sono mostrate le composizioni realizzate per i vari mix-design dei calcestruzzi.

Tabella 1- Composizione dei nuovi mix-design di calcestruzzo sviluppati.

<b>Componente</b>	<b>Mix 0</b>	<b>Mix 1</b>	<b>Mix 2</b>	<b>Mix 3</b>	<b>Mix 4</b>	<b>Mix 5</b>	<b>Mix 6</b>	<b>Mix 7</b>	<b>Mix 8</b>	<b>Mix 9</b>
Acqua	5.76%wt	5.11%wt	5.11%wt	10.19%wt	5.99%wt	7.65%wt	7.61%wt	8.65%wt	6.15%wt	7.12%wt
Cemento (CEM II 42.5R-B/(P-LL))	15.33%wt	15.33%	15.33%	28.80%	12.48%	15.30%	15.23%	16.39%	16.84%	18.02%
Sabbia (0-4)	40.07%wt	40.45%wt	40.45%wt	27.16%wt	36.90%wt	38.24%wt	38.06%wt	33.83%wt	38.55%wt	34.19%wt
Brecciolini (5-15)	15.41%wt	15.58%wt	15.58%wt	13.07%wt		15.30%wt	15.23%wt	12.88%wt	14.98%wt	12.57%wt
Breccia 15-30	23.04%wt	23.12%wt	23.12%wt	20.11%wt	22.80%wt	22.94%wt	22.84%wt	18.53%wt	22.43%wt	17.97%wt
Graniglia 10/20 Tapo	-	-	-	-	17.31%wt	-	-	-	-	-
Filler Tapojarvi	-	-	-	-	4.16%wt	-	-	-	-	-
Fibre Nylon (Meraflex)	0.04%wt	0.04%wt	0.04%wt	0.04%wt	0.04%wt	0.04%wt	0.04%wt	0.05%wt	0.04%wt	0.05%wt
Fibra carbonio	-	0.23%wt	0.23%wt	0.43%wt	0.19%wt	0.23%wt	0.23%wt	0.25%wt	0.23%wt	0.24%wt
Fibra Fibercrom	-	-	-	-	-	0.17%wt	-	-	-	-
Fibra Fibermix	-	-	-	-	-	-	0.63%wt	-	0.63%wt	0.68%wt
Additivo Super-fluidificante	0.13%wt	0.13%wt	0.13%wt	0.20%wt	0.13%wt	0.13%wt	0.13%wt	0.18%wt	0.15%wt	0.20%wt
mEPCM	-	-	-	-	-	-	-	9.24%wt	-	8.96%wt
Rapporto Acqua/Cemento	0.38	0.33	0.33	0.35	0.36	0.50	0.50	0.53	0.37	0.40
Massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	2343	2348	2348	2257	2404	2353	2364	2196	2376	2220
Massa volumica CLS 28gg (kg/m <sup>3</sup> )	2392	2336	2321	2253	2269	-	-	2144	-	-

A seguito della caratterizzazione, analizzando il comportamento termico complessivo delle miscele sviluppate, sono state selezionate le miscele 8 e 9, con cui sono stati realizzati i dispositivi sperimentali.

Si è quindi provveduto all'aggiornamento dell'impianto di prova ATES ed all'installazione dei dispositivi al fine di eseguire la loro caratterizzazione termica (Figura 2).



Figura 2: Impianto ATES: a) aggiornato pronto per accogliere la sezione di prova, b) con la sezione di prova non coibentata e c) con la sezione di prova coibentata.

Le prove sperimentali di caratterizzazione termica di un sistema TEES sono state pensate e programmate per eseguire dei cicli termici di carico/scarico del sistema, durante i quali, nella fase di carica termica, l'alimentazione fosse di tipo elettrico e/o termico, mentre nella fase di scarica termica il raffreddamento fosse solo per via termica. Prima di sottoporre i dispositivi ai test previsti, è stato necessario eseguire il degassamento degli stessi (eliminazione dell'acqua libera presente nel calcestruzzo) facendo scorrere al loro interno l'olio diatermico con una portata di 18 l/min e una temperatura di 140°C per 24 ore.

Sono state quindi eseguite due prove di carica/scarica del sistema, la prima caricando elettricamente il sistema e la seconda caricando il sistema attraverso il fluido termovettore; in entrambe le prove la fase di scarica è avvenuta sempre attraverso il fluido termovettore (Tabella 2).

Tabella 2 – Prova di carica/scarica sistema TEES.

Fase di	Metodo: conversione P2H	Metodo: riscaldamento tramite HTF
carico	Durata: 10 ore Temperatura obiettivo: 320°C	Durata: 30 ore Portata olio: 19 lit/min Temperatura ingresso olio: 320°C
scarico	Durata: 4.5 ore Portata olio: 17 l/min Temperatura ingresso olio: 150°C	Durata: 3 ore Portata olio: 13.5 l/min Temperatura ingresso olio: 150°C

Successivamente, è stata eseguita una prova a carico parziale. In questa prova è stato ripetuto un ciclo di carica/scarica con riscaldamento elettrico (P2H), in cui i tempi di carica e scarica sono stati ridotti rispettivamente a 5 ore e 2.5 ore.

Infine, è stata eseguita una prova funzionale ciclica del sistema, facendo 4 cicli totali (Tabella 3).

Tabella 3 – Prova ciclica (4 cicli) sistema TEES.

Fase di	
carico	Durata: 2 ore Temperatura obiettivo: 260°C
scarico	Durata: 1 ora Portata olio: 14 l/min Temperatura ingresso olio: 180°C

In Figura 3 sono riportate le temperature misurate sulla superficie esterna del guscio in calcestruzzo (6 totali, 3 per ogni dispositivo) nelle prove di carica/scarica del sistema sia nel caso con riscaldamento elettrico (a), sia nel caso con riscaldamento a HTF (b).

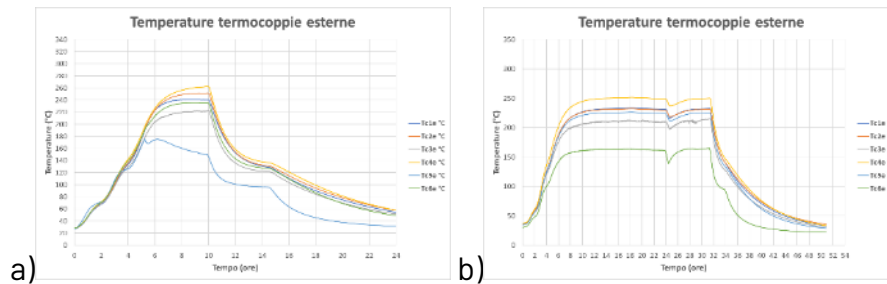


Figura 3: Prova di carica/scarica - Andamento delle temperature sulla superficie esterna del guscio in calcestruzzo: a) con carica elettrica e b) con carica con HTF.

In Figura 4 sono riportate le temperature sulle superfici interna (a) ed esterna (b) del guscio in calcestruzzo nella prova a carico parziale.

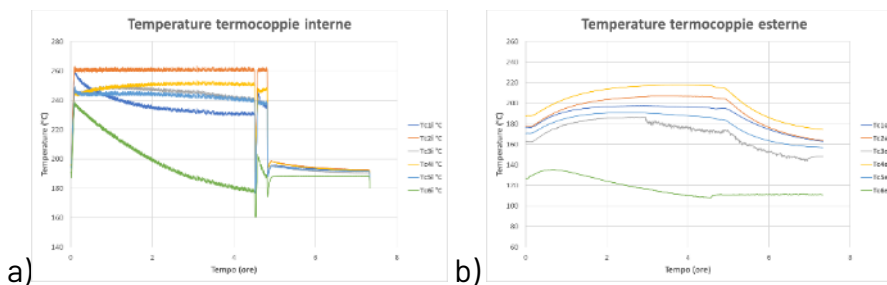


Figura 4: Prova a carico parziale - Andamento delle temperature sulle superfici interna a) ed esterna b) del guscio in calcestruzzo.

In Figura 5 sono riportate le temperature misurate sulle superfici interna (a) ed esterna (b) del guscio in calcestruzzo nella prova ciclica del sistema.

