

# Ricerca di Sistema elettrico



**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 (deliverable della LA4.5: Accumulo a media temperatura: analisi e progettazione di sistemi ibridi di accumulo)**

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

ANALISI E PROGETTAZIONE DI ACCUMULI ENERGETICI IBRIDI A MEDIA TEMPERATURA  
COMPREDENTI LO STOCCAGGIO DI TIPO TERMO-ELETTRICO (TEES) E SENSIBILE/LATENTE (SH/LH  
TES) A MEDIA TEMPERATURA (LA4.5)

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

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Progetto Integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico*

Linea di attività: 4.5

Responsabile del Progetto: dr. Vincenzo Antonucci, CNR

Responsabile del Progetto per ENEA: dr.ssa Margherita Moreno, ENEA

Responsabile del Work Package: ing. Raffaele Liberatore, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ing. Adio Miliozzi, ENEA

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: gennaio 2022

Mese fine previsto: giugno 2023

Mese fine effettivo: giugno 2023

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	4
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	4
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....	4
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	5
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	5
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	13
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	13
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	14
11	POSIZIONAMENTO DELLA RICERCA RISPETTO ALLO STATO DELL'ARTE INTERNAZIONALE .....	17

## 1 Risultati attesi

I risultati attesi per la presente linea di attività sono:

- Per un sistema innovativo di accumulo termo-elettrico di energia (TEES):
  - Studio e analisi di funzionamento del nuovo concetto di TEES;
  - Progettazione di alcuni prototipi di TEES in calcestruzzo da poter caratterizzare sperimentalmente.
- Per un sistema di accumulo termico a calore sensibile ed a calore latente:
  - Identificazione degli elementi da utilizzare TES ibrido che include un sistema di accumulo di materiali cementizi e a cambiamento di fase;
  - Progettazione di un sistema TES ibrido prototipale contenente modulo cementizio e modulo a cambiamento di fase.
- Aggiornamento degli impianti sperimentali ENEA Solteca3 e ATES per supportare le prove sperimentali programmate.

Da capitolato, per il test di verifica si evince che risultati devono essere realizzati nei seguenti termini:

- Dimensionamento, comprensivo di isolamento termico, dell'elemento TEES con la funzione di scambiare il calore tra mezzo di accumulo e fluido termovettore (HTF) sia in fase di carico che di scarico del sistema, e di generare calore per effetto Joule con le stime di scambio.
- Analisi termodinamica per prevedere il comportamento dinamico (tempi di carico e scarico) del sistema TEES con simulazioni numeriche sfruttando il Metodo degli Elementi Finiti ed il codice di calcolo Cast3M.
- Progettazione di un sistema TES ibrido di prova.

Gli impianti di prova Solteca3 e ATES, che saranno utilizzati al presente scopo, dovranno essere necessariamente aggiornati nella successiva LA4.7 al fine di supportare i sistemi di accumulo, agendo in particolar modo sulla potenza e sullo scambio di calore tra gli impianti di circolazione e il fluido termovettore. I componenti da sostituire e/o acquistare devono essere identificati nella presente linea di attività.

## 2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti per la presente linea di attività, come da capitolato vigente, sono stati:

- Dimensionamento, comprensivo di isolamento termico, dell'elemento TEES con la funzione di scambiare il calore tra mezzo di accumulo e fluido termovettore (HTF) sia in fase di carico che di scarico del sistema, e di generare calore per effetto Joule con le stime di scambio.
- Analisi termodinamica per prevedere il comportamento dinamico (tempi di carico e scarico) del sistema TEES con simulazioni numeriche sfruttando il Metodo degli Elementi Finiti ed il codice di calcolo Cast3M.
- Progettazione di un sistema TES ibrido di prova.
- Studio ed identificazione dei componenti degli impianti Solteca3 ed ATES da sostituire e/o acquistare per le prove sperimentali da effettuarsi nella successiva LA4.7.

*Non si rilevano scostamenti rispetto a quanto programmato.*

Riguardo ai benefici per il sistema elettrico e per i suoi utenti, la presente linea potrà dare risposte solo a più lungo termine. Infatti, essa è dedicata a dimensionamenti di prototipi, simulazioni e studio delle specifiche per la realizzazione di strumenti che possano assicurare la sperimentazione di materiali in grado di integrare meglio le tecnologie rinnovabili nel processo industriale quali: una migliore modularità del sistema, che potrebbe essere utile per affrontare problemi di scala; un adeguato design; soluzioni ingegneristiche che possono migliorare l'efficienza nel trasferimento di calore.

### 3 Prodotti attesi

Nessun prodotto hardware o software era atteso da questa linea di attività

### 4 Prodotti sviluppati

Nessuno sviluppo di prodotti hardware o software era atteso da questa linea di attività

### 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non c'è stato alcuno scostamento rispetto alle attività programmate

## 6 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito dei sistemi di accumulo di energia termo-elettrici, è stato sviluppato un nuovo concetto di sistema di accumulo a base cementizia. Due prototipi sono stati dimensionati e progettati per poter poi essere caratterizzati termicamente nella LA4.7. Si tratta di provini cilindrici con tubo immerso costituiti da calcestruzzi di due tipologie: con e senza materiali a cambiamento di fase micro-incapsulati.

Parallelamente è stato analizzato un sistema di accumulo termico misto sensibile-latente. In questa attività, sono state dapprima identificate le tipologie di elementi a calore sensibile ed a calore latente da utilizzare. Successivamente, attraverso analisi numerica, è stato progettato il prototipo del sistema TES ibrido. Questo prototipo sarà caratterizzato termicamente nella LA4.7.

In questa fase è stato necessario studiare degli opportuni aggiornamenti degli impianti di prova Solteca3 e ATEs, per poter essere utilizzati per la caratterizzazione (LA4.7) di questi nuovi sistemi TES.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Sistema accumulo termo-elettrico di energia (TEES)

Scopo di questo studio è quello di porre le basi per lo sviluppo di nuovi concetti di batteria di Carnot atte a promuovere lo sfruttamento sempre più ampio delle fonti rinnovabili elettriche (PV, eolico) e di facilitare la flessibilità energetica intra-settoriale.

Il concetto base che è stato portato avanti in questo studio è quello di realizzare un sistema "integrato" Power to Heat (P2H) funzionante a media temperatura (150-350°C) in cui la conversione elettro-termica è realizzata per effetto Joule tramite una corrente che scorre attraverso il tubo metallico (elemento resistivo) che funge da scambiatore termico tra un fluido termovettore ed il mezzo di accumulo termico.

Per realizzare un elemento rappresentativo di un futuro concetto di TEES si è pensato alla possibilità di studiare e realizzare un semplice provino costituito fondamentalmente da un tubo metallico immerso assialmente in un guscio cilindrico composto dal mezzo di accumulo, configurazione "tube and shell". Il mezzo di accumulo di forma cilindrica è diviso in due parti di pari lunghezza in modo da lasciare scoperto al centro il tubo metallico. Questa configurazione permette, nella fase di carica elettrica, di collegare il polo positivo di un generatore di corrente continua in questa zona scoperta ed il polo negativo, diviso in due, sia all'inizio e sia 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.

Il tubo metallico avrà quindi una duplice funzione: scambiare il calore tra mezzo di accumulo e fluido termovettore sia in fase di carica che di scarica del sistema, e generare calore per effetto Joule, convertendo l'energia elettrica dal generatore, da fornire al mezzo di accumulo nella fase di carica elettrica.

Il tubo di scambio è in acciaio AISI 304 con una lunghezza tra flange di 1.9m, un diametro esterno di 20mm e spessore di 1.5mm.

Il mezzo di accumulo è composto da due gusci cilindrici di lunghezza complessiva di 1.5m, diametro interno 20mm e diametro esterno 100mm. Nel presente lavoro sono stati presi in considerazione due diversi materiali: il primo costituito da un calcestruzzo base appositamente formulato per garantirne il funzionamento a alte temperature ed il mantenimento di buone prestazioni termiche (sistema a calore sensibile); ed il secondo costituito dallo stesso calcestruzzo, ma con l'aggiunta del 10%wt di PCM (sali solari) stabilizzato in forma, in una matrice porosa di diatomite, il cui fine è quello di incrementare la densità di

energia accumulata nel mezzo stesso (sistema ibrido sensibile/latente). L'ENEA ha sviluppato, in collaborazione con Cipiccia Calcestruzzi e l'Università di Perugia i materiali cementizi da utilizzare.

