



Caratterizzazione termica del prototipo ottimizzato e analisi dei dati sperimentali. Confronto con il primo prototipo ENEA

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

CARATTERIZZAZIONE TERMICA DEL PROTOTIPO OTTIMIZZATO E ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI.
CONFRONTO CON IL PRIMO PROTOTIPO

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

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: 1

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

Pacco di lavoro: 2 Accumulo termico

Linea di Attività: LA2.15 Caratterizzazione di un prototipo ottimizzato e progettazione preliminare di un sistema di più elementi di accumulo termico a cambiamento di fase

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 L'IMPIANTO SPERIMENTALE SOLTECA3.....	5
2.1 IL FLUIDO TERMOVETTORE: THERMINOL66.....	6
3 ANALISI DELL'INCERTEZZA DI MISURA IN SOLTECA3.....	7
3.1 GENERALITÀ SULL'INCERTEZZA DI UNA MISURA.....	7
3.1.1 <i>Incerteza di tipo A</i>	7
3.1.2 <i>Incerteza di tipo B</i>	7
3.1.3 <i>Combinazione di incertezze</i>	7
3.2 LE MISURE BASE.....	8
3.2.1 <i>Catena di misura</i>	8
3.2.2 <i>Misura della temperatura</i>	8
3.2.3 <i>Misura portata</i>	10
3.2.4 <i>Schede di acquisizione</i>	10
3.3 MISURE DERIVATE.....	12
3.3.1 <i>Temperatura media</i>	12
3.3.2 <i>Salto termico in-out HTF</i>	12
3.3.3 <i>Incerteza su calore specifico HTF</i>	12
3.3.4 <i>Potenza termica</i>	13
3.3.5 <i>Incerteza estesa</i>	13
3.4 APPLICAZIONE A SOLTECA3.....	13
3.4.1 <i>Misure di temperatura</i>	14
3.4.2 <i>Misure di portata</i>	15
3.4.3 <i>Valutazione di potenza</i>	15
4 IL PROTOTIPO ENEA-TES.LH02.....	16
5 DESCRIZIONE DELLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE.....	17
5.1 LE PROCEDURE DI CARATTERIZZAZIONE TERMICA.....	17
5.1.1 <i>TEST 1: Curva di Potenza del HTF in carico/scarico</i>	17
5.1.2 <i>TEST 2: Perdite termiche ad una temperatura costante</i>	19
5.1.3 <i>TEST 3: Perdite termiche a sistema inattivo durante un tempo t^*</i>	20
5.1.4 <i>TEST 4: Analisi carico/scarico TES in più cicli</i>	21
5.2 ANALISI DELLE CONDIZIONI FLUIDODINAMICHE INTERNE.....	22
6 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE.....	24
6.1 RISULTATI DEL TEST 1.....	24
6.1.1 <i>Test 1a</i>	24
6.1.2 <i>Test1b</i>	25
6.1.3 <i>Test1c</i>	27
6.1.4 <i>Sintesi risultati</i>	28
6.2 RISULTATI DEL TEST 2.....	29
6.3 RISULTATI DEL TEST 3.....	31
6.4 RISULTATI DEL TEST 4.....	33
7 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONFRONTO LH01-LH02.....	34
8 CONCLUSIONI.....	36
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	37

Sommario

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.15 del PTR 2019-2021 (anno 2020) relativa alla "Caratterizzazione prototipo ottimizzato, progettazione preliminare e analisi costi di sistema di più elementi". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power-to-gas, e relative interfacce con le reti", afferente al PAR2021 dell'Accordo di Programma ENEA-MISE 2019-2021.

Un nuovo prototipo di un elemento base di accumulo termico a calore latente denominato LH02, realizzato nella prima fase della presente linea di attività è stato sottoposto ad una completa caratterizzazione termica utilizzando l'impianto sperimentale denominato Solteca3 presente nel CR ENEA Casaccia. Questo, riempito con 300 kg di PCM (sale solare) e con una capacità nominale di 20 kWh, è stato provato nell'intervallo di temperature 200-280°C con una portata variabile tra 200 kg/h e 800 kg/h. I test effettuati hanno riguardato, prove di carico e scarico a ciclo singolo, prove di valutazione delle perdite di calore e prove multi-ciclo di breve durata. Al termine dei test si sono valutati i principali parametri chiave di prestazione del componente.

La caratterizzazione ha evidenziato come detti parametri abbiano avuto un netto miglioramento rispetto quelli ottenuti con il prototipo precedente, l'LH01, in ragione del fattore di scala adottato (capacità nominale triplicata) e di una serie di accorgimenti tecnici (aumento della superficie di scambio interna). Tali miglioramenti si sono riscontrati nonostante il fatto che l'impianto sperimentale abbia incontrato grosse difficoltà nell'imporre le condizioni di funzionamento ideali per la caratterizzazione. In particolare, non è stato possibile mantenere una temperatura massima di ingresso prossima a quella impostata di 280°C. La riduzione della temperatura in ingresso trova giustificazione nelle maggiori dimensioni di LH02 (300 kg di sale) e, quindi, nell'elevato calore assorbito dal sale in special modo durante il suo cambio di fase ed ha come conseguenza una limitazione nel trasferimento del calore e una dinamica del sistema ritardata.

Per poter, in futuro, caratterizzare correttamente sistemi di questa capacità sarà allora necessario apportare le dovute modifiche all'impianto Solteca3, affinché possa fornire una temperatura in ingresso coincidente con quella di set-point, oppure utilizzare altri impianti in grado di rispondere ai requisiti desiderati.

