



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione termica di un elemento
di accumulo termico realizzato con
calcestruzzo base a temperature medio-
alte a seguito di un ripetuto carico ciclico.

D. Mazzei, G. Giorgi, R. Liberatore, G. Napoli, A. Miliozzi

Report RdS/PAR2019/118

CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI UN ELEMENTO DI ACCUMULO TERMICO REALIZZATO CON CALCESTRUZZO
BASE A TEMPERATURE MEDIO-ALTE A SEGUITO DI UN RIPETUTO CARICO CICLICO.

D. Mazzei, G. Giorgi, R. Liberatore, G. Napoli, A. Miliozzi

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico, power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: *2 Accumulo termico*

Linea di attività: *LA1 Test su accumulo termico in materiali cementizi compatti e con diatomite, e con aggiunta di materiale a cambiamento di fase (SS-PCM)*

Responsabile del Progetto: ing. Giulia Monteleone

Responsabile del Work package: ing. Raffaele Liberatore

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare va all'ing. Giuseppe Mauro Giannuzzi, che ha ispirato l'intera attività ed è stato fondamentale per tutti i consigli profusi e che continua a fornire, per il buon esito del presente lavoro.

Indice

1	INTRODUZIONE.....	5
2	IMPIANTO SOLTECA-3.....	7
2.1	GENERALITÀ	7
2.2	RISCALDAMENTO OLIO.....	12
2.3	RAFFREDDAMENTO OLIO	12
2.4	RISCALDAMENTO MODULO	14
2.5	RAFFREDDAMENTO MODULO	14
2.6	STRUMENTAZIONE E ACQUISIZIONE DATI	16
3	CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	21
3.1	PROVE A 250°C	21
3.1.1	<i>Prova 1: caricamento a 250 °C e scaricamento a 220 °C, con il calcolo delle dispersioni termiche</i>	<i>22</i>
3.1.2	<i>Prova 2: caricamento a 250° e scaricamento a 220°C</i>	<i>30</i>
3.1.3	<i>Prova 3: caricamento a 250° e scaricamento a 220°C.....</i>	<i>34</i>
3.1.4	<i>Confronto tra le prove a 250°C.....</i>	<i>43</i>
3.2	PROVE A 280°C	48
3.2.1	<i>Prova 1: caricamento a 280 °C e scaricamento a 250 °C</i>	<i>48</i>
3.2.2	<i>Prova 2: caricamento a 280 °C e scaricamento a 250 °C</i>	<i>55</i>
3.2.3	<i>Prova 3: terzo caricamento a 280 °C e scaricamento a 250 °C.....</i>	<i>60</i>
3.2.4	<i>Confronto prove a 280°C.....</i>	<i>64</i>
3.3	ENERGIA ACCUMULATA ED EFFICIENZA	68
4	CONCLUSIONI	70
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	71

Sommario

La presente attività, che si configura come il proseguimento di una linea di ricerca avviata di recente da ENEA per lo sviluppo di sistemi di accumulo termico basati su materiali a basso costo, è principalmente finalizzata a: i) incrementare la densità di energia di un elemento di accumulo termico realizzato in calcestruzzo base, anche attraverso il contributo del calore latente, ii) analizzare la risposta del materiale. Partendo dai risultati ottenuti da ENEA di recente sulla definizione di una prima composizione della miscela di calcestruzzo, il presente lavoro vuole confermare la validità del concetto proposto e predisporre l'ottimizzazione del processo di produzione dei materiali impiegati attraverso l'interpretazione e comprensione dei fenomeni fisici evidenziati dalle sperimentazioni sugli elementi di accumulo basati su calcestruzzi.

In particolare, nell'ambito del presente lavoro, è stata effettuata la caratterizzazione termica di un modulo di calcestruzzo di dimensioni 200x200x3000 [mm], realizzato con una miscela base [1] adatta alla produzione di sistemi di accumulo termico a media temperatura (fino a 300°C). Per eseguire la caratterizzazione è stato utilizzato l'impianto sperimentale Solteca3 da 21 kW, appositamente sviluppato da ENEA per lo studio di questa tipologia di sistemi di accumulo. Nell'impianto, il modulo di accumulo viene sottoposto a cicli di riscaldamento/raffreddamento attraverso lo scambio termico con un flusso di olio diatermico, circolante in uno scambiatore di calore inglobato nel modulo di calcestruzzo stesso. La temperatura dell'olio in ingresso allo scambiatore di calore viene regolata attraverso un circuito secondario ad acqua; ciò permette di simulare le fasi di carica e scarica del modulo di accumulo. L'impianto si compone pertanto di un serbatoio per l'olio diatermico, di un circuito olio collegato al serbatoio e riscaldato attraverso uno scambiatore dedicato, del modulo di accumulo, e di un circuito ad acqua che provvede al raffreddamento. Sulla base dei dati sperimentali raccolti sono state valutate le prestazioni termiche di carica e scarica del modulo di accumulo nelle seguenti condizioni operative: intervallo di temperatura di caricamento e di cessione del calore pari a 30°C (220÷250°C e 250÷280°C), tempo di caricamento pari a circa 4÷4.5 ore. L'energia trasferita dall'olio diatermico al modulo di accumulo è risultata pressoché costante nel corso delle prove, con un valore medio pari a 6.73 kWh. Anche l'energia accumulata nel calcestruzzo, ottenuta sottraendo le perdite termiche verso l'ambiente all'energia trasmessa dall'olio al calcestruzzo, è risultata simile nei due range di temperatura esaminati, con un valore medio di 3.28 kWh.

Riguardo la fase di rilascio del calore, della durata di circa 2 ore, l'energia trasferita dal calcestruzzo all'olio diatermico è risultata anch'essa pressoché costante nelle varie prove, con un valore medio di 1.56 kWh.

Le prestazioni del sistema possono essere notevolmente incrementate con un migliore isolamento termico, che in queste prove, nonostante una coibentazione di 15 cm di spessore, costituita da silicato di calcio (5 cm) e lana di roccia (10 cm), ha evidenziato perdite termiche che variano da 520 W a 210°C a 1160 W a 275°C.

1 Introduzione

La crescente attenzione verso l'aspetto dell'efficienza energetica nel settore civile e industriale, catalizzata dall'urgenza climatica del surriscaldamento globale, e testimoniata dal nuovo quadro normativo EU, che prevede al 2030 un obiettivo di miglioramento dell'efficienza energetica almeno del 27%, ha di recente generato un interesse specifico verso il tema dell'accumulo termico come strumento di efficientamento, sia attraverso il recupero del calore di scarto nei processi industriali e civili (riscaldamento/raffrescamento di edifici), sia attraverso l'ottimizzazione degli scambi termici nei cicli energetici complessi.

I sistemi di accumulo termico, oltre a fornire indubbi vantaggi nell'efficientamento dei processi produttivi, possono favorire la decarbonizzazione del settore energetico supportando una crescente penetrazione delle fonti rinnovabili discontinue nel mix energetico. Essi inoltre si prestano a fornire i servizi ancillari per stabilizzare la frequenza, in sostituzione o in appoggio alle masse rotanti delle turbomacchine nei sistemi combinati.

I materiali di accumulo a calore sensibile, sia solidi che liquidi, sono la soluzione di riferimento per i sistemi attualmente in commercio ma il limite della bassa densità di energia stoccata si traduce in grandi volumi impegnati e, di conseguenza, elevati costi di realizzazione. La ricerca sui sistemi a calore sensibile si sta pertanto muovendo su due traiettorie complementari: sviluppare materiali di accumulo con buone caratteristiche termiche, ma a basso costo e incrementare la capacità di accumulo specifica attraverso l'inclusione di opportune quantità di materiale a cambiamento di fase, che forniscano un contributo energetico aggiuntivo associato al calore latente.

A questo riguardo ENEA ha avviato nel corso degli ultimi anni una attività di ricerca finalizzata allo sviluppo di materiali a basso costo basati su mescole di calcestruzzo. In particolare ENEA, nel corso del triennio 2012-2014 e successivamente tramite il progetto europeo STAGE-STE (FP7/2007-2013, grant agreement n. 609837) ha condotto una serie di attività finalizzate allo ([3]-[5]):

- sviluppo di nuovi materiali da utilizzare come mezzo di accumulo termico;
- studio ed analisi del comportamento termodinamico dei sistemi di accumulo;
- sviluppo di un framework modellistico per la simulazione del comportamento di questi sistemi a supporto della progettazione.

Tali sistemi di accumulo sono destinati a ridurre considerevolmente i costi del calore prodotto e accumulato e sono particolarmente adatti ad applicazioni di piccola/media taglia, soprattutto per il settore industriale convenzionale, grazie alla flessibilità di utilizzo nel recupero di calore. Un'altra possibile applicazione è la produzione di energia elettrica mediante Organic Rankine Cycles (ORC), che operano a temperature inferiori ai 300 °C con efficienze superiori al 20% [2].

L'idea dell'utilizzo del calcestruzzo come mezzo di accumulo termico nasce dall'esperienza maturata da ENEA nell'ambito di attività di ricerca sul comportamento strutturale del calcestruzzo sottoposto ad elevate temperature, sia in ambito nucleare che in edilizia. L'applicazione del calcestruzzo nel settore energetico può infatti essere supportato dalle seguenti considerazioni: il calcestruzzo è un materiale a basso costo, facilmente reperibile, facile da produrre e durevole. In aggiunta i suoi principali costituenti sono disponibili ovunque e non pongono criticità dal punto di vista ambientale. Su questa base ENEA ha di recente sviluppato, in collaborazione con l'Università di Trento, una innovativa mescola di calcestruzzo [1], idonea alla produzione di sistemi di accumulo termico a media temperatura (fino a 300°C). In tale mescola sono utilizzati materiali di riciclo per abbattere i costi di produzione, ossia cariche metalliche, consistenti in trucioli provenienti da scarti di officina meccanica, e fibre di poliammide (Nylon 66), provenienti dallo smaltimento dei rifiuti dell'industria delle moquette. La Tabella 1 mostra la sua composizione.

ENEA ha successivamente progettato e realizzato elementi di accumulo in calcestruzzo, pensati come modulo base per la produzione industrializzata di sistemi di accumulo. Su di essi sono state effettuate prove di degassaggio e di riscaldamento/raffreddamento preliminari [6]. Per la verifica delle prestazioni

termiche di tali moduli è stato inoltre realizzato un impianto sperimentale, SOLTECA-3, finalizzato alla caratterizzazione degli stessi in condizioni operative reali di carica e scarica termica fino a 300°C.

Tabella 1 – Mix design della mescola di calcestruzzo utilizzata.

Acqua (kg/m ³)	120
Cemento (kg/m ³)	340
Ghiaino* (7-15) (kg/m ³)	780
Sabbia* (0-7) (kg/m ³)	780
Sabbia* (0-4) (kg/m ³)	390
Fibre Nylon (kg/m ³)	5
Carica metallica (kg/m ³)	77
Rapporto a/c	0.35

* gli aggregati (ghiaino e sabbia) sono stati utilizzati in condizione satura superficie asciutta (SSD).

Il presente lavoro riguarda pertanto le prove sperimentali eseguite per la caratterizzazione dei materiali cementizi specificatamente sviluppati da ENEA per l'accumulo termico. I test sperimentali sono stati eseguiti su moduli di dimensioni 200x200x3000 [mm], realizzati con la mescola di calcestruzzo base [1] progettata per applicazioni a media temperatura (fino a 300°C) e riportata in Tabella 1. Le condizioni operative dei test di carica e scarica termica sono le seguenti: intervallo di temperatura tra caricamento e cessione del calore pari a 30°C (220÷250°C e 250÷280°C), tempo di caricamento pari a circa 4÷4.5 ore, tempo di scarica pari a circa 2 h. Sulla base dei dati raccolti attraverso la campagna sperimentale è stata valutata l'efficienza delle fasi di carica e di scarica del calore, le energie accumulate e i tempi caratteristici del processo.

2 Impianto SOLTECA-3

2.1 Generalità

L'impianto SOLTECA-3 è stato realizzato nell'ambito del PAR 2014 [6] per effettuare test sperimentali di carica e scarica termica su moduli di accumulo energetico compatti, nelle condizioni tipiche di un impianto industriale. Il P&I dell'impianto è riportato in Figura 1, mentre in Figura 2 sono mostrate alcune foto dell'impianto stesso. Nell'impianto sono presenti tutti i componenti necessari per poter effettuare correttamente le prove sperimentali, come mostrato nello schema semplificato di Figura 3.

Questo provvede al riscaldamento e al raffreddamento del modulo (simulazione della carica/scarica termica dell'accumulo) attraverso un fluido termovettore; per la presente attività è stato scelto un olio minerale, il PARATHERM-NF, caratterizzato da una temperatura massima di esercizio pari a 330°C, da una bassa tensione di vapore (2.5 kPa), e da una limitata azione di fouling (sporco delle tubazioni). Inoltre questo fluido è eco-compatibile e per tale motivo è utilizzato anche nell'industria alimentare.

Oltre al circuito del fluido termovettore ("circuito olio") è presente un secondo circuito, indipendente dal primo, in cui circola acqua; l'acqua è utilizzata quando occorre raffreddare l'olio in uscita dal modulo, per effetto del calore sottratto in fase di scarica.

Facendo riferimento alle Figure 1 e 3, il serbatoio T-101 ha un volume di circa 50 litri, contiene la maggior parte dell'olio presente nell'impianto, ed opera ad una pressione massima di 0.5 bar, regolata dalla valvola di sicurezza PSV-101. La P-101 è una pompa di circolazione centrifuga a trascinamento magnetico; questo tipo di pompa evita fuoriuscite di olio dalla girante. Un inverter regola il numero di giri della pompa, in base al valore di portata impostato dall'operatore. Il potenziale range operativo di portata è compreso tra 0 e 2500 kg/h, ma è necessario mantenere la velocità al sopra del 20% del valore nominale per evitare oscillazioni di portata.

Nel serbatoio è installato un misuratore di livello, L-101, che interrompe l'alimentazione alla pompa in caso di basso livello a seguito di una perdita di olio. Nella tubazione di scarico del serbatoio è presente una valvola, BV-101C, per il drenaggio dell'olio dal circuito.

Il componente E-101 è un riscaldatore elettrico con potenza di circa 21 kWt, che consente di riscaldare l'olio in ingresso al modulo di accumulo al valore desiderato di temperatura. Il controllo della potenza elettrica è effettuato sulla base della temperatura misurata in TT-101, all'uscita dal componente. Per evitare il degrado dell'olio, è necessario limitare la temperatura di film a contatto con le resistenze. A tale scopo è stato installato un controllo di sicurezza per avere temperature di pelle delle resistenze elettriche inferiori a un valore impostato (circa 340°C).

Lo scambiatore di calore E-102 è uno scambiatore tra il circuito olio e il circuito acqua, usato per raffreddare l'olio e simulare un carico termico. La circolazione nel circuito acqua (in blu in Figura 3) è assicurata dalla pompa P-102.

Poiché la massima temperatura operativa è pari a 300°C, tutti i principali componenti dell'impianto (serbatoio, scambiatori E-101 ed E-102, tubazioni) sono stati realizzati in acciaio al carbonio. La Figura 4 riporta una foto dell'impianto durante la costruzione.

Tutto l'impianto è coibentato per limitare le perdite termiche (Figura 7), utilizzando silicato di calcio in strati di 5 cm di spessore, oltreché lana di roccia in strati di 10 cm o in cospelle rigide di 5 cm di spessore per le tubazioni (Figura 5). La coibentazione è rivestita esternamente con lamierino di alluminio per contenere e proteggere il materiale coibentante (Figura 2).

In Figura 6 è mostrato il modulo di accumulo in materiale cementizio che è oggetto delle prove sperimentali. Esso ha una lunghezza di 3 metri, con sezione quadrata di 20x20 cm e un peso di circa 280 kg. Annegato all'interno del calcestruzzo è presente uno scambiatore di calore (Figura 6), realizzato con tubazione in AISI 316, con diametro esterno di 16 mm e spessore di 1 mm (DN16), per una lunghezza complessiva di circa 12 m.

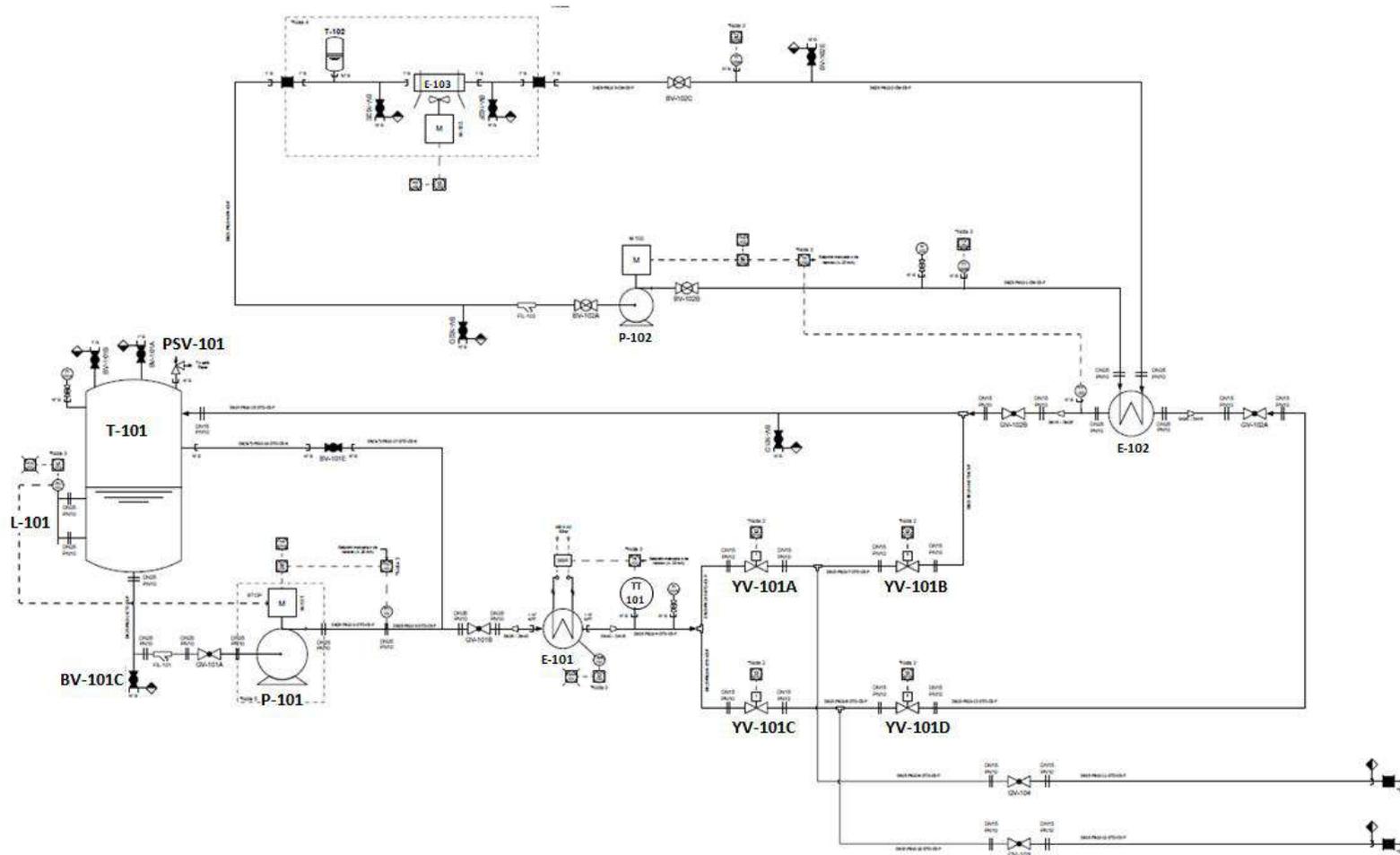


Figura 1: P&I dell'impianto SOLTECA-3

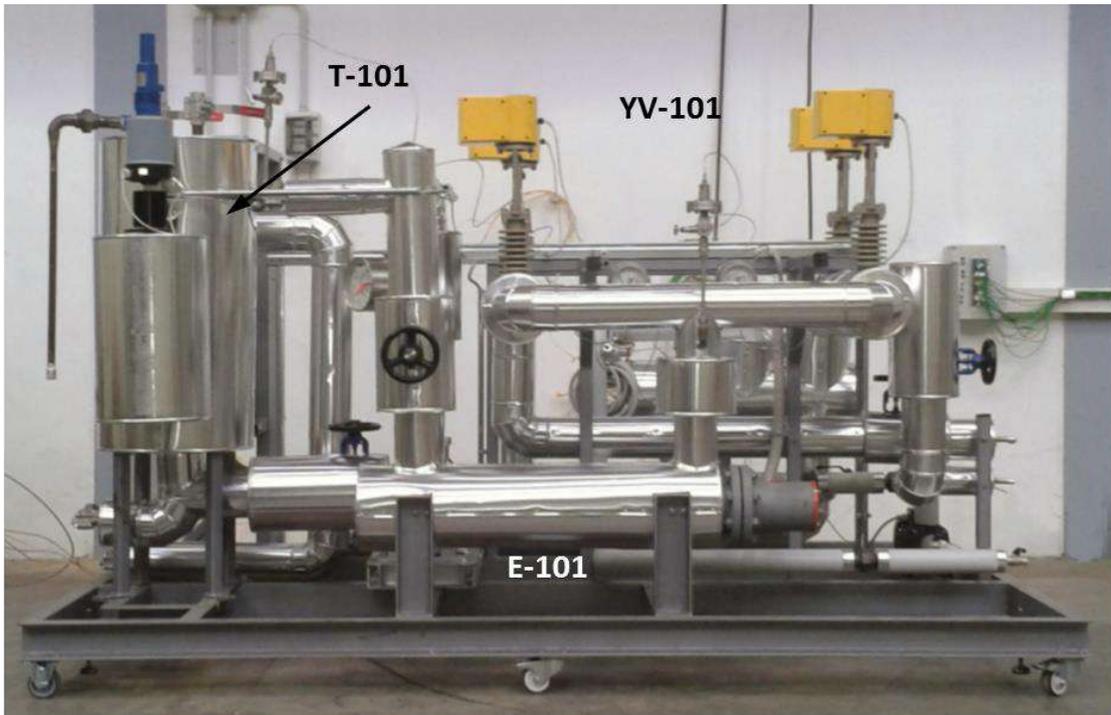


Figura 2: Alcune viste dell'impianto SOLTECA-3

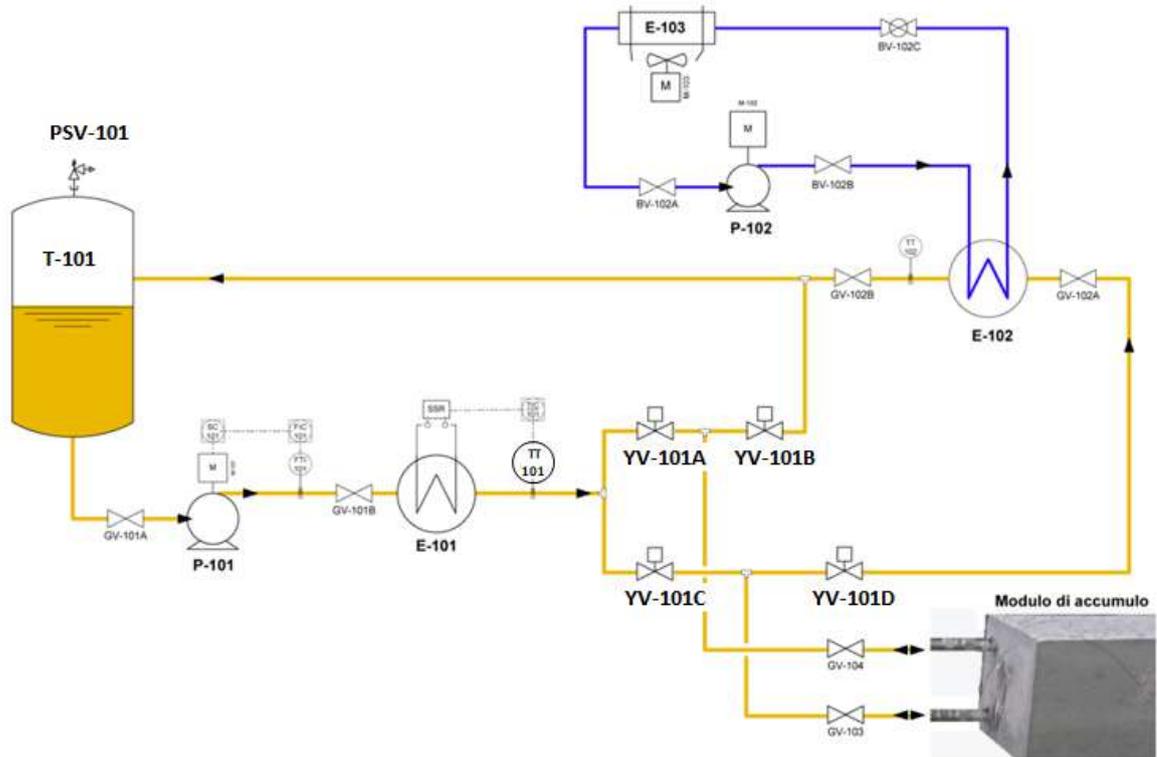


Figura 3: Schema semplificato impianto SOLTECA-3



Figura 4: Impianto SOLTECA-3 durante la realizzazione



Figura 5: Coibentazione del modulo di accumulo.



Figura 6: Modulo di accumulo ("nudo" e coibentato)

In Figura 7 è riportata un'immagine dello scambiatore di calore olio/calcestruzzo. Nella figura si notano i ferri dell'armatura che conferisce solidità strutturale al modulo di accumulo, in modo da permettere la sua movimentazione senza gravare direttamente sulla tubazione dello scambiatore.

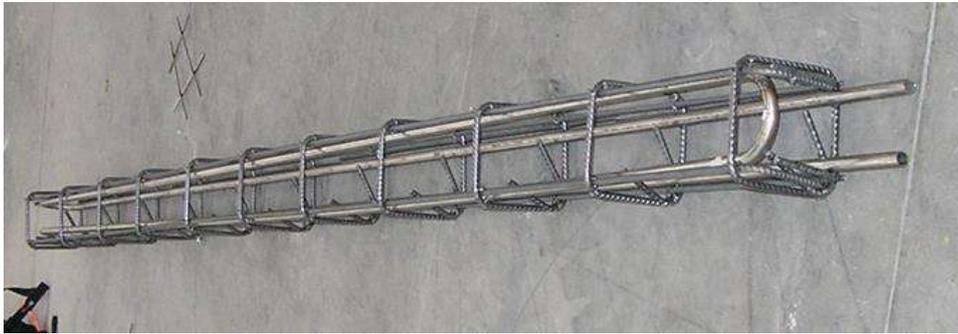


Figura 7: Scambiatore di calore integrato al modulo cementizio.

I moduli cementizi sono stati collocati su una struttura realizzata con profilati di alluminio, dotata di ruote per un agevole spostamento. Tra il modulo e la struttura di alluminio, allo scopo di isolare i due sistemi, è stato posto del Pirogel dello spessore di circa 2 cm, che ha un ulteriore effetto coibentante.

Nel circuito olio sono presenti quattro elettrovalvole: YV-101A, YV-101B, YV-101C e YV-101D, che consentono di impostare la corretta circolazione dell'olio per riscaldare o raffreddare l'olio, caricare o scaricare il modulo. Di seguito sono descritte le diverse fasi operative e i relativi schemi d'impianto.

2.2 Riscaldamento olio

Questa fase consente di scaldare l'olio presente nel circuito alla temperatura desiderata. Per far questo è necessario aprire le valvole YV-101A e YV-101B, e mantenere chiuse le YV-101C e YV-101D, come mostrato in Figura 8; così facendo, la circolazione esclude anche il modulo di accumulo e il settore di raffreddamento. Inoltre è necessario impostare i valori desiderati della portata dell'olio e della temperatura di uscita dal riscaldatore E-101.

La portata dell'olio può essere regolata operando sulla pompa P-101 in controllo manuale, impostando la velocità (come percentuale rispetto al valore massimo), oppure in controllo automatico, impostando il valore della portata dell'olio in kg/h (la velocità di rotazione sarà variata dal regolatore sulla base del segnale di portata nel misuratore FTI-101).

2.3 Raffreddamento olio

Questa fase operativa consente di raffreddare l'olio presente nel circuito alla temperatura desiderata. Per far questo è necessario aprire le valvole YV-101C e YV-101D, e mantenere chiuse le YV-101A e YV-101B, come mostrato in Figura 9, oltre ad impostare i valori desiderati della portata dell'olio e della temperatura. Il modulo di accumulo resta escluso dalla circolazione dell'olio, mentre viene raggiunto il settore di scambio termico olio-acqua.

Il riscaldatore E-101 è di norma spento e la temperatura TT-102 di uscita dallo scambiatore E-102 viene regolata controllando la portata dell'acqua mediante variazione del numero di giri della pompa P-102, tramite un inverter. La regolazione della portata può essere effettuata in controllo manuale, impostando il numero di giri della pompa su una percentuale del valore massimo, o in controllo automatico. Se necessario è possibile attivare manualmente anche il ventilatore dell'aerotermo E-103.

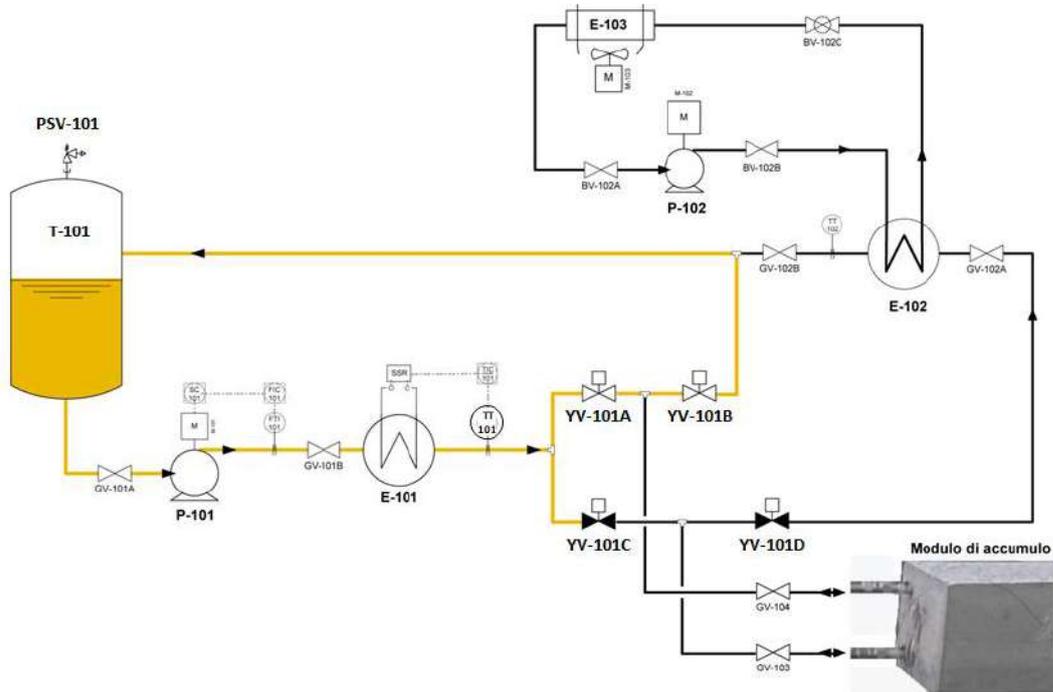


Figura 8: Schema riscaldamento olio

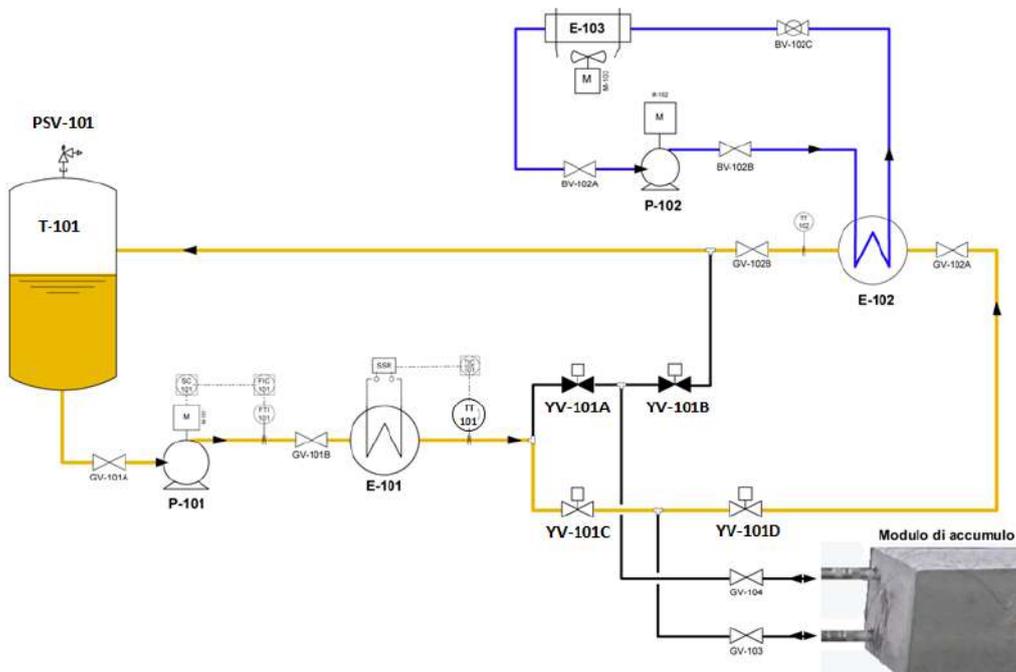


Figura 9: Schema raffreddamento olio

2.4 Riscaldamento modulo

Questa modalità operativa consente di simulare il caricamento del modulo di accumulo trasferendo l'energia termica dall'olio al calcestruzzo; il riscaldatore E-101 in questo caso rappresenta la sorgente di calore.