Si è considerata una temperatura operativa minima di 220°C ed una massima di 280°C. La temperatura ambiente è stata ipotizzata di 20°C. Il fluido termovettore all'interno del tubo di scambio termico è un olio diatermico, il Therminol66, con una portata pari a circa 15 L/min (regime completamente turbolento).

Per effettuare l'isolamento termico dell'elemento TEES sopra descritto si è considerato di utilizzare un coibente in lana di roccia. Considerando un diametro esterno del coibente pari a 300mm, dalle temperature in gioco si è calcolata la temperatura di parete del coibente pari a circa 30°C (inferiore a 35°C quindi rispettante i requisiti normativi). In Figura 7-1: è riportata un'immagine concettuale del componente.

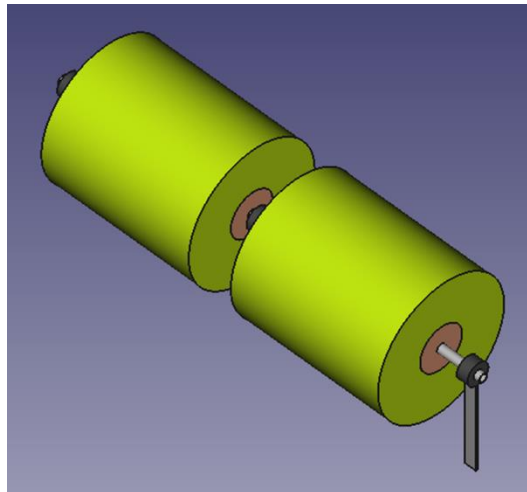


Figura 7-1: immagine concettuale del TEES

Tenendo in conto delle dimensioni del tubo metallico e delle sue proprietà elettriche è stato opportunamente dimensionato il generatore elettrico a corrente continua, come descritto in un successivo paragrafo.

Al fine di prevedere il comportamento dinamico (tempi di carico) del sistema TEES si è proceduto ad alcune simulazioni numeriche sfruttando il Metodo degli Elementi Finiti ed il codice di calcolo Cast3M. Le analisi, in regime transitorio, sono state eseguite in configurazione 2D assial-simmetrica, considerando un unico modulo cilindrico della dimensione complessiva dei due, funzionalmente equivalente. In Figura 7-2: è riportato un particolare del mesh del mezzo di accumulo, del tubo di scambio e della coibentazione.

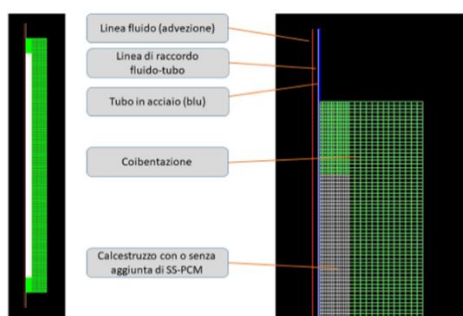


Figura 7-2: Caso 2D: mesh

I risultati della simulazione numerica FEM hanno evidenziato quanto segue:

La capacità termica teorica è di 1.16kWh per il caso base e 1.31 kWh per il mix al 10% di PCM, con un contributo in questo caso del calore latente del 5.5%;

Il mix al 10% produce un incremento di capacità termica del 14% rispetto al caso base;

La massa di PCM fonde completamente dopo circa 2 ore di transitorio;

In 6 ore, il calore accumulato è pari a 1.1 kWh per il caso base e 1.3 kWh per il mix al 10%, con un contributo del calore latente del 5.72%;

Il fattore di caricamento per il TEES con il calcestruzzo base è di circa il 96%, mentre quello con il mix al 10% è solo leggermente inferiore (95.5%);

Le perdite di calore dal sistema elementare sono valutabili in circa 140-160W, con un flusso prossimo ai 90-100W/m<sup>2</sup>;

La temperatura esterna del coibente rimane al di sotto dei 30°C.

Il nuovo TEES, una volta realizzato, sarà successivamente oggetto di attenta caratterizzazione sperimentale (LA4.7) all'interno dell'impianto sperimentale ATES, opportunamente modificato allo scopo, e ciò posizionerà i sistemi in oggetto ad un TRL 3-4.

## 7.2 Sistema ibrido di accumulo termico a calore sensibile ed a calore latente

È stato studiato un prototipo di accumulo di energia termica (TES) che integra il contributo sensibile e quello latente. Lo scopo è quello di ottenere un'elevata densità energetica, compattezza, alta efficienza e una temperatura di calore e alimentazione il più possibile stabile durante la fase di scarica.

Il prototipo sarà composto da due moduli collegati in serie: uno realizzato con elementi in calcestruzzo, che sfruttano principalmente il calore sensibile, e l'altro, con elementi PCM.

Le 4 valvole presenti nel sistema di circolazione permetteranno la circolazione del fluido termico:

- in by-pass, cioè senza ingresso del fluido nei moduli, utile per scaldare l'olio fino ad almeno 80°C nelle condizioni di start-up quando è troppo viscoso;
- ingresso nel modulo cementizio e uscita in quello a cambiamento di fase o viceversa

Il modulo cementizio è un parallelepipedo lungo 3 m e di sezione 0.22x0.22 m nel quale è inserito un serpentino in acciaio di circa 12 m.

Si prevede che la miscela di calcestruzzo contenga fino al 10% in peso di sale solare, assorbito in un supporto poroso.

Il modulo PCM sarà composto da:

- un contenitore esterno, in lamiera di acciaio spessore 3 mm, base 320x 640 mm ed altezza utile 760 mm.
- uno scambiatore di calore costituito da due tubi di 12 m a serpentino alettati in acciaio di diametro esterno di 20 mm e spessore di 1.5 mm.
- un PCM (sale solare) che riempie il volume utile interno (300 kg).

I due moduli dovranno essere accoppiati con tubi flessibili (**Figura 7-3**) a bassa dispersione termica per consentire un facile montaggio/ smontaggio ed evitare rotture.



**Figura 7-3: Tubi flessibili da impiegare per l'accoppiamento in serie dei due moduli di accumulo termico.**

Si prevede che l'olio fluisca negli scambiatori per caricare/scaricare il TES per immagazzinare circa 30 kWh tra 200 e 300°C.

I principali requisiti sono:

- intervalli di temperatura tra i 150 ed i 350°C;
- scambio termico convettivo HTF-HSM elevato, con portate superiori ai 400 kg/h;
- capacità di accumulo nominale di circa 30 kWh<sub>t</sub>;
- adeguata coibentazione per minimizzare le perdite termiche;
- potenza di riscaldamento / raffreddamento superiore a 20 kW;
- tempi di carica o scarica inferiori alle 12 ore.

### 7.3 Aggiornamento impianti sperimentali ENEA Solteca3 e ATES

Per rispondere ai requisiti, è necessario apportare delle modifiche funzionali a Solteca3.

Gli aggiornamenti riguardano:

- realizzazione di uno scambiatore (S1) in acciaio a pressione massima di 1.45 ata da integrarsi con l'impianto di circolazione già esistente. S1 sarà coibentato con materiale e spessore adatti alla temperatura di esercizio (320 °C) con finitura in lamierino di alluminio.
- fornitura di un sistema di raffreddamento ad aria (S2), in sostituzione di quello esistente. Tale sistema dovrà consentire il raffreddamento dell'olio diatermico che circolerà con portata fino ad 800 kg/h sotto i 320 °C, con potenza massima di 25 kW<sub>th</sub>. La portata dell'aria dovrà essere regolabile per consentire, una potenza di raffreddamento regolabile da 0 a 25 kW<sub>th</sub>, variabile mediante controllo della temperatura uscente da detto sistema di raffreddamento. Il controllo è già esistente, per cui è solo richiesto che il sistema di regolazione del sistema di raffreddamento vi si interfacci. Il raffreddatore sarà posto all'esterno e collegato mediante apposita tubazione di circa 1.5 m con l'impianto Solteca 3, posto all'interno di un edificio. Il foro per la tubazione è già presente (**Figura 7-8**).