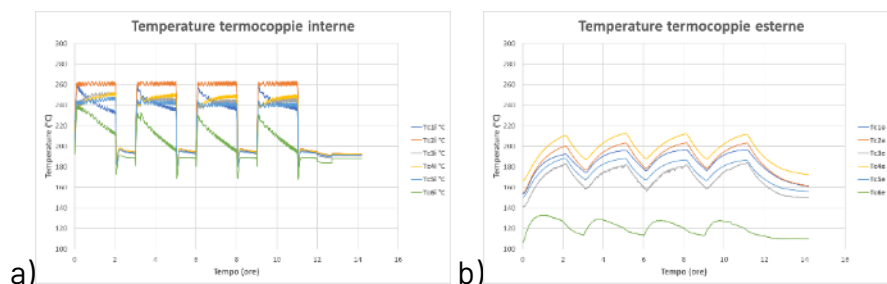


Figura 5: Prova ciclica - Andamento delle temperature sulle superfici interna a) ed esterna b) del guscio in calcestruzzo.

In conclusione, si è dimostrato che il concetto proposto di TEES, durante la fase di carico del sistema, non solo funziona correttamente ma lo fa in modo efficiente ed efficace. La

conversione interna elettro-termica (effetto Joule) consente di generare calore alla temperatura di target direttamente nel tubo di scambio in modo estremamente efficace, a differenza di quanto accade con un riscaldamento per convezione tramite fluido termovettore. Nonostante ciò, un fattore limitante nello sfruttamento rapido e completo del mezzo di accumulo continua ad essere legato alla diffusività termica del materiale.

Nella prova a carico parziale si osserva come operare con un tempo di carico ridotto, ma superiore alle 3 ore consenta un accumulo di energia prossimo a quello nominale. Invece, una riduzione del tempo di scarico del sistema impedisce il suo completo raffreddamento e ne riduce il fattore di utilizzo.

In un funzionamento ciclico, il comportamento termico del sistema si stabilizza a partire almeno dal terzo in poi. Ovviamente la durata delle fasi di carica e scarica nei vari cicli dovrà essere tale da garantire un buon sfruttamento del mezzo di accumulo, in questo caso il calcestruzzo.

## 7.2 Accumulo Termico Ibrido Sensibile-Latente (SH-LH TES)

Scopo di questa attività è quello di realizzare e caratterizzare un sistema di accumulo ibrido sensibile/latente, denominato HyTES.

HyTES consta di due elementi di accumulo termico in serie: il primo utilizza un materiale a cambiamento di fase (PCM) e il secondo è basato su calcestruzzo (CLS) come mezzo solido di accumulo (calore sensibile), al quale è stata aggiunto il 10% in peso, di un PCM micro-incapsulato (mEPCM).

I test sono stati effettuati utilizzando l'impianto di prova SOLTECA3, che è stato aggiornato secondo quanto prescritto in [ 1] e di cui si riportano alcune immagini dei lavori di montaggio e di realizzazione finale (da Figura 6 a Figura 9).



Figura 6: Solteca3 con riscaldatore (a) e raffreddatore preesistenti (b).



Figura 7: rimozione del circuito di riscaldamento (a) e raffreddamento (b)



Figura 8: installazione nuove linee olio dall'impianto (a) verso il nuovo aerotermo esterno (b)



Figura 9: impianto Solteca3 dopo installazione nuovi componenti (A: fronte; B: retro; C: accoppiato al modulo cementizio e a quello a cambiamento di fase, sulla sinistra è visibile anche l'alimentatore per il riscaldamento dello scambiatore ad olio tramite effetto Joule e a destra è in evidenza il modulo cementizio).



Figura 10: particolare dei flussi dell'olio in carica nei moduli da e per modulo cementizio (A), da e per modulo a calore latente (B).

In particolare, in Figura 10 le foto evidenziano il collocamento delle termocoppie e il flusso in carica; in scarica è l'opposto.

In Tabella 4 cosa acquisiscono le termocoppie relative agli ingressi ed uscite dei moduli di accumulo, necessarie per il calcolo dell'energia assorbita e ceduta.

Tabella 4 – Dati acquisiti dalle termocoppie relative ad ingressi ed uscita dei moduli di accumulo

**In carica**

<b>TM_OUT_CLS_PCM</b>	T da riscaldatore ad ingresso PCM
<b>TM_IN_PCM_CLS</b>	T da uscita PCM ad ingresso CLS (posta all'uscita del modulo PCM)
<b>TM_OUT</b>	da PCM ingresso CLS (posta all'ingresso del modulo PCM)
<b>TM_IN</b>	da CLS a serbatoio Solteca (posta ad uscita CLS).
<b>IN SCARICA</b>	
<b>TM_IN</b>	da SOLTECA (dopo passaggio per raffreddatore e riscaldatore) a CLS (posta ad ingresso CLS);
<b>TM_OUT</b>	da CLS a PCM (posta ad uscita CLS)
<b>TM_IN_PCM_CLS</b>	da CLS a PCM (posta ad uscita CLS)
<b>TM_OUT_CLS_PCM</b>	da PCM a serbatoio Solteca (posta all'uscita del modulo PCM)

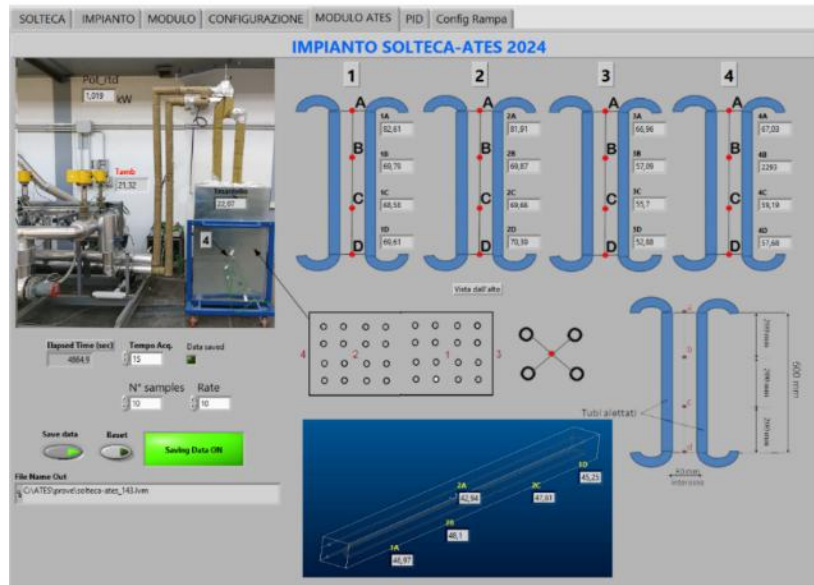


Figura 11: interfaccia LabView che mostra temperatura delle termocoppie all'interno dei moduli di accumulo.



Figura 12: Particolare di due dei quattro morsetti per accoppiamento scambiatore/alimentatore e più in alto delle 4 valvole con attuatore elettrico.

Come si può vedere dall'interfaccia di controllo (Figura 11), realizzata in LabView, sono acquisite 16 temperature all'interno del modulo PCM e 5 nel CLS, oltre a quelle di mantello, ambiente e morsetti del collegamento con l'alimentatore. Infine, viene acquisito e controllato, sia manualmente che in automatico la portata dell'olio e lo stato delle 4 valvole con attuatore automatico (Figura 12).

### 7.2.1 Piano di prove

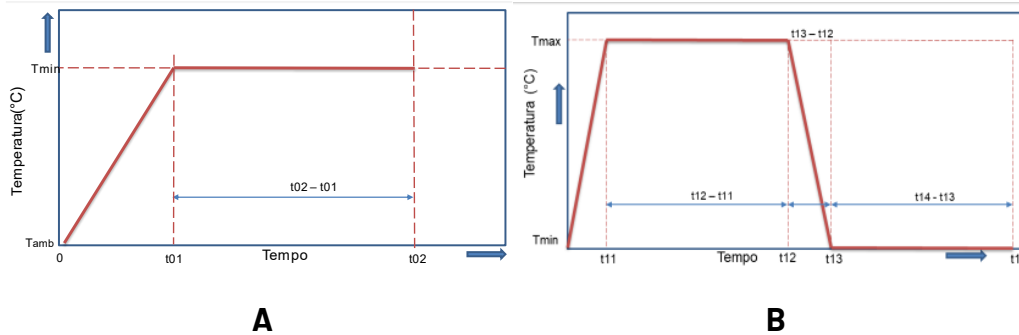
Per caratterizzare il comportamento di HyTES le seguenti prove:

- 1 Prova a carico e scarico totale;

- 2 Prova a carico e scarico parziale;
- 3 Analisi del comportamento termico di più cicli carico/scarico.

### 7.2.2 TEST 1: Prova a carico e scarico totale;

Le fasi di riscaldamento e di carica/scarica del sistema sono schematizzate come in *Figura 13*.