Per attivare questa modalità, è necessario aprire le valvole YV-101C e YV-101B, mantenendo chiuse le YV-101A e YV-101D, come mostrato in Figura 10. E' inoltre necessario impostare i valori desiderati della portata e della temperatura dell'olio.

Questa fase viene effettuata preriscaldando precedentemente la massa di olio alla temperatura operativa, come descritto nella fase riscaldamento olio. La temperatura viene poi mantenuta costante durante la fase di riscaldamento modulo, regolando la potenza termica del riscaldatore E-101, sulla base della temperatura TT-101.

La durata della fase di riscaldamento modulo dipende dalle caratteristiche del campione e termina quando si sono raggiunte le condizioni stazionarie di temperatura nella parte centrale del modulo (condizioni di accumulo "pieno").

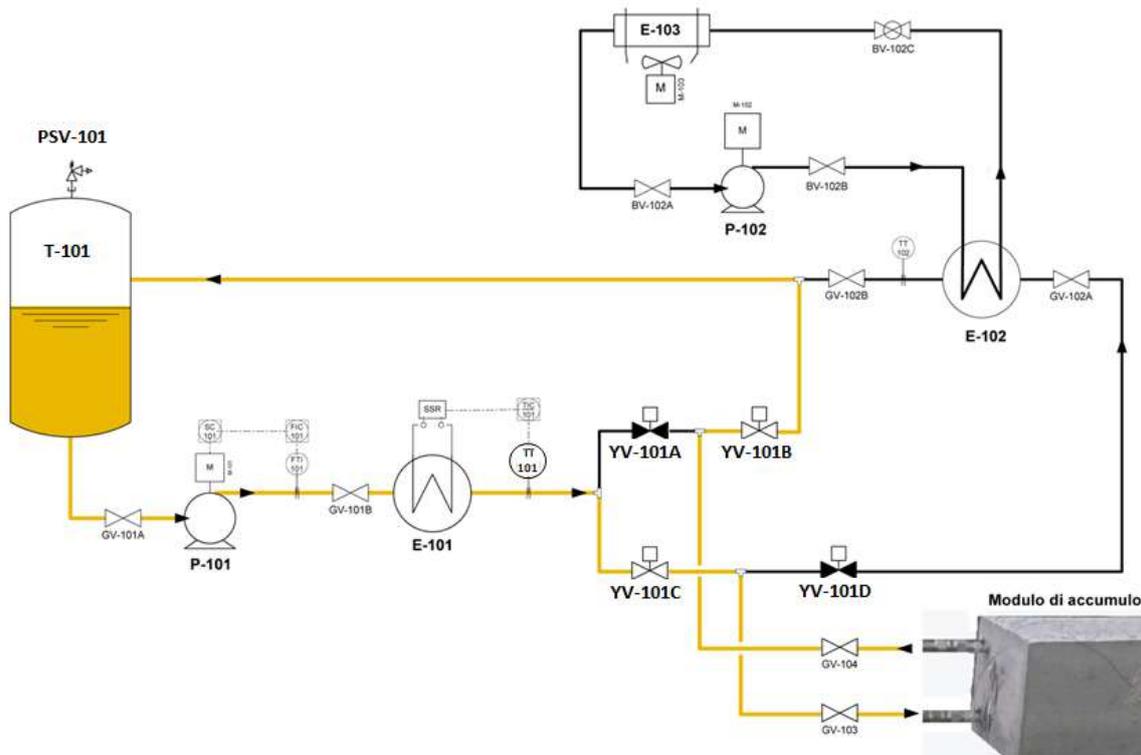


Figura 10: Schema riscaldamento modulo

2.5 Raffreddamento modulo

Questa modalità operativa consente di simulare lo scaricamento termico del modulo di accumulo trasferendo l'energia termica dal calcestruzzo all'olio; lo scambiatore E-102 in questo caso asporta la potenza termica trasferita all'olio e quindi simula un'utenza termica di un impianto CSP.

Per attivare questa modalità, è necessario aprire le valvole YV-101A e YV-101D, mantenendo chiuse le YV-101B e YV-101C, come mostrato in Figura 11. Questa fase operativa viene realizzata raffreddando precedentemente la massa di olio alla temperatura di set, come descritto nella fase raffreddamento olio. Il riscaldatore E-101 mantiene costante la temperatura in ingresso al modulo, TT-101.

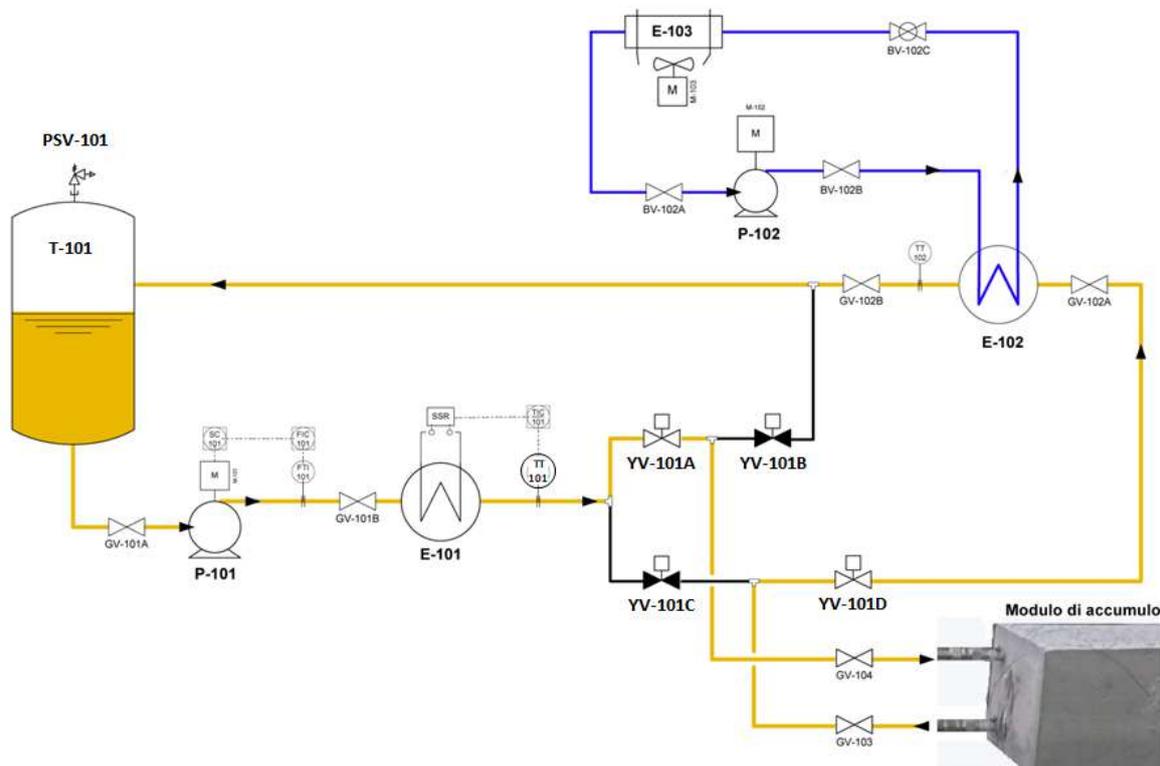


Figura 11: Schema raffreddamento modulo

Come precedentemente menzionato, ogni modalità operativa prevede l'impostazione di determinati set-point di temperatura e portata dell'olio e dello stato di apertura delle quattro elettrovalvole. Queste operazioni possono essere effettuate in due modalità differenti di gestione dell'impianto, ossia in locale e in remoto. Nel primo caso tutte le operazioni sono effettuate attraverso un quadro di controllo, mentre nel secondo caso il sistema di acquisizione dati fornisce in remoto le variabili misurate al programma di controllo e riceve i segnali di azionamento per gli attuatori di processo.

In Figura 12 è mostrata l'immagine del quadro di controllo: oltre all'interruttore generale sono presenti gli interruttori per attivare i singoli componenti, quali le pompe olio e acqua (P-101 e P-102), il ventilatore dell'aeroterma (E-103), e le quattro valvole (VA, VB, VC e VD).

Le variabili controllate sono tre, a cui corrispondono tre regolatori dei set-point: portata dell'olio (FIC-101), temperatura di mandata dell'olio (TIC-101), e temperatura di ritorno dell'olio (TIC-102).

E' presente inoltre un regolatore di sicurezza per evitare il raggiungimento di temperature critiche sulla superficie delle resistenze elettriche, ed evitare il degrado dell'olio; tale regolatore interrompe l'alimentazione al riscaldatore E-101, fino al ripristino di temperature accettabili.

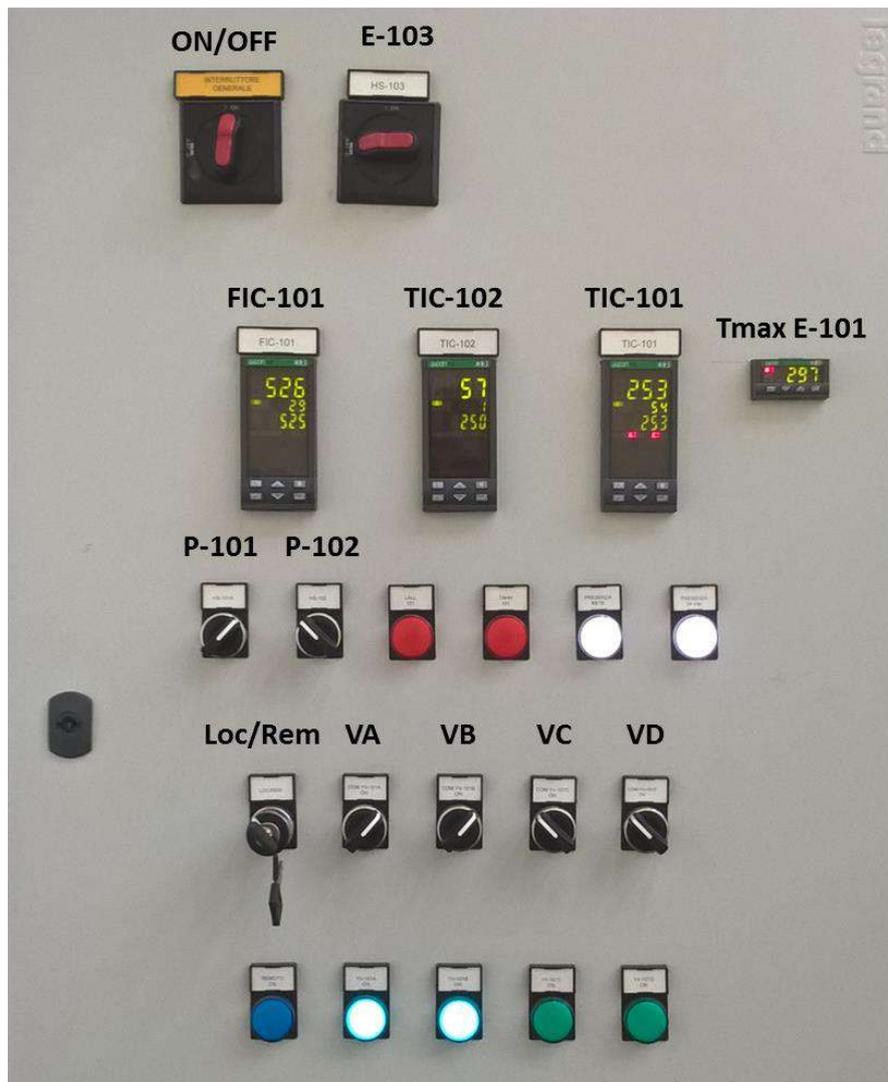


Figura 12: Quadro elettrico di controllo

2.6 Strumentazione e acquisizione dati

L'impianto è adeguatamente strumentato e consente l'acquisizione e la registrazione delle principali grandezze per effettuare in maniera corretta le analisi funzionali del modulo di accumulo.

Le principali grandezze acquisite sono la portata del fluido termovettore, la sua temperatura in diversi punti del circuito, e la temperatura del calcestruzzo.

La portata viene misurata utilizzando un rotometro (Variable Area Flow Meter) della Yokogawa, modello RAMC, Metal short stroke, mostrato in Figura 13. Il modello installato è in acciaio AISI 316L, e misura la portata in massa (in kg/h) in un range da 0 a 2400 kg/h.

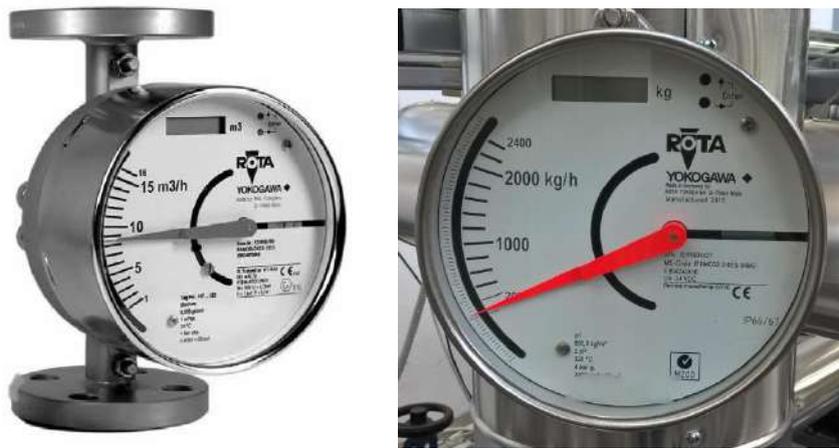


Figura 13: Rotametro

La scala dello strumento è riferita ad un olio con densità di 850 kg/m^3 alla temperatura di 320°C . Se le proprietà dell'olio utilizzato differiscono più del 5% da quelle di riferimento, è necessario effettuare una correzione del valore misurato. La correzione viene effettuata attraverso un fattore correttivo F :

$$m_{corr} = m_{scala} \cdot F$$

$$F = \sqrt{\frac{(SG_{float} - SG_{new}) \cdot SG_{scale}}{(SG_{float} - SG_{scale}) \cdot SG_{new}}}$$

SG_{float} = Specific Gravity del galleggiante, float

SG_{scale} = Specific Gravity del fluido di riferimento

SG_{new} = Specific Gravity del nuovo fluido

Nel caso specifico il galleggiante è in AISI316L, $SG_{float} = 8.04$, $SG_{scale} = 0.85$, e per il nuovo fluido, il PARATHERM, considerando una temperatura media di esercizio di 260°C , risulta $SG_{new} = 0.722$; applicando l'equazione precedente il fattore correttivo risulta pari a $F = 1.092$ e pertanto la portata attuale è superiore del 9% rispetto al valore misurato.

La misura è resa disponibile come segnale $4\div 20 \text{ mA}$. Lo strumento ha un'accuratezza della misura del 1.6%, e una ripetibilità della misura del $\pm 0.1\%$.

La misura della temperatura è realizzata utilizzando termocoppie di tipo K. Per la misura della temperatura del fluido, ove possibile sono stati utilizzati pozzetti per realizzare il contatto diretto della testa della termocoppia con il fluido, mentre in altri casi le termocoppie sono state installate sulla parete esterna della tubazione.

In Figura 14 sono indicate le termocoppie installate sull'impianto per la lettura della temperatura dell'olio e dell'acqua; quelle identificate in rosso sono interne e leggono direttamente la temperatura del fluido.

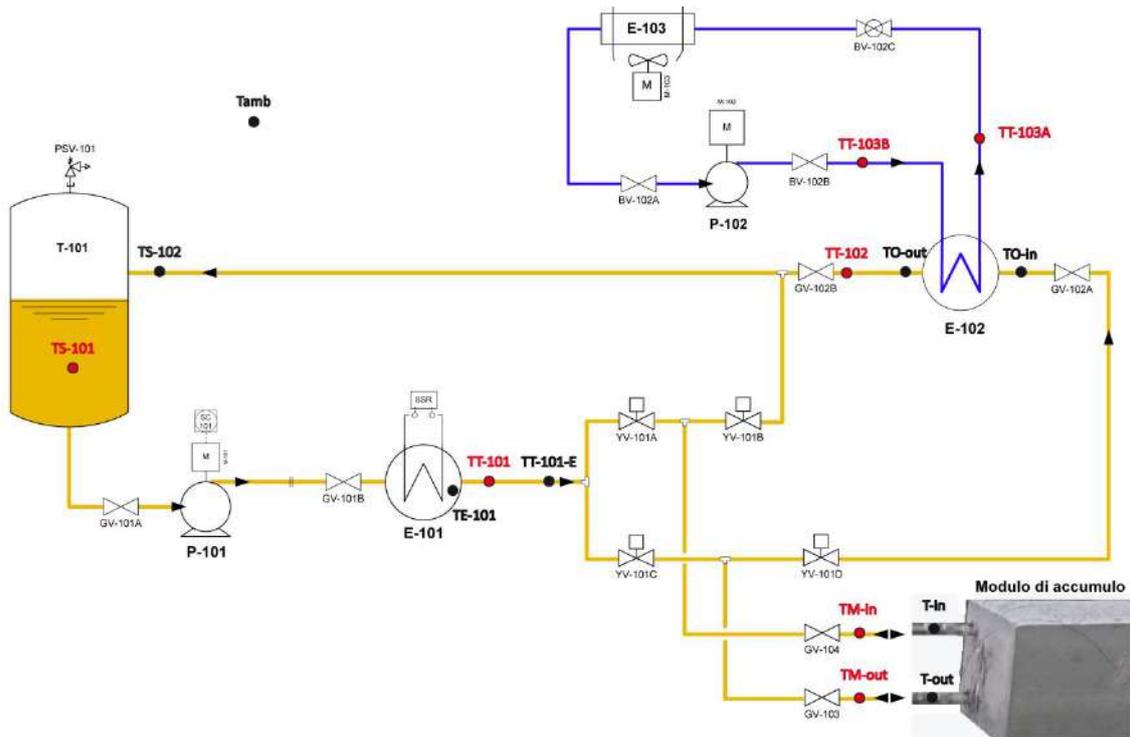


Figura 14: Posizione delle termocoppie nell'impianto

Nel modulo di accumulo sono state installate termocoppie all'interno del modulo, sulla superficie esterna del calcestruzzo e sullo scambiatore di calore, come mostrato in Figura 15.

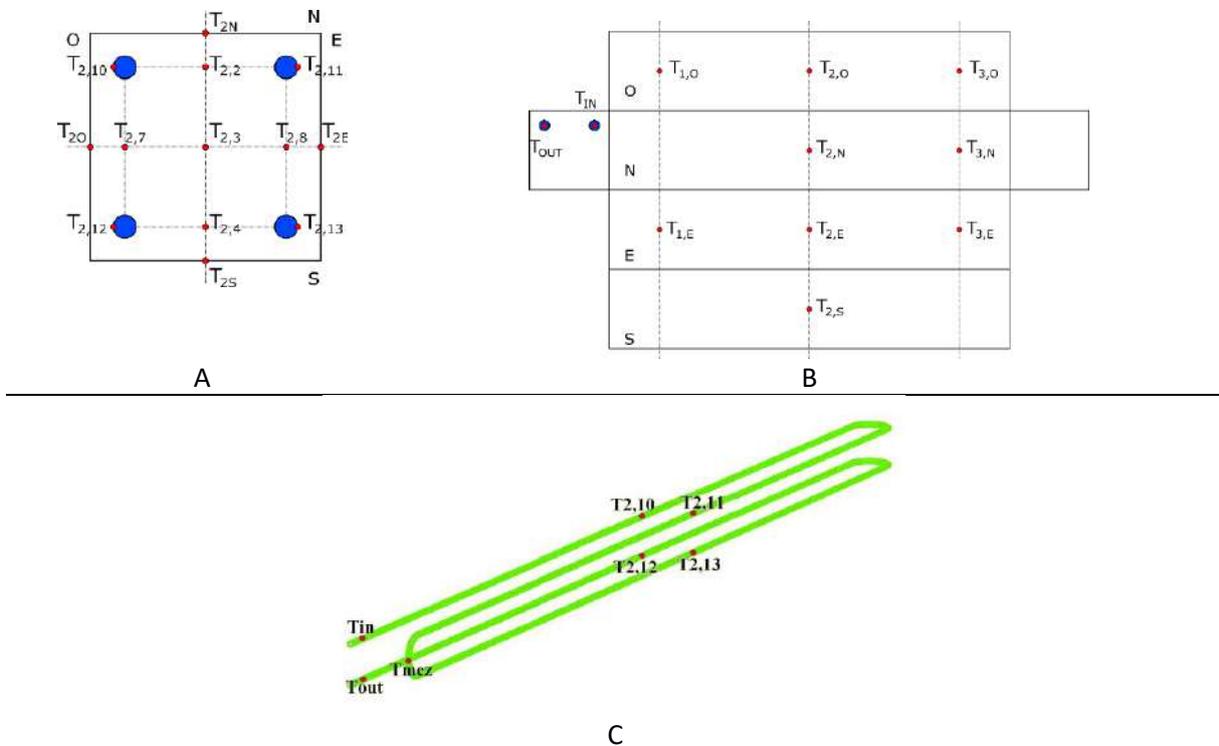


Figura 15: Posizione delle termocoppie nel modulo di accumulo

Le termocoppie interne al calcestruzzo sono installate nella sezione mediana del modulo, mostrata nella parte A della figura 15, e sono indicate come T2_2, T2_7, T2_3, T2_8 e T2_4. Quella centrale, la T2_3, può essere considerata come la temperatura media del calcestruzzo.

Sulla parete esterna del calcestruzzo sono installate 9 termocoppie, come mostrato nella parte B della figura 15, che mostra lo sviluppo piano delle superfici esterne del modulo di accumulo. Le T2_N e T3_N sono posizionate sulla faccia superiore (indicata con N), la T2_S è sulla faccia inferiore (S), mentre le T1_O, T2_O e T3_O, e le T1_E, T2_E e T3_E, sono posizionate sulle facce laterali indicate con E e O.

Sulla tubazione di scambio termico sono installate 7 termocoppie, come mostrato nella parte C della Figura 15. Quattro di esse (T2_10, T2_11, T2_12 e T2_13) sono montate sulla sezione di mezzeria del modulo, mentre le altre, T_in, T_out e T_mez, sono installate rispettivamente all'ingresso, all'uscita e nel punto di mezzo della tubazione.

Il sistema di acquisizione dati è stato realizzato utilizzando componenti e schede della National Instruments. In particolare è stata utilizzata un'unità base NI CompactDAQ, Ethernet Data Acquisition System, che consente l'installazione fino a 8 schede di acquisizione; per le misure sono state usate cinque schede. In Figura 16 è mostrata un'immagine del sistema di acquisizione.



Figura 16: Sistema di acquisizione dati

In particolare sono state installate le seguenti schede di acquisizione:

1. NI-9264 output di tensione, 16 canali;
2. NI-9265 output di corrente, 8 canali;
3. NI-9207 input tensione/corrente, 16 canali (8 V e 8 A)
4. NI-9214 misura di temperatura, 16 canali
5. NI-9214 misura di temperatura, 16 canali

La scheda NI-9264 consente di alimentare i relè per azionare le quattro elettrovalvole nel funzionamento in remoto.

La scheda NI-9265 consente di impostare in remoto i set-point della portata FIC-101, e delle due temperature TIC-101 e TIC-102.

La scheda NI-9207 consente di leggere i segnali di portata e temperatura olio (FI-101, TT-101 e TT-102), e lo stato di apertura delle quattro elettrovalvole.

Le due schede NI-9214 sono utilizzate per acquisire tutti i segnali di temperatura. In Figura 17 è mostrato il sistema di acquisizione e il cablaggio dei segnali.



Figura 17: Cablaggio sistema di acquisizione dati

Per la gestione del sistema di acquisizione è stato sviluppato un programma in Labview®, con il quale vengono processati i segnali (Figura 18).



Figura 18: Computer di acquisizione

Il programma acquisisce ed elabora i segnali provenienti dall'impianto e li trasforma nei valori di misura delle variabili acquisite desiderate, che vengono memorizzate su file. In Figura 19 è riportata la maschera di acquisizione, come mostrata dal software, delle grandezze relative all'olio.

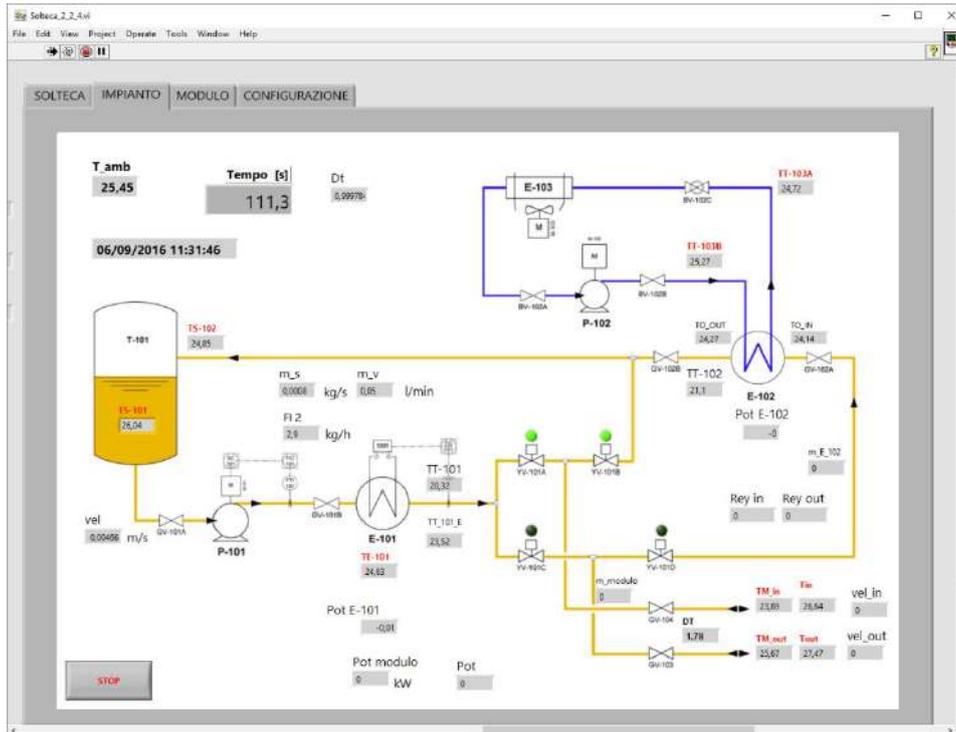


Figura 19: Maschera principale del programma di acquisizione

Il programma consente la gestione automatica in remoto delle varie operazioni (set-point, apertura/chiusura valvole), per effettuare una serie di prove in sequenza.

3 Campagna sperimentale

In questa sezione del lavoro sono descritte le prove sperimentali condotte a diverse temperature di ingresso.

3.1 Prove a 250°C

Ogni prova è costituita da quattro fasi distinte e in sequenza: riscaldamento olio, riscaldamento modulo, raffreddamento olio e raffreddamento modulo. Alcuni test preliminari hanno permesso di definire i set-point di temperatura, le relative rampe di salita e i tempi di ciascuna fase. La descrizione della procedura è la seguente:

Stato iniziale dell'impianto:

Il modulo di accumulo è mantenuto alla temperatura di circa 220°C, la portata della pompa P-101 è regolata in manuale al 30% del numero di giri nominale (corrispondente a circa 435 kg/h), le valvole YV-101C e YV-101B sono aperte mentre le valvole YV-101A e YV-101D sono chiuse, e il set-point della temperatura TT-101 è pari a 220°C.

Fase di riscaldamento olio

La pompa dell'olio viene regolata in automatico con set-point di portata pari a 520 kg/h. Si apre la valvola YV-101A e si chiude la YV-101B.

Il set-point della temperatura TT-101 è impostato a 255°C (5°C al di sopra della temperatura di caricamento), con rampa di salita di 40°C/h, tranne che nell'ultima prova (con rampa di 75°C/h).

Fase di riscaldamento modulo (caricamento)

Viene attivata la circolazione nel modulo aprendo la valvola YV-101C e chiudendo la valvola YV-101A. Il set-point della TT-101 viene impostato a 250°C. Per limitare l'abbassamento della temperatura del serbatoio a causa dello svuotamento dell'olio freddo presente nelle tubazioni interne al modulo, si può mantenere, per un certo tempo, la valvola YV-101A aperta utilizzandola come valvola miscelatrice.

La fase termina quando la temperatura media del modulo, la T2_3 si è stabilizzata avvicinandosi alla temperatura di 250°C; la durata di questa fase è di circa 4.5 h.

Fase di raffreddamento olio

In questa fase è necessario raffreddare l'olio presente nel serbatoio alla temperatura di 220°C per alimentare il modulo nella fase di scaricamento termico. Si interrompe la circolazione nel modulo e si attiva la circolazione nello scambiatore E-102 aprendo la valvola YV-101D e chiudendo la YV-101B. I set-point delle temperature TT-101 e TT-102 si impostano a 220°C. La fase termina quando la temperatura del serbatoio, TS-101, è di circa 220°C; questa fase operativa ha una durata pari a circa 15 minuti.

Fase di raffreddamento modulo (scaricamento)

Viene riattivata la circolazione nel modulo, aprendo la valvola YV-101A e chiudendo la YV-101C.

Il set-point della TT-101 viene mantenuto a 220°C.

Durante questa fase si controlla la temperatura dell'acqua in uscita dallo scambiatore E-102, la TT-103A, per evitare che salga troppo, agendo manualmente, se necessario, sul numero di giri della pompa P-102 per aumentare la portata dell'acqua. La fase termina quando la temperatura del modulo è ritornata nelle condizioni iniziali di 220°C; la durata è di circa 2 h.

Al termine della prova, la temperatura del modulo viene stabilizzata a 220°C per ripristinare lo stato iniziale prima di una nuova prova. Per fare questo si aprono le valvole YV-101B e YV-101C e si chiudono le YV-101A e YV-101D, la pompa P-101 viene posta in manuale al 30% del numero di giri nominale e il set-point della TT-101 viene mantenuto a 220°C.

3.1.1 Prova 1: caricamento a 250 °C e scaricamento a 220 °C, con il calcolo delle dispersioni termiche

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo ottenute durante la prova sono riportate in Figura 20, in cui sono identificate le quattro fasi della prova.

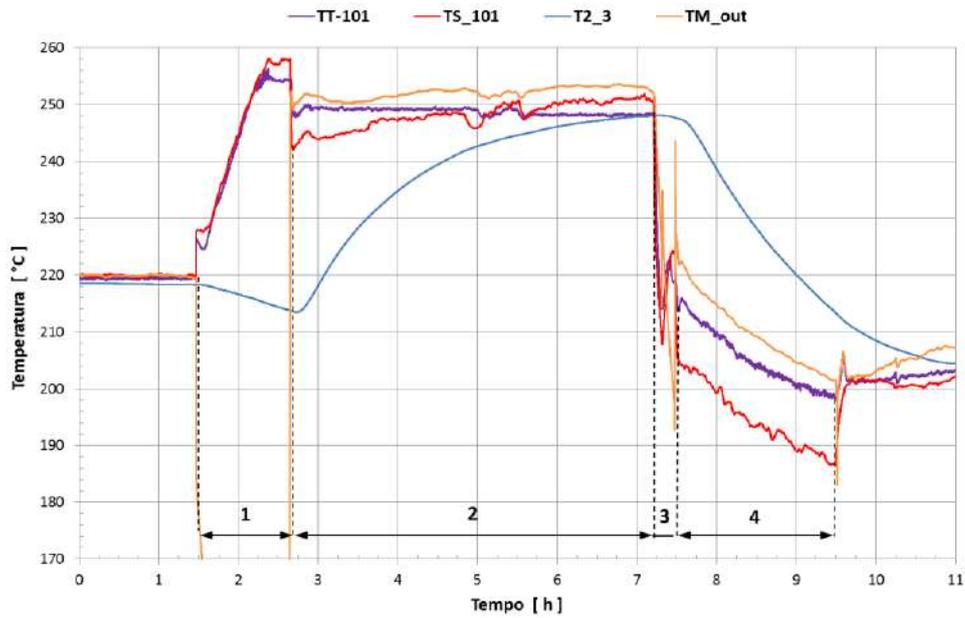


Figura 20: Prova 1. Temperature olio e modulo.