S1 sarà dedicato al riscaldamento, che sarà effettuato per effetto Joule, essendo l'olio diatermico un materiale dielettrico, applicando un'opportuna tensione di corrente elettrica (max 40V) tramite un alimentatore, e dovrà avere le seguenti caratteristiche:

Diametro interno tubo	mm	12.5
Spessore tubo	mm	2.3
Ampiezza spire	mm	300
Numero di spire		18.5
Passo tra le spire	mm	34.2

Tali caratteristiche sono state ricavate per avere una superficie di scambio adeguata allo scambio termico di 25 kW con una differenza di temperatura tra ingresso ed uscita di circa 75°C.

Per calcolarlo è stato scelto un diametro interno dei tubi il più piccolo possibile, compatibilmente con le perdite di carico e la lunghezza totale dello scambiatore, che dovrà essere contenuta nello spazio lasciato libero dalla rimozione dell'attuale scambiatore di calore, come successivamente descritto. La superficie spiraliforme è stata scelta per minimizzare gli ingombri e le perdite di carico stesse, massimizzando lo scambio di calore per effetto Joule tubo/olio.

È stata quindi effettuata una procedura iterativa per la quale lo scambio di calore, assicurato dalla superficie di scambio interna dei tubi fosse almeno sufficiente a garantire la potenza desiderata, secondo la seguente equazione:

$$A_o = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{(T - t)U_D}$$

dove  $U_D$  [W/m<sup>2</sup>] è il coefficiente globale di scambio,  $dQ$  è il carico termico [J/s],  $T$  la temperatura dell'olio [°C], i pedici 1 e 2 indicano rispettivamente ingresso ed uscita dallo scambiatore e  $t$  quella del tubo riscaldante.

Il calore da scambiare deve anche essere compatibile con la portata applicata e con il suo calore specifico.

A questo scopo è stata applicata la relazione:

$$Q = W_c C_{pc} (T_1 - T_2)$$

con  $W_c$  portata dell'olio [kg/s]  $C_{pc}$  il suo calore specifico [J/kg/°C].

Per riscaldare il tubo, come detto, si utilizzerà l'effetto Joule. A tale scopo è stato necessario calcolare la corrente [A] e la differenza di potenziale da applicare [V], considerando la lunghezza della spirale e il suo spessore. Sono state considerati anche aspetti di sicurezza, privilegiando per il calcolo della potenza da applicare una maggiore corrente rispetto alla differenza di potenziale.

Più in dettaglio, la conversione elettro-termica è realizzata per effetto Joule tramite una corrente che scorre attraverso il tubo metallico (elemento resistivo) che funge da scambiatore termico tra un fluido termovettore ed il materiale di accumulo termico.

A tal fine, i poli positivo e negativo di un generatore di corrente in continua saranno collegati all'inizio ed alla fine del tubo di scambio. La corrente  $I$  che attraverserà il tubo produrrà calore nel tubo stesso con una potenza  $P$  calcolabile con la nota relazione:

$$P = R * I^2 = V * I$$

Dove  $R$  rappresenta la resistenza elettrica del tubo metallico.

La resistenza segue la relazione:

$$R = \rho_{el} \frac{L}{A_{tubo}}$$

con  $L$  distanza tra i poli e  $A_{\text{tubo}}$  area della sezione del tubo di scambio (nel nostro caso la sezione metallica del tubo).

Inoltre, lo scambiatore dovrà avere tre opportuni morsetti metallici per l'ampereaggio massimo calcolato di 630 A per connessione con alimentatore elettrico posti agli estremi e nella parte centrale (Figura 7-4). Questa soluzione assicura che sia messo in tensione solo lo scambiatore, escludendo la restante parte di impianto.

I cavi flessibili da connettere all'alimentatore, ha i capicorda integrali 42x42mm con foro M12.

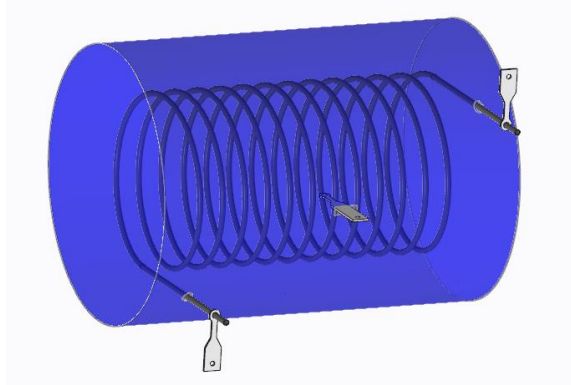


Figura 7-4: Schema scambiatore S1 per riscaldamento olio diatermico

Si dovrà contestualmente prevedere:

- smontaggio degli scambiatori esistenti e installazione dei nuovi; in particolare, per il raffreddamento, rimozione dell'impianto di raffreddamento esistente, costituito da uno scambiatore (Figura 7-7) di 28cm di lunghezza e 12cm circa di diametro e di un raffreddatore ad acqua posto all'esterno (Figura 7-9).
- raccordi per l'installazione dei nuovi scambiatori con tubazioni preesistenti DN25 in ingresso e uscita del raffreddatore, DN25 in ingresso al riscaldatore e DN15 in uscita al riscaldatore stesso.

In Figura 7-5 è presente uno schizzo indicativo dell'impianto, che include gli scambiatori attualmente esistenti.

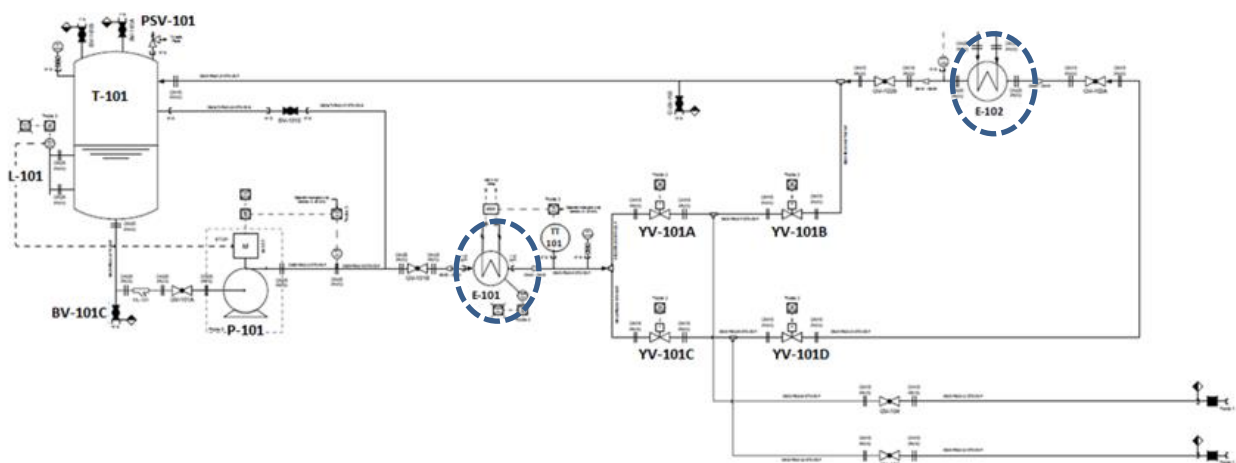
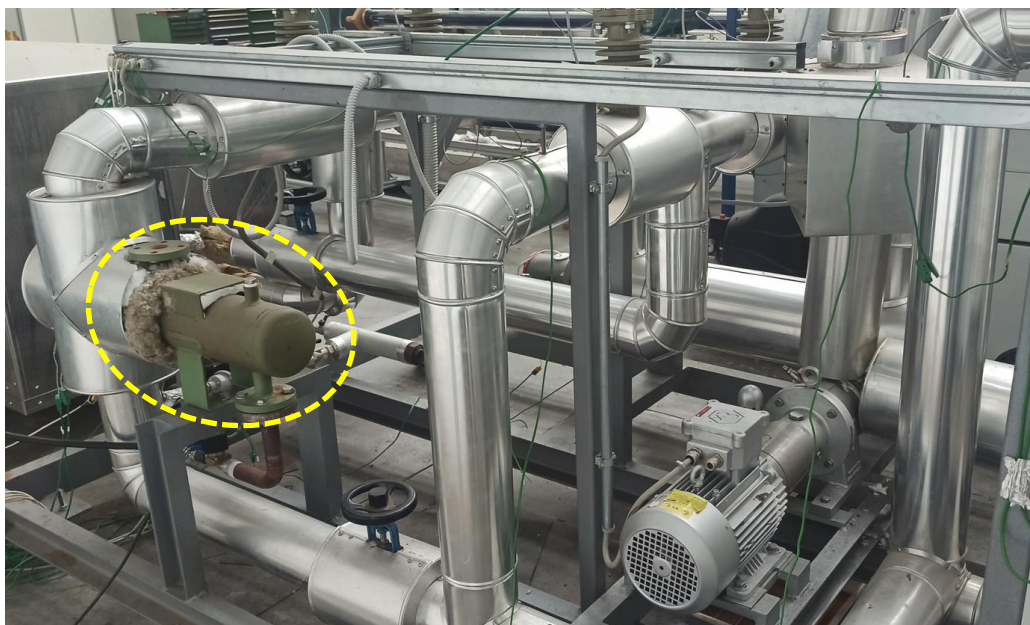