*Figura 13: Set point della temperatura di ingresso del HTF per le fasi di riscaldamento (A) e di carico/scarico (B).*

I parametri adottati sono riportati in Tabella 5:

*Tabella 5 – parametri test 1*

Parametro	Unità	Valore
<b>Temperatura operativa minima (<math>T_{min}</math>)</b>	°C	180
<b>Temperatura operativa massima (<math>T_{max}</math>)</b>	°C	280
<b>Tempo salita riscaldamento (<math>t01</math>)</b>	Min	0:30
<b>Tempo complessivo riscaldamento (<math>t02-t01</math>)</b>	Ore	24
<b>Tempo salita carica (<math>t11</math>)</b>	Min	0:30
<b>Tempo complessivo carico (<math>t12-t11</math>)</b>	Ore	15
<b>Tempo salita scarica (<math>t13-t12</math>)</b>	Min	0:30
<b>Tempo complessivo scarico (<math>t14-t13</math>)</b>	Ore	15

In *Figura 14* sono riportati gli andamenti della temperatura ambiente e di quella del mantello del SHTES, delle temperature di ingresso e uscita del serbatoio dell'olio e del riscaldatore, della velocità del fluido termovettore e del numero di Reynolds.

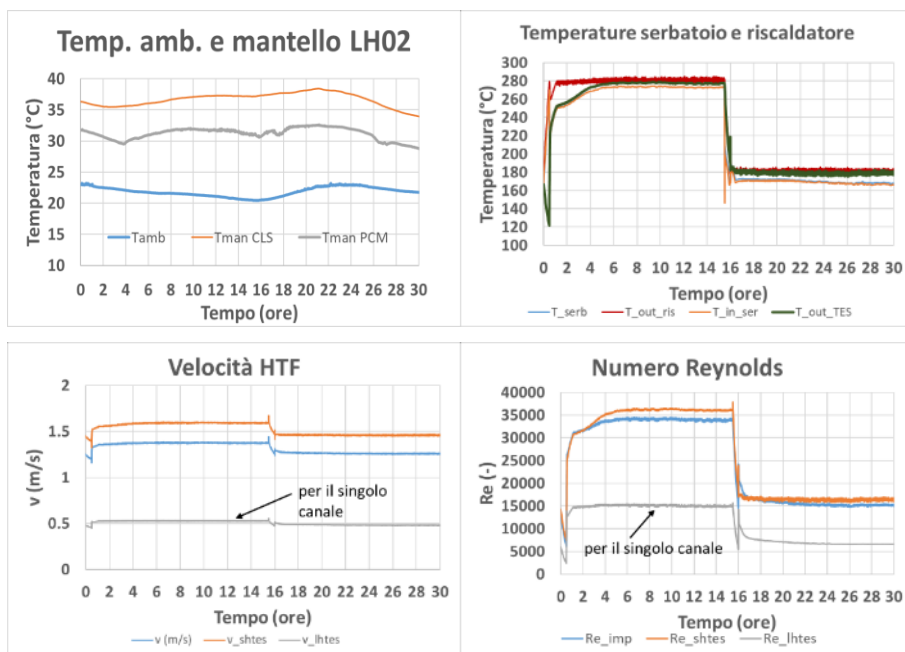


Figura 14: Andamenti della temperatura ambiente e di quella del mantello del SHTES, delle temperature di ingresso e uscita del serbatoio dell'olio e del riscaldatore, della velocità del fluido termovettore e del numero di Reynolds.

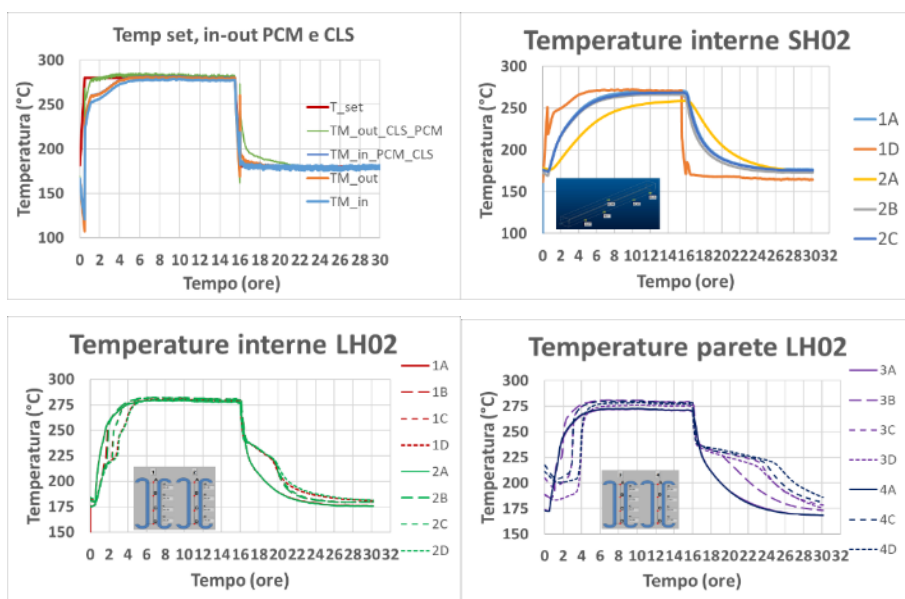


Figura 15: Andamenti della temperatura di ingresso e uscita del HTF da HyTES da sistemi costituenti, delle temperature interne e esterne a SH02 ed LH02.

Invece, in Figura 15 si possono vedere gli andamenti della temperatura di ingresso e uscita del HTF da HyTES e da sistemi costituenti, delle temperature interne ed esterne a SH02 ed LH02.

La Tabella 6 mostra i risultati del test 1. Si noti che la capacità teorica è 38 kWh. Quella fornita a fine carica dal fluido (vista lato HTF) al lordo delle perdite termiche è 54 kWh a carico totale; dopo 8 ore (inizio del plateau, Figura 15, invece, è di 41kWh, mentre 29.6 kWh è quella accumulata. Di quest'ultima, dopo 10 ore, se ne ricavano 25.7 (la nominale).

Tabella 6 – principali risultati test 1

Descrizione	Valore
Temperatura minima operativa [°C]	180
Temperatura massima operativa [°C]	280
Massimo salto termico HTF [°C]	100
Capacità teorica [kWh]	38
Capacità nominale [kWh]	25.7
Energia fornita al TES alla massima durata [kWh]	54.3
Accumulo PCM alla massima durata [kWh]	26.7
Accumulo CLS alla massima durata [kWh]	20.4
Massima durata di carica [h]	15
Massima durata di scarica [h]	14.1
Tempo di carica ottimale [h]	8
Energia fornita al sistema [kWh]	41.4
Energia accumulata da modulo CLS [kW]	7.8
Energia accumulata da modulo PCM [kW]	22.0
Energia accumulata dal sistema [kWh]	29.6
Tempo di scarica ottimale [h]	10
Energia scaricata dal modulo CLS [kWh]	5.2
Energia scaricata dal modulo PCM [kWh]	19.1
Energia scaricata dal sistema [Wh]	25.7
Perdite di calore a temperatura costante di 280°C [W]	1654
Perdite di calore a temperatura costante di 180°C [W]	292

### 7.2.3 TEST 2: Prova a carico e scarico parziale

Come da capitolato, è stata condotta anche una prova a carico e scarico parziali della durata di circa 6 e 5:30 h rispettivamente.