Nella Figura 21 è mostrato il dettaglio della fase di riscaldamento dell'olio.

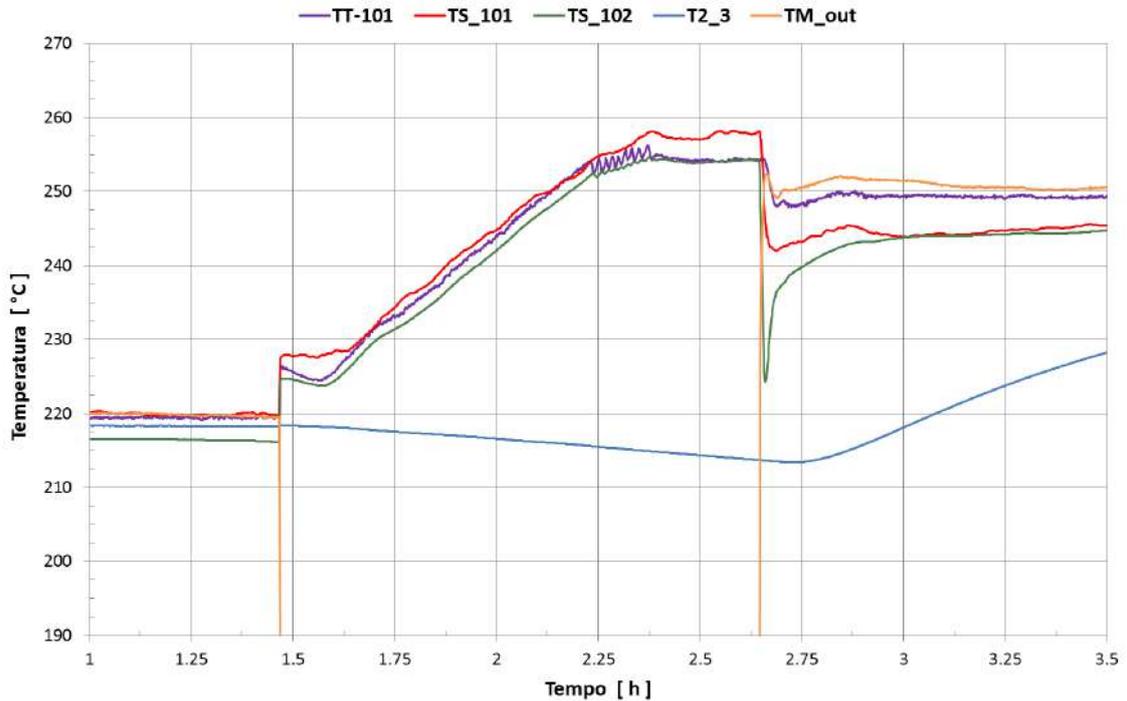


Figura 21: Prova 1. Dettaglio riscaldamento a 250°C

Nella parte finale del riscaldamento si nota un'oscillazione delle TT-101 a seguito dell'intervento del sistema di sicurezza del riscaldatore E-102, che determina una serie di spegnimenti e accensioni. Questo è stato causato da un non corretto settaggio dei parametri del regolatore. Il set-point è raggiunto in 55 minuti e viene successivamente mantenuto per altri 15 minuti. Si nota una discordanza tra le tre temperature misurate rispettivamente nel serbatoio (TS-101), in uscita dal

riscaldatore (TT-101) e in ingresso al modulo (TM_out); questa discordanza verrà successivamente discussa. Durante la fase di riscaldamento e stabilizzazione della temperatura dell'olio, che dura 1 ora e 10 minuti, il modulo si raffredda di 4.8°C da 218.3°C a 213.5°C, con un rateo di circa 4.1°C/h.

In Figura 22 è mostrato il dettaglio della fase di riscaldamento del modulo.

Quando si attiva la circolazione nel modulo, per effetto dell'olio più freddo in equilibrio con la temperatura del calcestruzzo presente nelle tubazioni interne al modulo, la TT-101 si abbassa di 2°C e il set-point viene ripristinato in circa 10 minuti, tenendo aperta la valvola YV-101A.

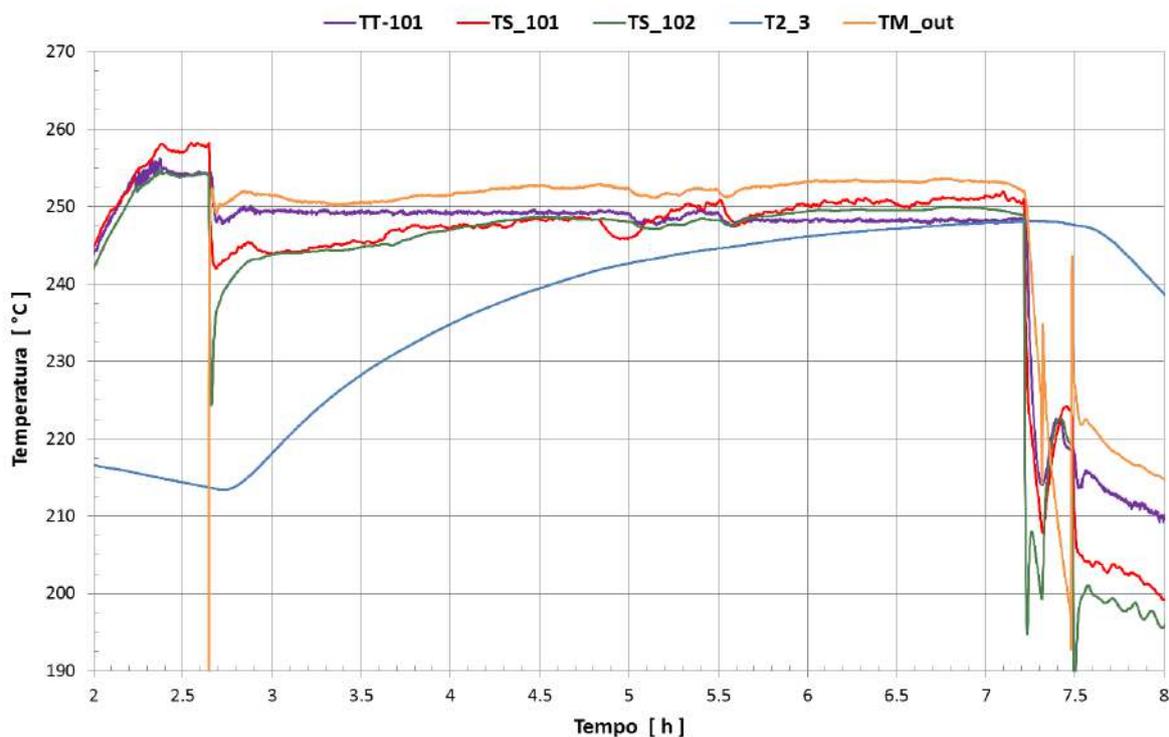


Figura 22: Prova 1. Dettaglio del caricamento modulo

Il caricamento del modulo prosegue per circa 4.5 ore e la sua temperatura media raggiunge un valore di circa 248°C.

A questo punto si interrompe la circolazione dell'olio nel modulo e si entra nella fase di raffreddamento olio. Il dettaglio di questa fase è mostrato nelle Figure 23 e 24.

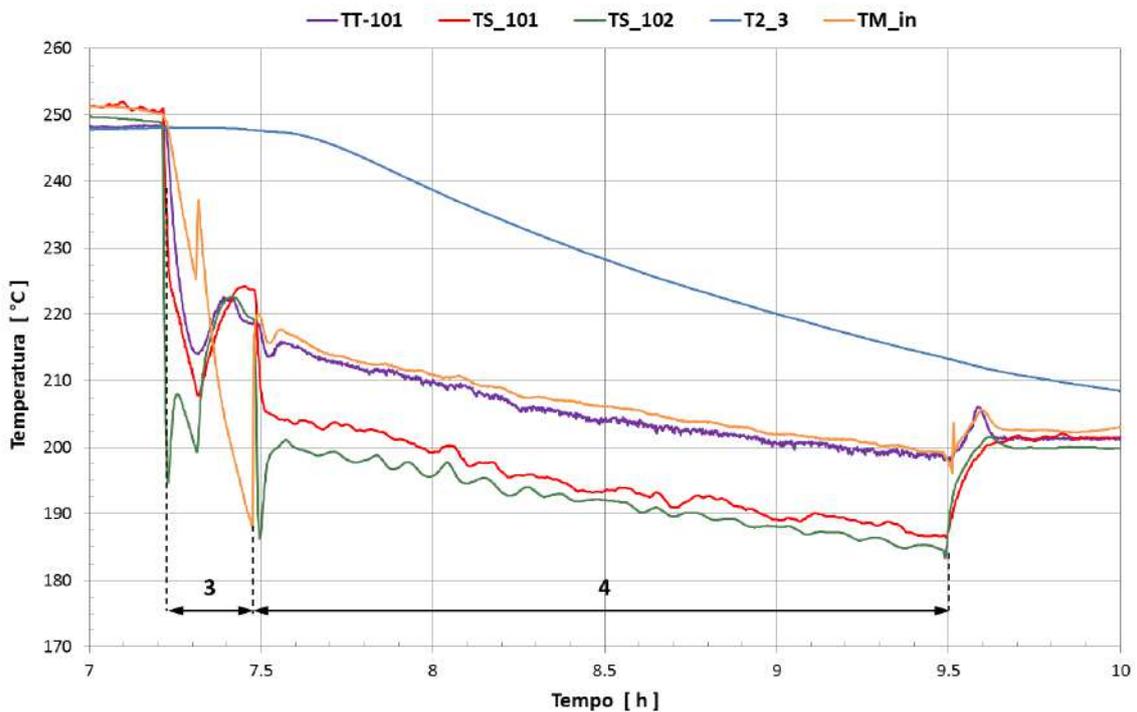


Figura 23: Prova 1. Dettaglio raffreddamento olio e scaricamento modulo

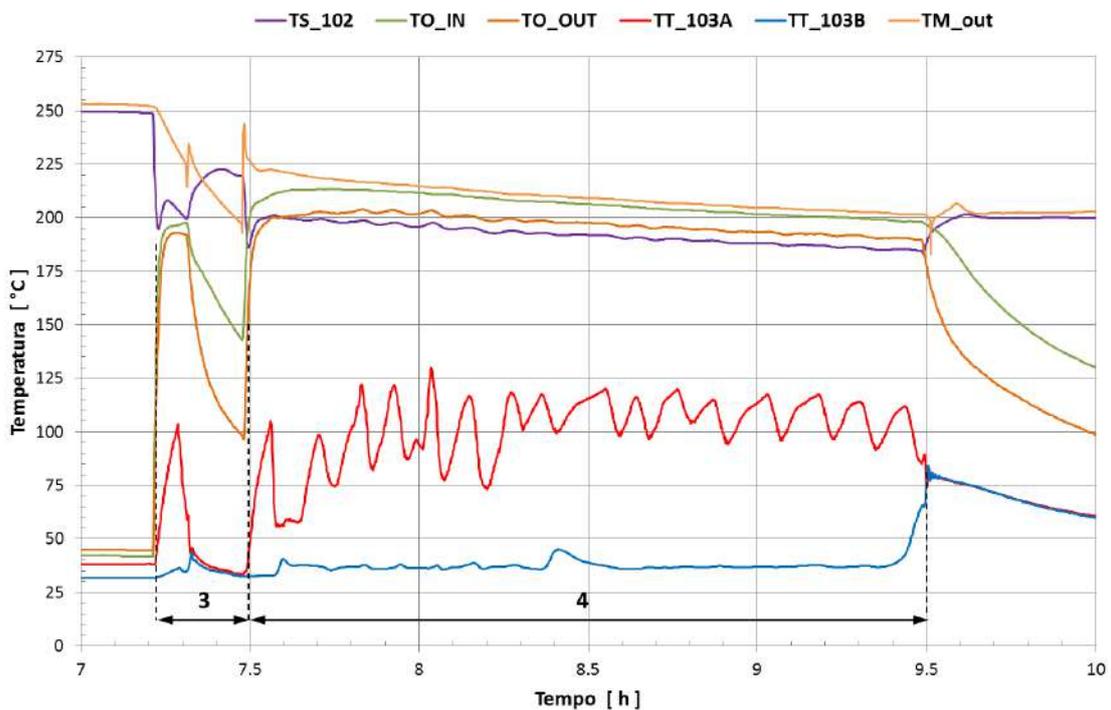


Figura 24: Prova 1. Dettaglio delle temperature dello scambiatore E-102

Dopo circa 15 minuti la temperatura del serbatoio è intorno a 220°C, e la fase di raffreddamento olio si interrompe, passando alla fase di raffreddamento modulo. Il raffreddamento eccessivo dell'olio nello scambiatore E-102 però non consente al regolatore del riscaldatore E-101 di mantenere costante la temperatura di ingresso al modulo, che si riduce durante questa fase da 219°C a 198°C.

La temperatura dell'olio più bassa migliora lo scambio termico nel calcestruzzo e quindi aumenta l'energia termica estratta dal calcestruzzo.

In Figura 25 sono mostrate le temperature medie del calcestruzzo e dell'olio in ingresso e in uscita dal modulo, insieme alla potenza termica di carica/scarica dell'accumulo. La potenza termica è calcolata moltiplicando la portata dell'olio per la differenza di entalpia dell'olio alle temperature di ingresso e di uscita.

Nel grafico riferito alla potenza termica, la prima fase è relativa al mantenimento a circa 220°C. Questo consente di valutare le dispersioni termiche del modulo a questa temperatura, che risultano pari a 584 W.

Durante la fase di riscaldamento del modulo la potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è massima all'inizio, circa 3.5 kW (escludendo il picco iniziale), per ridursi con l'aumento della temperatura del modulo fino a circa 880 W. Questa potenza termica è quella che viene trasferita dall'olio al calcestruzzo; non è uguale a quella immagazzinata nel calcestruzzo, poiché il modulo disperde energia verso l'ambiente esterno. Le perdite verso l'ambiente ovviamente dipendono dalla temperatura superficiale del modulo, che ovviamente risente delle temperature interne e quindi dell'olio.

Dai risultati delle prove sperimentali è stato possibile valutare le dispersioni termiche del modulo al variare della sua temperatura media; i risultati sono mostrati in Figura 26.

Le perdite variano da 520 W a 210°C a 1160 W a 275°C. Poiché l'area della superficie di scambio termico esterna è pari a circa 6.5 m² (0.5x3x4 + 0.5x0.5x2), la perdita termica unitaria varia tra 80 e 178.5 W/m².

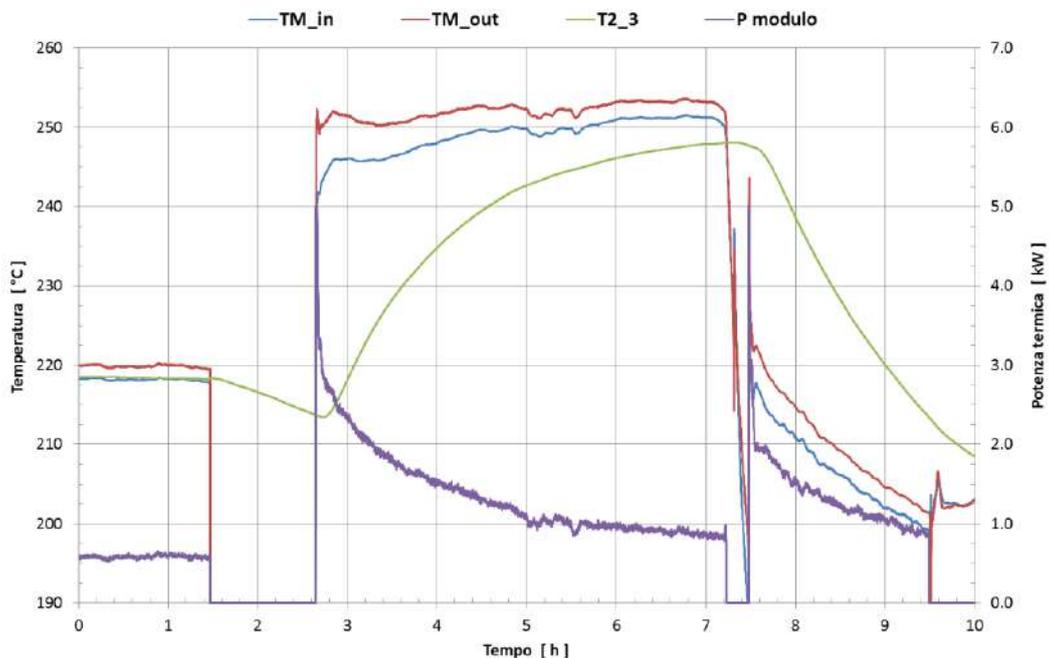


Figura 25: Prova 1. Potenza termica del modulo

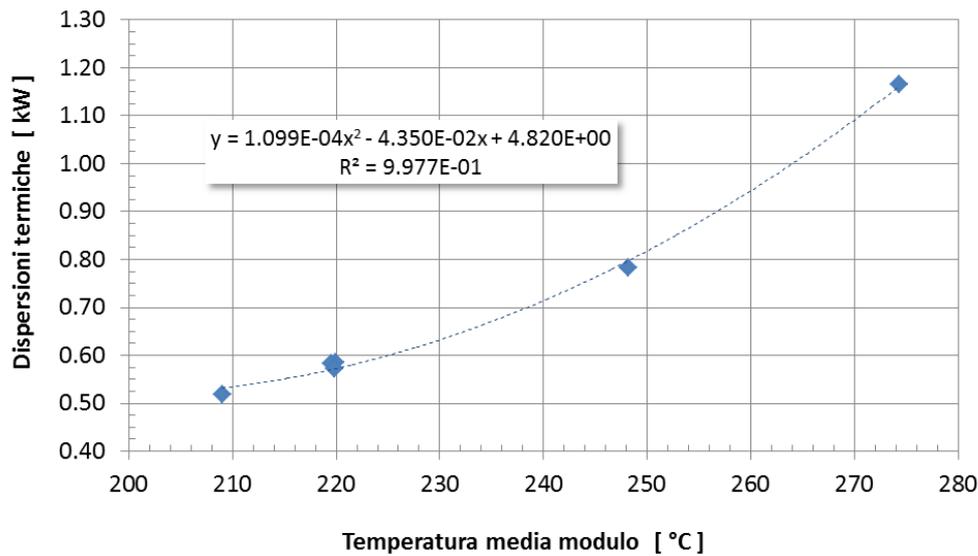


Figura 26: Dispersioni termiche del modulo cementizio

Sottraendo le dispersioni termiche del modulo alla potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è possibile calcolare la potenza netta di caricamento del modulo, cioè la variazione di energia immagazzinata nel calcestruzzo. (Figura 27, fase di riscaldamento modulo).

Nella fase di scaricamento la potenza termica è definita come quella che viene ceduta dal calcestruzzo all'olio, trasferendo l'energia precedentemente immagazzinata (c'è un cambio di segno rispetto alla fase di caricamento, per comodità di visualizzazione)

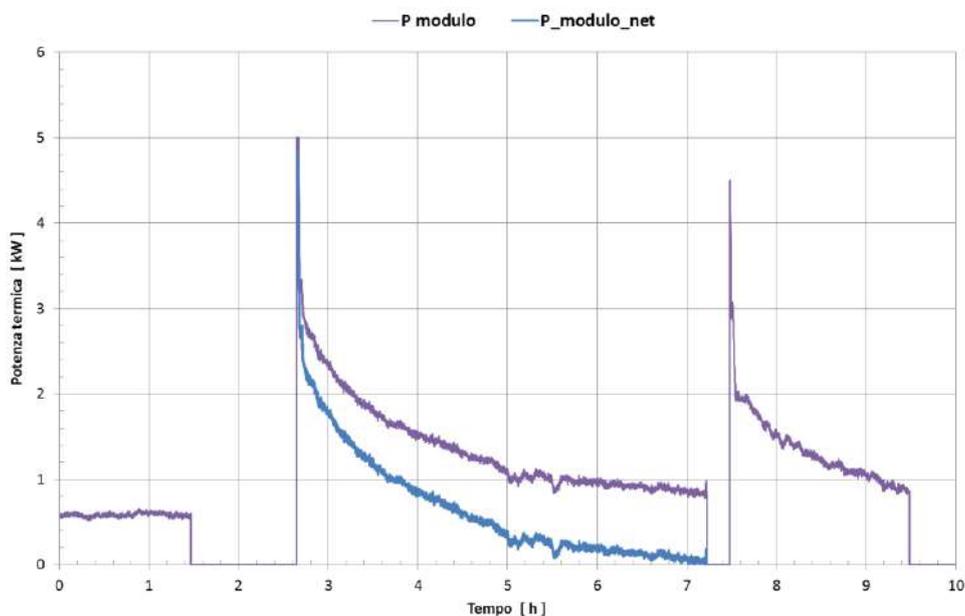


Figura 27: Prova 1. Confronto potenza termica del modulo

Dalle potenze termiche è possibile calcolare l'energia termica immagazzinata nel calcestruzzo e quella scaricata dal calcestruzzo e valutare l'efficienza del sistema di accumulo.

In Figura 28 è mostrato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio, quella effettivamente caricata nel modulo e quella scaricata dal modulo.

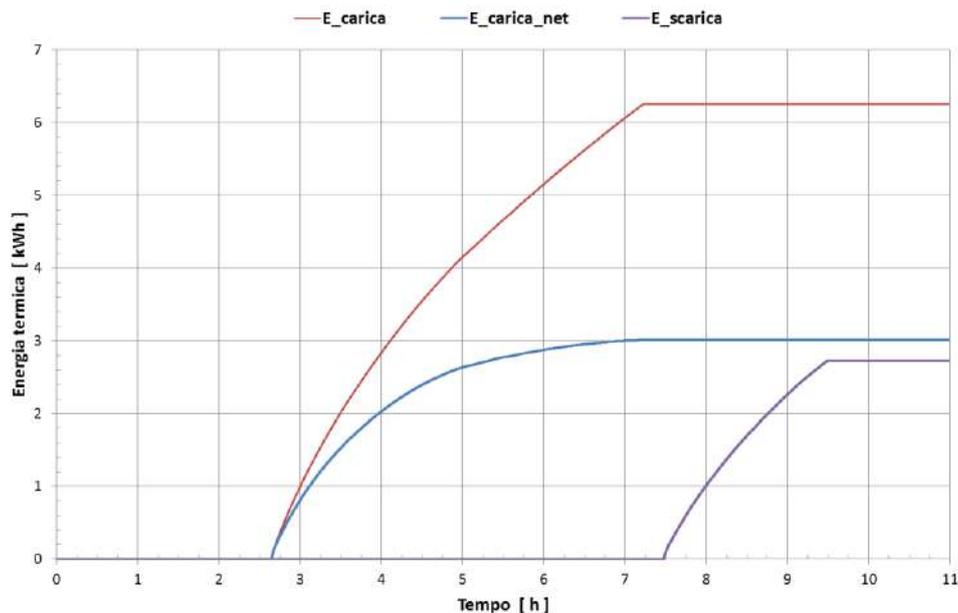


Figura 28: Prova 1. Energia termica

L'energia trasferita dall'olio è pari a 6.26 kWh, quella caricata nel modulo è pari 3.01 kWh, con un'efficienza di caricamento di circa il 48%; questo valore è strettamente legato alla coibentazione del modulo, poiché l'energia mancante in caricamento è dovuta alle dispersioni verso l'ambiente. L'energia scaricata dal modulo è pari a 2.72 kWh. Il sistema di accumulo presenta quindi un'efficienza, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, di circa il 90%.

Per quanto riguarda la temperatura del modulo di accumulo, sul calcestruzzo sono installate più termocoppie: alcune interne alla sezione mediana, e altre esterne sulle quattro facce maggiori. L'andamento delle temperature misurate è riportato rispettivamente nella Figura 29 e nella Figura 30.

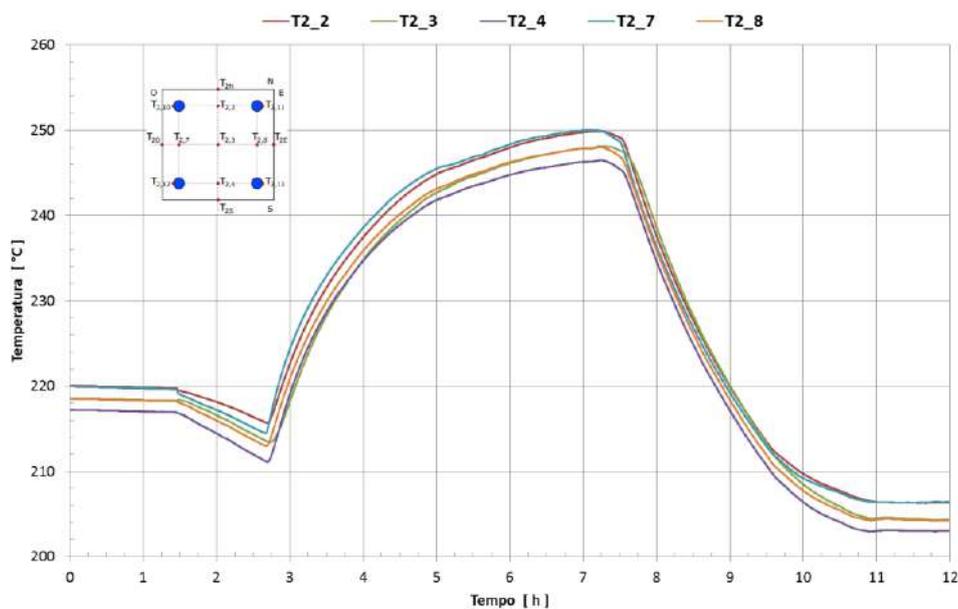


Figura 29: Prova 1. Temperature interne del calcestruzzo nella sezione mediana

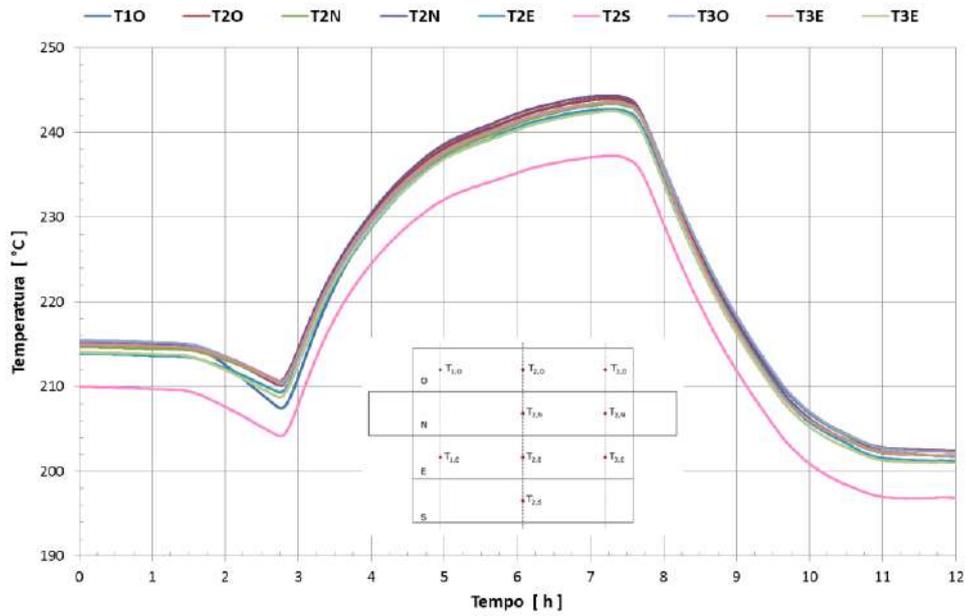


Figura 30: Prova 1. Temperature sulle facce esterne del calcestruzzo

Come si osserva dalla figura, T2_3 approssima abbastanza bene la temperatura media del modulo. Inoltre le temperature sulla faccia inferiore (T2_4 e T2_S) sono più basse perché poste in una zona con maggiori dispersioni termiche verso l'esterno.

3.1.2 Prova 2: caricamento a 250° e scaricamento a 220°C

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo nella seconda prova sono riportate in Figura 31, con l'identificazione delle quattro fasi del test.

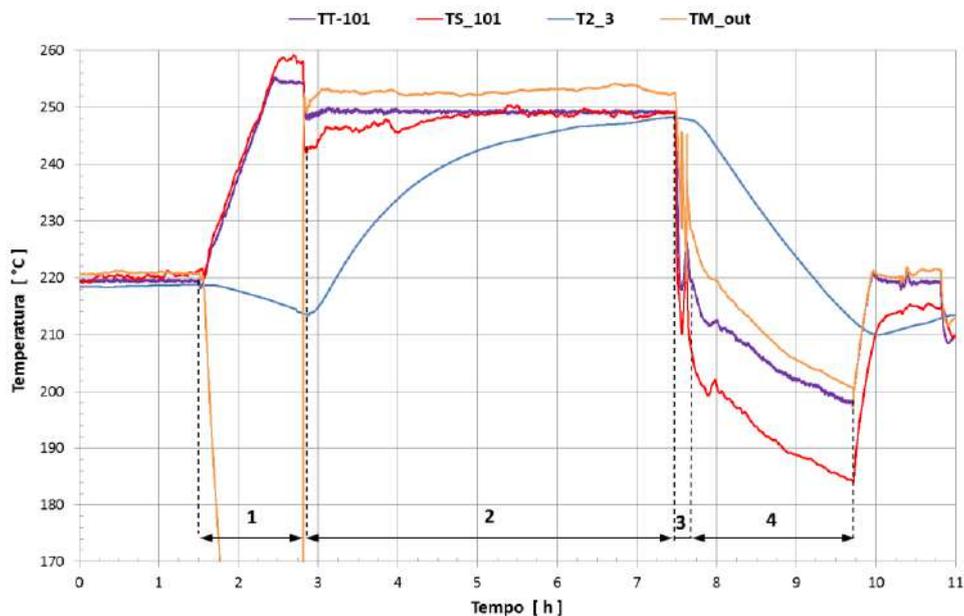


Figura 31: Prova 2. Temperature olio e modulo.

Nella Figura 32 è mostrato il dettaglio della fase di riscaldamento dell'olio.

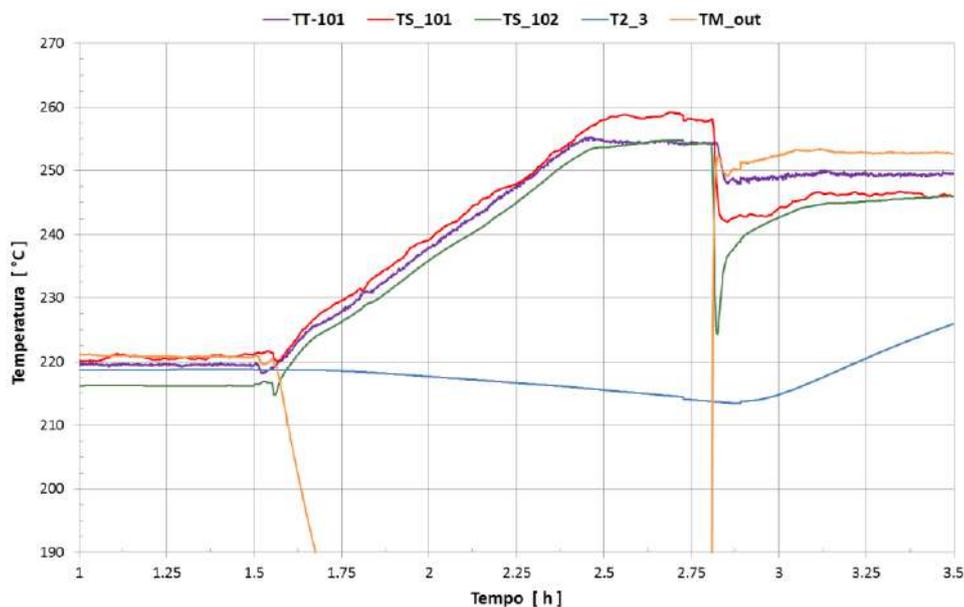


Figura 32: Prova 2. Dettaglio riscaldamento olio a 250°C

Il set-point è raggiunto in 55 minuti e viene successivamente mantenuto per altri 20 minuti.

Durante la fase di riscaldamento e stabilizzazione della temperatura dell'olio, che dura 1 ora e 15 minuti, il modulo si raffredda di 4.8°C da 218.6°C a 213.5°C, con un rateo di circa 4.1°C/h.

In Figura 33 è mostrato il dettaglio della fase di caricamento del modulo.