Figura 7-5: schema semplificato del circuito di accumulo con il serbatoio in evidenza.

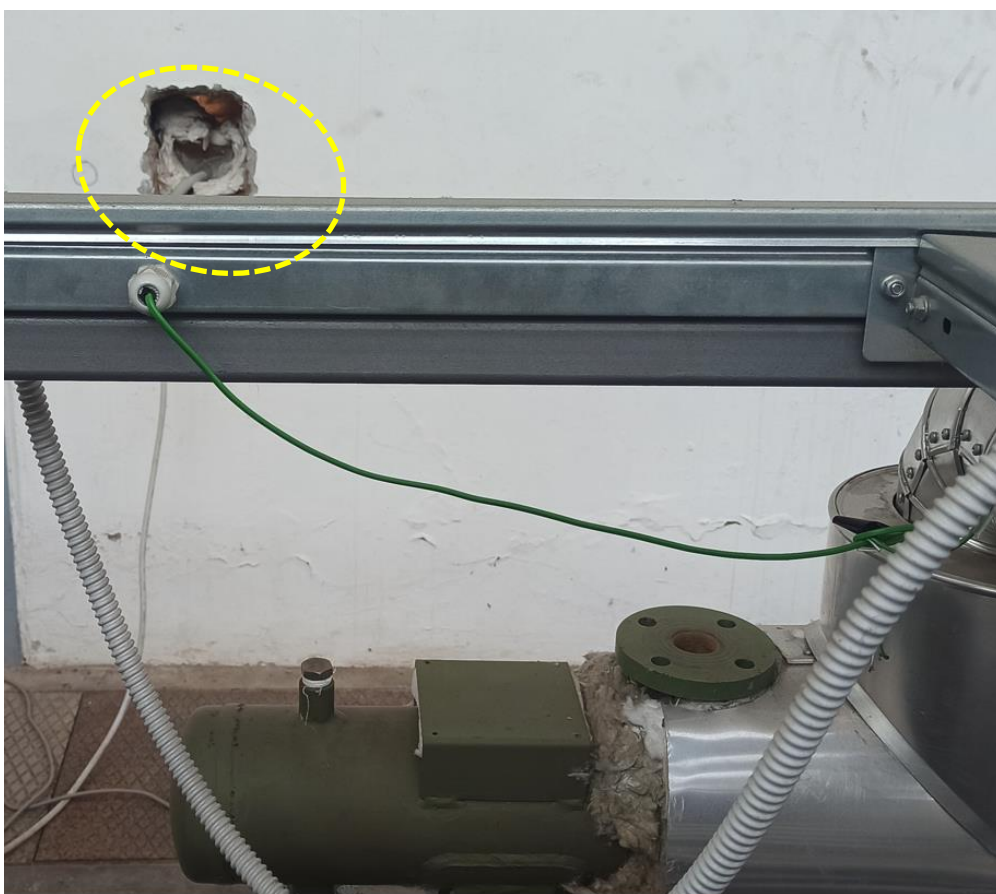
In [Figura 7-6](#) e [Figura 7-7](#) un'immagine dell'impianto di circolazione esistente rispettivamente frontale con evidenza del riscaldatore e posteriore con evidenza del raffreddatore al momento presenti.



**Figura 7-6:** immagine dell'impianto con lo scambiatore/riscaldatore (evidenziato) nella posizione frontale.



**Figura 7-7:** immagine dell'impianto con lo scambiatore/raffreddatore (evidenziato) nella posizione frontale.



**Figura 7-8: foro già presente sulla parete dell'edificio per il collegamento tra Solteca 3 e raffreddatore.**



**Figura 7-9: parte esterna dell'edificio, ove rimuovere raffreddatore già esistente e collegare il nuovo.**

Riguardo ad ATES, dopo la rimozione del modulo di accumulo con PCM nanostrutturati, testati per il precedente PTR19-21, dovrà essere installato il modulo TEES, nella posizione illustrata in [Figura 7-10](#). L'accoppiamento dovrà tenere in considerazione il diverso diametro e spessore delle tubature: rispettivamente 16 ed 1mm per il circuito, e 21.3 e 2.1 mm per il TEES. Saranno previsti idonei morsetti per le trecce di rame finite con capicorda e guaina 240 mm<sup>2</sup> foro M12. L'alimentatore in cc (630A 40V) dovrà

avere comandi a bordo in contenitore industriale e la possibilità di interfacciamento con il SW National Instruments LabView, con il quale si interfacerà, tramite schede di acquisizione dedicate, il sistema di misura delle temperature in aggiunta alla misura della portata.