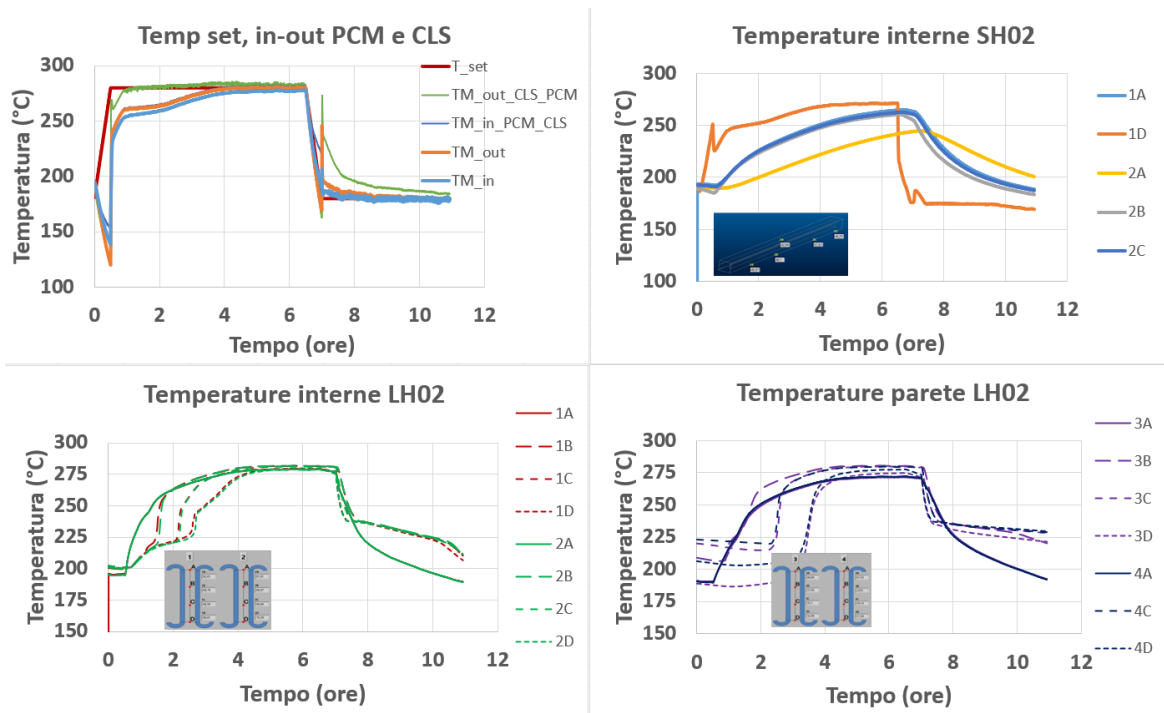


Figura 16: Andamenti della temperatura di ingresso e uscita del HTF da HyTES da sistemi costituenti, delle temperature interne ed esterne a SH02 ed LH02.

Questo test ha consentito di elaborare i seguenti risultati (Tabella 7):

Tabella 7 – principali risultati test 2

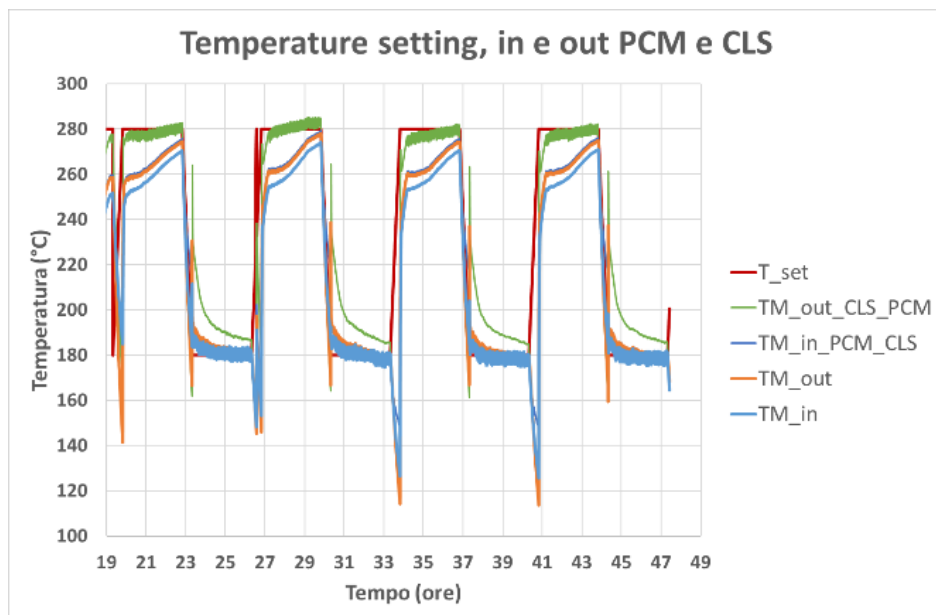
Descrizione	Valore
Parametri di Processo	
Temperatura minima operativa [°C]	180
Temperatura massima operativa [°C]	280
Massimo salto termico HTF [°C]	100
Tempo di carica [h]	6
Energia fornita al sistema [kWh]	34.65
Energia accumulata da modulo CLS [kWh]	6.04
Energia accumulata da modulo PCM [kWh]	19.34
Energia accumulata dal sistema [kWh]	25.18
Tempo di scarica [h]	4
Energia scaricata da modulo CLS [kWh]	5.52
Energia scaricata da modulo PCM [kWh]	17.42

Come si può vedere dal confronto delle due tabelle e dai grafici l'energia accumulata e scaricata a carico parziale è inferiore a quella a carico totale, ma comunque con un'alta percentuale di accumulo rispetto ad essa.

#### 7.2.4 TEST 3: Analisi di più cicli carica/scarica

Come da specifica, sono stati effettuati quattro cicli consecutivi di carico/scarico nell'intervallo operativo 180-280°C con durata ridotta del carico e dello scarico rispetto al ciclo unico precedente. In *Figura 17* sono mostrati gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita del HTF in HyTES e nei suoi componenti. La Tabella 9 mostra parametri adottati.

Le prove cicliche hanno evidenziato che per ottenere delle prestazioni più vicine a quelle massime misurate occorre assicurare dei tempi di carico e scarico maggiori di quelli adottati in questa prova.



*Figura 17: andamenti delle temperature di ingresso e uscita del HTF in HyTES e nei suoi componenti.*

*Tabella 8 – parametri test prova ciclica*

Parametro	Unità	Valore
Portata	kg/h	630
Temperatura operativa minima ( $T_{min}$ )	°C	180
Temperatura operativa massima ( $T_{max}$ )	°C	280
Tempo salita riscaldamento ( $t_{01}$ )	ore	0:30
Tempo complessivo riscaldamento ( $t_{02}-t_{01}$ )	ore	24
Tempo salita carica ( $t_{11}$ )	ore	0:30
Tempo complessivo carica ( $t_{12}-t_{11}$ )	ore	3
Tempo salita scarica ( $t_{13}-t_{12}$ )	ore	0:30

Tempo complessivo raffreddamento (t14-t13)	ore	3
Numero di cicli	-	4

### 7.3 Caratterizzazione Fisica del Mezzo di Accumulo Cementizio

I test sperimentali per la stima della conducibilità e diffusività termica sono stati eseguiti utilizzando lo strumento TPS 2500 S (Hot Disk), che implementa il metodo del disco caldo (norma ISO22007:2:2022, Transient plane heat source). La parte principale dello strumento è il sensore rivestito in kapton, costituito da un filo di nickel a doppia spirale. Il sensore funziona sia come sorgente piana di calore, sia come sensore di temperatura per rilevare l'innalzamento della temperatura del sensore stesso e localmente anche quella sulla superficie del campione. Le proprietà di trasporto termico dei provini di cemento sono state stimate a temperatura ambiente ed a 100°C, fornendo una potenza elettrica al sensore compresa tra 1-1.5 W con un tempo di misura del transiente termico pari a 640 secondi, i dati sono riportati in Tabella 9 e Tabella 10.

Tabella 9- caratteristiche fisiche dei provini di materiale cementizio in riferimento alla diversa composizione.

Mix	provino cubico (mm)	peso iniziale (kg)	peso finale post deg. (kg)	densità media iniziale (kg/m <sup>3</sup> )	densità media finale post deg. (kg/m <sup>3</sup> )	Var. densità (kg/m <sup>3</sup> )	T (°C)	$\lambda$ (W/m K)	std $\sigma$ $\lambda$ (W/m K)	$\rho c_p$ (J/m <sup>3</sup> K) 10 <sup>5</sup>	std $\sigma$ $\rho c_p$ (J/m <sup>3</sup> K) 10 <sup>5</sup>	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) 10 <sup>-6</sup>	std $\sigma$ $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) 10 <sup>-5</sup>
Mix 0	150	7.900	7.800	2363	2333	1.25%	23.4	1.951	0.206	1.743	0.103	1.127	0.163
Mix 0	150	8.050	7.950										
Mix 1	150	7.800	7.650	2304	2259	1.93%	23.2	1.659	0.096	2.319	0.190	0.723	0.098
Mix 1	150	7.750	7.600										
Mix 2	150	7.650	7.550	2267	2237	1.31%	23.8	1.577	0.058	2.033	0.122	0.780	0.073
Mix 2	150	7.650	7.550										
Mix 3	150	7.550	7.350	2207	2148	2.68%	25.8	1.867	0.165	1.602	0.042	1.165	0.109
Mix 3	150	7.350	7.150										
Mix 4	150	7.450	7.350	2222	2200	1.00%	20.3	1.384	0.074	1.859	0.060	0.740	0.054
Mix 4	150	7.550	7.500										
Mix 5	150	7.700	7.550	2274	2237	1.63%	22.2	1.731	0.181	1.807	0.078	0.957	0.074
Mix 5	150	7.650	7.550										
Mix 6	150	7.800	7.650	2326	2289	1.59%	20.1	1.737	0.071	1.858	0.064	0.937	0.070
Mix 6	150	7.900	7.800										
Mix 7	150	7.450	7.450	2222	2207	0.67%	18.8	1.686	0.048	2.294	0.047	0.735	0.024
Mix 7	150	7.550	7.450										
Mix 8(1)	150	7.250	7.150	2156	2119	1.72%	19.1	1.618	0.250	2.652	0.495	0.617	0.068
Mix 8(2)	150	7.300	7.150										
Mix 8(3)	150	7.150	7.050	2148	2119	1.38%	19.8	1.177	0.011	1.102	0.024	1.069	0.033
Mix 8(4)	150	7.350	7.250										
Mix 8(5)	150	7.350	7.200	2193	2141	2.36%	19.4	1.495	0.227	2.272	0.230	0.657	0.065
Mix 8(6)	150	7.450	7.250										
Mix 9(1)	150	7.750	7.650	2281	2252	1.30%	19.8	1.834	0.115	2.103	0.120	0.878	0.108
Mix 9(2)	150	7.650	7.550										
Mix 9(3)	150	7.750	7.600	2281	2244	1.62%	20.8	1.890	0.085	1.713	0.052	1.105	0.082
Mix 9(4)	150	7.650	7.550										
Mix 9(5)	150	7.700	7.550	2296	2259	1.61%	20.8	1.741	0.111	2.048	0.032	0.851	0.059
Mix 9(6)	150	7.800	7.700										