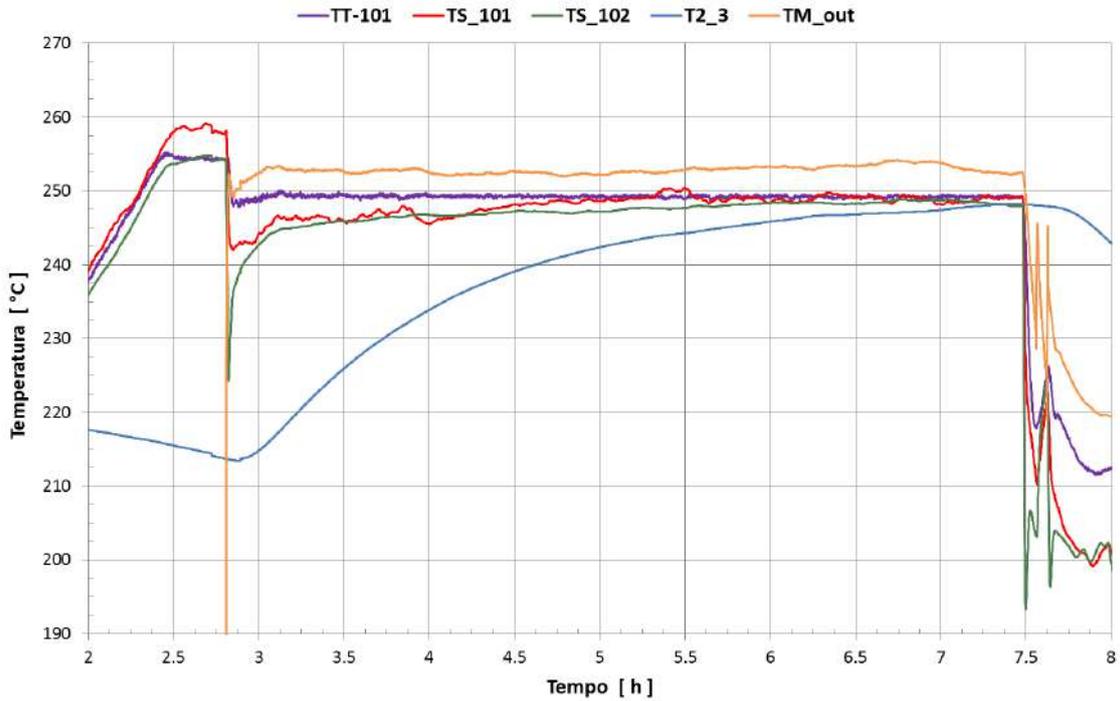


Figura 33: Prova 2. Dettaglio del caricamento modulo

Anche in questa prova, la TT-101 si abbassa inizialmente di 2°C e il set-point viene ripristinato in circa 10 minuti. Il caricamento del modulo prosegue per circa 4 h e 40 minuti, e la temperatura media del modulo raggiunge un valore di circa 248°C.

Le fasi di raffreddamento olio e raffreddamento modulo sono mostrate rispettivamente in [Figura 34](#) e [Figura 35](#).

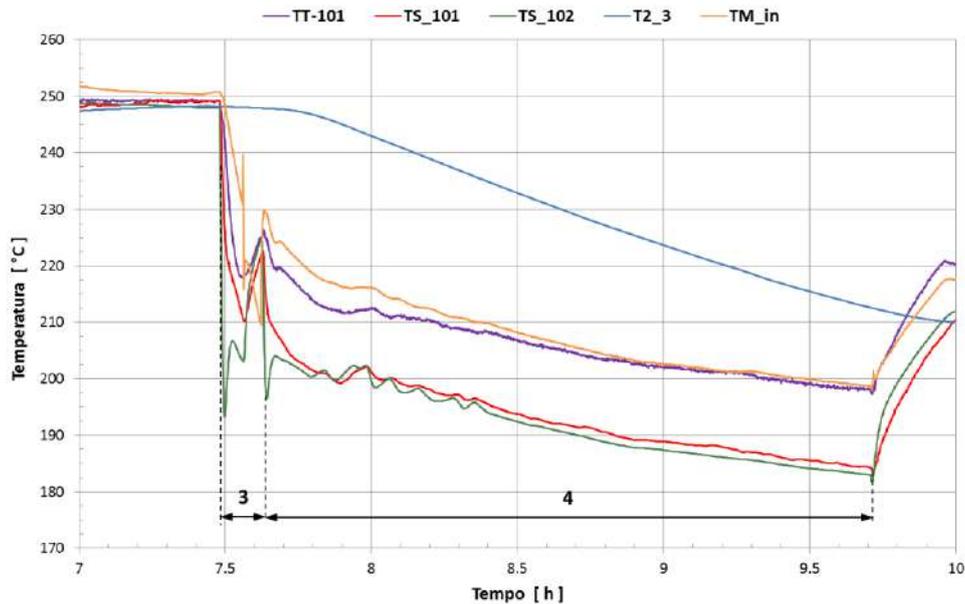


Figura 34: Prova 2. Dettaglio raffreddamento olio e scaricamento modulo

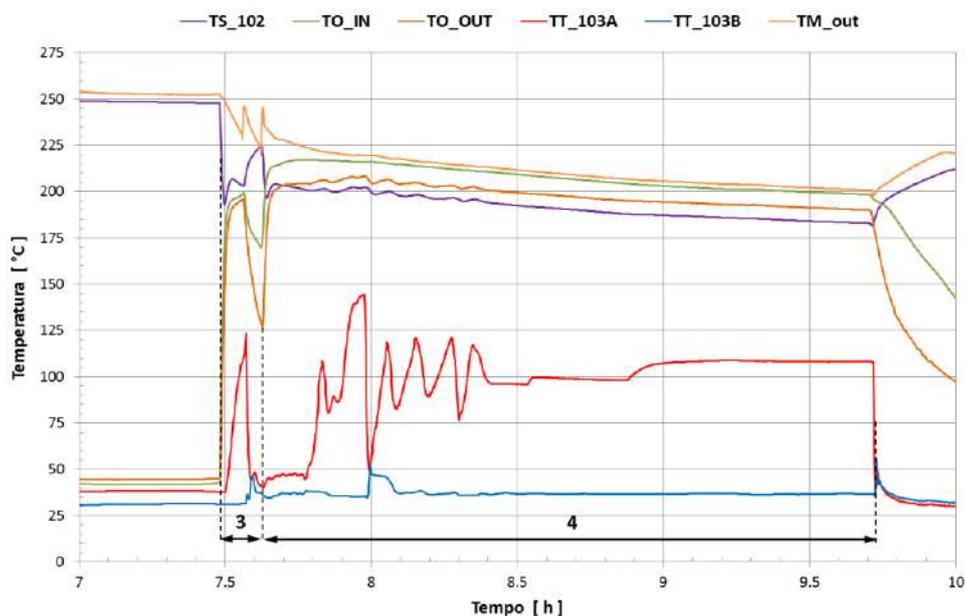


Figura 35: Prova 2. Dettaglio delle temperature dello scambiatore E-102

La fase di raffreddamento dell'olio dura circa 15 minuti, dopodiché viene riattivata la circolazione nel modulo per la fase di scaricamento. Anche in questa prova il raffreddamento eccessivo dell'olio nello scambiatore E-102 non consente al regolatore del riscaldatore E-101 di mantenere costante la temperatura di ingresso al modulo, che si riduce da 220°C a 198°C.

In Figura 36 sono riportate le temperature medie del calcestruzzo e dell'olio, in ingresso ed uscita dal modulo, insieme alla potenza termica.

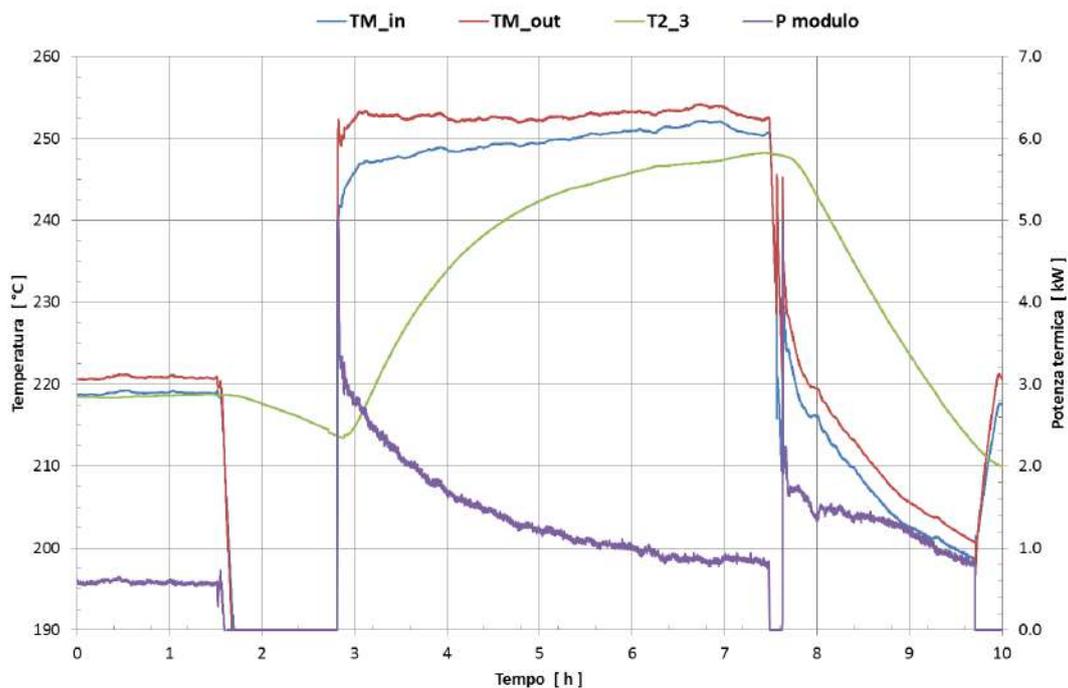


Figura 36: Prova 2. Potenza termica del modulo

La potenza termica, pressochè costante nel primo tratto, è richiesta per il mantenimento del calcestruzzo a una temperatura media di 219.6°C, e deve compensare la dispersione termica verso l'ambiente di circa 580 W.

Durante la fase di caricamento del modulo la potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è massima all'inizio, circa 3.5 kW (escludendo il picco iniziale dovuto alla riattivazione della circolazione), per ridursi con l'aumento della la temperatura del modulo fino a circa 880 W.

Sottraendo alla potenza termica trasferita le dispersioni termiche del modulo (mostrate in Figura 26) è possibile calcolare la potenza netta assorbita dal calcestruzzo (Figura 37).

In Figura 38 è mostrato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio al calcestruzzo, quella effettivamente caricata nel modulo e quella scaricata dal modulo.

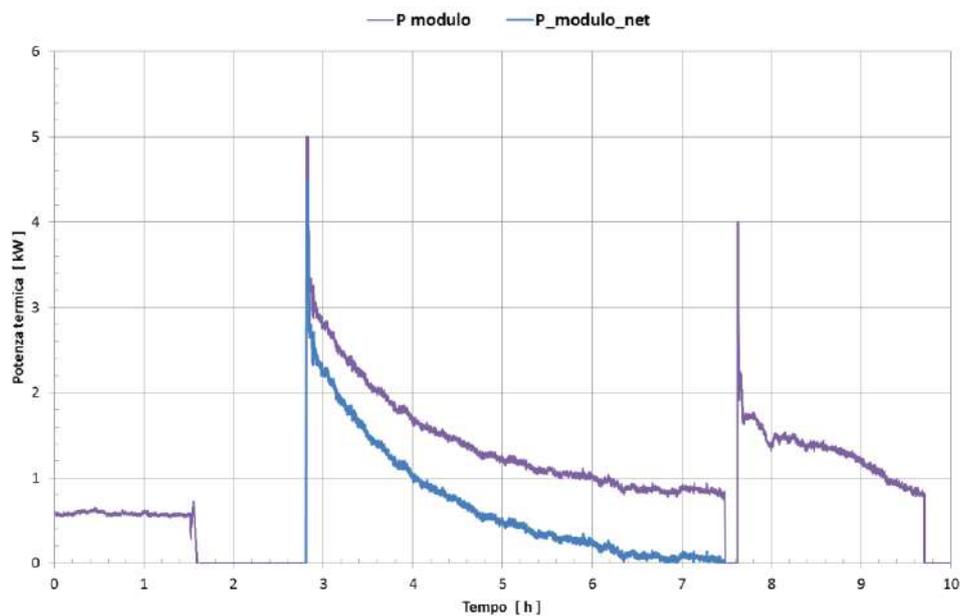


Figura 37: Prova 2. Confronto potenza termica del modulo

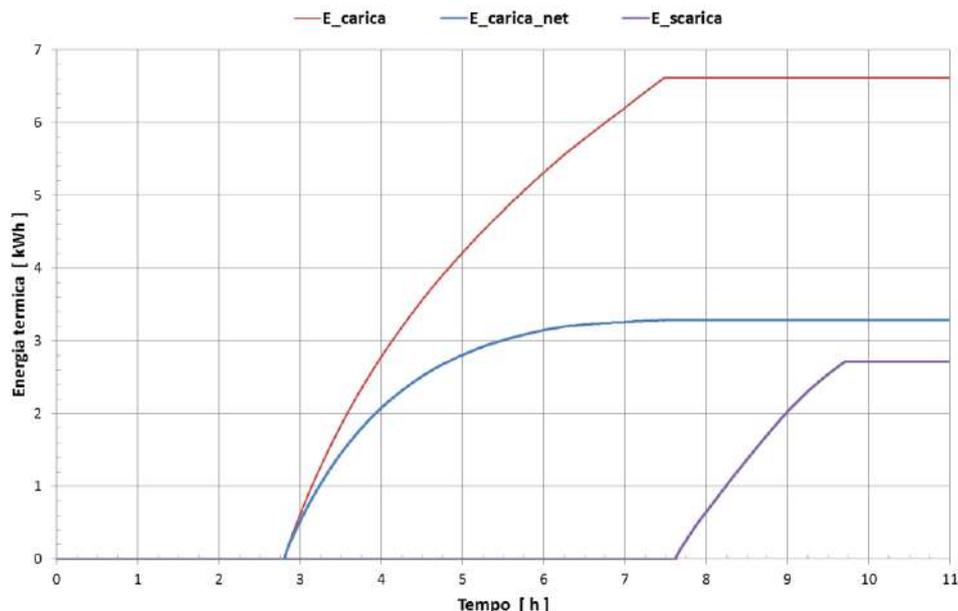


Figura 38: Prova 2. Energia termica

L'energia trasferita dall'olio è pari a 6.61 kWh, e quella caricata nel modulo è pari a 3.28 kWh, con un'efficienza di caricamento di circa il 50%.

L'energia scaricata dal modulo è invece pari a circa 2.71 kWh. L'efficienza del sistema di accumulo, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, è pari a circa l'82%.

3.1.3 Prova 3: caricamento a 250° e scaricamento a 220°C

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo nella terza prova a 250°C sono riportate in Figura 39, con l'identificazione delle quattro fasi del test.

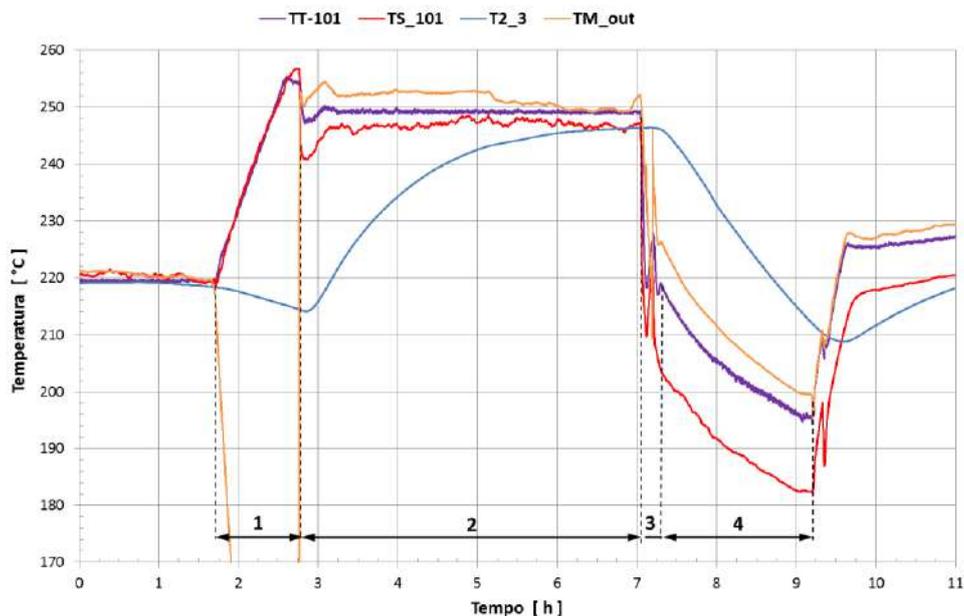


Figura 39: Prova 3. Temperature olio e modulo.

Nella Figura 40 è riportato il dettaglio della fase di riscaldamento dell'olio.

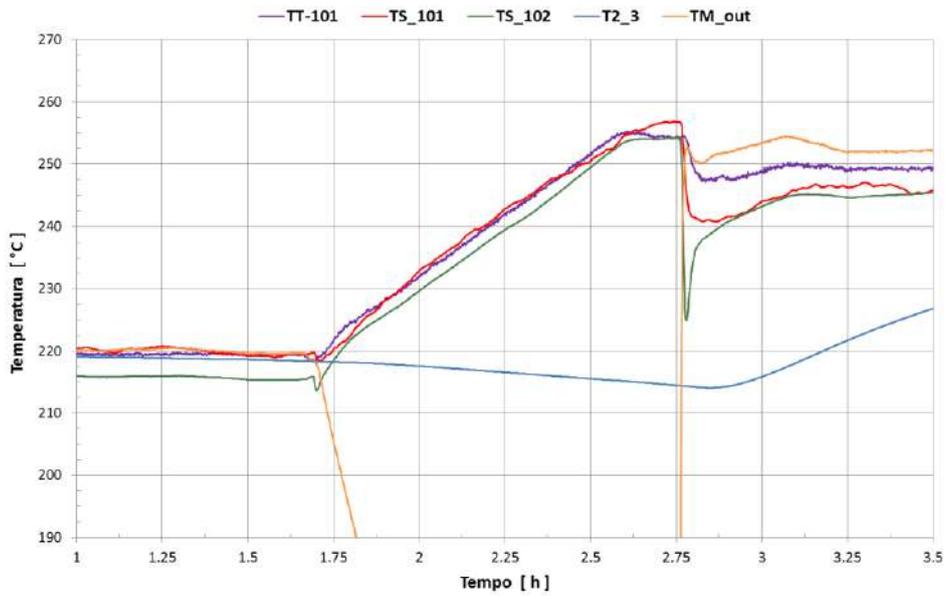


Figura 40: Prova 3. Dettaglio riscaldamento olio a 250°C

Il set-point è raggiunto in 54 minuti e viene successivamente mantenuto per altri 22 minuti.

Durante la fase di riscaldamento e stabilizzazione della temperatura dell'olio, che dura 1 ora e 15 minuti, il modulo si raffredda di 4.8°C, da 218.6°C a 213.5°C, con un rateo di circa 4.1°C/h.

In Figura 41 è mostrato il dettaglio della fase di caricamento del modulo.

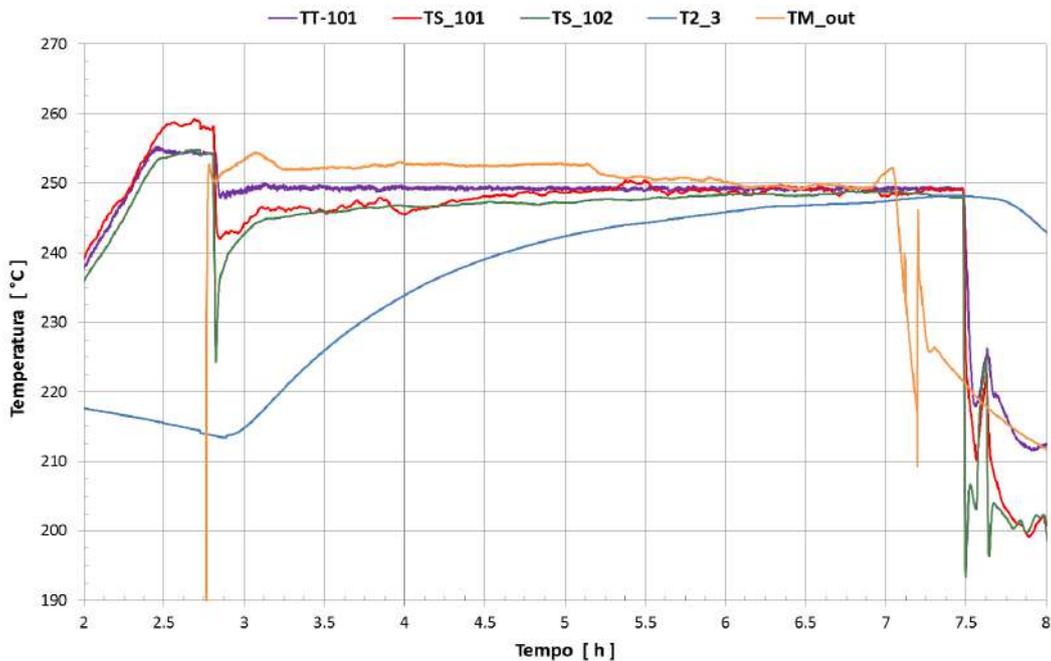


Figura 41: Prova 3. Dettaglio del caricamento modulo

Il caricamento del modulo prosegue per circa 4 h e 40 minuti e la sua temperatura media raggiunge un valore di circa 248°C.

Le fasi di raffreddamento olio e di raffreddamento modulo sono mostrate rispettivamente in Figura 42 e Figura 43.

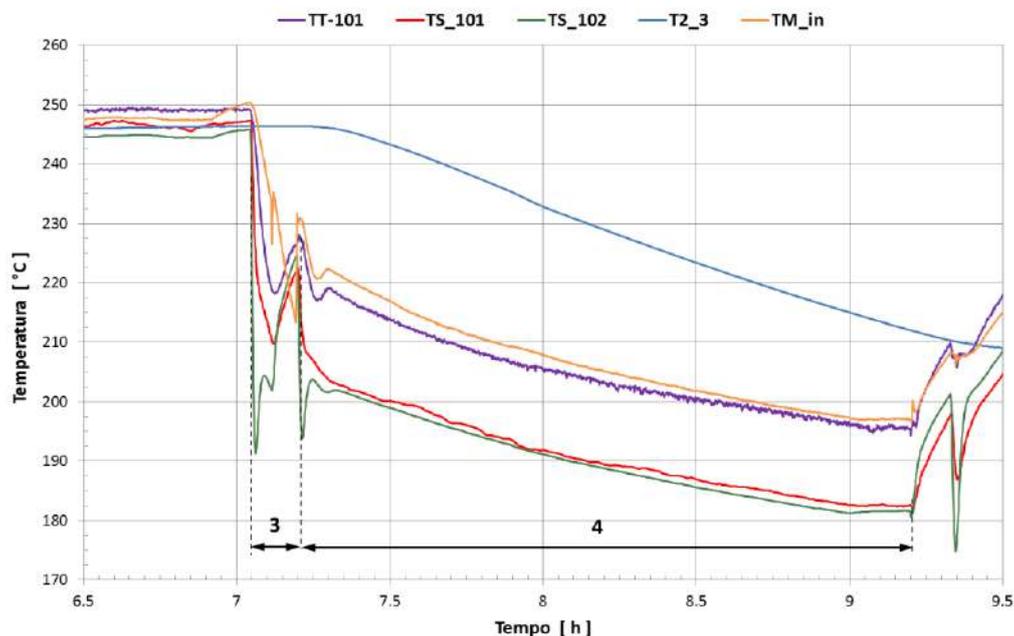


Figura 42: Prova 3. Dettaglio raffreddamento olio e scaricamento modulo

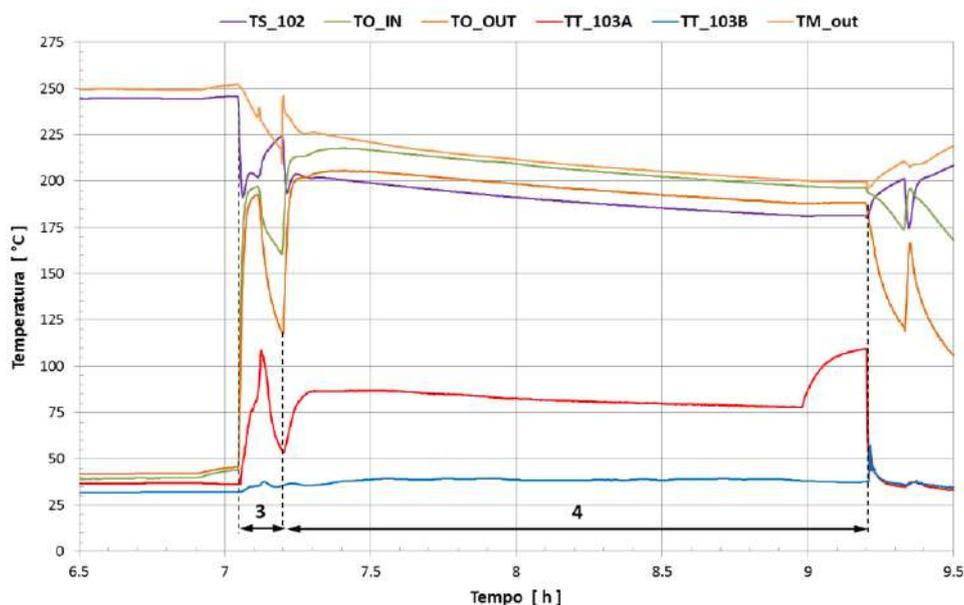


Figura 43: Prova 3. Dettaglio delle temperature dello scambiatore E-102

La fase di raffreddamento dell'olio dura circa 10 minuti, e successivamente viene riattivata la circolazione nel modulo per la fase di scaricamento.

Anche in questa prova il raffreddamento eccessivo dell'olio nello scambiatore E-102 non consente al regolatore del riscaldatore E-101 di mantenere costante la temperatura di ingresso al modulo, che si riduce da 219°C a 195°C.

In Figura 44 è mostrata la temperatura media del calcestruzzo e dell'olio in ingresso e uscita dal modulo, insieme alla potenza termica.

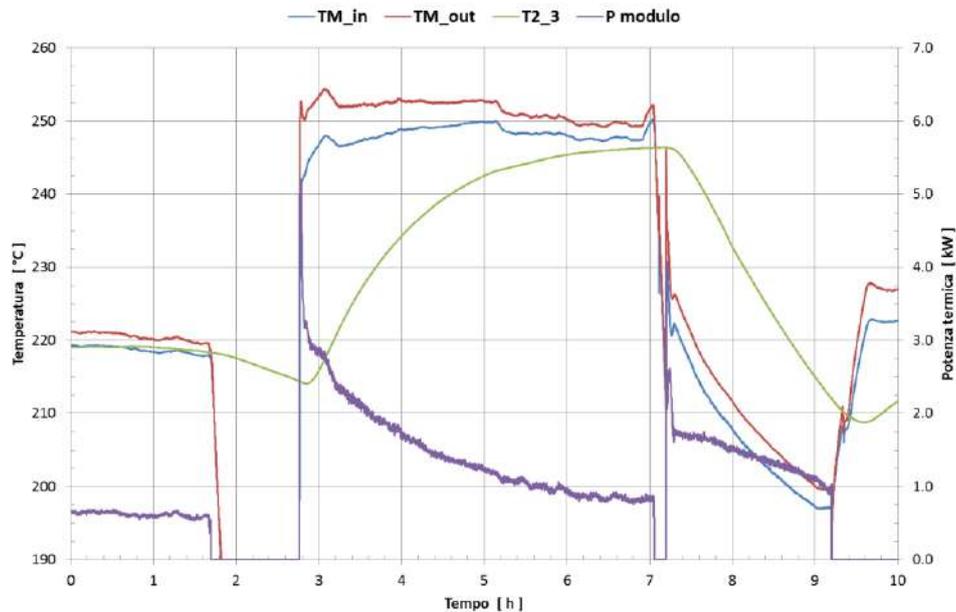


Figura 44: Prova 3. Potenza termica del modulo

In una fase iniziale la potenza fornita compensa una dispersione termica di circa 628 W, mantenendo il modulo a una temperatura media di 220.14°C.

Durante la fase di caricamento del modulo la potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è massima all'inizio (circa 4 kW), per ridursi con l'aumento della temperatura fino a circa 830 W.

Sottraendo alla potenza termica trasferita le dispersioni termiche del modulo (mostrate in Figura 26) è possibile calcolare la potenza netta assorbita dal calcestruzzo (Figura 45).

In Figura 46 è riportato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio, quella effettivamente caricata nel modulo e quella scaricata dal modulo.

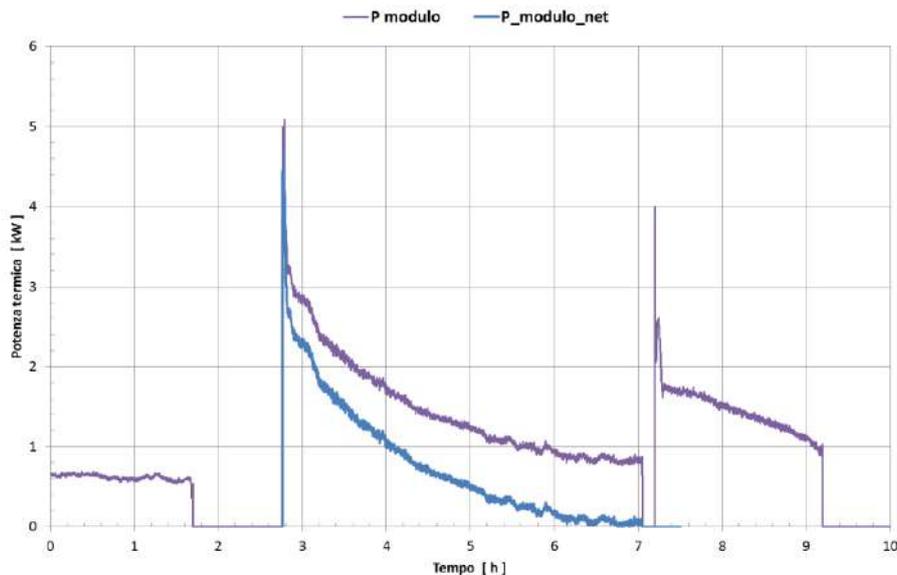


Figura 45: Prova 3. Confronto potenza termica del modulo

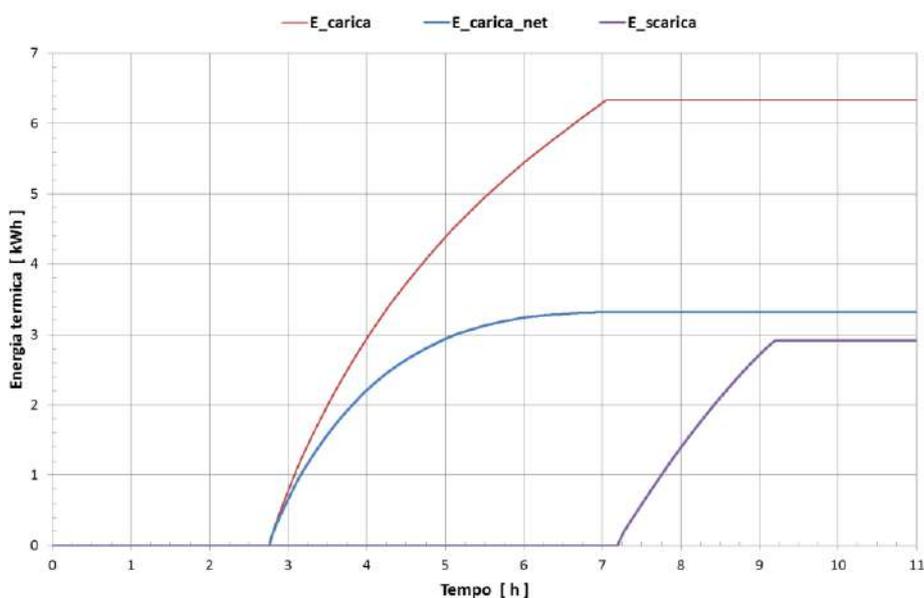


Figura 46: Prova 3. Energia termica

L'integrale dell'energia trasferita dall'olio è pari a 6.34 kWh, quella caricata nel modulo è pari a 3.32 kWh, con un'efficienza di caricamento di circa il 52%.

L'energia scaricata dal modulo è invece pari a circa 2.92 kWh. L'efficienza del sistema di accumulo, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, è pari a circa l'88%. Prova 4: caricamento a 250 °C e scaricamento a 220 °C (con raffreddamento ad aria)

Dalle prove precedenti è risultato che lo scambiatore E-102 è molto efficiente e determina un forte raffreddamento dell'olio; di conseguenza il regolatore, che agisce sul numero di giri della pompa di circolazione dell'acqua (P-102), non riesce a mantenere costante la temperatura di uscita, ossia la TT-102.