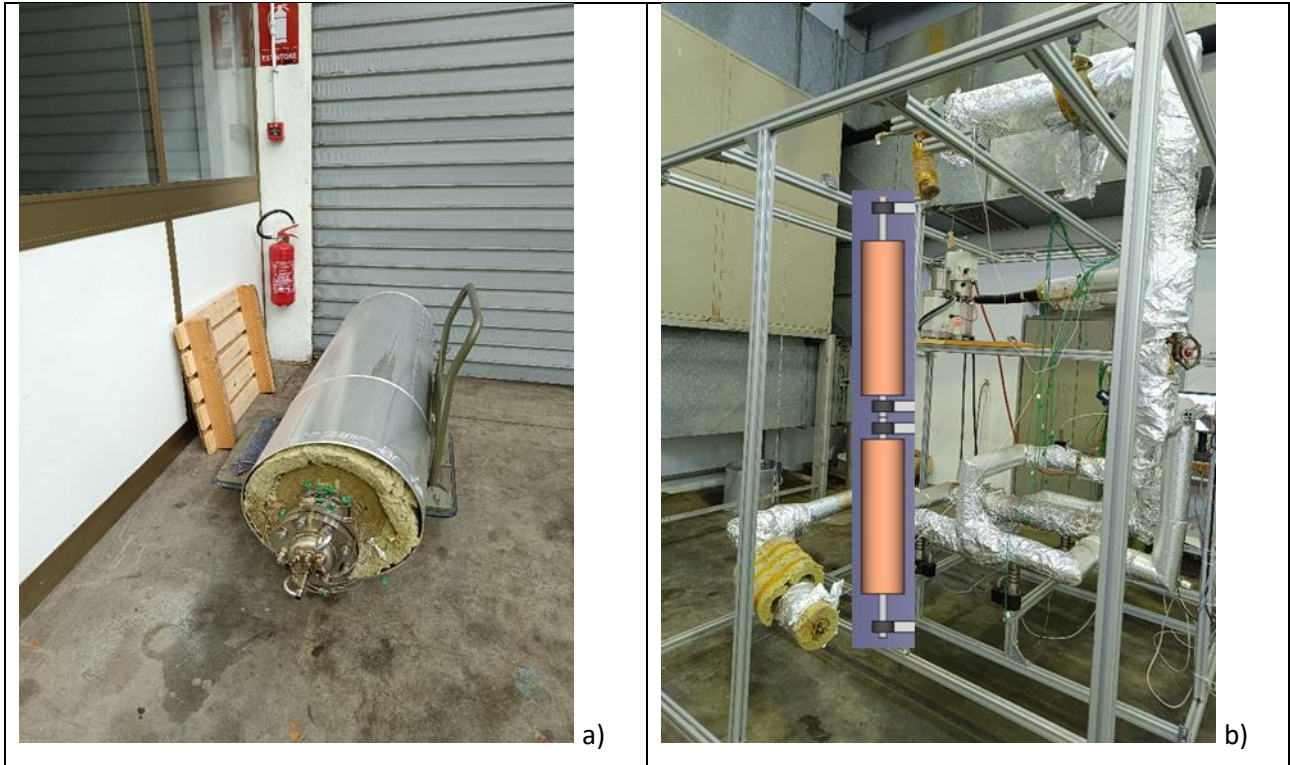


Figura 7-10: a) modulo di accumulo con PCM incapsulati; b) posizionamento nuovo dispositivo

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non ci sono state attività di consulenza.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state fatte pubblicazioni scientifiche, poiché si tratta di un lavoro preliminare, volto alla preparazione di prove sperimentali e alla individuazione degli aggiornamenti degli impianti prototipali ove saranno eseguiti tali test. La realizzazione di questi aggiornamenti e delle prove sperimentali è oggetto della successiva LA4.7.

## 10 Eventi di disseminazione

### 10.1 IEA ES TCP

#### 10.1.1 Energy Storage Technology Collaboration Platform – ExCO93

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 2 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 la 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.

L'ENEA ha organizzato e partecipato al 93° meeting con il delegato italiano, ing. Raffaele Liberatore e l'alt delegate dr.ssa Margherita Moreno. Il meeting si è svolto al CR Casaccia, dopo una giornata (17 maggio) di visita presso le facilities ENEA riguardanti l'accumulo di energia, durante la quale sono state spiegate ai delegati le ricerche ed i prototipi presenti inerenti l'accumulo di energia e quindi le ricerche finanziate con il presente PTR nell'ambito del progetto 1.2, compresi Solteca3 ed ATES, con accurata presentazione delle attività in essere.

Da rimarcare, come avvenimenti di questa riunione che:

sono stati presentati gli stati di avanzamento dei task/annex attivi ed approvati gli aggiornamenti di:

- 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

Si è concluso il task 34 (Comfort Climate Box) con la presentazione del report finale da parte di Peter Wagener, ma tale rapporto è in attesa dell'approvazione finale, che sarà discussa alla prossima riunione dell'XC94. È stato raccomandato, a tal proposito, di presentare 2 documenti: Final Report, Executive Summary of Final Report.

- È stato approvato il nuovo progetto, denominato EcoNESTO-Techno-economic assessment of thermal energy storage systems, che è divenuto task 41. In tale ambito l'ing. Raffaele Liberatore è stato nominato revisore insieme a Stan van den Broek .

Sono stati inoltre proposti i tre seguenti annex/task:

- CCB2 - for hot and humid climates, presentato da Kashif Nawaz;

- Standardized use of building mass as storage for renewables and grid flexibility, presentato da Christoph Rohringer
- Offshore and onshore Energy Islands in Denmark (probabilmente il nome e alcune modalità saranno da rivedere), presentato da Hendrik Wust.

Sono stati inoltre presentati i Country report di : Belgio, Danimarca, Giappone, Corea del Sud, Spagna e Turchia.

In **Tabella 10-1** sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

**Tabella 10-1 - ExCO93 18-19 maggio 2022**

<b>Titolo</b>	<b>IEA ES TCP Executive Commette Meeting (XC93)</b>
<b>Luogo</b>	Roma in presenza e web meeting in remoto
<b>Periodo</b>	18/05/2022 – 19/05/2022
<b>Tipologia</b>	Executive Commette meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	41
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

#### 10.1.2 Energy Storage Technology Collaboration Platform – ExCO94

L'ENEA ha partecipato al 94° meeting con il delegato italiano, ing. Raffaele Liberatore. Il meeting si è svolto a Nagoya (Giappone), ma è stato trasmesso anche in remoto per i delegati che non potevano partecipare fisicamente.

Da rimarcare, come avvenimenti di questa riunione che:

- È stato approvato il nuovo progetto, denominato “System flexibility from Medium-Duration Energy Storage” (task 42);
- È stato approvato il nuovo progetto, denominato “Thermal building mass activation”.

Sono stati inoltre presentati i Country report di : Canada, Repubblica Ceca e Svizzera.

In **Tabella 10-2** sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

**Tabella 10-2 - ExCO94 16-17 novembre 2022**

<b>Titolo</b>	<b>IEA ES TCP Executive Commette Meeting (XC94)</b>
<b>Luogo</b>	Web meeting
<b>Periodo</b>	16/11/2022 – 17/11/2022
<b>Tipologia</b>	Executive Commette meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	40
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

#### 10.1.3 Energy Storage Technology Collaboration Platform – ExCO95

L'ENEA ha partecipato al 95° meeting con il delegato italiano, ing. Raffaele Liberatore. Il meeting si è svolto a Vienna (Austria), ma è stato trasmesso anche in remoto per i delegati che non potevano partecipare fisicamente.

Sono stati presentati i Country report di: Finlandia, Israele, Svezia, UK, Italia e Paesi Bassi.

Da rimarcare che per l'Italia, è stato presentato, come progetto strategico il Progetto Integrato 1.2 "Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico", con particolare enfasi per le presenti attività, che hanno riscosso apprezzamento da parte dei delegati.

In **Tabella 10-2** sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

**Tabella 10-3 -ExCO94 30 maggio-01 giugno 2023**

<b>Titolo</b>	<b>IEA ES TCP Executive Committee Meeting (XC95)</b>
<b>Luogo</b>	Web meeting
<b>Periodo</b>	30/05/2023 – 01/06/2023
<b>Tipologia</b>	Executive Committee meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	40
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

## 10.2 UniRoma1 22 novembre 2022

Raffaele

### Lezioni/seminari Università

L'ing. Raffaele Liberatore (ENEA) in data 22/11/2022 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 50 studenti in remoto e 20 in presenza.

## 10.3 New IEA ES Task – 1<sup>st</sup> Definition Workshop

L'ing. Daniele Nicolini ha partecipato per ENEA al primo workshop di definizione di un nuovo task del IEA ES nell'ambito dello sviluppo e della diffusione del Power to Heat e delle Carnot Batteries. Questo nuovo task si pone come seguito (follow up) del precedente task 36 – Carnot Batteries.

In **Tabella 10-4** sono mostrati luogo, periodo, tipologia, numero indicativo e tipologia di partecipanti.

**Tabella 10-4 -New IEA-ES Task - 1<sup>st</sup> Definition Workshop**

<b>Titolo</b>	<b>Carnot Batteries</b>
<b>Luogo</b>	Stoccarda (D) / Online
<b>Periodo</b>	29/03/2023
<b>Tipologia</b>	Experts meeting
<b>Numero indicativo partecipanti</b>	57
<b>Tipologia partecipanti</b>	Esperti del settore

## 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. Di seguito è presentato il posizionamento della ricerca rispetto alle due tecnologie qui studiate.

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) [ 1].

### 11.1 TES ibridi elettrico/termico

Scopo di questo studio è stato quello di porre le basi per lo sviluppo di nuovi concetti di batteria di Carnot atte a promuovere lo sfruttamento sempre più ampio delle fonti rinnovabili elettriche (PV, eolico) e di facilitare la flessibilità energetica intra-settoriale.

Come primo passo si è partiti dallo studio della conversione elettro-termica (P2H) e dell'accumulo termico (TES) in modo strettamente connesso, anzi, nel presente studio, "integrato".