Tabella 10- caratteristiche fisiche dei provini di materiale cementizio in riferimento alla diversa composizione a 100°C.

	Temperatura (°C)	$\lambda$ (W/m K)	std $\sigma$ $\lambda$ (W /m K)	$\rho c_p$ (J/m <sup>3</sup> K) 10 <sup>6</sup>	std $\sigma$ $\rho c_p$ (J/m <sup>3</sup> K) ·10 <sup>6</sup>	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) ·10 <sup>-6</sup>	std $\sigma$ $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) ·10 <sup>-6</sup>
<b>Mix 0</b>	100,4	2,206	0,516	3,323	0,102	0,664	0,161
<b>Mix 1</b>	99,8	1,851	0,141	2,328	0,263	0,807	0,119
<b>Mix 2</b>	99,7	1,712	0,142	2,126	0,031	0,805	0,064
<b>Mix 3</b>	100,1	1,571	0,151	2,370	0,248	0,664	0,023
<b>Mix 4</b>	100,4	1,906	0,293	2,744	0,595	0,719	2,744
<b>Mix 5</b>	99,9	1,922	0,435	2,391	0,258	0,832	0,265
<b>Mix 6</b>	99,5	2,115	0,423	3,071	0,434	0,694	0,123
<b>Mix 7</b>	119,5	2,109	0,498	3,001	0,390	0,701	0,145

I risultati dei test con l'olio diatermico e glicerina sono riportati in Tabella 11, ed i best fit con dati sperimentali in Figura 18 e Figura 19. Il valore calcolato per la glicerina,  $0.2119 \text{ W / m }^\circ\text{C}$ , presenta una variazione del 29% rispetto al valore riportato dal Touloukian [ 7] che è pari a  $0.2990 \text{ W / m }^\circ\text{C}$ . Per il Therminol 66 è stato calcolato un valore di  $0.1102$  e  $0.1108 \text{ W / m }^\circ\text{C}$  che presenta una variazione del 3.73% e 3.18 % rispetto ai dati tabellati dal produttore di  $0.1145 \text{ W / m }^\circ\text{C}$ .

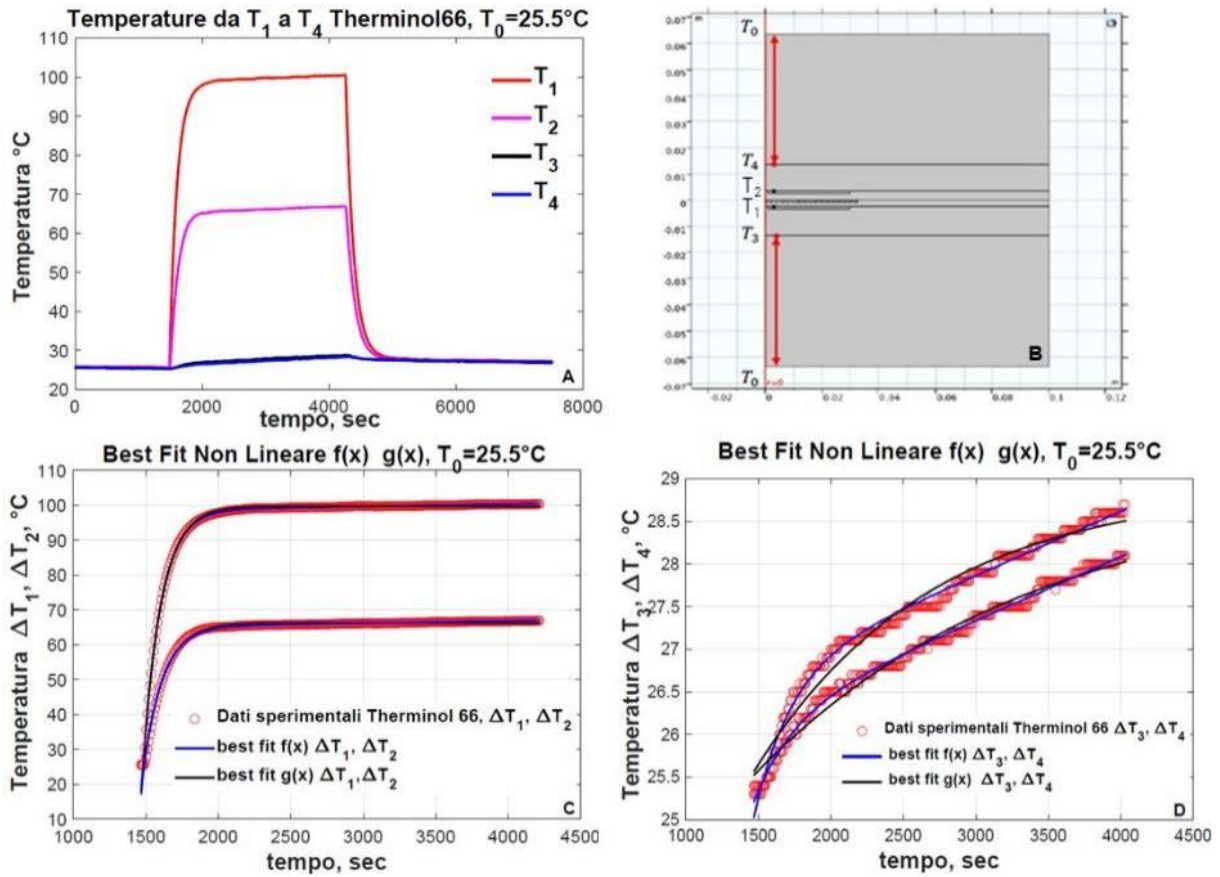


Figura 18: (A) temperature nel tempo per il test sperimentale con olio diatermico mentre è acceso il circuito del cavo scaldante, (B) schema delle 4 termocoppie all'interno della cella di misura,  $T_1 - T_4$ , (C-D) i cerchi rossi rappresentano i dati sperimentali  $T_1 - T_4$ , le curve a tratto pieno in blu e nero il best fit con le funzioni  $f(x)$  e  $g(x)$ , la temperatura del forno è  $T_0=25.5^\circ\text{C}$ .