Se la TT-102 scende al di sotto del set-point, il regolatore ferma la pompa dell'acqua e questo determina un forte aumento della temperatura dell'acqua nella cassa dello scambiatore con incremento della pressione. In questo caso è necessario escludere il regolatore e agire manualmente sul numero di giri della pompa per tenere sotto controllo la temperatura di uscita dell'acqua, la T-T-103A. Questo complica la gestione delle fasi di raffreddamento olio e scaricamento modulo, e non consente di mantenere costante la temperatura dell'olio in ingresso al modulo durante la fase di scaricamento alterando così lo scarico di energia. Il problema sarebbe ancora più accentuato nelle prove a 280°C.

Per risolvere il problema l'impianto è stato modificato, drenando l'acqua dal circuito secondario e facendo raffreddare l'olio nel fascio tubiero con l'aria del mantello dello scambiatore E-102. Il calore è poi disperso nell'ambiente attraverso la superficie esterna dello scambiatore. Lo schema di funzionamento dell'impianto resta sostanzialmente lo stesso, con la differenza che il fluido di raffreddamento nel circuito secondario non è l'acqua ma aria.

La modifica è stata verificata nelle prove ad alta temperatura (descritte più avanti); è stata quindi ripetuta una prova a 250°C per osservare la differenza di comportamento con le precedenti prove.

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo sono riportate in Figura 47.

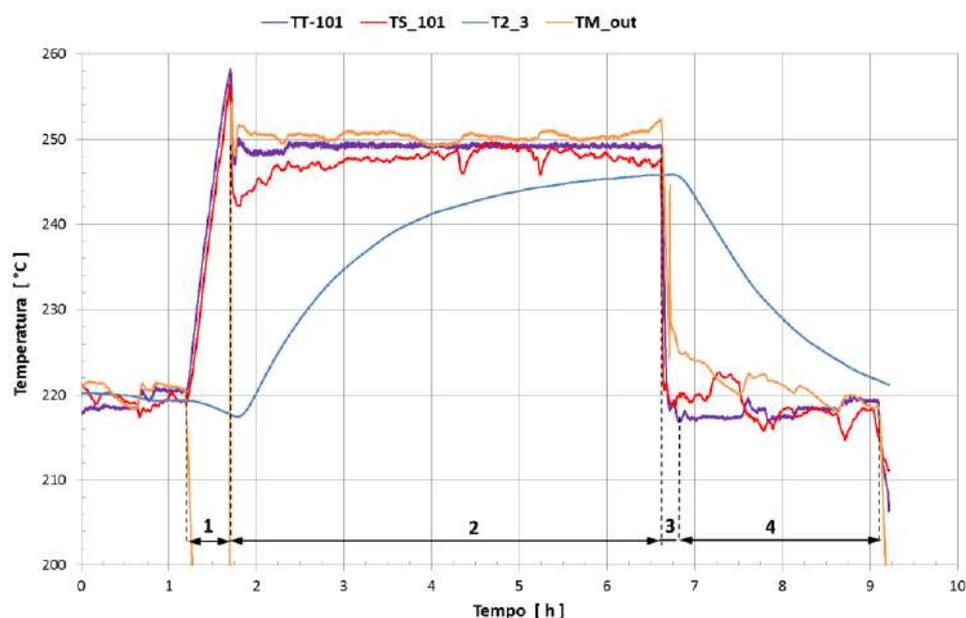


Figura 47: Prova 4. Temperature olio e modulo.

Durante la fase di riscaldamento olio, il set-point di TT-101 è stato fissato a 257°C, con una rampa di riscaldamento più rispetto alle precedenti prove a 250°C (70°C/h invece di 40°C/h). Nella Figura 48 è riportato il dettaglio della fase di riscaldamento dell'olio.

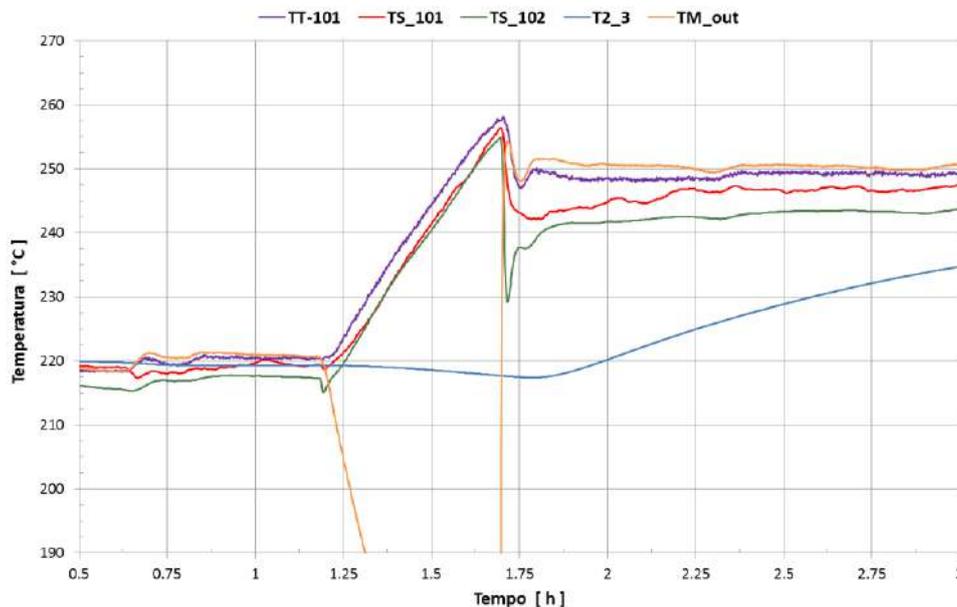


Figura 48: Prova 4. Dettaglio riscaldamento a 250°C

Il set-point è stato raggiunto in circa 30 minuti. Durante questa fase, il modulo si è raffreddato di circa 2°C, da 219°C a 217°C, con un rateo di circa 4.0°C/h.

In Figura 49 è mostrato il dettaglio della fase di caricamento del modulo.

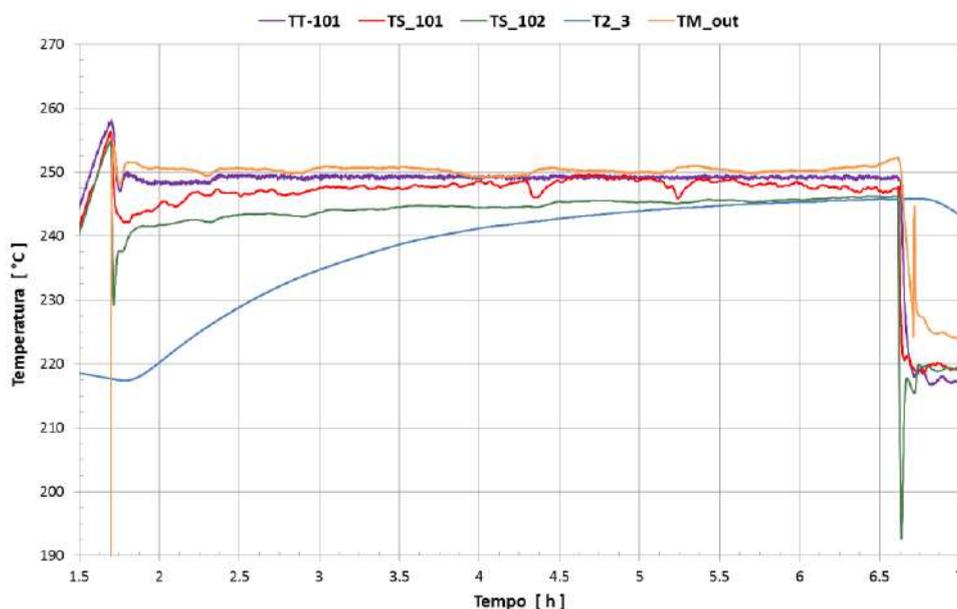


Figura 49: Prova 4. Dettaglio del caricamento modulo

Il caricamento del modulo prosegue per circa 5 h e la temperatura media del calcestruzzo raggiunge un valore di circa 246°C.

Il dettaglio della fase di raffreddamento olio è mostrato nella Figura 50, mentre in Figura 51 è mostrata la fase di scaricamento modulo.

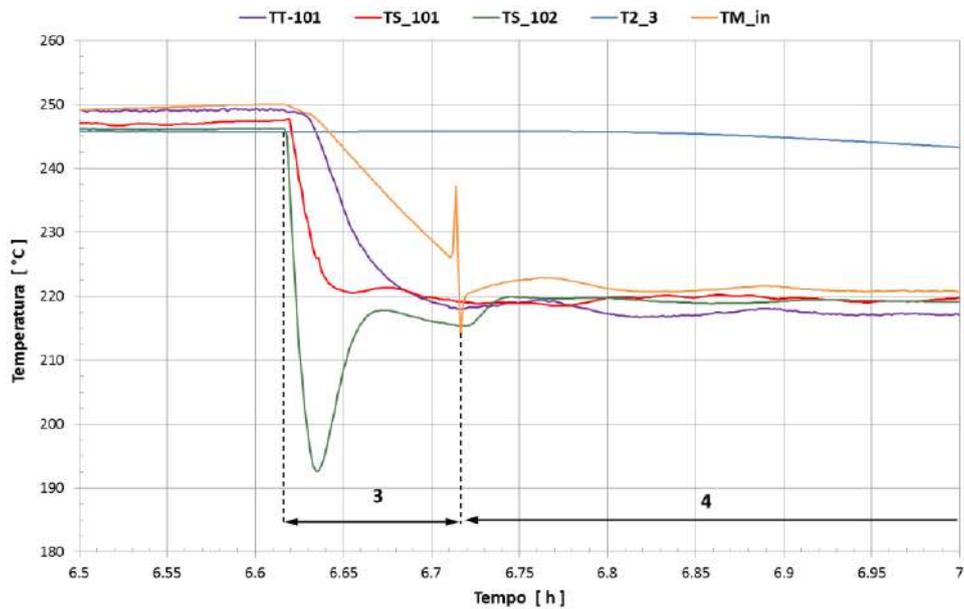


Figura 50: Prova 4. Dettaglio raffreddamento olio

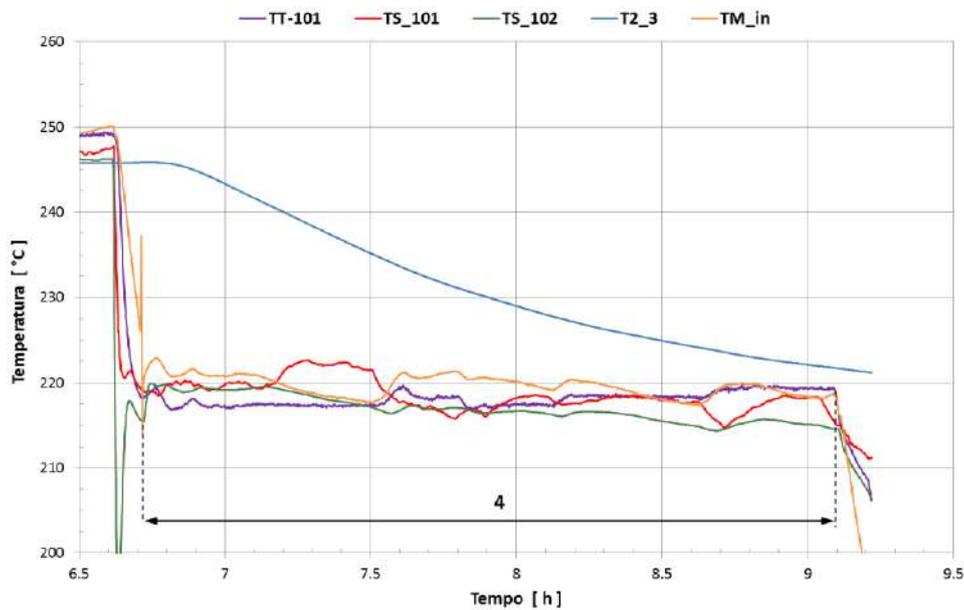


Figura 51: Prova 4. Dettaglio dello scaricamento modulo

La fase di raffreddamento dell'olio dura in questo caso circa 6 minuti e viene terminata quando la temperatura del serbatoio è circa 220°C.

Nella fase di scaricamento, la temperatura di alimentazione del modulo, TM_in, rimane alta (intorno ai 220°C), anche se l'affidabilità di questa misurazione è dubbia perché in questa prova il regolatore della TT-101 ha presentato un funzionamento discontinuo.

In Figura 44 è mostrata la temperatura media del calcestruzzo e dell'olio in ingresso e in uscita dal modulo, insieme alla potenza termica.

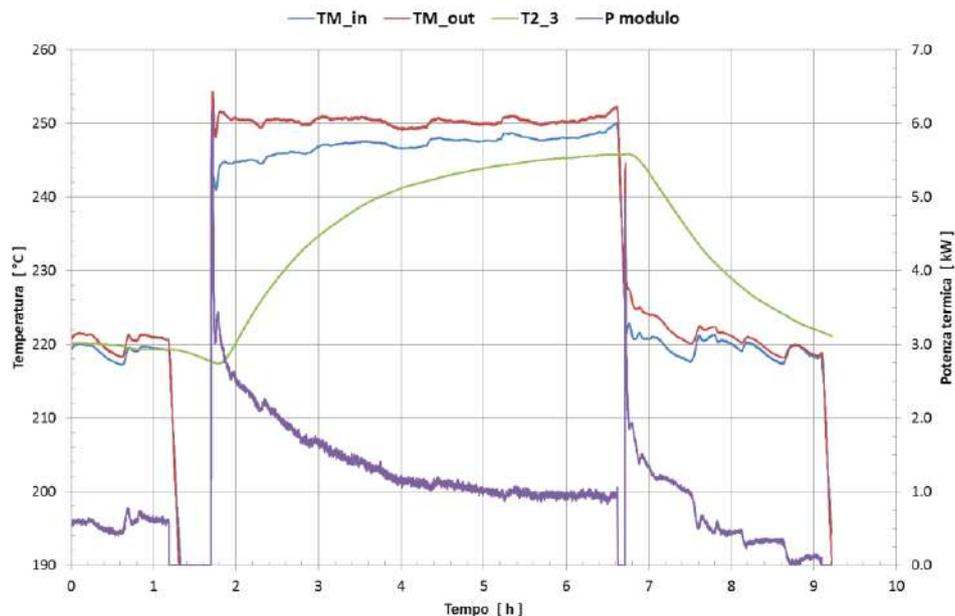


Figura 52: Prova 4. Potenza termica del modulo

Durante la fase di caricamento del modulo la potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è massima all'inizio, circa 3.5 kW (escludendo il picco iniziale), per ridursi con l'aumento della temperatura del modulo fino a circa 970 W nella parte terminale.

In Figura 25 e in Figura 53 sono riportate sia la potenza termica durante la fase di carica e scarica, sia la potenza netta immagazzinata dal calcestruzzo durante la fase di carica.

La non perfetta regolazione della temperatura dell'olio in ingresso al modulo, la TM_{in} , influisce negativamente sull'andamento della potenza termica scaricata.

In Figura 54 è mostrato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio, quella effettivamente caricata nel modulo e quella scaricata dal modulo.

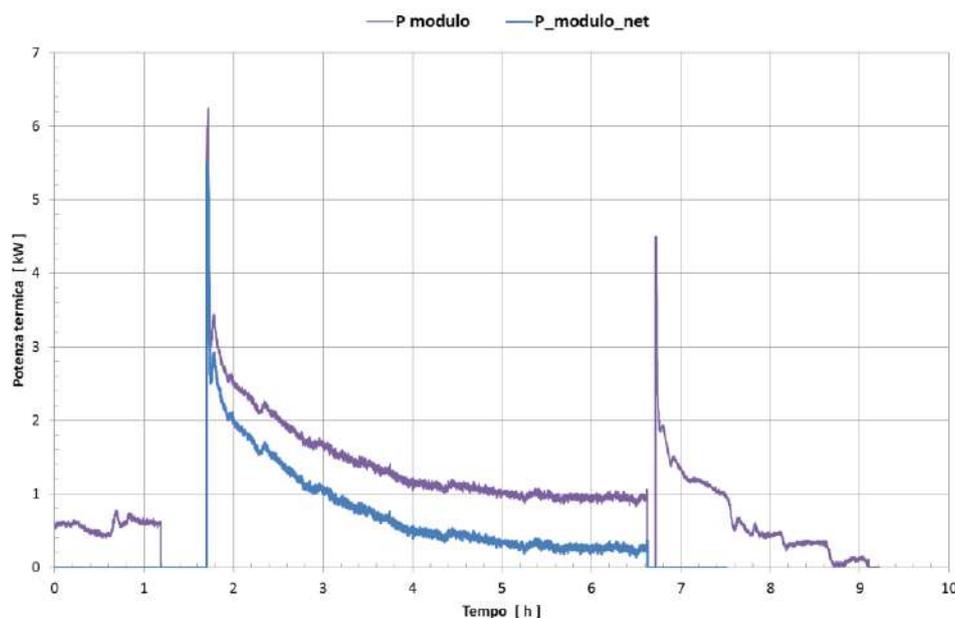


Figura 53: Prova 4. Confronto potenza termica del modulo

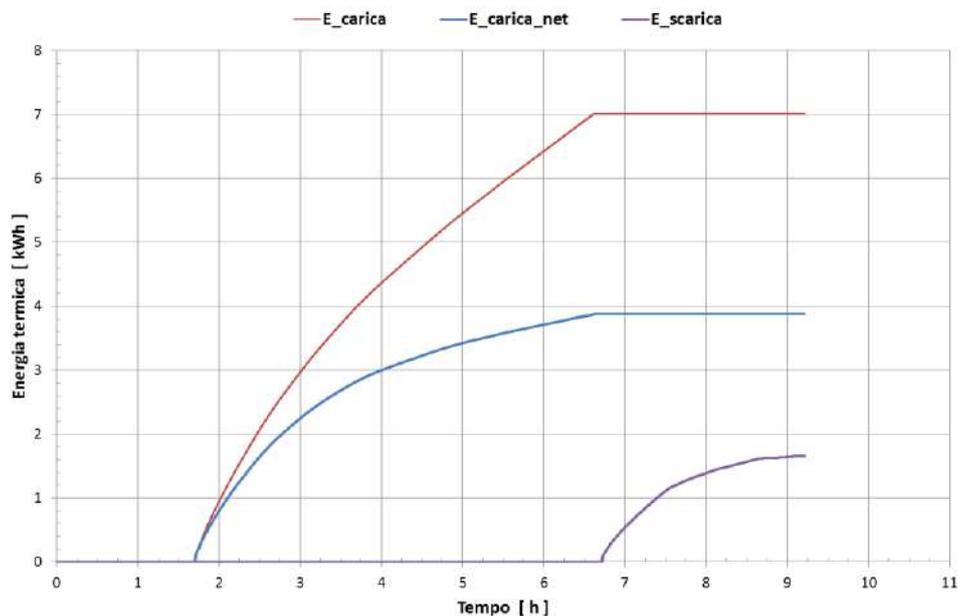


Figura 54: Prova 4. Energia termica

L'integrale dell'energia trasferita dall'olio è pari a 7.02 kWh mentre l'integrale dell'energia caricata nel modulo è 3.87 kWh, con un'efficienza di caricamento di circa il 55%.

L'energia scaricata dal modulo è pari a circa 1.66 kWh. L'efficienza del sistema di accumulo, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, è in questo caso circa il 43%. Questo valore limitato è sicuramente da attribuire a un non perfetto controllo della TT-101, che influisce sulla temperatura dell'olio in ingresso al modulo, la TM_{in} , la quale fa variare la potenza asportata dal modulo (Figura 53).

3.1.4 Confronto tra le prove a 250°C

Sulla base dei risultati sperimentali sopra descritti è possibile verificare se i test ripetuti di riscaldamento e raffreddamento del modulo, anche se limitati in numero, abbiano prodotto modifiche nella zona di contatto tra tubo e calcestruzzo, alterando lo scambio termico tra i due.

A tal fine è stato operato un confronto tra l'andamento della temperatura media del modulo, delle potenze termiche nelle due fasi e delle relative energie assorbite dal modulo. Poiché le scale temporali delle varie prove sono leggermente diverse, per l'analisi dei risultati è stato utilizzato come zero temporale l'inizio della fase di caricamento.

In Figura 55 è mostrato il confronto della temperatura del calcestruzzo nella sezione mediana, la T2_3, che può essere considerata come la temperatura media del modulo.

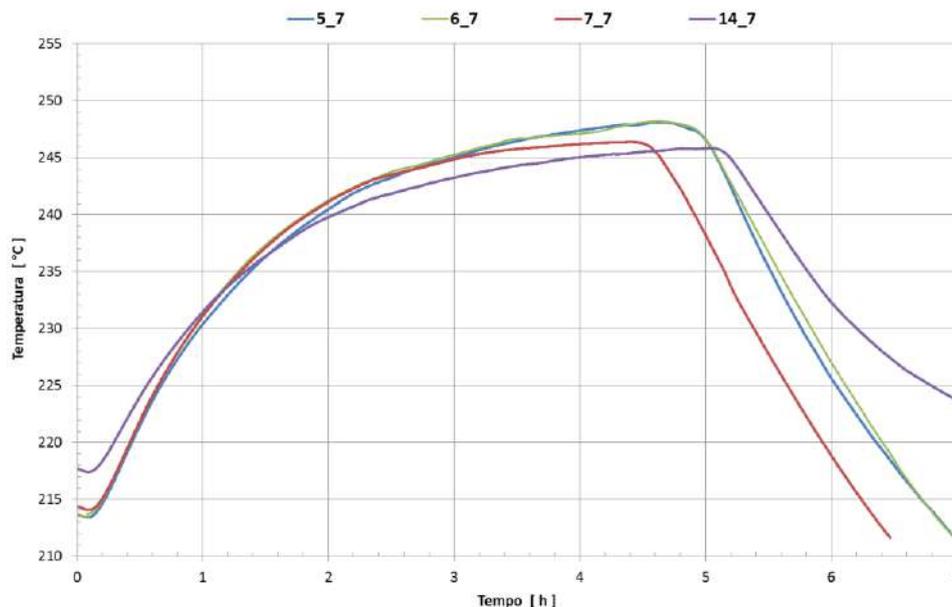


Figura 55: Prova a 250°C: confronto temperatura media modulo

Nella fase di caricamento, si osserva come le temperature nelle prime due prove (5_7 e 6_7) sono praticamente coincidenti, con una temperatura massima raggiunta di 248.2°C. La prova 3 (7_7) risulta sovrapponibile alle altre due fino a circa 3 h e poi si scosta leggermente raggiungendo alla fine del caricamento una temperatura leggermente inferiore (246.4°C).

Maggiori differenze si notano nella prova 4 (14_7), in cui si parte da una temperatura superiore (circa 218°C invece che circa 214°C), arrivando comunque a una temperatura finale simile (245.8°C).

Le differenze potrebbero essere dovute all'andamento della temperatura di ingresso del modulo, TM_{out} , che è mostrata in Figura 56.

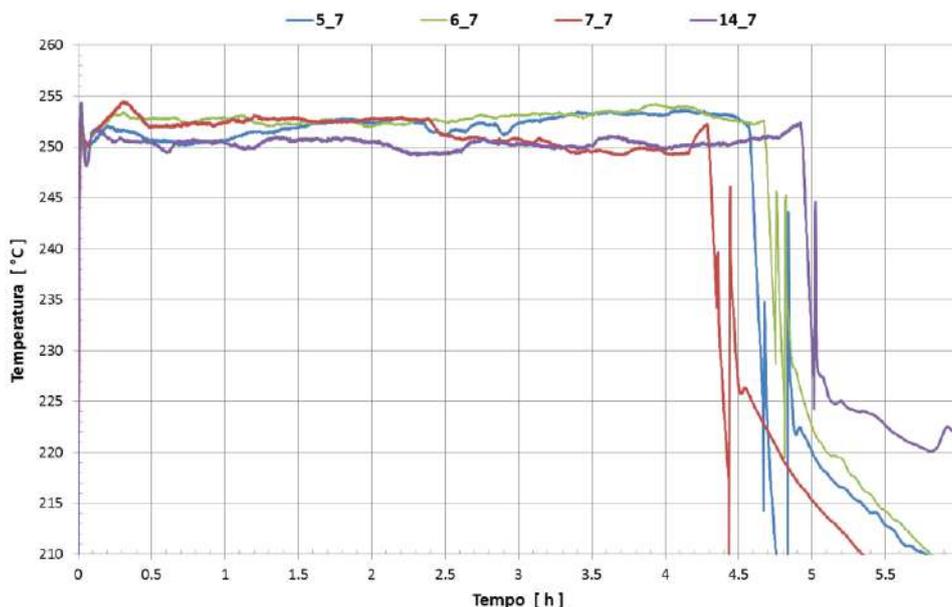


Figura 56: Prova a 250°C: confronto temperatura ingresso modulo

Infatti, per quanto riguarda la prova 3 (7_7), lo scostamento dalle prime due prove dopo circa 3 ore sembra dovuto ad una riduzione di circa 3°C della temperatura di ingresso al modulo. Anche per la

prova 4, la differenza nella variazione delle temperatura del modulo è imputabile ad una TM_{out} più bassa, ma stabile intorno a $250^{\circ}C$.

Se si analizza l'energia termica trasferita dall'olio al calcestruzzo (Figura 57) e la sua potenza (Figura 58) e la differenza di temperatura dell'olio in ingresso/uscita dal modulo stesso (Figura 59), si rileva che le prove 2 (6_7), 3 (7_7) e 4 (14_7) presentano un incremento molto simile mentre per la prova n. 1 l'incremento è più basso.

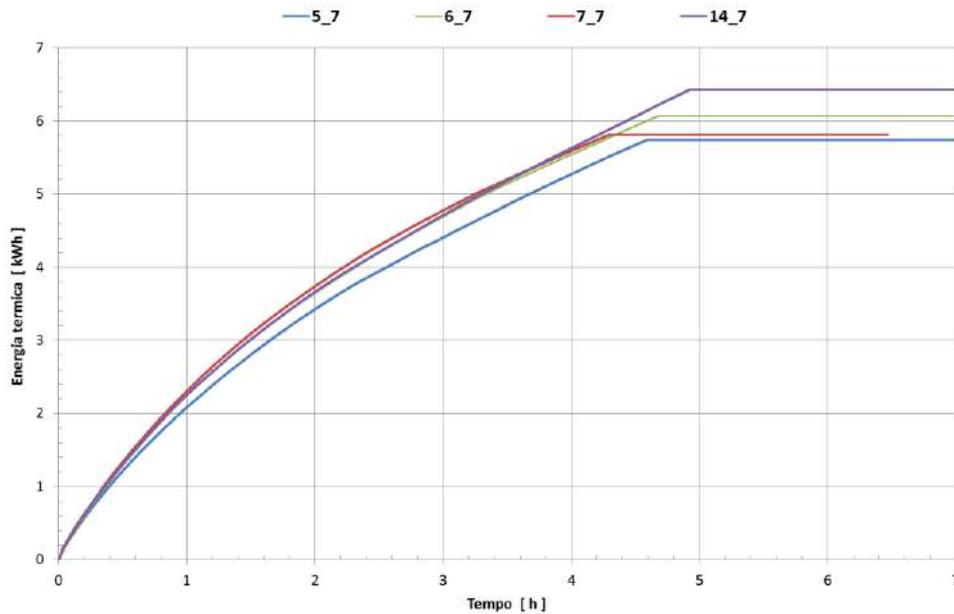


Figura 57: Prova a $250^{\circ}C$: confronto energia trasferita dall'olio

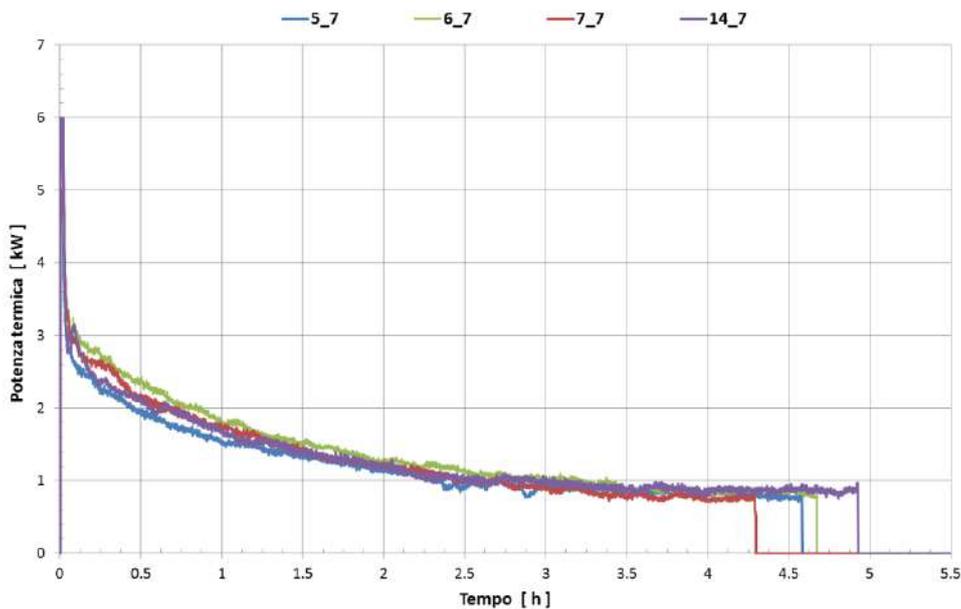


Figura 58: Prova a $250^{\circ}C$: confronto potenza termica trasferita dall'olio

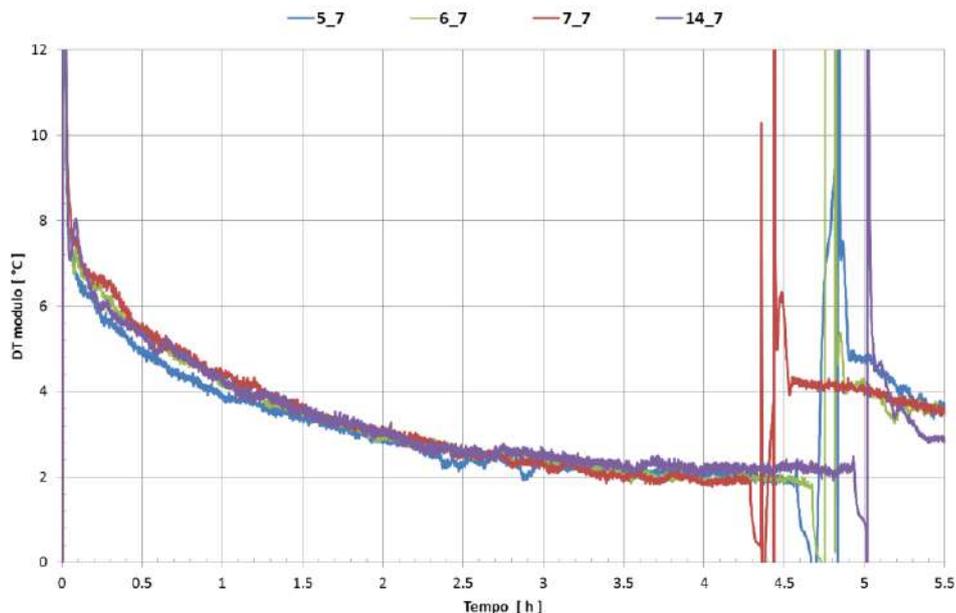


Figura 59: Prova a 250°C: confronto DELTA T nel modulo

L'energia effettivamente accumulata nel modulo, calcolata sottraendo all'energia trasferita dal fluido al calcestruzzo le perdite termiche verso l'esterno, è mostrata in Figura 60.