Tutto ciò implica lo sviluppo e l'ingegnerizzazione di materiali e componenti per un accumulo termico con alimentazione combinata termica-elettrica. In pratica, partendo dalla tecnologia dell'accumulo termico a calore sensibile/latente, devono essere ideati e sviluppati sistemi integrati di conversione dell'elettricità in calore di tipo dissipativo e sistemi di accumulo termico con riformulazione dei materiali e revisione progettuale dei componenti. Il nuovo TEES deve quindi essere oggetto di attenta caratterizzazione sperimentale e analisi teorica. Ciò posizionerà i sistemi in oggetto ad un TRL 3-4.

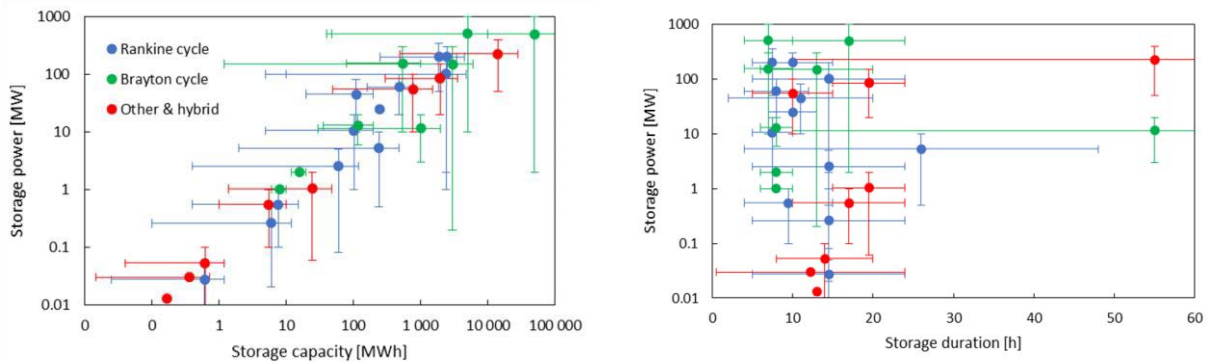
Il concetto base che è stato portato avanti in questo studio è stato quello di realizzare un sistema "integrato" P2H funzionante a media temperatura (150-350°C) in cui:

- la trasformazione elettro-termica sia di tipo dissipativo, effetto Joule, ed avvenga all'interno del tubo metallico di scambio termico HTF-HSM del TES;
- l'accumulo termico sia principalmente a calore sensibile utilizzando materiali cementizi con una possibile aggiunta di materiali a cambiamento di fase (calore latente) stabilizzati in forma.

Per quanto riguarda il posizionamento della ricerca, le batterie di Carnot includono tecnologie come il Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) [ 2], i sistemi basati sull'uso di riscaldatori elettrici e motori termici Rankine o Brayton. Nelle batterie di Carnot, l'energia elettrica viene immagazzinata come energia termica, che viene successivamente recuperata durante la scarica. La ricarica può essere effettuata con diverse tecnologie di riscaldamento, mentre la scarica può essere effettuata con diverse tecnologie di motore termico [ 3]. Poiché le batterie Carnot sono basate su pompe di calore e motori termici, sono costituite da pompe, compressori, espansori, turbine e scambiatori di calore, che sono tutti componenti che possono essere facilmente scalati. Per questo motivo, le batterie di Carnot potrebbero essere un'alternativa a PHES e CAES. Rispetto a queste, le batterie di Carnot potrebbero avere efficienze inferiori ma con il vantaggio di poter essere installate ovunque, non basandosi su serbatoi o grotte preesistenti.

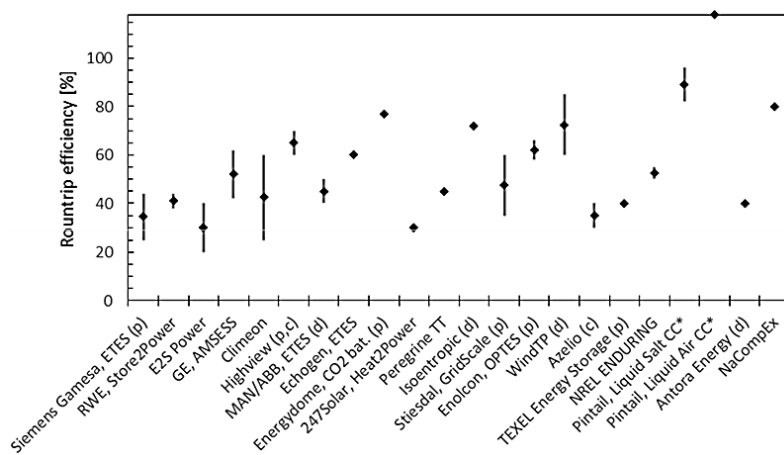
Tra le tecnologie EES (Electrical Energy Storage) su scala di rete, le batterie di Carnot hanno il livello medio di prontezza tecnologica (TRL) più basso, anche se stanno diventando sempre più popolari. Per questo motivo, il potenziale effettivo di questo gruppo tecnologico eterogeneo non è ancora chiaro, nonostante la ricerca attualmente in corso. Ultimamente, una notevole quantità di pubblicazioni è stata dedicata alle batterie di Carnot ([ 4],[ 5]).

L'intervallo della potenza erogata e della capacità di accumulo estratti da letteratura sono presentati in **Figura 11-1**. Essa mostra che il CB copre una gamma di sistemi dei kW ai GW. I più piccoli sono basati su motori ORC e Stirling, mentre i più grandi sono generalmente basati sulle attuali tecnologie delle centrali termiche. La durata di accumulo conferma il range di applicazione compreso tra circa 4 e 24 h, l'intervallo di tempo dei cosiddetti sistemi di accumulo di energia di media durata. Con la maggiore maturità di questi sistemi e la maggiore durata di accumulo richiesta, potrebbe essere possibile aggiungere ulteriore capacità ad un costo relativamente basso. I sistemi che utilizzano il principio della pompa di calore (principalmente compressione del vapore o ciclo di Brayton) per la carica sono molto più trattati dalla letteratura scientifica a causa del loro potenziale maggiore efficienza. Lo sviluppo commerciale è significativamente meno avanzato, con molti sistemi che rimangono allo stato concettuale e tuttavia non realizzati.



**Figura 11-1 Potenza in uscita e capacità di stoccaggio (a) e durata di scarica (b) per i sistemi CB sviluppati commercialmente. [ 4]**

I dati raccolti possono essere visualizzati anche dal punto di vista dell'efficienza di andata e ritorno, come mostrato in **Figura 11-2**. Si può osservare un'ampia diffusione dei valori tra circa il 25% e l'80%, con un'eccezione nei sistemi co-alimentati a combustibile, che raggiungono valori anche superiori al 100%. L'elevata efficienza di andata e ritorno è spesso riportata per sistemi concettuali ed è simile ai risultati teorici con stime piuttosto ottimistiche. Pertanto, è necessario prestare attenzione, specialmente per i sistemi esistenti solo in stati concettuali o di progettazione iniziale, in assenza di dati sperimentali. Anche se esistono impianti dimostrativi e pilota, i valori sono ancora per lo più proiettati per impianti completi e quindi di solito devono ancora essere verificati.



**Figura 11-2 Panoramica dell'efficienza di andata e ritorno nei sistemi CB commerciali. In notazione (d) sta per demo, (p) pilota, (c) unità commerciali (costruite o in costruzione), \* per sistemi con combustione di carburante aggiuntivo. [ 4]**

Infine, è presentata nella **Figura 11-3** una breve cronologia dello sviluppo commerciale, considerando i sistemi dai dimostratori di laboratorio e dai sistemi di prova del concetto sino alle installazioni commerciali e ai pilota su larga scala (spesso operanti in regime commerciale). Essa mostra come lo sviluppo stia guadagnando slancio, soprattutto negli ultimi anni, con il primo grande pilota su scala di rete che è entrato in linea nel 2019, e la piena commercializzazione di unità modulari da 13 kW nel 2021 e più sistemi pilota e commerciali previsti per la messa in servizio nel 2022 e nel 2023. Una volta fatta esperienza su questi sistemi e aumentato ulteriormente gli impianti rinnovabili, potremmo assistere a uno sviluppo ancora più rapido.