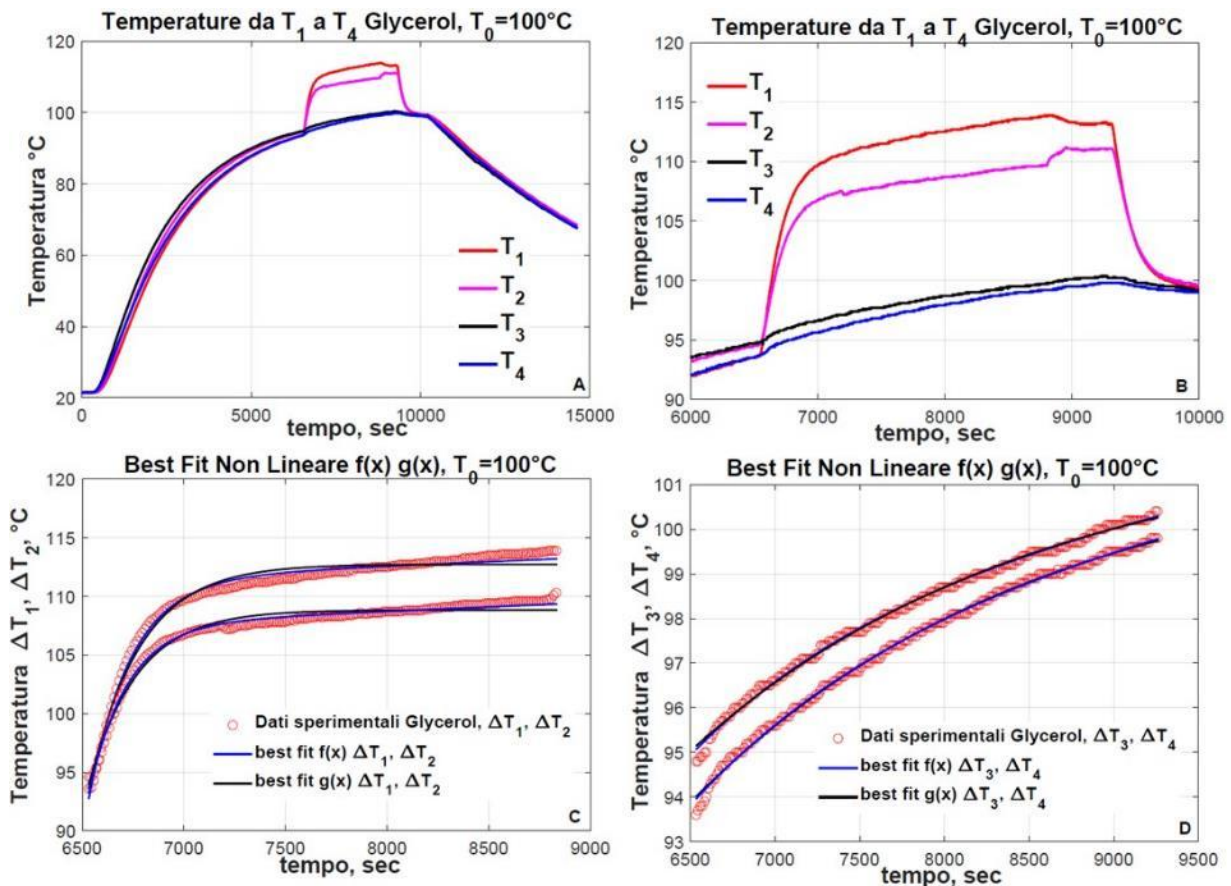


Figura 19: (A) temperatura nel tempo per il test sperimentale con glicerina, (B) temperature relative all'accensione del circuito del cavo scaldante, (C-D) i cerchi rossi rappresentano i dati sperimentali  $T_1 - T_4$ , le curve a tratto pieno in blu e nero il best fit con le funzioni  $f(x)$  e  $g(x)$ , la temperatura del forno è  $T_0=100^\circ\text{C}$ .

Tabella 11- Parametri di best fit  $\Delta T$ , e conducibilità termica per la glicerina e l'olio diatermico.

prova sperimentale	$f(x)$	$f(x)$	$f(x)$
	$T_{av} = (T_1 + T_2)/2$	$T_{av}^0 = (T_2 + T_0)/2$	$\lambda(T_{av})$ (W/m °C)
<b>THERMINOL 66 <math>T_0=70^\circ\text{C}</math></b>	120.77	88.91	0.0591
<b>THERMINOL 66 <math>T_0=25.5^\circ\text{C}</math></b>	81.80	45.28	1,3834
<b>THERMINOL 66 <math>T_0=25^\circ\text{C}</math></b>	81.43	45.01	0.74
<b>Glycerol <math>T_0=100^\circ\text{C}</math></b>	109.62	157.70	0.3480
prova sperimentale	$g(x)$	$g(x)$	$g(x)$
	$T_{av} = (T_1 + T_2)/2$	$T_{av}^0 = (T_2 + T_0)/2$	$\lambda(T_{av})$ (W/m °C)
<b>THERMINOL 66 <math>T_0=70^\circ\text{C}</math></b>	122.10	89.59	0.1263
<b>THERMINOL 66 <math>T_0=25.5^\circ\text{C}</math></b>	83.01	45.88	0.1102
<b>THERMINOL 66 <math>T_0=25^\circ\text{C}</math></b>	82.67	45.63	0.1108
<b>Glycerol <math>T_0=100^\circ\text{C}</math></b>	110.78	158.83	0.2119

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non ci sono state attività di consulenza.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state ancora effettuate pubblicazioni inerenti a questa linea di attività.

## 10 Eventi di disseminazione

### 10.1 IEA ES TCP

#### 10.1.1 Energy Storage Technology Collaboration Platform – ExCO meetings

IEA Energy Storage (ES) è uno dei Technology Collaboration Programs (TCP) all'interno dell'International Energy Agency (IEA). Attualmente al TCP-ES partecipano attivamente 21 paesi e 3 sponsor. I paesi rappresentati sono: Austria, Belgio, Canada, Cina, Repubblica Ceca, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Israele, Italia, Giappone, Norvegia, Slovenia, Sud Corea, Olanda, Svezia, Turchia, Regno Unito, Stati Uniti e Svizzera.

Gli sponsor sono la Spagna, tramite il CIC EnergiGUNE e l'Università di Siviglia oltre alla BVS, che ha sede in Germania.

Il principale fine di IEA-ES è quello di facilitare la ricerca, lo sviluppo, l'implementazione e l'integrazione di tecnologie di immagazzinamento dell'energia, quali l'accumulo di energia elettrica, l'accumulo di energia termica, l'accumulo di energia distribuita e l'accumulo di energia geotermica.

Tipicamente si tengono riunioni semestrali tra i vari delegati e/o alternate (alt) nazionali, organizzate in posti diversi dai partner partecipanti.

Nel biennio 2023-2024 sono stati attivi i seguenti task, che come si vede rientrano le attività di interesse anche di questa linea di attività, con particolare attenzione al Task 36 e suo follow-up Task 44, Task 40 e Task 41:

- Task 32- Modelling of Energy Storage for Simulation/ Optimization of Energy Systems – Open Sesame;
- Task 35 – Flexible Sector Coupling;
- Task 36 – Carnot Batteries
- Task 37 – Smart Design and Control of Energy Storage Systems
- Task 38 – Ground Source de-icing for infrastructure
- Task 39 – Large TES for district heating
- Task 40 – Compact Thermal Energy Storage; Materials within Components within Systems
- Task 41 – Economics of Energy Storage – EcoEneSto

- Task 42 - System flexibility from Medium-Duration Energy Storage
- Task 43 - Storage for renewables and flexibility through standardized use of building mass
- Task 44 - Power-to-Heat and Heat integrated Carnot Batteries for Zero-Carbon (industrial) Heat & Power supply
- Task 45 - Accelerating the Uptake of Large Thermal Energy Storages

In tale ambito l'ing. Raffaele Liberatore, delegato per l'Italia, è stato nominato revisore dei Task 41 e Task 44.

Queste riunioni sono state anche occasione per presentare le attività del PTR22-24 sull'accumulo di energia, compreso il termico che, come si vede è giudicato di particolare interesse. I facilities tours, le riunioni stesse e gli scambi di opinioni con i delegati nazionali, esperti di accumulo energetico, sono stati occasione di aggiornamento e di divulgazione.

In Tabella 12, Tabella 13 e Tabella 14 sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

Tabella 12 - ExC096 15-17 novembre 2023

<b>Titolo</b>	<b>IEA ES TCP Executive Committee Meeting (XC96)</b>
<b>Luogo</b>	Berlino in presenza e web meeting in remoto
<b>Periodo</b>	15/11/2023 - 17/11/2023
<b>Tipologia</b>	Executive Committee meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	50
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

Tabella 13 - ExC097 03-04 giugno 2024

<b>Titolo</b>	<b>IEA ES TCP Executive Committee Meeting (XC97)</b>
<b>Luogo</b>	Lione in presenza e web meeting in remoto
<b>Periodo</b>	03/06/2024 - 04/06/2024
<b>Tipologia</b>	Executive Committee meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	45
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

Tabella 14 - ExC098 12-14 novembre 2024

<b>Titolo</b>	<b>IEA ES TCP Executive Committee Meeting (XC97)</b>
<b>Luogo</b>	Ritchland (WA - USA) in presenza e web meeting in remoto
<b>Periodo</b>	12/11/2024 - 14/12/2024
<b>Tipologia</b>	Executive Committee meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	48
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

## 10.2 UniRoma1 06 novembre 2023

### Lezioni/seminari Università

L'ing. Raffaele Liberatore (ENEA) in data 06/11/2023 ha tenuto una lezione/seminario di 3 ore in lingua inglese (in modalità "ibrida") nell'ambito del corso Advanced Energy Conversion Systems, corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, presso la Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, Università La Sapienza di Roma, introducendo le tematiche dell'accumulo termico trattate in questo WP. Tale evento è stato seguito da circa 20 studenti in remoto e 50 in presenza.