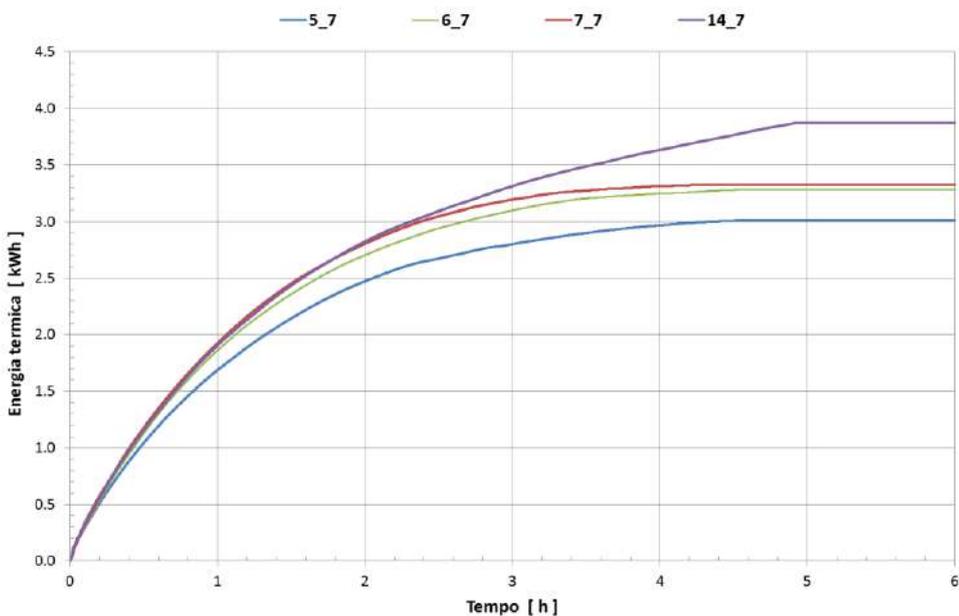


Figura 60: Prova a 250°C: confronto energia accumulata nel modulo

Il confronto dell'energia ceduta dal calcestruzzo all'olio nella fase di scarica è invece mostrato in Figura 61. La notevole differenza della prova 4 (14_7) rispetto alle altre tre è legata al diverso andamento della temperatura dell'olio in ingresso al modulo, la TM_{in} , nella fase di scarica.

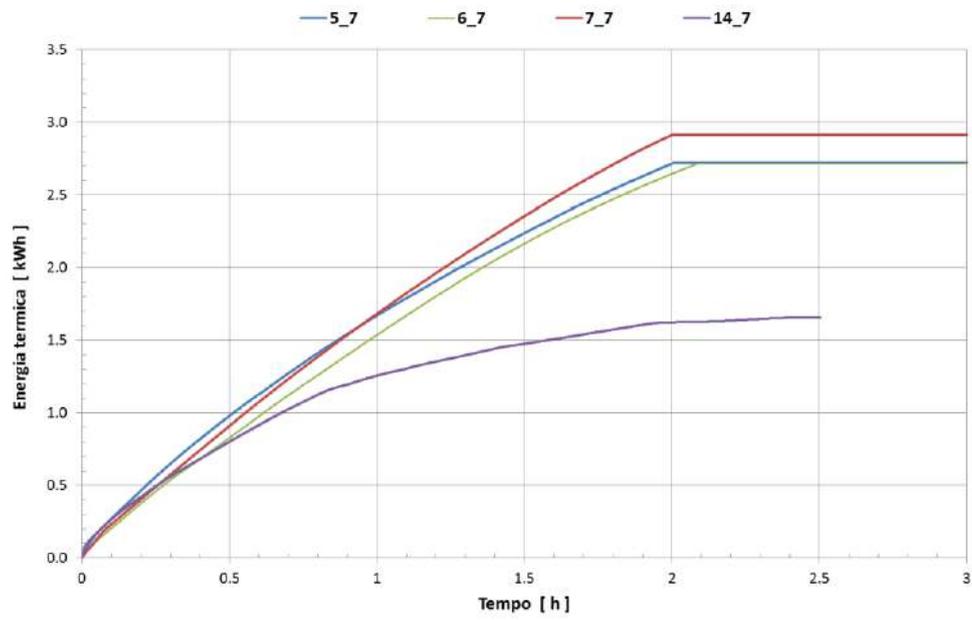


Figura 61: Prova a 250°C: confronto energia scaricata dal modulo

3.2 Prove a 280°C

Nelle prime tre prove precedenti è risultato difficile controllare, durante la fase di scaricamento, la temperatura dell'olio in ingresso al modulo, la TM_in, poiché lo scambiatore a fascio tubiero E-102 era troppo potente e raffreddava velocemente l'olio, come descritto per la Prova 4 nella precedente sezione. L'impianto è stato quindi modificato drenando l'acqua dal circuito secondario e usando l'aria per il raffreddamento, come già descritto. L'efficacia di questo sistema è stata verificata ed è stato quindi utilizzato in tutte le successive prove a 280°C, oltre che nella Prova 4 a 250°C.

La procedura di queste prove per i settaggi di temperatura e portata rispecchia quella delle prove a 250 °C, con le seguenti differenze:

Stato iniziale dell'impianto:

Il set-point della temperatura TT-101 è pari a 250°C.

Fase di riscaldamento olio:

Il set-point della temperatura TT-101 è impostato a 285°C (5°C al di sopra della temperatura di caricamento), con rampa di salita di 20°C/h.

Fase di caricamento modulo:

Il set-point della TT-101 viene impostato a 280°C.

La fase termina quando la temperatura media del modulo, la T2_3, si è stabilizzata avvicinandosi ai 280°C; la durata è di circa 4 h.

Fase di raffreddamento olio:

Il set-point della temperatura TT-101 è impostato a 250°C. La fase termina quando la temperatura TT-101 raggiunge il valore di 250°C; la durata è di circa 5 minuti.

Fase di scaricamento modulo:

Il set-point della TT-101 viene mantenuto a 250°C. La fase termina quando la temperatura del modulo è ritornata nelle condizioni iniziali di 250°C; la durata è di circa 2 h.

Al termine della prova, la temperatura del modulo viene stabilizzata a 250°C per ripristinare lo stato iniziale prima di una nuova prova.

3.2.1 Prova 1: caricamento a 280 °C e scaricamento a 250 °C

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo sono mostrate in Figura 62, in cui sono identificate le quattro fasi della prova.

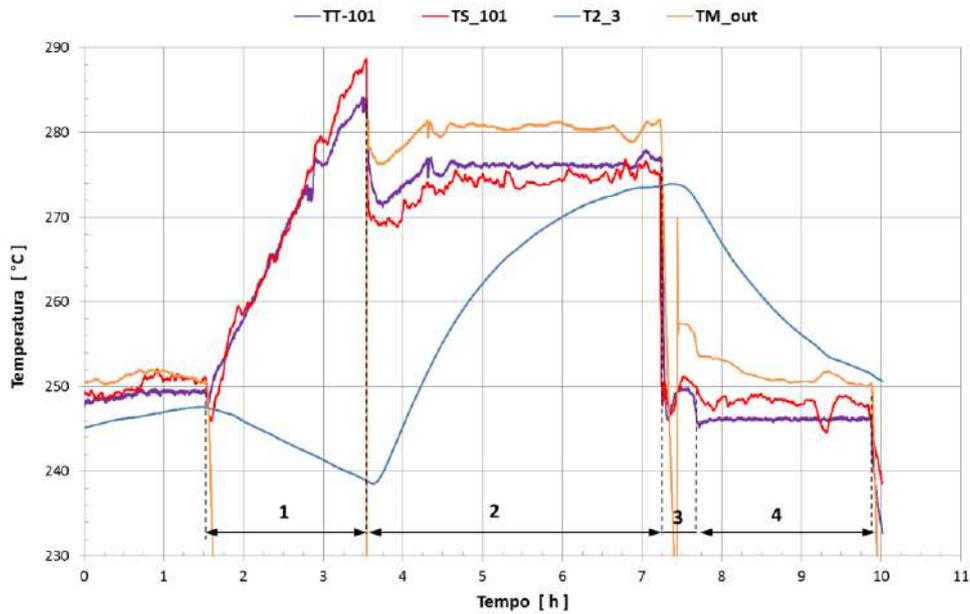


Figura 62: Prova 1 a 280 °C. Temperature olio e modulo

La prova parte con il modulo in condizioni stazionarie (temperatura media pari a 248°C) mentre tutto l’olio presente nel circuito ha temperatura pari a circa 251°C.

Nella Figura 63 è mostrato il dettaglio della fase di riscaldamento dell’olio.

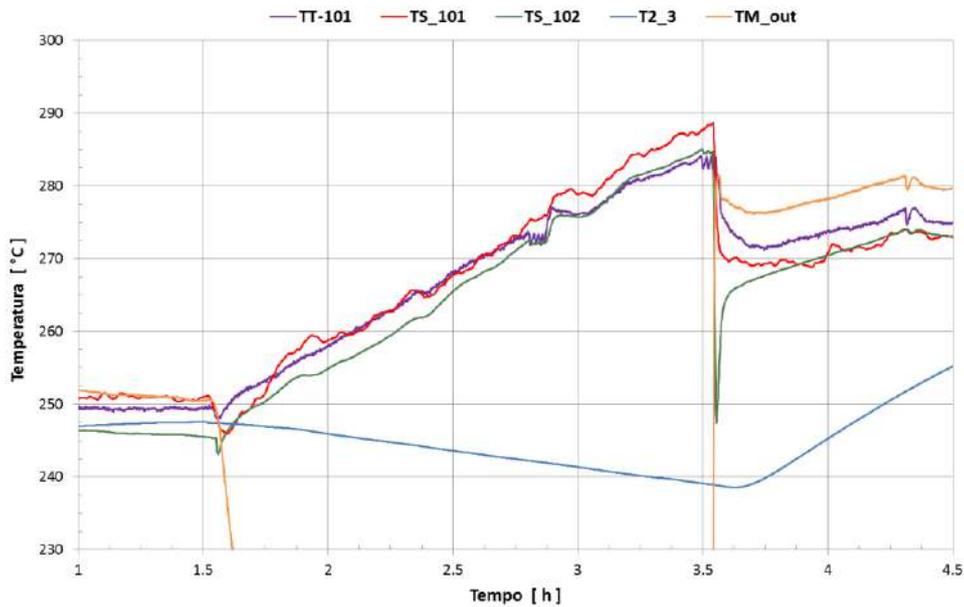


Figura 63: Prova 1. Dettaglio riscaldamento a 280°C

Il set-point termico è raggiunto in 1 ora e 55 minuti. Durante la fase di riscaldamento dell’olio, il modulo si raffredda di circa 9°C, passando da 247.5°C a 238.5°C, con un rateo di circa 4.7°C/h.

In Figura 64 è mostrato il dettaglio della fase di caricamento del modulo.

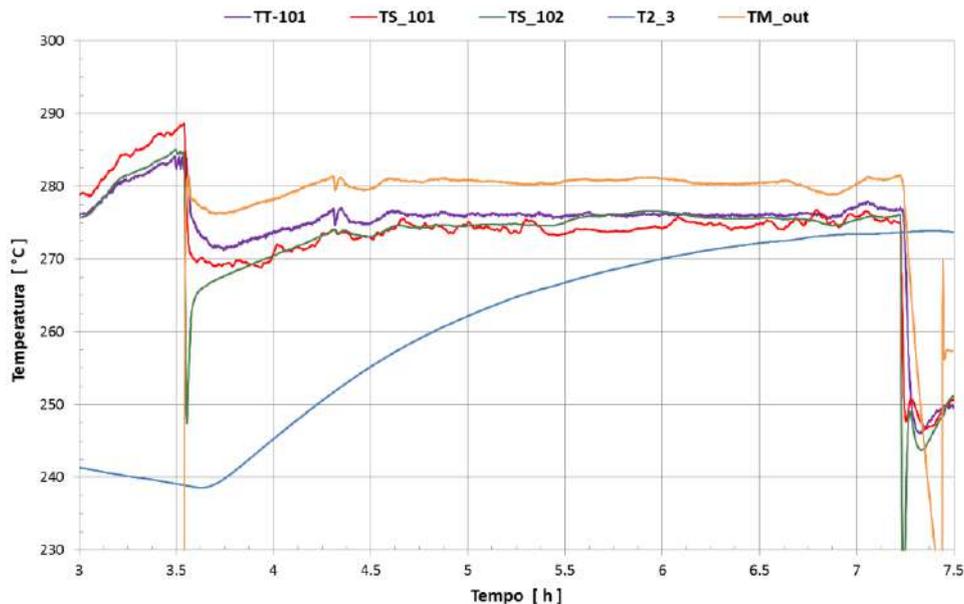


Figura 64: Prova 1 a 280 °C. Dettaglio del caricamento modulo

Quando si attiva la circolazione nel modulo, la temperatura in ingresso al modulo (TM_out-101) si abbassa di circa 4°C ed il set-point viene ripristinato in circa 40 minuti.

Il caricamento del modulo prosegue per circa 3 ore e 45 minuti e la sua temperatura media raggiunge un valore di circa 274°C.

Il dettaglio della fase di raffreddamento olio è mostrato nella Figura 65, mentre in Figura 66 è mostrata la fase di scaricamento modulo.

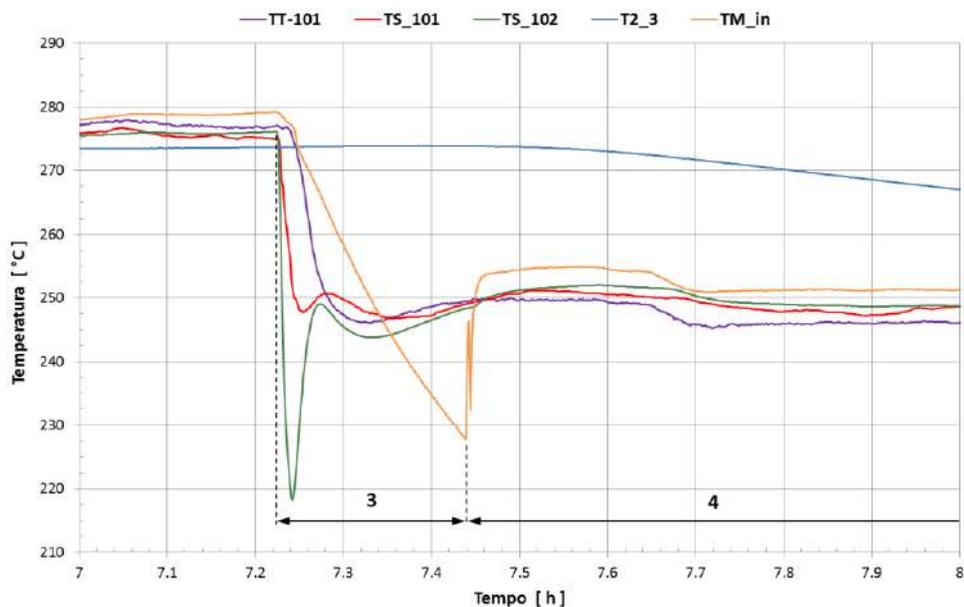


Figura 65: Prova 1 a 280 °C. Dettaglio raffreddamento olio

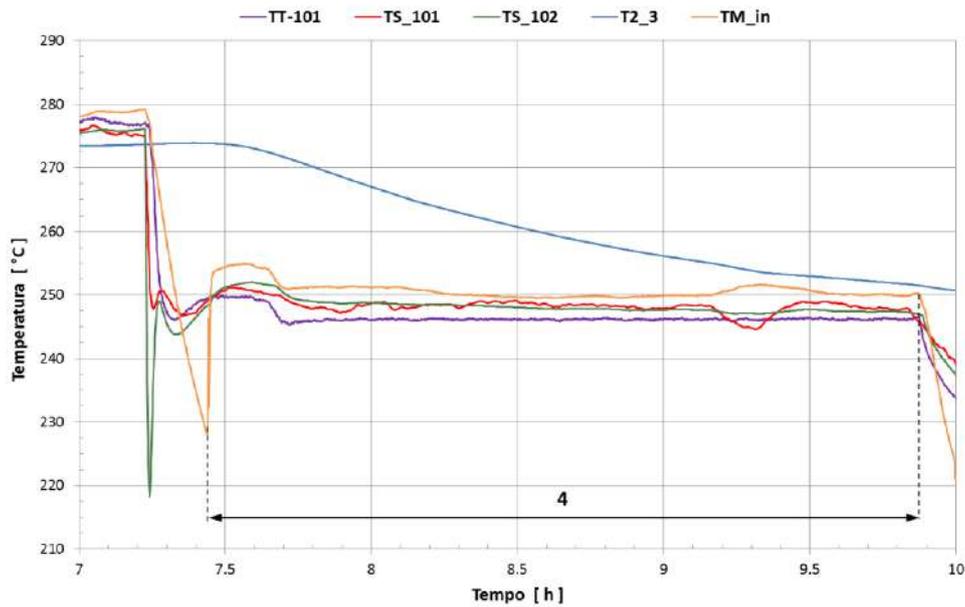


Figura 66: Prova 1 a 280 °C. Dettaglio dello scaricamento modulo

La fase di raffreddamento dell'olio dura in questo caso circa 13 minuti.

In Figura 67 è riportata la temperatura media del calcestruzzo e dell'olio in ingresso e uscita dal modulo, insieme alla potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo (fase di caricamento) o dal calcestruzzo all'olio (fase di scaricamento).

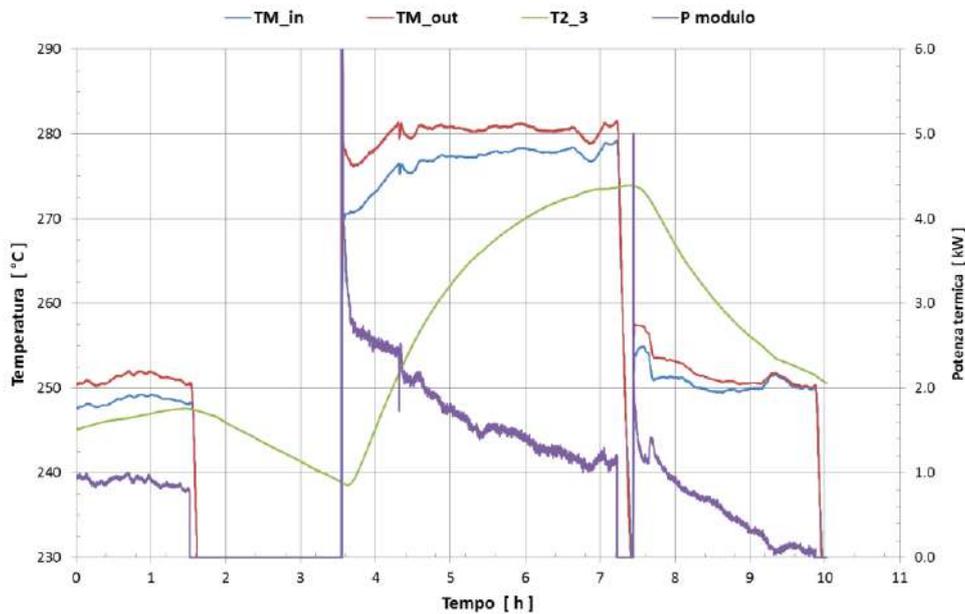


Figura 67: Prova 1 a 280 °C. Potenza termica del modulo

Nella prima parte della prova (tratto iniziale del grafico), la potenza termica serve a compensare le perdite termiche verso l'ambiente esterno mantenendo il modulo a circa 248°C; la dispersione termica è di circa 900 W.

Durante la fase di caricamento del modulo la potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è massima all'inizio, circa 4 kW (escluso il picco iniziale dovuto alla riattivazione della circolazione nel modulo), per ridursi con l'aumento della temperatura del modulo fino a circa 1100 W .

Sottraendo le dispersioni termiche del modulo (Figura 26) alla potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo, si ottiene la potenza netta assorbita dal calcestruzzo (Figura 68).

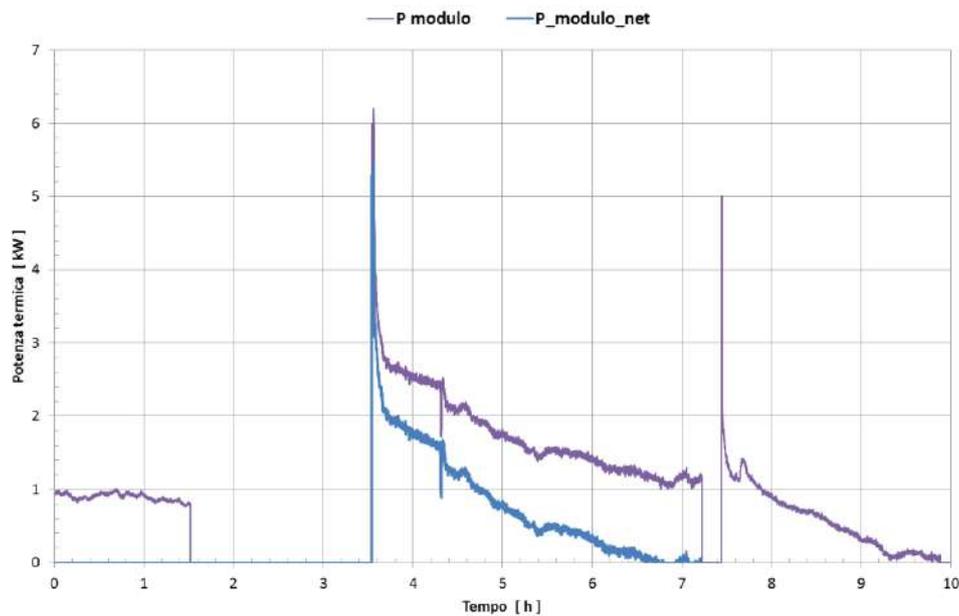


Figura 68: Prova 1 a 280 °C. Confronto potenza termica del modulo

In Figura 69 è mostrato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio, di quella effettivamente caricata nel modulo e di quella scaricata dal modulo.

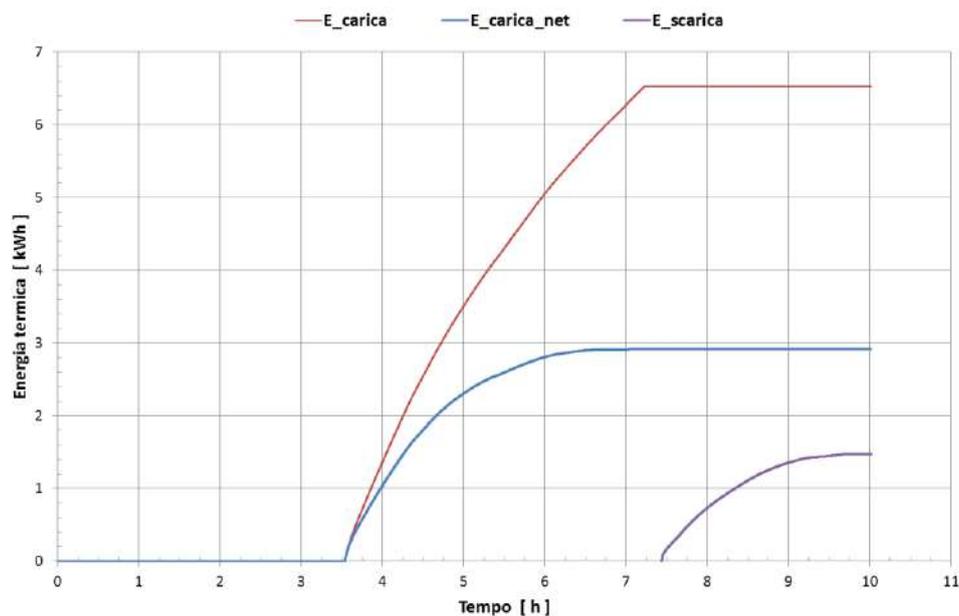


Figura 69: Prova 1 a 280 °C. Energia termica

L'energia trasferita dall'olio al modulo di accumulo è pari a 6.53 kWh, quella caricata nel modulo è pari a 2.91 kWh, con un'efficienza di caricamento di circa il 45%; questo valore è strettamente legato

alla coibentazione del modulo, che determina le dispersioni termiche verso l'ambiente. L'energia scaricata dal modulo è invece pari a 1.48 kWh. Il sistema di accumulo presenta quindi un'efficienza, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, pari a circa il 51%.

L'intervallo di temperatura tra la carica e la scarica del presente test e della Prova 4 a 250°C coincidono (30°C); i risultati possono quindi essere confrontati per valutare l'effetto dell'aumento della temperatura di lavoro del modulo da 250°C a 280°C.

Il confronto tra l'energia trasferita dal fluido al calcestruzzo nel presente test e nella Prova 4 è evidenziato in Figura 70.

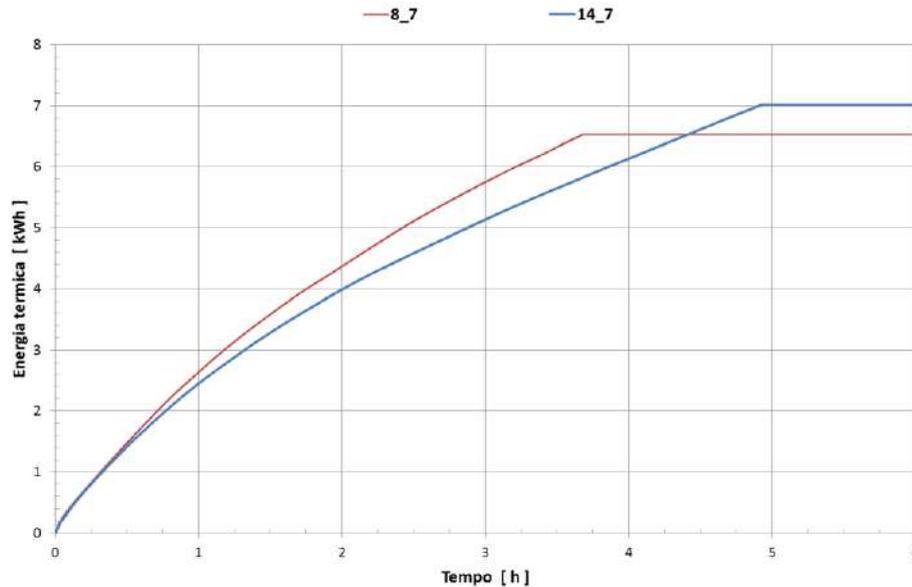


Figura 70: Energia termica: confronto tra la Prova 1 a 280 °C (8_7) e la Prova 4 a 250 °C (14_7)

La velocità di salita è maggiore nella prova a 280°C, in quanto la temperatura e la portata sono maggiori rispettivamente del 12% e del 10.5%, e questo accresce il coefficiente di scambio termico tra olio e tubo e tra tubo e calcestruzzo.

Il valore medio del coefficiente di scambio interno ai tubi, calcolato con la correlazione di Gnielinski, è di 2310 W/m²-K nella prova a 250°C, mentre è di 3384 W/m²-K nella prova a 280°C, con un aumento del 46%.

Se si confronta invece l'energia effettivamente immagazzinata nel calcestruzzo (Figura 71) l'andamento è diverso in quanto pesano molto le dispersioni termiche.

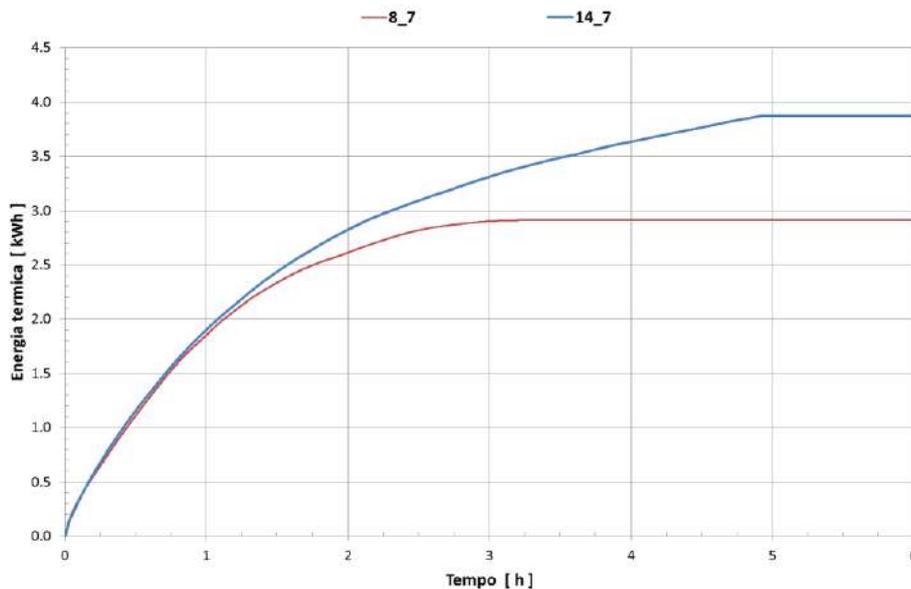


Figura 71: Energia termica accumulata: confronto tra Prova 1 a 280 °C (8_7) e Prova 4 a 250 °C (14_7)

Come conseguenza, l'energia scaricabile dal modulo si riduce di circa l'11% (Figura 72).

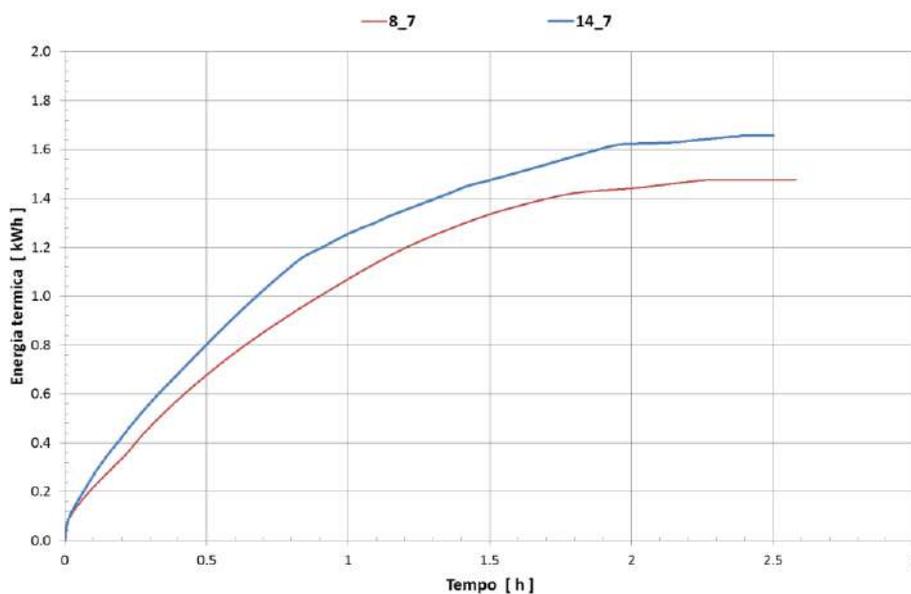


Figura 72: Energia termica scaricata: confronto tra Prova 1 a 280 °C (8_7) e Prova 4 a 250 °C (14_7)

L'andamento delle temperature interne ed esterne del modulo di accumulo è mostrato rispettivamente in Figura 73 e Figura 74.

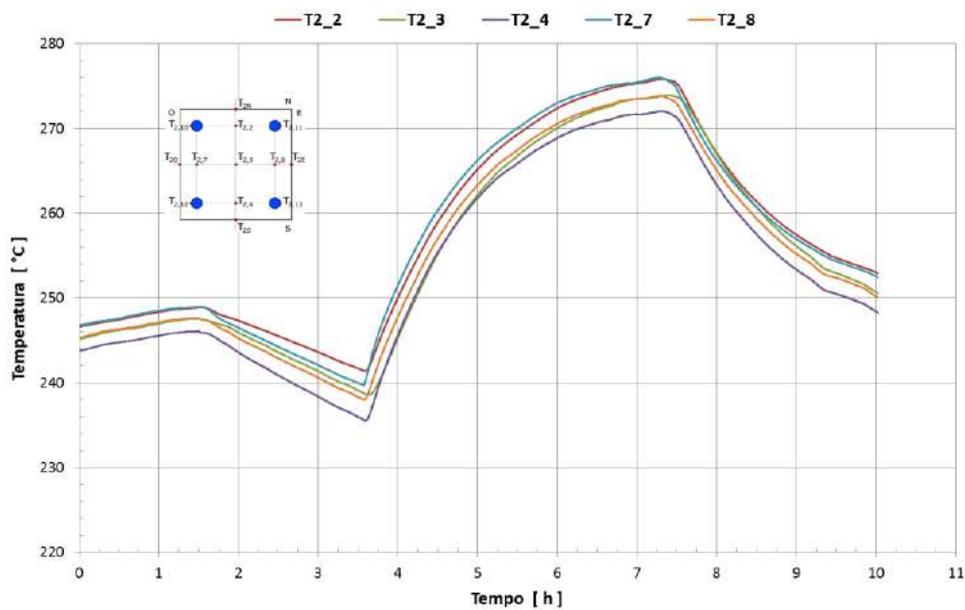


Figura 73: Prova 1 a 280 °C (8_7). Temperature interne del calcestruzzo nella sezione mediana

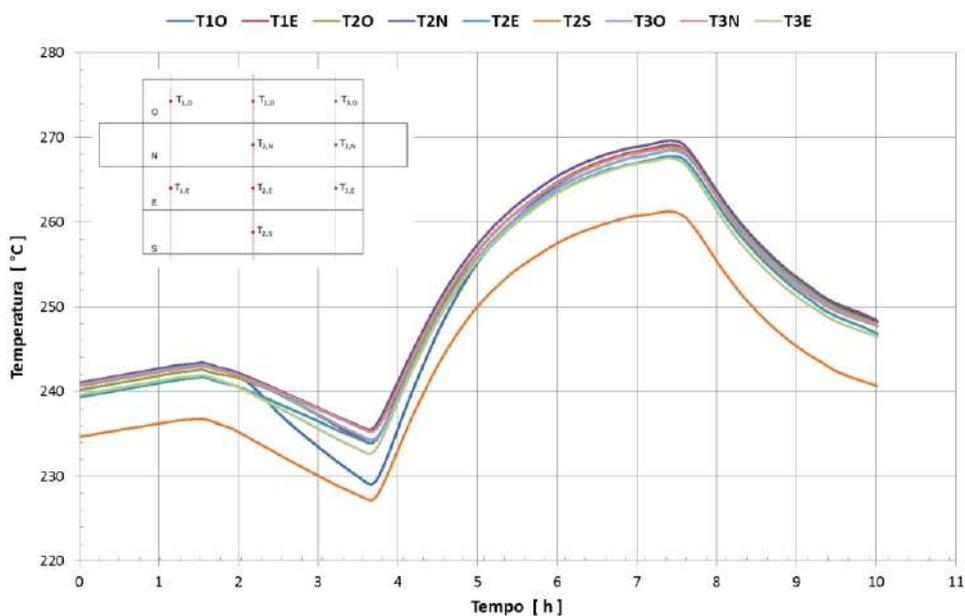


Figura 74: Prova 1 a 280 °C (8_7). Temperature sulle facce esterne del calcestruzzo

La T2_3 approssima abbastanza bene la temperatura media del modulo. Le temperature sulla faccia inferiore del modulo (T2_4 e T2_S) sono più basse perché la zona presenta maggiori dispersioni termiche verso l'esterno.