1864	Perkins calcium chloride engine (p)			
1885	Honigmann fireless locomotive (p)			
2004	Isentropic ltd 1st prototype (d)			
2011	Highview LAES 350 kW (d/p)			
2012	Isentropic ltd 2nd prototype (d)			
2014	Siemens G. rock storage 1st prot.			
2015	Isentropic ltd 3rd prot. construction			
2016	Isentropic ltd bankrupt			
2018	Futurebay 50 kW (d/p)	Highview LAES 5 MW (p)		
2019	1414 unit (d/p)	Isentropic 150 kW (d/p)	CCT Energy Storage (p)	Siemens Gamesa 1.2 MW (p)
2020	Antora prototype (d)			
2021	CHESTER, E2S (d)	Prototypes kW scale heat pump Echogen, TČ Mach (d)	MAN ETES MW scale (d)	Azelio 13 kW unit (c)
2022	Kraftenlagen 60 kW (p)	Highview LAES 50 MW (c)	EnergyDome 2.5 MW (p)	Stiesdal 2 MW (p)
2023	Highview LAES 50 MW (c)	MAN heat pump 50 MWth (c)		

**Figura 11-3 Cronologia dello sviluppo sperimentale commerciale delle CB. In notazione (d) sta per demo o prototipo di laboratorio, (p) pilota, (c) unità commerciali [ 4]**

Inoltre, vi è un notevole sviluppo dei sistemi di accumulo di energia termica in cui l'applicazione CB è specificamente suggerita come uno dei casi d'uso. Una tendenza interessante nei sistemi CB con accumulo ad alta temperatura è una riadozione delle tecnologie precedentemente considerate per le centrali solari a concentrazione e il calore di processo industriale.

Ciò conferma che CB non è tanto una nuova tecnologia quanto un nuovo modo d'uso e una combinazione di tecnologie esistenti. Come tale, forse per la semplicità, fa sì che i sistemi riscaldati elettricamente siano per lo più assenti dalla letteratura scientifica sebbene abbiano la prospettiva di un sistema a basso costo, semplice e robusto.

Si noti che l'IEA (International Energy Agency) ha attivo, in questo settore un particolare task 36 dedicato alle Carnot Batteries, nell'ambito del Technology Collaboration Programme "Energy Storage" ([Energy Storage Technology Collaboration Programme - IEA ES TCP \(iea-es.org\)](https://www.iea-es.org/)).

## 11.2 TES ibridi latente/sensibile

In sintesi, i principali vantaggi e svantaggi sono così riassumibili:

- TES a calore sensibile: sono i sistemi più maturi dal punto di vista commerciale, di facile realizzazione, basati su materiali liquidi o solidi facilmente reperibili, con buoni valori di calore specifico e diffusività termica (buona potenza erogata), e di basso costo.

Di contro, hanno una densità di energia accumulata bassa e, di conseguenza, necessitano di grandi volumi ed hanno perdite termiche elevate (grandi superfici esposte);

- TES a calore latente: questi sistemi mostrano una elevata densità di energia accumulata, dovuta al calore latente, e, di conseguenza, grande compattezza e perdite termiche ridotte. Inoltre, possono fornire energia a temperatura costante o comunque “stabilizzata” con un accrescimento della qualità del calore rilasciato (valore exergetico).

Per contro, a causa principalmente della bassa conducibilità termica del mezzo di accumulo, hanno potenze erogate inferiori, sistemi di scambio termico più complessi e costi più elevati, oltre che problematiche di corrosione nel caso l’HSM sia chimicamente aggressivo.

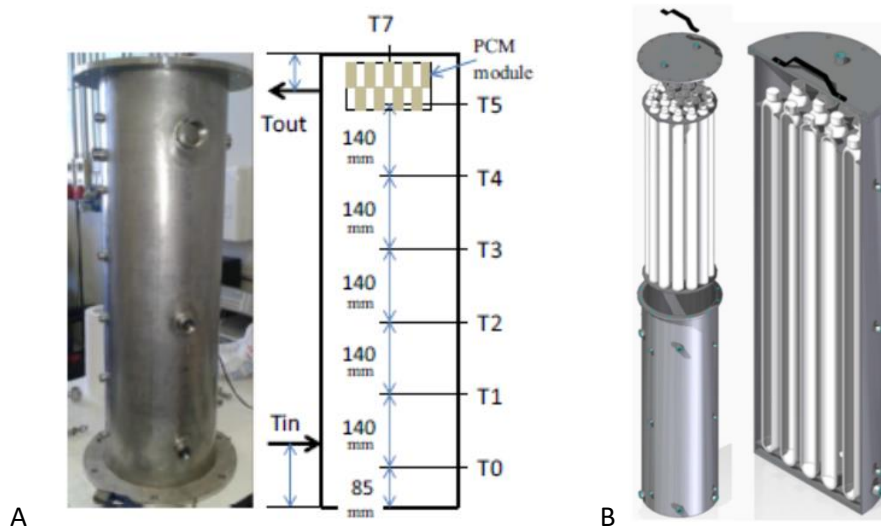
In realtà un sistema di accumulo termico “ideale” dovrebbe possedere delle caratteristiche che appartengano ad una o all’altra tecnologia di accumulo, come, ad esempio: alta densità di energia accumulata, compattezza, elevata efficienza, temperatura del calore fornito stabile, buone potenze fornite durante la fase di scarico.

Per raggiungere questo obiettivo, è stata proposta ed analizzata in letteratura una soluzione di sistema di accumulo termico ibrido sensibile/latente in cui entrambe le tecnologie convivano e concorrano al raggiungimento dei target indicati ([ 6]-[ 9]).

Frazzica et al. (2016, [ 6]) hanno proposto una soluzione integrata (**Figura 11-4-A**) di contenitore contenente un mezzo di accumulo a calore sensibile ed equipaggiato vicino alla sezione di uscita di un insieme di capsule contenente materiale a cambiamento di fase (PCM).

In esso, è stata condotta la sperimentazione di un sistema di accumulo ibrido sensibile/latente su piccola scala costituito da acqua in cui vengono aggiunti all’interno del serbatoio materiali a cambiamento di fase macro-incapsulati (una paraffina commerciale e una miscela di sali idrati).

I risultati hanno mostrato un sensibile aumento, fino al 10%, della capacità di accumulo di calore per unità di volume, anche per frazioni limitate di PCM.



**Figura 11-4 - Sistemi di accumulo ibrido sensibile/latente integrati con PCM macro-incapsulato (MEPCM): A) MEPCM situato nella sezione di uscita del TES [ 6]; B) MEPCM distribuito lungo tutto il contenitore del TES [ 7]**

Sempre Frazzica et al. (2022, [ 9]) hanno riproposto lo stesso concetto di accumulo ibrido in cui, però, il PCM macro-incapsulato è uniformemente distribuito all’interno del contenitore per tutta la lunghezza (**Figura 11-4-B**). Tale accumulo è stato sviluppato appositamente per l’erogazione di acqua calda a bordo di navi e testato, selezionando un PCM commerciale, su scala di laboratorio. I risultati ottenuti hanno mostrando la possibilità di aumentare la densità volumetrica di accumulo di energia fino al 30% rispetto alla configurazione con solo calore sensibile.

Zauner et al. (2017, [ 7]) hanno studiato un concetto di accumulo di calore ibrido sensibile/latente basato su di uno scambiatore di calore a fascio tubiero commerciale (**Figura 11-5**) in cui il materiale a cambiamento di

fase, del polietilene ad alta densità (HDPE), è incapsulato all'interno dei tubi e dell'olio diatermico funge da accumulo di calore sensibile e da mezzo di trasferimento del calore. Lo studio ha dimostrato come questi tipi di accumuli termici possano essere utilizzate in molte applicazioni in cui i requisiti relativi alla capacità di accumulo, ai livelli di temperatura e ai profili di potenza per la carica e la scarica, nonché, alle condizioni economiche variano notevolmente (energie rinnovabili, calore di processo, teleriscaldamento, produzione di energia e riscaldamento domestico).