## 10.3 UniRoma1 31 ottobre 2024

### Lezioni/seminari Università

L'ing. Raffaele Liberatore (ENEA) in data 31/10/2024 ha tenuto una lezione/seminario di 3 ore in lingua inglese (in modalità "ibrida") nell'ambito del corso Advanced Energy Conversion Systems, corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, presso la Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, Università La Sapienza di Roma, introducendo le tematiche dell'accumulo termico trattate in questo WP. Tale evento è stato seguito da circa 10 studenti in remoto e 40 in presenza.

## 10.4 Enerstock 2024 International Congress

Enerstock è una delle principali conferenze internazionali sullo stoccaggio dell'energia, che affronta gli ultimi sviluppi in campo scientifico, politico e di implementazione. È organizzata ogni tre anni in una diversa città di Nazioni, coinvolte con l'Energy Storage.

In tale ambito l'ing. Raffaele Liberatore ha presentato oralmente il lavoro: "Thermal Energy Storage with Molten Salts: Predictive Models for thermo-physical properties", realizzato insieme a

S. Sau, A.C. Tizzoni, A. Spadoni, E. Veca, E. Mansi, T. Delise, M. Battaglia, N. Corsaro, C. D'Ottavi, S. Licoccia

riguardante miscele di sali da usare come materiali per l'accumulo termico a media temperatura.

In Tabella 15 sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

Tabella 15- Enerstock 5-7 giugno 2024

<b>Titolo</b>	<b>Enerstock 2024</b>
<b>Luogo</b>	Lione (Francia)
<b>Periodo</b>	05/06/2024 - 07/06/2024
<b>Tipologia</b>	Congresso internazionale
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	600
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

## 10.5 Zeroemission

Zeroemission è la fiera internazionale consolidata per la promozione delle energie rinnovabili a livello internazionale, per lo sviluppo della decarbonizzazione della produzione elettrica, l'elettrificazione dei consumi, la mobilità elettrica e la lotta ai cambiamenti climatici. I settori industriali tematici offrono a tutti i visitatori professionali una panoramica completa delle innovazioni pienamente sostenibili e delle tecnologie correlate: sistemi, materiali, attrezzature, tecnologie, prodotti e servizi.

In tale ambito l'ing. Raffaele Liberatore ha presentato oralmente:

"New frontiers of research and innovation in the thermal energy storage sector", presentando le attività di questa linea.

In Tabella 16 sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

Tabella 16- Zeroemission 10-12 ottobre 2023

<b>Titolo</b>	<b>Zeroemission 2023</b>
<b>Luogo</b>	Roma
<b>Periodo</b>	10/10/2023
<b>Tipologia</b>	Congresso nazionale

<b>Numero indicativo partecipanti</b>	600
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

## 10.6 Salina

Al workshop finale dell'evento avvenuto a Malfa (ME) dall'1 al 2 ottobre 2023, l'ing. Liberatore ha presentato i lavori:

"Introduction to THERMAL STORAGE TECHNOLOGIES and the use of thermo-chemical reactors for high temperatures"

"IEA -TCP ES: Overview of ongoing activities"

Mentre l'ing. Daniele Nicolini il lavoro:

"Medium temperature energy storage including thermoelectric and sensible/latent storage"

In Tabella 16 sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

Tabella 17- Malfa - Salina (ME) 1-2 ottobre 2023

<b>Titolo</b>	<b>LA RICERCA DI SISTEMA: CONFRONTO sulle ATTIVITA' di RICERCA delle TECNOLOGIE DI ACCUMULO</b>
<b>Luogo</b>	Malfa (ME)
<b>Periodo</b>	1-2/10/2024
<b>Tipologia</b>	Congresso nazionale
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	100
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

## 10.7 Nanoinnovation Congress

L'evento rappresenta un consolidato punto di incontro nazionale per l'ampia e multidisciplinare comunità coinvolta nello sviluppo della nanotecnologia e nella sua integrazione con altre tecnologie chiave, in tutti i campi di applicazione. I temi trattati riguardano: Nanomedicina, Nanomateriali, Energia ed ecosistemi correlati, con l'obiettivo di migliorare il ritorno tecnologico e sociale degli investimenti in ricerca e istruzione superiore.

NanoInnovation riunisce ricercatori, tecnologi, manager, imprenditori e investitori che condividono le loro esperienze, opinioni e aspettative sui temi proposti.

Sia nel 2023 che nel 2024 sono stati organizzati due workshop sull'accumulo termico, uno dei due riguardante proprio gli aspetti trattati in questa LA.

In tale ambito l'ing. Raffaele Liberatore è stato chairman dei due workshop, per entrambe le annualità dedicati all'accumulo termico e ha presentato oralmente:

"Introduction on PTR22\_24 Project 1.2 concerning Thermal Energy Storage".

In Tabella 18 e Tabella 19 sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

Tabella 18- Nanoinnovation 18-22 settembre 2023

<b>Titolo</b>		<b>Nanoinnovation 2023</b>
<b>Luogo</b>		Roma
<b>Periodo</b>		20/09/2023
<b>Tipologia</b>		Congresso nazionale
<b>Numero partecipanti</b>	<b>indicativo</b>	300
<b>Tipologia partecipanti</b>		Esperti del settore

Tabella 19- Nanoinnovation 10-13 settembre 2024

<b>Titolo</b>		<b>Nanoinnovation 2024</b>
<b>Luogo</b>		Roma
<b>Periodo</b>		12/09/2024
<b>Tipologia</b>		Congresso nazionale
<b>Numero partecipanti</b>	<b>indicativo</b>	300
<b>Tipologia partecipanti</b>		Esperti del settore

## 10.8 Missione a Narni (TR) - 16 aprile 2024

### Riunione ENEA/Calcestruzzi Cipiccia SpA/UniPG su LA 4.7

L'ing. Adio Miliozzi, l'ing. Raffaele Liberatore e l'ing. Daniele Nicolini dell'ENEA hanno effettuato prima una riunione presso la ditta Calcestruzzi Cipiccia SpA per verificare lo sviluppo dei mix-design dei nuovi calcestruzzi da utilizzare come mezzo di accumulo nell'ambito della linea LA 4.7 e programmare la realizzazione dei relativi provini e prototipi da fornire a ENEA. Alla riunione erano presenti l'ing. Luca Cipiccia e l'ing. Mauro Candelori della ditta e il prof. Franco

Dominici e il prof. Roberto Petrucci dell'Università di Perugia. Successivamente la riunione si è spostata presso i laboratori della sede di Terni dell'Università di Perugia, dove si è discusso sull'ottimizzazione dei mix-design e sulla realizzazione dei PCM micro-incapsulati, successivamente utilizzati dalla ditta Calcestruzzi Cipiccia SpA.

## 10.9 Missione a Padova - 28-30 maggio 2024

### Riunione ENEA/UniPD su LA 4.11

L'ing. Adio Miliuzzi e l'ing. Daniele Nicolini dell'ENEA hanno effettuato la missione presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova al fine di verificare lo stato di avanzamento delle attività dell'Università di Padova e programmare le attività successive relative alla LA 4.11 del PTR 22-24. Per l'Università erano presenti il prof. Carmelo Maiorana, il prof. Luca Doretto, il prof. Gianluca Mazzucco e l'ing. Francesca Martelletto. In particolare, durante l'incontro è stato analizzato lo stato di avanzamento dello sviluppo del software che ingloba i due moduli, uno precedentemente sviluppato dalla stessa UniPD e uno sviluppato dall'Università di Foggia.

## 10.10 Missione a Bari - 16-18 settembre 2024

### Riunione ENEA/UniFG su LA 4.17

L'ing. Daniele Nicolini e l'ing. Adio Miliuzzi dell'ENEA hanno effettuato la missione presso il Politecnico di Bari al fine di effettuare la riunione con il prof. Francesco Fornarelli del Dipartimento di scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria (DAFNE) dell'Università di Foggia. Oggetto dell'incontro è stata la verifica dello stato di avanzamento delle attività di quest'ultima e la programmazione delle attività successive relative alla LA 4.17 del PTR 22-24. Alla riunione erano presenti anche il prof. Sergio Camporeale, l'ing. Vito Ceglie e l'ing. Fabio Anaclerio. In particolare, durante l'incontro è stato analizzato lo stato di avanzamento dello sviluppo dei modelli CFD per lo studio di alettature di un tubo di scambio termico di un sistema LHTES.