3.2.2 Prova 2: caricamento a 280 °C e scaricamento a 250 °C

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo sono riportate in Figura 75, in cui sono identificate le quattro fasi della prova.

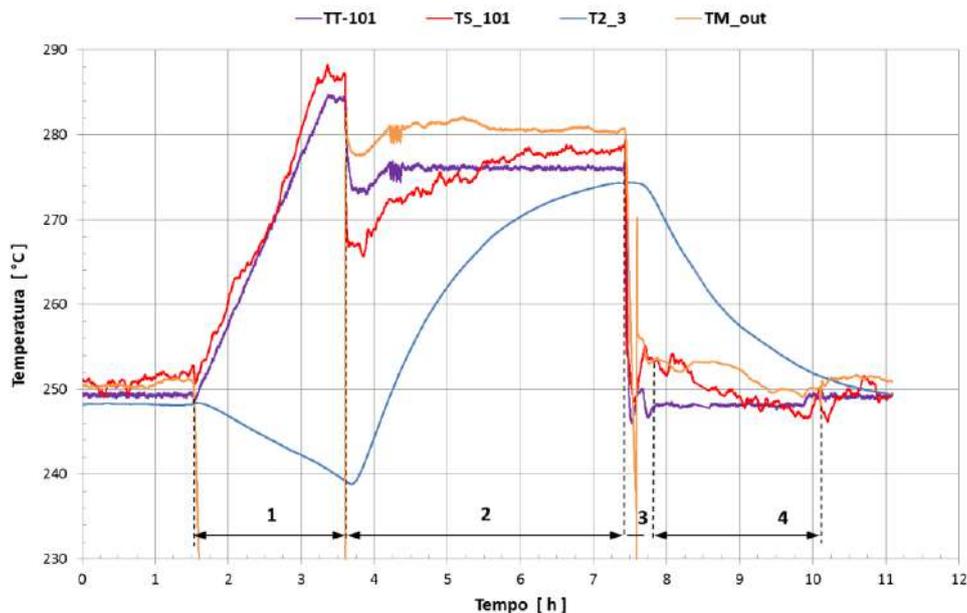


Figura 75: Prova 2 a 280 °C. Temperature olio e modulo.

Il modulo era inizialmente in condizioni stazionarie con una temperatura media di 248°C. Nella Figura 76 è riportato il dettaglio della fase di riscaldamento dell’olio.

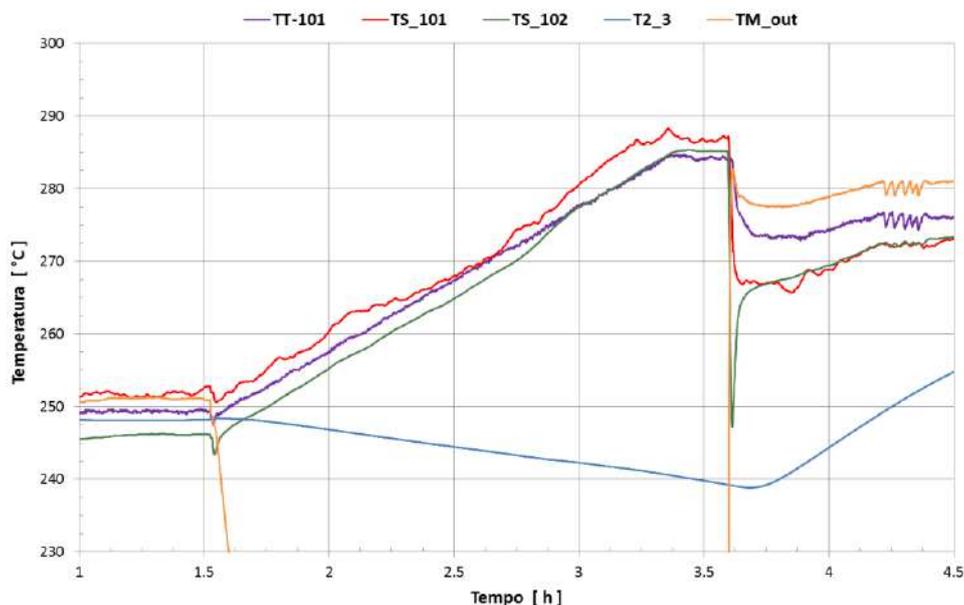


Figura 76: Prova 2 a 280°. Dettaglio riscaldamento olio.

Il set-point è raggiunto in 1 ora 55 minuti, e viene mantenuto per circa 15 minuti. Durante la fase di riscaldamento e mantenimento della temperatura dell’olio, con durata circa 2 ore e 10 minuti, il modulo si raffredda di 9.6°C, da 248.4°C a 238.8°C, con un rateo di circa 4°C/h.

In Figura 77 è mostrato il dettaglio della fase di caricamento del modulo.

Quando si attiva la circolazione nel modulo, la temperatura in ingresso al modulo (TM_out-101) si abbassa di circa 3°C e il set-point viene ripristinato in circa 30 minuti.

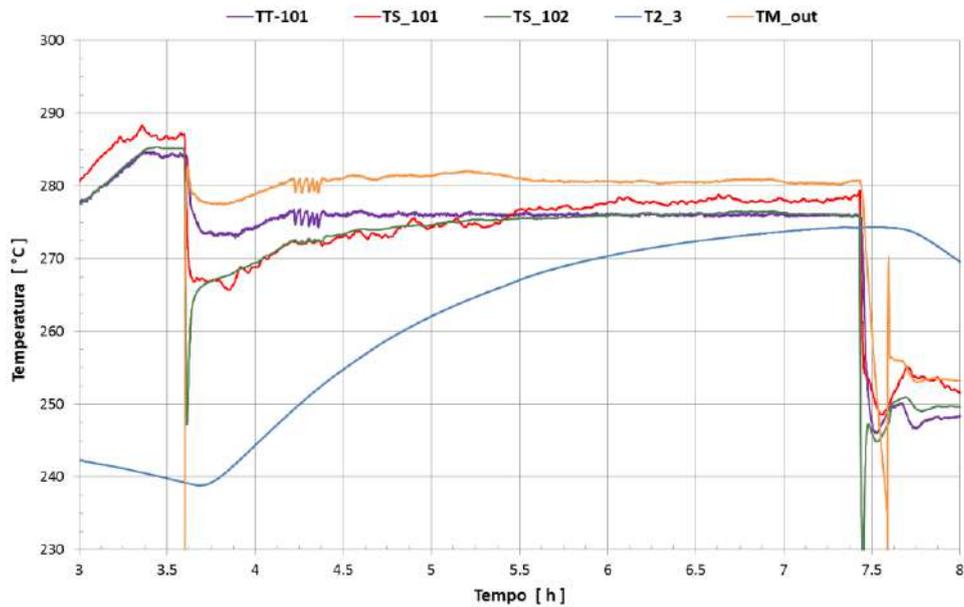


Figura 77: Prova 2 a 280 °C. Dettaglio del caricamento modulo

Il caricamento del modulo prosegue per circa 3 ore e 50 minuti e la sua temperatura media raggiunge un valore di circa 274°C.

Il dettaglio della fase di raffreddamento olio è riportato in Figura 78, mentre in Figura 79 è mostrata la fase di scaricamento modulo.

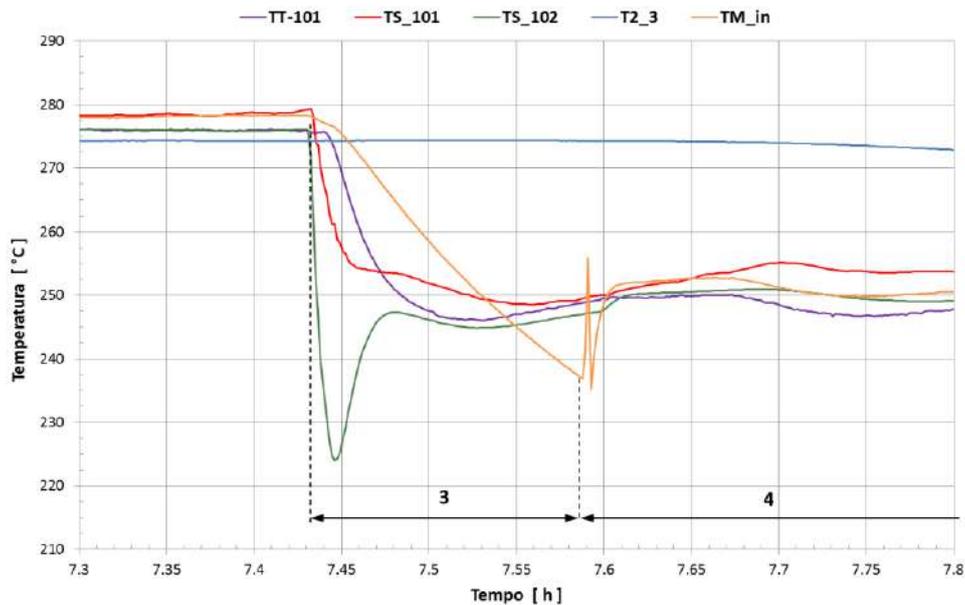


Figura 78: Prova 2 a 280 °C. Dettaglio raffreddamento olio

La fase di raffreddamento dell'olio ha una durata in questo caso di circa 10 minuti.

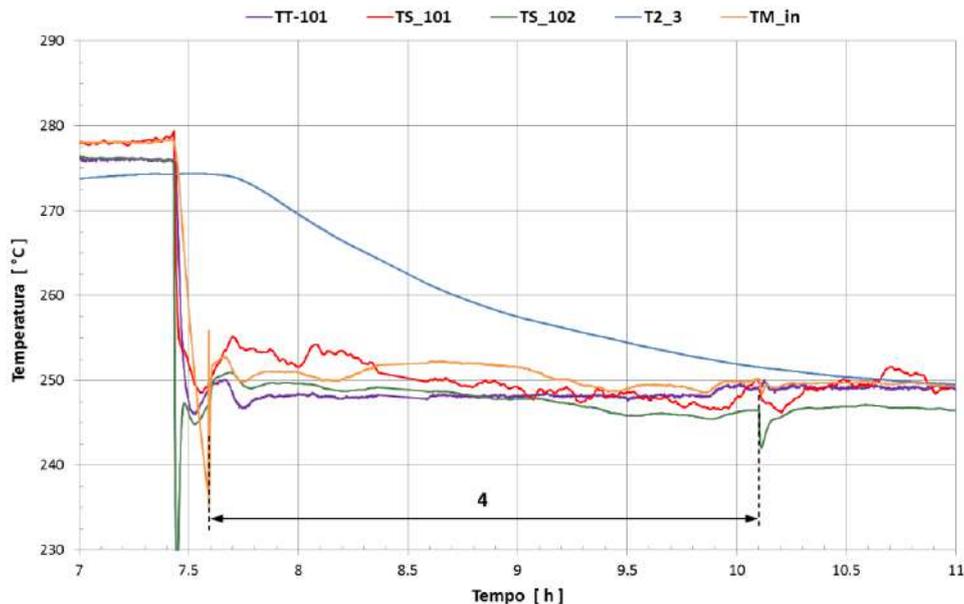


Figura 79: Prova 2 a 280 °C. Dettaglio dello scaricamento modulo

La fase di scaricamento del modulo ha invece una durata di circa 2.5 ore.

In Figura 80, è riportata la temperatura media del calcestruzzo e dell’olio in ingresso e uscita dal modulo, insieme alla potenza termica.

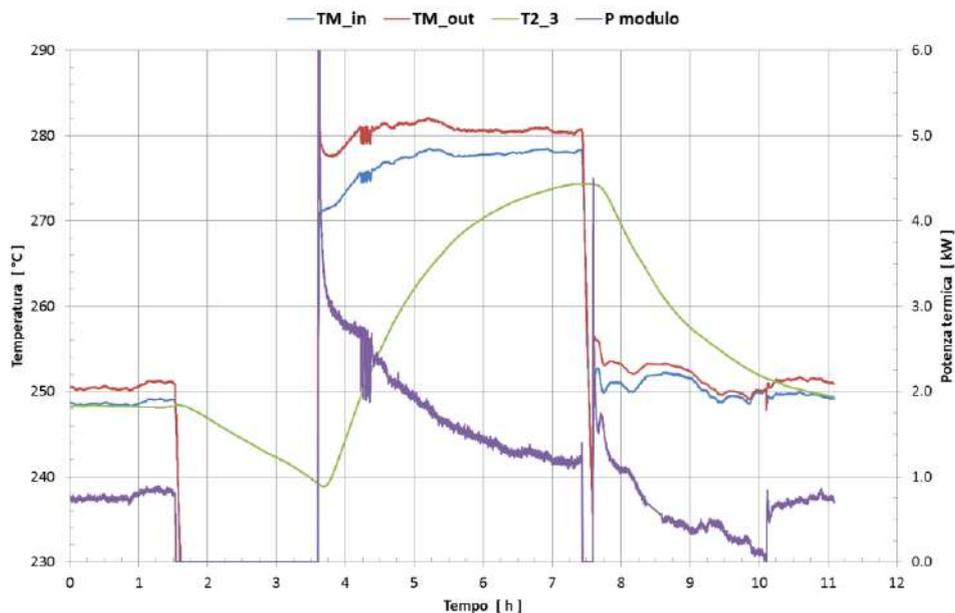


Figura 80: Prova 2 a 280 °C. Potenza termica del modulo

La potenza termica nella fase iniziale, necessaria al mantenimento del modulo a circa 248°C, comporta dispersioni termiche di circa 770 W. Durante la fase di caricamento del modulo la potenza termica trasferita dall’olio al calcestruzzo è massima all’inizio, con valore di circa 5 kW (escluso il picco iniziale), per ridursi con l’aumento della temperatura del modulo fino a circa 1100 W.

La potenza netta assorbita dal modulo è mostrata in Figura 81.

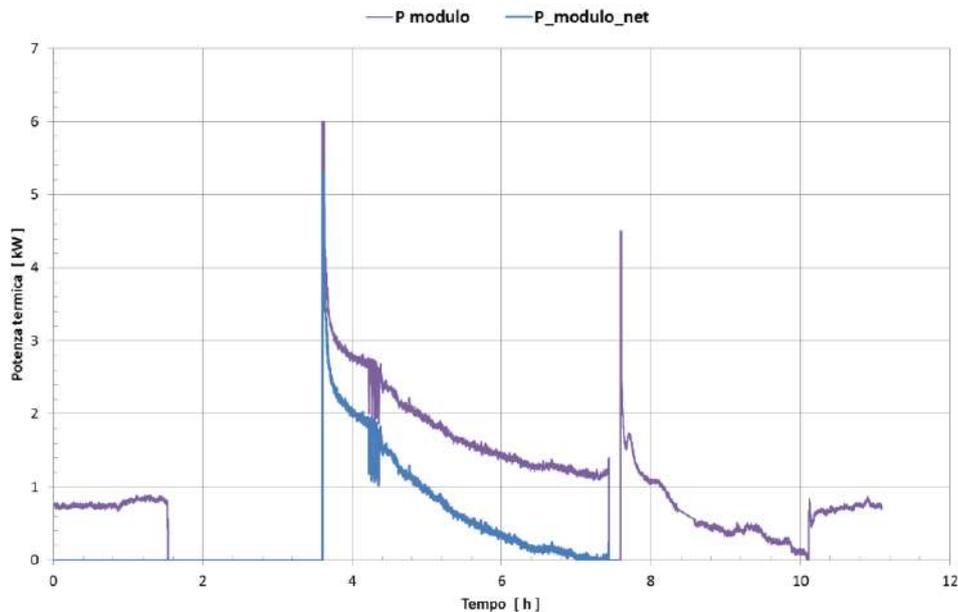


Figura 81: Prova 2 a 280 °C. Confronto potenza termica del modulo

In Figura 82 è evidenziato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio, di quella effettivamente caricata nel modulo e di quella scaricata dal modulo.

L'energia trasferita dall'olio al modulo è pari a 7.12 kWh, mentre quella caricata nel modulo è pari a 3.28 kWh, con un'efficienza di caricamento pari a circa il 46%. L'energia scaricata dal modulo è pari a 1.60 kWh. Il sistema di accumulo presenta quindi un'efficienza, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, pari a circa il 49%.

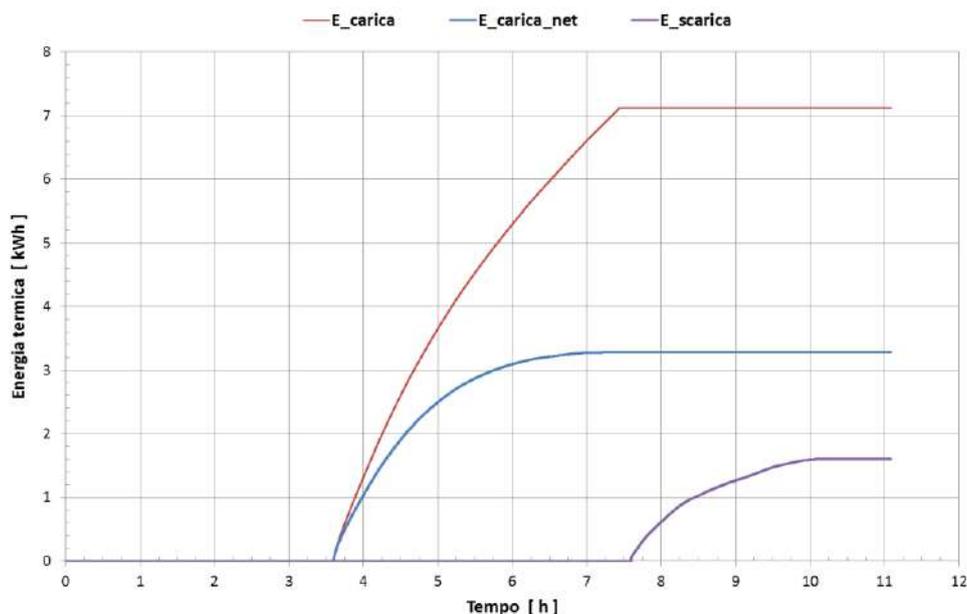


Figura 82: Prova 2 a 280 °C. Energia termica

3.2.3 Prova 3: terzo caricamento a 280 °C e scaricamento a 250 °C

L'andamento delle temperature dell'olio e del modulo sono riportate in Figura 83, in cui sono identificate le quattro fasi della prova.

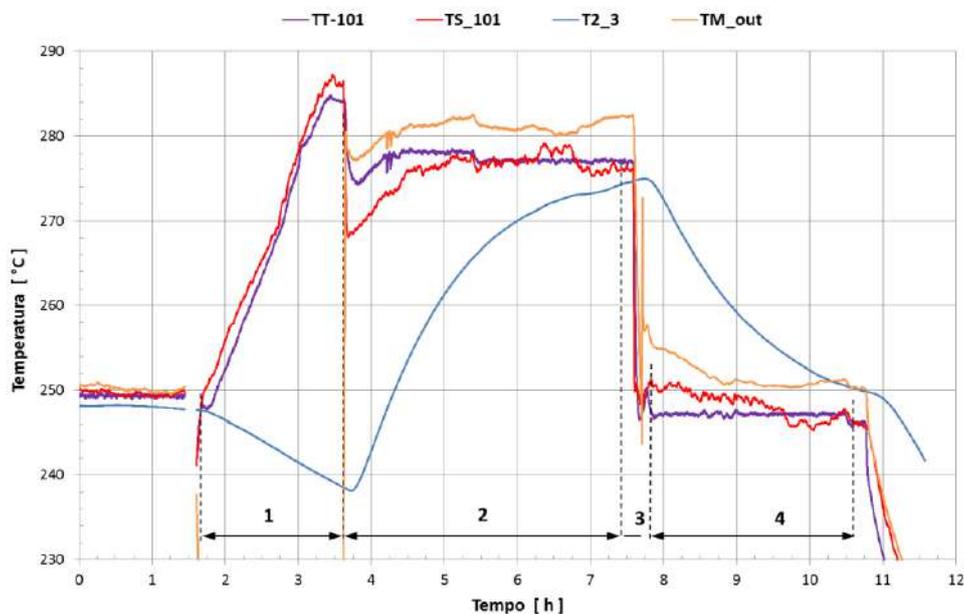


Figura 83: Prova 3 a 280 °C. Temperature olio e modulo.

Il modulo è inizialmente in condizioni stazionarie con una temperatura media di 248°C.

Nella Figura 76 è riportato il dettaglio della fase di riscaldamento dell'olio. Poco prima dell'inizio della fase di riscaldamento si verifica un'interruzione nell'acquisizione dati di circa 11 minuti.

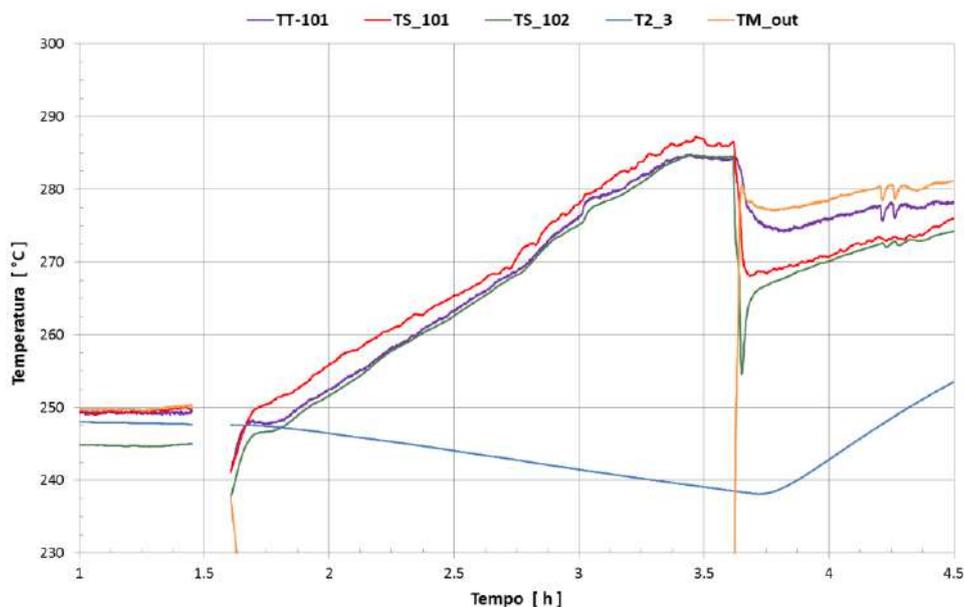


Figura 84: Prova 3. Dettaglio riscaldamento a 280°C

Il set-point è raggiunto in 1 ora 45 minuti, e viene mantenuto per circa 15 minuti.

Durante la fase di riscaldamento e mantenimento della temperatura dell'olio, durata circa 2 ore, il modulo si raffredda di 9.4°C, da 247.6°C a 238.2°C, con un rateo di circa 4.7 °C/h.

In Figura 85 è riportato il dettaglio della fase di caricamento del modulo.

Quando si attiva la circolazione nel modulo, la temperatura in ingresso al modulo (TM_out-101) si abbassa di circa 3°C e il set-point viene ripristinato in circa 30 minuti.

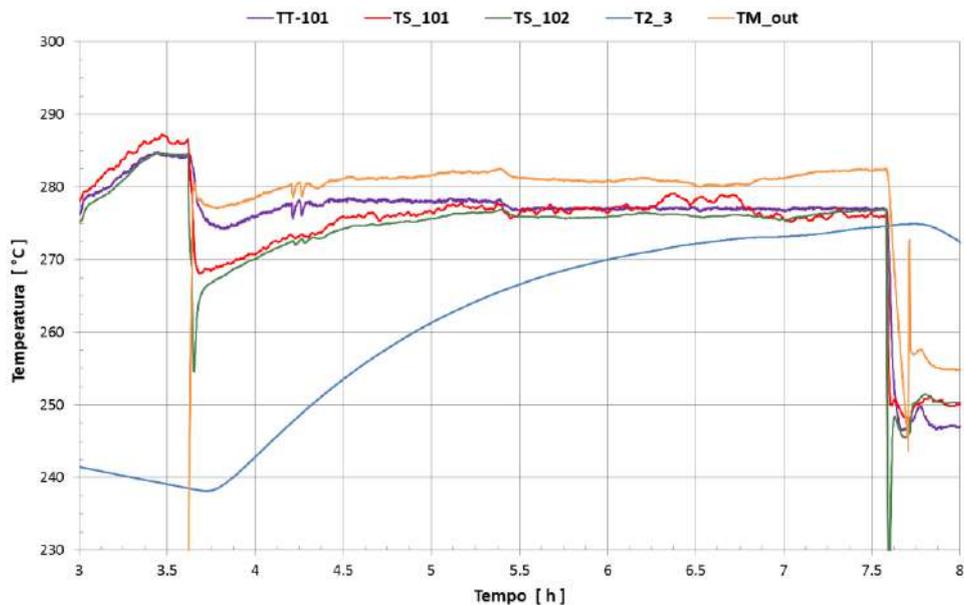


Figura 85: Prova 3 a 280 °C. Dettaglio del caricamento modulo

Il caricamento del modulo ha una durata di circa 4 ore e la temperatura media del modulo raggiunge un valore di circa 275°C.

Il dettaglio della fase di raffreddamento olio è mostrato in Figura 86, mentre in Figura 87 è evidenziata la fase di scaricamento modulo.

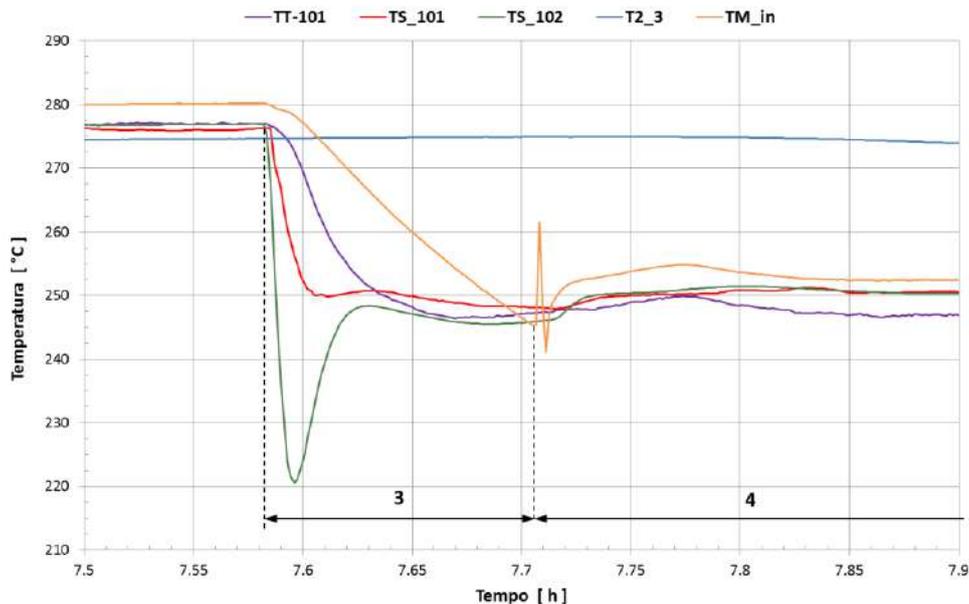


Figura 86: Prova 3 a 280 °C. Dettaglio raffreddamento olio

La fase di raffreddamento dell’olio dura circa 7 minuti.

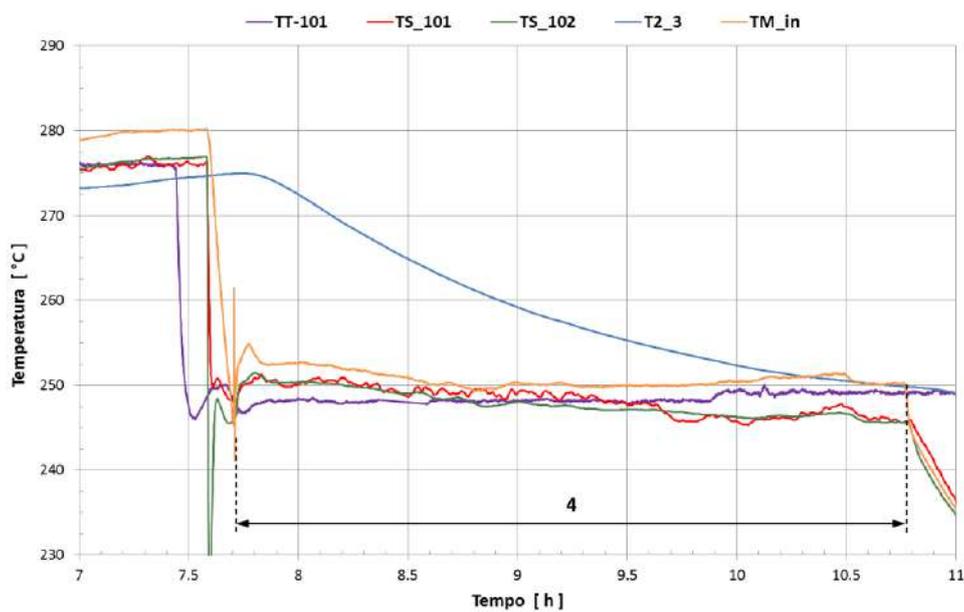


Figura 87: Prova 3 a 280 °C. Dettaglio dello scaricamento modulo

La fase di scaricamento del modulo ha una durata di circa 3 ore. In Figura 88 è mostrata la temperatura media del calcestruzzo e dell’olio in ingresso e uscita dal modulo, insieme alla potenza termica.

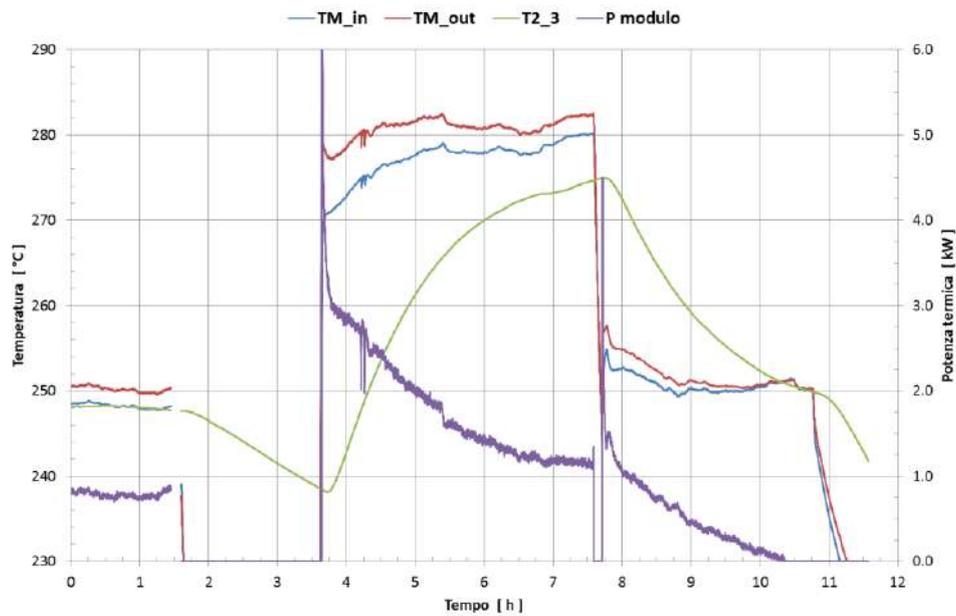


Figura 88: Prova 3 a 280 °C. Potenza termica del modulo

Nella fase iniziale la potenza trasferita serve a compensare le dispersioni termiche (circa 780 W) mantenendo il modulo a circa 248°C.