**Figura 11-5 - Sistema di accumulo di calore ibrido sensibile/latente con scambiatore di calore a fascio tubiero [ 7]**

Lo studio di un sistema analogo è stato quindi effettuato da Liu et al. (2020, [ 8]) per realizzare un promettente sistema TES per un impianto di energia solare concentrata (CSP). Egli ha indagato il comportamento termico di diversi sistemi: a cascata con 3 PCM, a cascata con 5 PCM, ibrido PCM-grafite-PCM e a grafite singola. Tutti i PCM considerati si sono dimostrati come potenziali mezzi di accumulo potendo soddisfare i requisiti operativi del CSP. Confrontandoli, l'accumulo a grafite singola (sensibile) è meno problematico, ma ha una densità di accumulo più bassa (47 kWh/ton). Però, in una configurazione sandwich PCM-grafite-PCM (ibrido sensibile/latente) la densità di energia è aumentata a 61 kWh/ton e l'efficienza di accumulo di questo sistema ibrido è del 70.7%, la più alta tra tutti i sistemi TES studiati.

Concludendo, l'adozione di sistemi TES ibridi sensibile/latente appare una buona soluzione per ottenere un accumulo termico con caratteristiche migliorate e, quindi, meritevole di ulteriori sviluppi.

Contrariamente a quanto proposto in letteratura, in cui la parte sensibile e quella latente sono strettamente e fisicamente integrate, nel nostro caso si è invece ipotizzato che le due tecnologie siano connesse ed operino in combinazione ma che siano fisicamente separate.

Si noti tuttavia che, i TES a calore sensibile basati su calcestruzzi hanno il vantaggio di utilizzare mezzi di accumulo largamente disponibili, di basso costo e con una buona capacità di accumulo, ma il loro utilizzo in TES funzionanti fino a circa 400 °C impone che il mix-design ed i processi di realizzazione/trattamento di tali materiali siano opportunamente studiati. Data la bassa diffusività termica del calcestruzzo questi devono essere modificati per promuovere la conducibilità termica, oltre che dimensionare opportunamente il sistema di scambio termico [ 10].

Tali moduli cementizi, presi singolarmente, sono stati studiati anche in passato: dal DLR ([ 11], [ 12]) o dell'Università dell'Arkansas [ 13], ma hanno evidenziato alcune problematiche: i) severi problemi di fessurazione e bassa durabilità; ii) spesso si sono utilizzati calcestruzzi a forte matrice ceramica con incremento dei costi; iii) le dimensioni dei manufatti, gettati in opera, sono sempre rilevanti (alcune decine di m<sup>3</sup>) e di forte impatto visivo. ENEA ha avviato questa linea sviluppando, inizialmente, un calcestruzzo con nuove caratteristiche che, utilizzando materiali standard, potesse essere in grado di lavorare ad alte temperature, essere durabile ed avere buone caratteristiche di scambio termico. Tale materiale (di fatto un composito) è stato nel tempo ottimizzato modificandone la composizione ed i costituenti. Nelle ultime formulazioni sono anche state aggiunte piccole quantità (5-10% in peso) di PCM micro-incapsulato in modo da incrementare la densità di energia accumulata dal mezzo e quindi rendere il TES più compatto

([ 14],[ 15],[ 16]). A tal proposito esistono soluzioni commerciali proposte da ENERGYNEST, che ha utilizzato il materiale denominato Heatcrete [ 17], con dimensioni modulari fino a 4 MWh termici di accumulo, dichiarate scalabili fino a 1000 MWh, come illustrato nell'ambito del congresso IRES 2022 da Magnus Mörtberg (Thermal Storage and Industrial Heat).

Il materiale in questione, tuttavia, per caratteristiche fisiche, è compatibile con quello della miscela base realizzata dall'ENEA nel primo anno di attività del PTR19-21, successivamente migliorato con PCM micro-incapsulati in grado di garantire maggiore densità di energia e maggiore stabilità.

#### **Riferimenti:**

[ 1] 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.

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

[ 3] A. Benato, A. Stoppato, Pumped thermal electricity storage: a technology overview, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 6 (2018) 301–315, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.017>.

[ 4] Novotny, V.; Basta, V.; Smola, P.; Spale, J. Review of Carnot Battery Technology Commercial Development. *Energies* 2022, 15, 647. <https://doi.org/10.3390/en15020647>

[ 5] O. Dumonta, G.F. Frate, A. Pillai, S. Lecomptec, M. De Paepec, V. Lemort, Carnot battery technology: A state-of-the-art review *Journal of Energy Storage* 32 (2020) 101756

[ 6] Andrea Frazzica, Marco Manzan, Alessio Sapienza, Angelo Freni, Giuseppe Toniato, Giovanni Restuccia, Experimental testing of a hybrid sensible-latent heat storage system for domestic hot water applications, *Applied Energy* 183 (2016) 1157–1167.

[ 7] Christoph Zauner, Florian Hengstberger, Benjamin Mörzinger, Rene Hofmann, Heimo Walter, Experimental characterization and simulation of a hybrid sensible-latent heat storage, *Applied Energy* 189 (2017) 506–519.

[ 8] Ming Liu, Soheila Riahi, Rhys Jacob, Martin Belusko, Frank Bruno, Design of sensible and latent heat thermal energy storage systems for concentrated solar power plants: Thermal performance analysis, *Renewable Energy* 151 (2020) 1286-1297.

[ 9] Frazzica, A.; Manzan, M.; Palomba, V.; Brancato, V.; Freni, A.; Pezzi, A.; Vaglieco, B.M. , Experimental Validation and Numerical Simulation of a Hybrid Sensible-Latent Thermal Energy Storage for Hot Water Provision on Ships. *Energies* 2022, 15, 2596. <https://doi.org/10.3390/en15072596>

[ 10] Miliozzi A., Giannuzzi G.M., Mazzei D., Liberatore R., Crescenzi T., Mele D. Dispositivo di accumulo termico, sistema modulare incorporante il dispositivo e relativo metodo di realizzazione, 2017, Brevetto per invenzione industriale, domanda numero 102017000129902, Data di presentazione 14/11/2017; concessione nr. 102017000129902

[ 11] D. Laing, WD. Steinmann, M. Fiß, R. Tamme, T. Brand, C. Bahl; Solid Media Thermal Storage Development and Analysis of Modular Storage Operation Concepts for Parabolic Trough Power Plants, *Journal of Solar Energy Engineering* 2008, Vol. 130 / 011006-1

[ 12] D. Laing, D. Lehmann, M. Fiß, C. Bahl," Test Results of Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants", *Solar Energy Engineering*, vol. 131, November , 2009

- [ 13] JE Skinner, MN Strasser , BM Brown, RP Selvam, “Testing Of High Performance Concrete As A Thermal Energy Storage Medium At High Temperatures”, Journal of Solar Energy Engineering 2014; 136 / 021004-1
- [ 14] A. Miliozzi, M. Chieruzzi, L. Torre, Experimental investigation of a cementitious heat storage medium incorporating a solar salt/diatomite composite phase change material. Applied Energy, 2019, 250, 1023–1035, ISSN: 0306-2619
- [ 15] F. Dominici, A. Miliozzi, L. Torre. Thermal Properties of Shape-Stabilized Phase Change Materials Based on Porous Supports for Thermal Energy Storage. Energies, 2021, 14(21), 7151, ISSN 1996-1073
- [ 16] A. Miliozzi, F. Dominici, M. Candelori, E. Veca, R. Liberatore, D. Nicolini, L. Torre. Development and characterization of concrete/PCM/diatomite composites for thermal energy storage in CSP/CST applications. Energies, 2021, 14(15), 4410, ISSN 1996-1073
- [ 17] N.Hoivik, C. Greiner, Ev. Bellido Tirado, et al; Demonstration of EnergyNest thermal energy storage (TES) technology; AIP Conference Proceedings 1850, 080011 (2017)