## 11 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

In questa linea di attività sono state analizzate due tecnologie ibride che riguardano l'accumulo termico a media temperatura: a) accumulo di calore sia mediante energia proveniente sia da un fluido termico sia da fonte elettrica; b) accoppiamento di moduli base di accumulo di calore sensibile e latente. Essendo questa linea di attività il proseguimento della LA4.5 il posizionamento della ricerca rispetto alle due tecnologie qui studiate è già stato esposto nel report ad essa dedicato [ 1].

In ogni caso, è utile rimarcare che si è operato affinché le soluzioni individuate siano flessibili in termini di dimensione (capacità) e integrabilità con l'obiettivo ultimo di sviluppare soluzioni che possano essere utilizzate nel sistema energetico e produttivo italiano, dove la necessità di sistemi flessibili e compatti, anche di medio-piccola capacità, è rilevante, sia per la fornitura di calore industriale, sia per sistemi di potenza di piccola taglia (distribuita) [ 2].

### **Valutazioni su sistemi ibridi in grado di ricevere calore sia da fluido termico che elettrico**

Questa tecnologia è particolarmente utile per contrastare la cosiddetta overgeneration di energia elettrica dovuta alla sempre maggiore produzione di energia elettrica da fonti

rinnovabili. Nell'IEA Energy Storage TCP, questo aspetto è trattato in modo particolarmente approfondito ed è presente in vari task che studiano la flexibility e le batterie di Carnot, come ad esempio i recenti task 42: "System flexibility from Medium-Duration Energy Storage" o task 44: "Hi CBest: Power-to-Heat and Heat integrated Carnot Batteries for Zero-Carbon (industrial) Heat & Power supply".

Un caso di riferimento efficace dovrebbe tenere conto dei seguenti aspetti:

- Analisi delle prestazioni di carica parziale: molte tecnologie sono in una fase in cui è stata proposta solo la progettazione termodinamica; pertanto, si prevede che vengano eseguiti studi di carica parziale per dare agli operatori un'idea di quanto le prestazioni possano degradarsi in questo tipo di operazione. Ciò è particolarmente interessante poiché significa anche modificare le temperature operative per vedere come viene influenzata la fase successiva.
- Simulazioni dinamiche: i sistemi di accumulo devono essere in grado di rispondere rapidamente per verificare la flessibilità da fornire agli utenti e i servizi di rete necessari per l'integrazione RES, inclusa la scala temporale.
- Integrazione con altri sistemi: in particolare, i sistemi integrati termicamente dovrebbero avere vantaggi significativi in termini di riduzione delle perdite di energia. In altre parole, dove, con quale frequenza e a quale costo i flussi di energia termica sono disponibili in modo continuo e stabile? Qual è il loro potenziale? Poiché il flusso di calore disponibile è fissato dal sistema a monte (ad esempio un impianto industriale, per il calore di scarto), quanto può essere grande il sistema di accumulo, data l'energia di scarto disponibile?
- Strategie di controllo: le strategie di controllo dovrebbero massimizzare la funzione obiettivo selezionata per quanto riguarda, ad esempio, l'intervallo di potenza/capacità, le fluttuazioni nei prezzi dell'elettricità, la domanda di elettricità, la produzione di energia e qualsiasi integrazione del calore di scarto, nonché produrre un chiaro beneficio ambientale, in particolare per minori emissioni di gas serra.

Infine, si prevede che la riduzione dei costi del sistema TES ibrido rispetto a uno tradizionale promuoverà attivamente questa tecnologia e guadagnerà la fiducia degli investitori.

### **Applicabilità generale di sistemi ibridi ad accumulo sensibile-latente**

Un metodo emergente per un sistema di accumulo di energia combina sistemi di accumulo di energia termica latente e sensibile.

Ad esempio, Laing et al. [3] hanno sviluppato una soluzione di accumulo combinata per la generazione diretta di vapore in impianti CSP con un accumulo in calcestruzzo per il surriscaldamento del vapore e un LHTES per l'evaporazione dell'acqua. Un impianto prototipo da 700 kWh è stato costruito a Litoral of Endesa a Carboneras, in Spagna.

A Roma (Italia) è in fase di costruzione un prototipo di TES ibrido comprendente un modulo in grado di immagazzinare 40 kWh di energia termica mediante materiali a cambiamento di fase (PCM), seguito da un modulo in calcestruzzo da circa 150 kWh e altri 40 kWh PCM TES con una temperatura di cambiamento di fase più elevata. L'intervallo di temperatura di esercizio complessivo del sistema è  $290\div 450^{\circ}\text{C}$  [4].

I benefici di questo tipo di sistemi sono attesi in un effetto positivo sia per facilitare la gestione del sistema grazie alla stabilizzazione della temperatura di uscita del fluido termovettore per molte ore sia per fornire calore di alta qualità all'utente.

Novotny et al. [5] hanno sviluppato un grafico temperatura-entropia di tale sistema, insieme a un ciclo di carica che coinvolge l'ORC e un ciclo di scarica correlato a una pompa di calore. Alcuni autori hanno studiato l'accoppiamento di fonti di calore a bassa temperatura con PTES (Pumped Thermal Electricity Storage) [6], sviluppando un modello numerico per un sistema PTES subcritico che funziona con butene. Hanno scoperto che il rapporto tra energia elettrica fornita e potenza elettrica utile è 1,25 con un'efficienza exergetica massima del 59%, operando tra una sorgente e una temperatura minima di 100 °C e 15 °C, rispettivamente. Se non viene utilizzata energia termica, l'efficienza exergetica massima scende al 52%. Va notato che i profili di temperatura sensibili sono validi solo all'inizio della carica e della scarica e si presume un sistema di accumulo stratificato. In realtà, le temperature cambiano nel tempo, portando a una riduzione della produzione di lavoro. Pertanto, anche per i sistemi con una buona corrispondenza di temperatura per l'SHTES, è necessario considerare importanti irreversibilità. Altri metodi di ibridazione per temperature medio-alte utilizzati per ottenere TES a base di cemento più compatti consistono nell'aggiungere una quantità di materiale a cambiamento di fase (PCM) stabilizzata in forma al loro mix-design, in modo da non compromettere le loro prestazioni termomeccaniche. In questo modo, un tale mezzo di accumulo ibrido sensibile/latente ha i vantaggi di un basso costo del calcestruzzo combinato con una maggiore densità di energia [7].

#### **Riferimenti:**

[ 1] A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Nicolini, E.M. Veca, G. Giorgi, G. Napoli. *Analisi e progettazione di accumuli energetici ibridi a media temperatura comprendenti lo stoccaggio di tipo termo-elettrico (TEES) e sensibile/latente (SH/LH TES) a media temperatura. RdS\_PTR22-24\_PR1.2\_LA4.5\_092*

[ 2] A. Miliozzi, F. Bisegna, F. Nardecchia. L. Pompei. Accumulo termico. SIMTE - Sistema Informativo e di Monitoraggio delle Tecnologie Energetiche. 2021, AdP ENEA-MiSE, RSE, Prog 2.1 Strumenti e modelli, anche settoriali, per scenari energetici ed elettrici, adeguati all'evoluzione del sistema - Analisi di evoluzione dei mercati e della regolazione.

[ 3] D. Laing, M. Eck, M. Hempel, W. D. Steinmann, M. Meyer-Grünefeldt, M. Eickhoff, Analysis of Operation Test Results of a High Temperature Phase Change Storage for Parabolic Trough Power Plants With Direct Steam Generation, proceedings of ASME 2012, ES2012-91056, pp. 273-280.

[ 4] R. Liberatore et al. Progetto JCA Eni ENEA. Atti di Solar Paces 2024.

[ 5] V. Novotny, V. Basta, P. Smola, J. Spale Spale, J. Review of Carnot Battery Technology Commercial Development. *Energies* 2022, 15, 647.

[ 6] S. Rehman, L.M. Al-Hadhrani, M. Alam. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 44, 586-598.

[ 7] Y.S. Touloukian, *Thermal Conductivity Non metallic Liquids and Gases; Thermophysical properties of matter vol.3; USA, 1970.*

[ 8] Miliozzi, A.; Dominici, F.; Candelori, M.; Veca, E.; Liberatore, R.; Nicolini, D.; Torre, L. Sviluppo e caratterizzazione di compositi calcestruzzo/PCM/diatomite per l'accumulo di energia termica in applicazioni CSP/CST. *Energies* 2021, 14, 4410