Durante la fase di caricamento del modulo la potenza termica trasferita dall'olio al calcestruzzo è massima all'inizio, con valore di circa 5 kW (escluso il picco iniziale), per ridursi con l'aumento della temperatura fino a circa 1200 W.

La potenza netta assorbita dal calcestruzzo è mostrata in Figura 81.

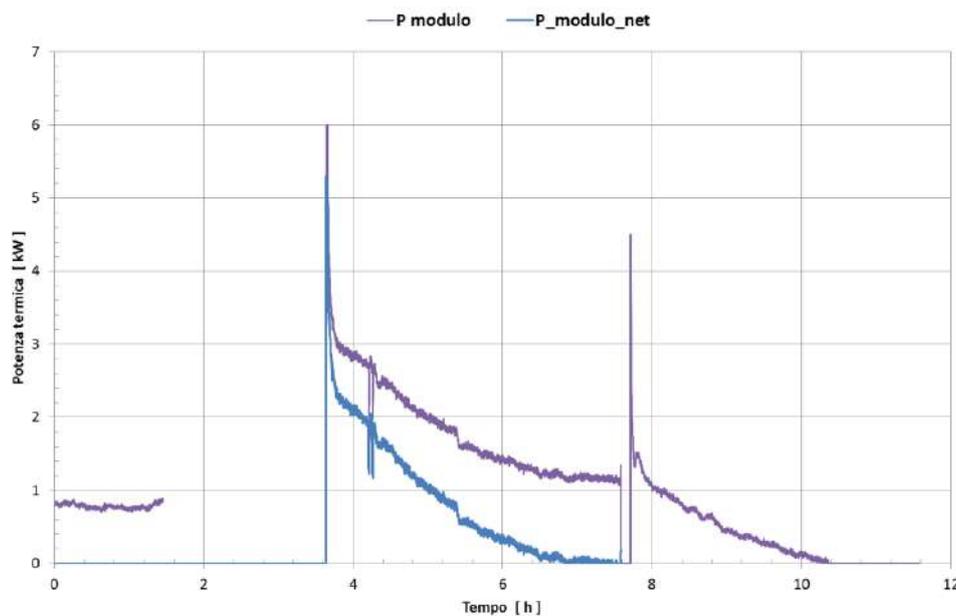


Figura 89: Prova 3 a 280 °C. Confronto potenza termica del modulo

In Figura 90 è evidenziato l'andamento dell'energia trasferita dall'olio, di quella effettivamente caricata nel modulo e di quella scaricata dal modulo.

L'energia trasferita dall'olio è pari a 7.22 kWh, mentre quella caricata nel modulo è pari a 3.28 kWh, con un'efficienza di caricamento di circa il 45%. L'energia scaricata dal modulo è pari a 1.52 kWh. Il sistema di accumulo presenta quindi un'efficienza, intesa come rapporto tra le energie scaricate e caricate, di circa il 46%.

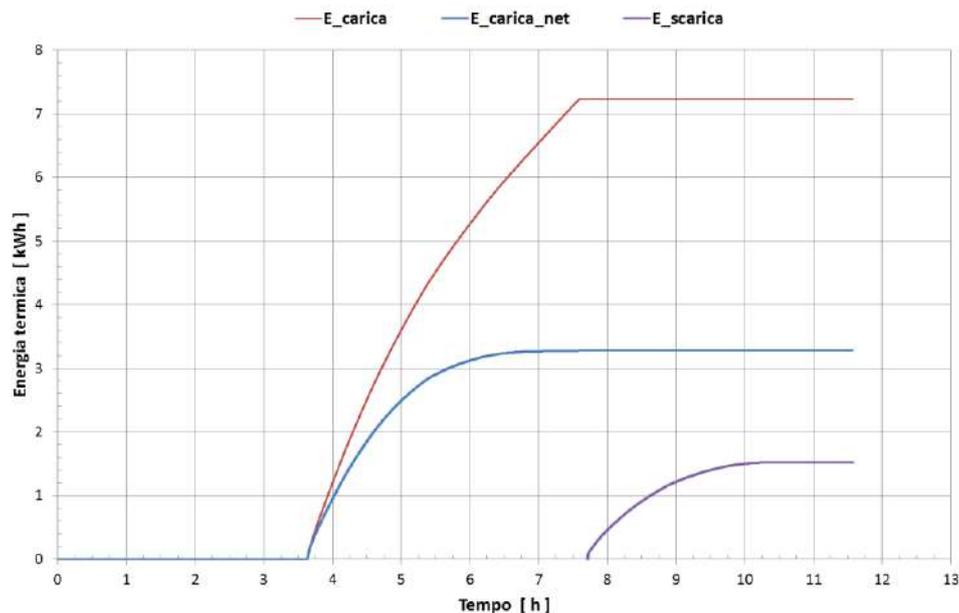


Figura 90: Prova 3 a 280 °C. Energia termica

3.2.4 Confronto prove a 280°C

Sulla base dei risultati sperimentali sopra descritti è possibile verificare se i test ripetuti di riscaldamento e raffreddamento del modulo, anche se limitati in numero, abbiano prodotto modifiche nella zona di contatto tra tubo e calcestruzzo, alterando lo scambio termico tra i due. Pertanto è stato operato un confronto tra l'andamento della temperatura media del modulo, quello delle potenze termiche nelle due fasi di carica e scarica e le relative energie caricate e scaricate. Poiché le scale temporali delle varie prove sono leggermente diverse, per l'analisi dei risultati è stato utilizzato come zero temporale l'inizio della fase di caricamento.

In Figura 91 è mostrato il confronto della temperatura del calcestruzzo nella sezione mediana, la T2_3, che può essere considerata come la temperatura media del modulo.

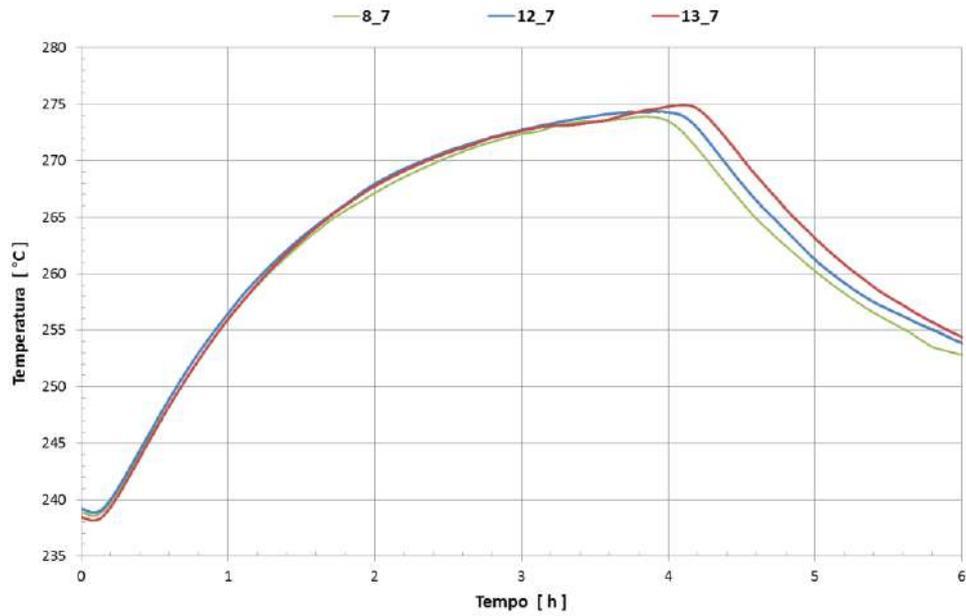


Figura 91: Prova a 280°C: confronto temperatura media modulo

Dalla figura si osserva come le curve siano praticamente sovrapposte; l'unica leggera differenza tra le tre prove è la durata della fase di caricamento.

In Figura 92 è mostrato l'andamento della temperatura dell'olio in ingresso al modulo (TM_out) nelle diverse prove, mentre in Figura 93 è riportato l'andamento dell'energia termica trasferita dall'olio al modulo.

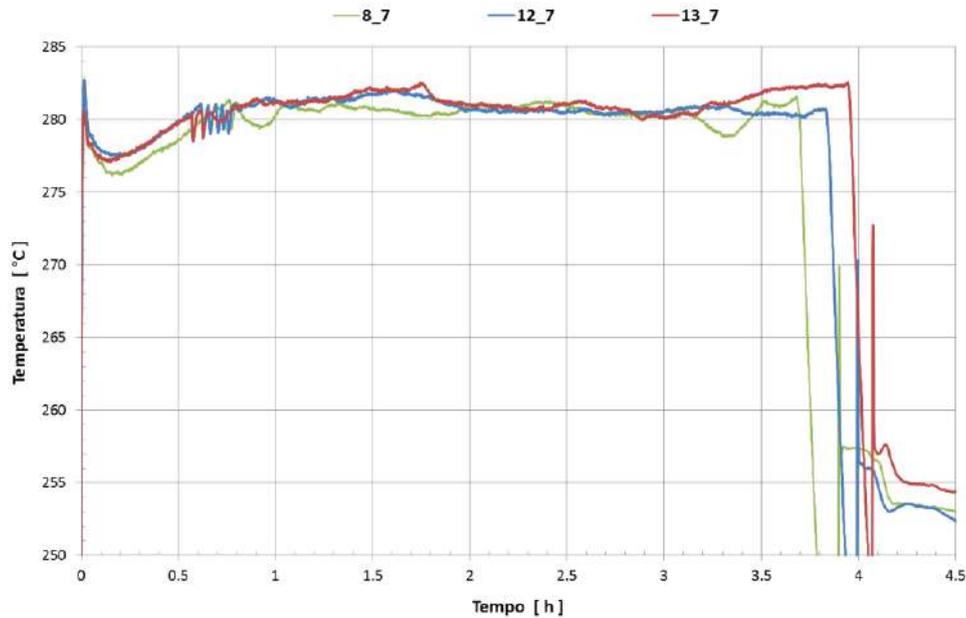


Figura 92: Prova a 280°C: confronto temperatura ingresso modulo

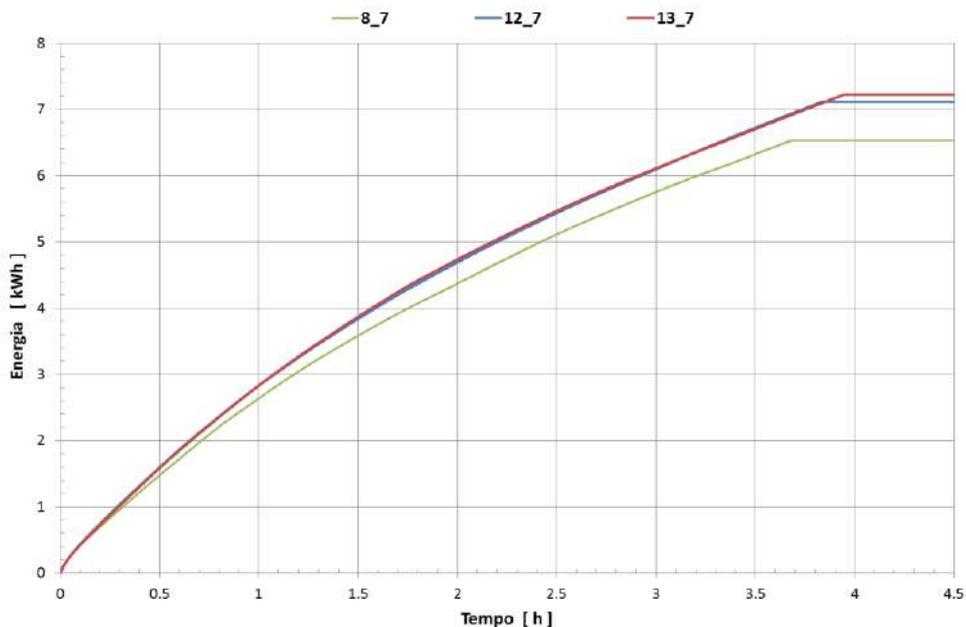


Figura 93: Prova a 280°C: confronto energia trasferita dall'olio

Il confronto dell'energia trasferita mostra che, mentre le curve relative alle prove 2 (12_7) e 3 (13_7) sono praticamente identiche, la curva della 1 (8_7) risulta più bassa. La Figura 94 e la Figura 95 mostrano rispettivamente il confronto tra le potenze e le temperature di ingresso/uscita dell'olio dal modulo per le tre prove a 280 °C.

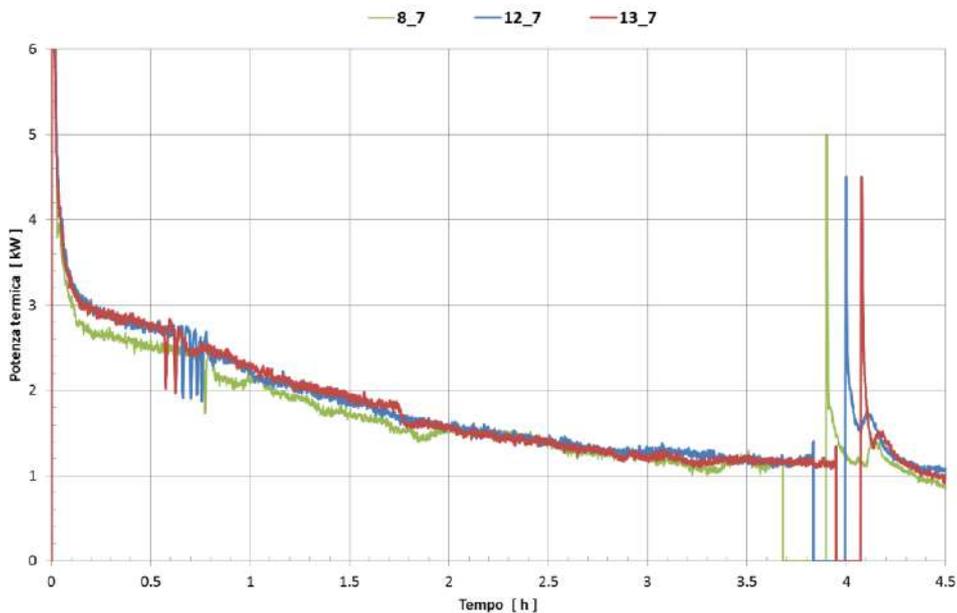


Figura 94: Prova a 280°C: confronto potenza termica trasferita dall'olio

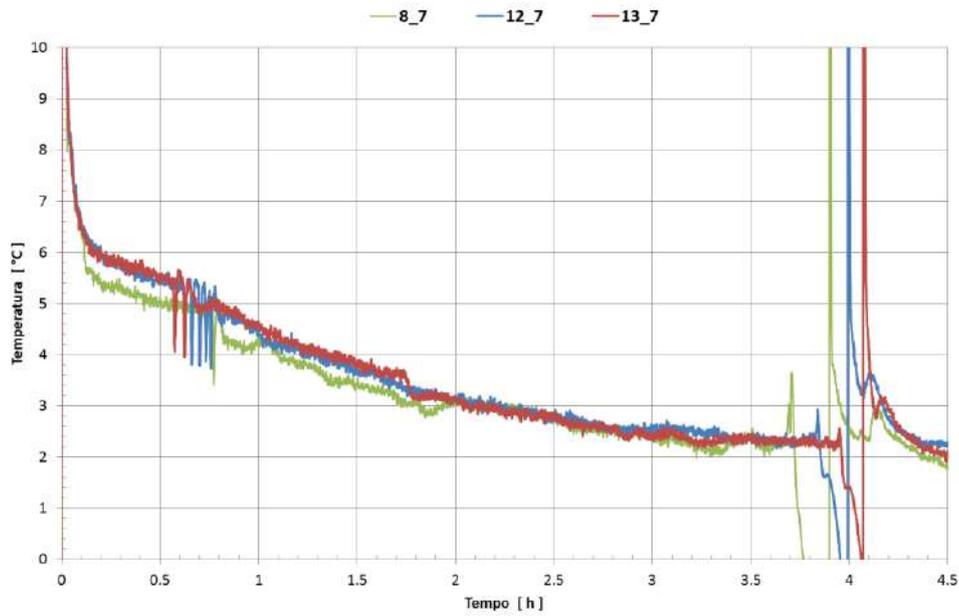


Figura 95: Prova a 280°C: confronto DELTA T nel modulo

L'energia effettivamente accumulata nel modulo, calcolata detraendo le perdite termiche verso l'esterno dall'energia trasferita dal fluido, è mostrata in Figura 96.

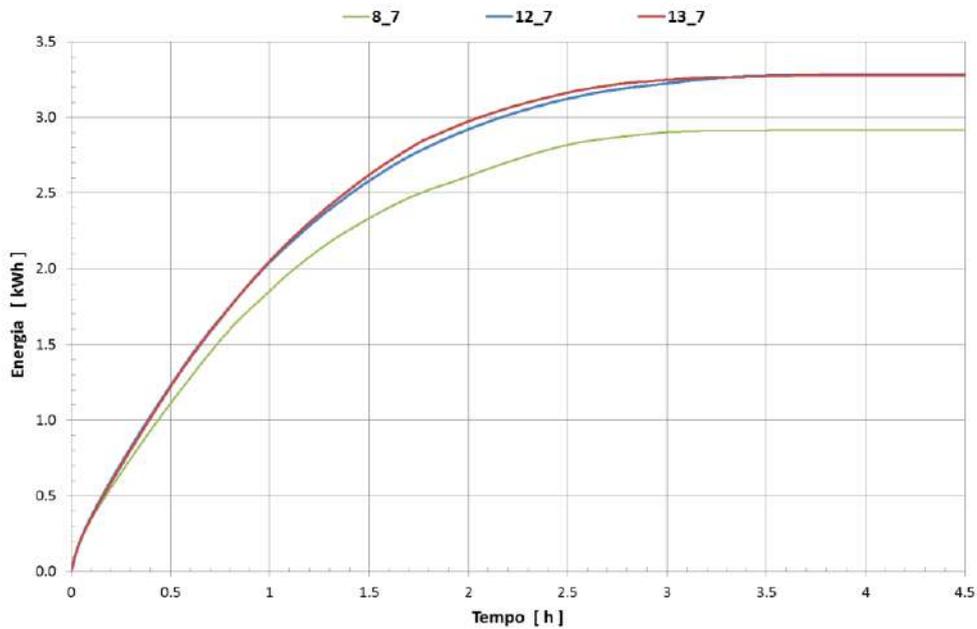


Figura 96: Prova a 280°C: confronto energia accumulata nel modulo

Il confronto dell'energia scaricata dal calcestruzzo è invece mostrata in Figura 97.

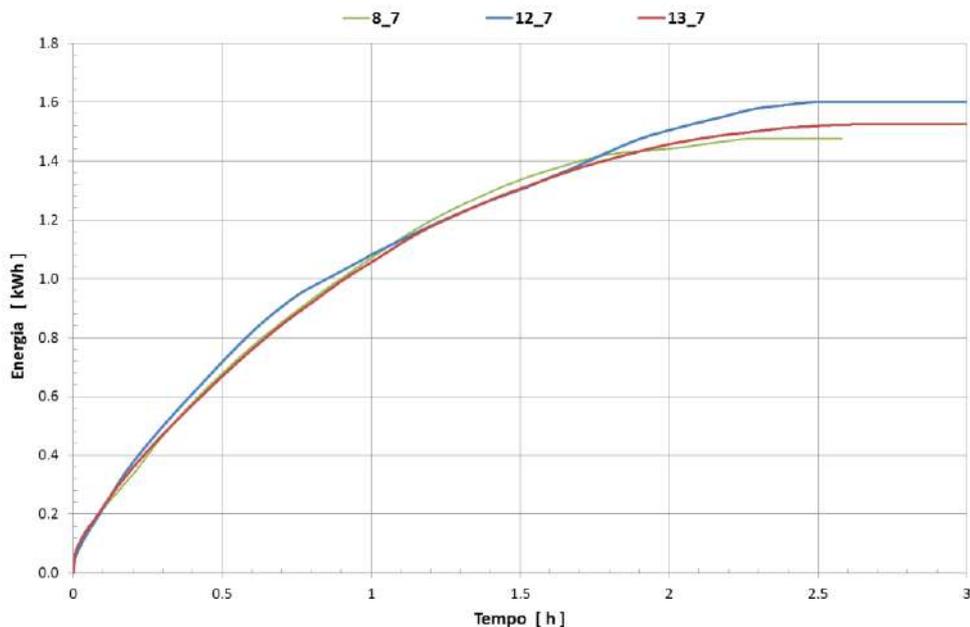


Figura 97: Prova a 280°C: confronto energia scaricata dal modulo

La differenze sono coerenti con i diversi salti termici (tra temperatura di ingresso e di uscita) nel modulo, evidenziati in Figura 98.

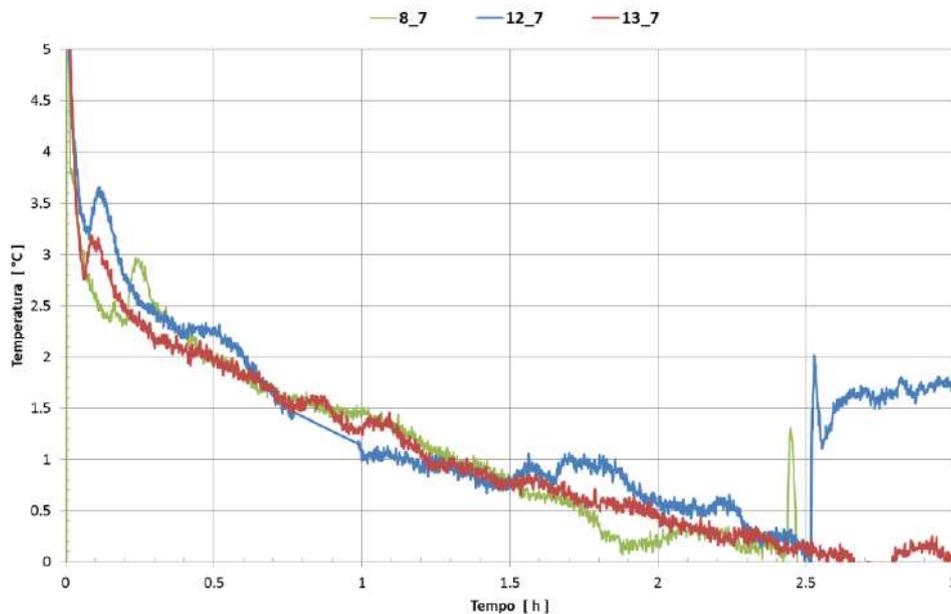


Figura 98: Prova a 280°C: confronto DT modulo nella scarica

3.3 Energia accumulata ed efficienza

In Tabella 2 sono riportati i valori dell'energia termica accumulata e dei rendimenti ottenuti dalle prove sperimentali effettuate sui due moduli di accumulo.

Tabella 2: Confronto tra le prove effettuate in relazione ad energia e rendimento

<i>T [°C]</i>		<i>Energia [kWh_t]</i>			<i>Rendimento [%]</i>		
	Prova	Caricata	Accumulata	Scaricata	Carica	Scarica	Totale
250	1	6.26	3.01	2.72	48.08	90.37	43.45
250	2	6.61	3.28	2.71	49.62	82.62	41.00
250	3	6.34	3.32	2.92	52.37	87.95	46.06
250	4	7.02	3.87	1.66	55.13	42.89	23.65
280	1	6.53	2.92	1.47	44.72	50.34	22.51
280	2	7.11	3.28	1.52	46.13	46.34	21.38
280	3	7.22	3.28	1.60	45.43	48.78	22.16

Nelle prime tre prove l'energia scaricata e i relativi rendimenti risultano superiori, poiché a causa del comportamento dello scambiatore di calore olio/acqua (E-101) la temperatura di ingresso al modulo nella fase di scarica non resta costante e diminuisce nel tempo.

In Figura 99 è mostrato graficamente il confronto delle energie termiche delle prove.

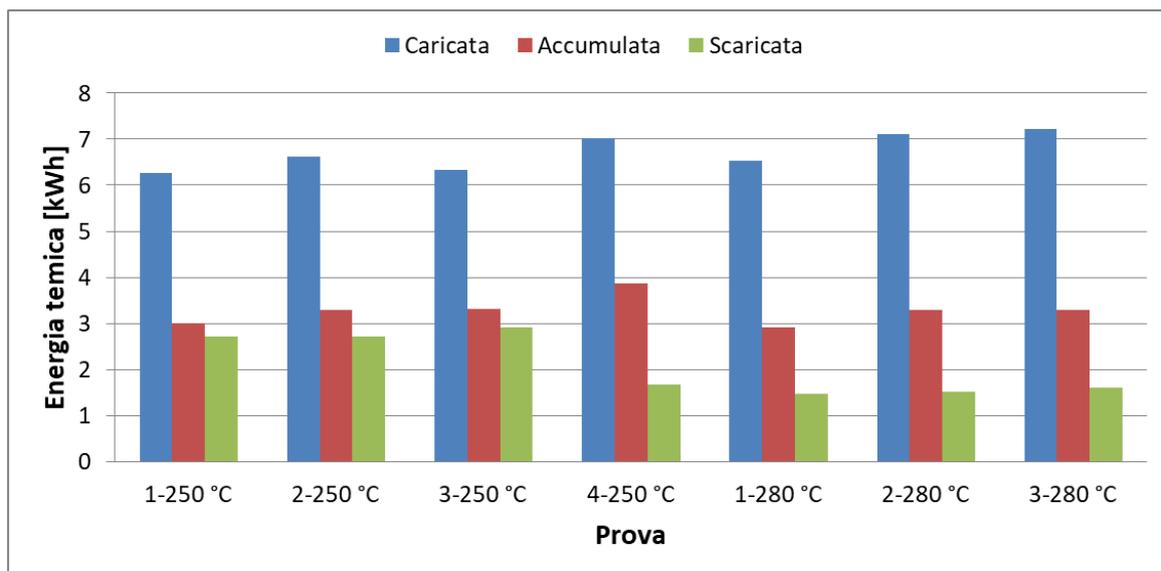


Figura 99: Confronto tra i risultati delle prove

Come è possibile osservare dalla Figura 99, l'energia trasmessa dall'olio è pressoché costante (con variazioni contenute entro il 15%), con un valore medio di 6.73 kWh.

Anche l'energia accumulata nel calcestruzzo non mostra grosse variazioni (si rimane entro il 25%) con un valore medio di 3.28 kWh: le prove a 250°C presentano un valore medio di 3.37 kWh, mentre nelle prove a 280°C il valore medio è di 3.16 kWh, con una riduzione di circa il 6%.

Per quanto riguarda la fase di scarica, se si escludono le prime tre prove (in cui il range di temperatura era variabile) si osserva come l'energia trasferita dal calcestruzzo all'olio sia abbastanza costante (entro il 12%), con un valore medio pari a 1.56 kWh.

4 Conclusioni

Nel presente documento sono riportati i risultati delle prove sperimentali effettuate per la caratterizzazione termica di un modulo di accumulo termico cementizio, pensato come elemento base per la costruzione di accumuli termici modulari e a basso costo. Le prove hanno inoltre consentito di verificare il funzionamento dell'impianto sperimentale SOLTECA-3, per validare la sua idoneità all'utilizzo previsto (test di moduli di accumulo) ed eventualmente apportarvi modifiche.

L'attività ha evidenziato problemi e limiti operativi dell'impianto SOLTECA-3 il cui schema di funzionamento è stato modificato dopo le prime prove, dimostrando comunque la sua capacità di sperimentare il comportamento termodinamico dei moduli in condizioni molto simili a quelle presenti in impianti reali. Per le attività future si ritiene comunque necessario revisionare l'impianto, in particolare con la sostituzione del misuratore di portata.

Per quanto riguarda la sperimentazione sul modulo di accumulo termico, sono state effettuate prove di caricamento/scaricamento termico sia a 250°C che a 280°C, su un intervallo di temperatura di 30°C.

Le prove hanno evidenziato che nella fase di caricamento le dispersioni termiche verso l'esterno del modulo influenzano notevolmente l'energia effettivamente accumulata nel calcestruzzo, che risulta significativamente inferiore a quella ceduta dall'olio al calcestruzzo.

Infatti, se nelle prove a 250°C il rendimento di carica (rapporto tra l'energia accumulata e quella trasmessa dall'olio al calcestruzzo) è stato valutato pari a circa il 53%, nelle prove a 280°C esso si riduce a circa il 45% a causa delle maggiori dispersioni termiche.

Nella fase di scaricamento, l'energia che può essere estratta dal calcestruzzo e trasferita all'olio dipende dalle proprietà termiche delle mescole, dalla resistenza di contatto tra calcestruzzo e tubo di scambio termico e dalla temperatura dell'olio "freddo" in ingresso al modulo.

Se quest'ultima non rimane costante, ma si riduce durante la prova, l'energia che può essere scaricata aumenta, accrescendo il rendimento (inteso come rapporto tra l'energia estratta dal calcestruzzo e quella che era stata accumulata). Questo fenomeno è particolarmente evidente nelle prove a 250°C: in tre prove la temperatura dell'olio si riduce durante la scarica e il rendimento (medio sui tre test) di scarica, inteso come rapporto tra l'energia scaricata e quella accumulata, risulta pari a 87%; nella quarta prova, con un migliore controllo della temperatura di ingresso (tenuta costante a 220°C), il rendimento si riduce a circa il 43%.

Nelle prove a 280°C, svolte con temperatura di ingresso stabile a 220°C, il rendimento medio nella fase di scarica risulta pari a circa il 48%.

Se si escludono le tre prove a temperatura d'ingresso non controllata, il rendimento globale medio, inteso come rapporto tra l'energia scaricata dal calcestruzzo e quella caricata con l'olio, è risultato pari a circa il 22%. Questo valore, come precedentemente menzionato, è notevolmente influenzato dalle dispersioni termiche.

Va precisato che i rendimenti stimati con la presente campagna sperimentale vanno intesi come parametri utili per una caratterizzazione termica e della velocità di scambio di calore, e a fini comparativi con le campagne sperimentali previste nelle prossime annualità, nelle quali il fenomeno delle perdite termiche dovrà essere ridotto.

Per applicazioni industriali, tuttavia, qualora la dimensione del modulo per esigenze di prefabbricazione e movimentazione restasse simile a quella attualmente adottata, si dovrà prevedere un adeguato impilamento dei vari moduli costituenti il TES, in modo da ridurre le superfici esposte, prevedendo ovviamente anche una coibentazione più efficiente nelle parti esterne. Va inoltre considerata l'interposizione di strati di coibente (per esempio pirogel) tra moduli aventi temperature medie molto diverse in modo da ridurre lo scambio di calore reciproco, evitando l'appiattimento dei profili termici e il conseguente incremento di entropia del sistema.

Da quanto detto, risulta chiara l'opportunità di nuove sperimentazioni per evidenziare i vantaggi che potranno essere apportati al sistema di accumulo, sia nelle caratteristiche della miscela di calcestruzzo – che potrà arricchirsi di materiali a cambiamento di fase – sia nel sistema di scambio termico, che potrà essere aggiornato, per superare le problematiche qui evidenziate.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Girardi, G.M. Giannuzzi, D. Mazzei, V. Salomoni, C. Majorana, R. Di Maggio, et al. Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems. *Construction and Building Materials* 135 (2017) 565–579.
- [2] Liberatore R, Falchetta M, Gaggioli W, Mazzei D, Russo V. Power production of an ORC System using a stratified molten salt as thermal energy storage integrated in a CSP plant. *AIP Conference Proceedings* 2126, 140003.
- [3] Ozger OB, Di Maggio R, Giannuzzi GM, Salomoni VA, Majorana CE, et al. “Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for Energy storage systems”. *Mater. Des.* 2013; 51: 989–997.
- [4] Salomoni VA, Majorana CE, Giannuzzi GM, Di Maggio R, Miliozzi A, et al. “Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants”, *Solar Energy* 103 (2014) 303–315.
- [5] Giannuzzi GM, Liberatore R, Mele D, Mazzucco G, Xotta G, Salomoni V, Majorana CE, Di Maggio R. Experimental campaign and numerical analyses of thermal storage concrete modules. *Solar Energy* 2017, 157: 596-602.
- [6] ENEA – Report RdS/PAR2014/118 – “Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi di accumulo a calore sensibile in materiali cementizi”, G.M. Giannuzzi, E. Giovannini, R. liberatore, D. Mazzei, D. Mele, T. Crescenzi
- [7] 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", *Solar Energy Engineering*, December 28, 2007.
- [8] 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.
- [9] PG. Bergan, CJ. Greiner, “A new type of large scale thermal energy storage”, *Energy Procedia* 58 (2014) 152 – 159.
- [10] JE. Skinner, BM. Brown, RP. Selvam, “Testing Of High Performance Concrete As A Thermal Energy Storage Medium At High Temperatures”, *Proc.ASME 2011 5th International Conf. on Energy Sustainability ES2011 August 7-10, 2011, Washington, DC, USA.*