Terminata la caratterizzazione di LH02, il passo successivo, sempre all'interno di questa linea di attività, dovrà essere quello di effettuare una progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi di accumulo di questo tipo e di effettuare una analisi dei costi sia per il singolo per elemento e per l'intero modulo. In questo modo si saranno poste le basi per una futura sperimentazione in un sistema simile al reale, su larga scala, da dimostrarsi in un ambiente rilevante.

1 Introduzione

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.15 del PTR 2019-2021 (anno 2020) relativa alla "Caratterizzazione prototipo ottimizzato, progettazione preliminare e analisi costi di sistema di più elementi". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power-to-gas, e relative interfacce con le reti", afferente al PAR2021 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE 2019-2021.

Il prototipo di un elemento base di accumulo termico a calore latente denominato LH02 e di capacità termica nominale pari a 20 kWh, progettato e realizzato nella linea di attività LA2.7 [1] e nella prima parte della presente LA 2.15 [2], è stato sottoposto ad una completa caratterizzazione termica utilizzando l'impianto sperimentale denominato Solteca3, già brevemente descritto nella LA2.1 [3], presente nel CR ENEA Casaccia.

Questa caratterizzazione è avvenuta attraverso una serie di prove cicliche di carico e scarico del componente e di prove di riscaldamento e raffreddamento prolungate, a temperatura operativa compresa tra i 200°C ed i 280°C, allo scopo di esaminare il comportamento del sistema di accumulo, fino alle condizioni stazionarie sia in fase di carico che di scarico.

I dati sperimentali ottenuti sono stati analizzati e messi a confronto con quelli del primo prototipo, ricavati nella campagna sperimentale della LA2.2 [4].

A valle della sperimentazione, si è effettuato. In un successivo passo di questa linea di attività, una progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi di accumulo ed un'analisi dei costi sia per il singolo elemento che per il modulo.

2 L'impianto sperimentale Solteca3

L'impianto sperimentale denominato SOLTECA3 è utilizzato per la caratterizzazione fino a 300 °C di elementi di accumulo termico di medio-piccola taglia in condizioni operative quasi reali di portata. Il limite operativo di temperatura è imposto dall'olio utilizzato come fluido termovettore.

Tale impianto, già presente in ENEA ed utilizzato anche per lo svolgimento del presente lavoro (Figura 2-1), è stato leggermente aggiornato al fine di migliorarne le prestazioni.



Figura 2-1- Impianto Solteca3 e consolle di controllo.

In particolare, una prima serie di attività di messa a punto dell'impianto, effettuate ne 2020 e documentate nel dettaglio in [5], hanno riguardato:

- La sostituzione del misuratore di portata con uno con maggiore precisione (errore da 1.6% a 0.1%), che si avvale dell'effetto Coriolis ed ha il vantaggio di essere indipendente dalle caratteristiche del fluido di processo liquido;

- La sostituzione dello scambiatore olio/acqua per il raffreddamento del fluido di processo, per simulare le condizioni di scarica dell'accumulo termico, con un dispositivo di raffreddamento olio/aria, in modo da poter meglio modulare gli scambi termici, poiché quello olio/acqua non era regolabile a portate troppo basse a causa della possibile evaporazione dell'acqua nei tubi e conseguente aumento di pressione, a basse portate;
- La coibentazione di alcune parti dell'impianto per limitare le perdite termiche. Queste hanno interessato in particolare la pompa di circolazione e il tratto di collegamento verso e dal modulo di accumulo;
- La sostituzione della pompa a trascinamento magnetico, che perdeva olio con una nuova di caratteristiche identiche;
- La sostituzione del serbatoio di accumulo dell'olio termico, che si era danneggiato (Figura 2-2). In questo caso il serbatoio è stato realizzato in acciaio inossidabile (AISI 304), invece che acciaio al carbonio come quello preesistente.



Figura 2-2- Impianto Solteca3 e console di controllo.

Inoltre, sono state progettate e realizzate due nuove sezioni di misura, da allocare alle tubazioni di ingresso ed uscita dal LH02, in grado di ospitare contemporaneamente sia una termoresistenza che una termocoppia per misurare la temperatura del fluido termovettore (Figura 2-3).

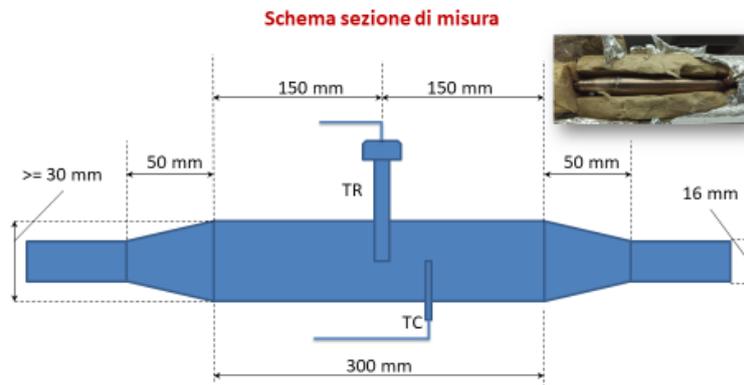


Figura 2-3- Schema di sezione di misura delle temperature in ingresso ed uscita dal LH02.

2.1 Il fluido termovettore: Therminol66

Le proprietà del fluido termovettore, il Therminol66, sono riportate qui di seguito in funzione della temperatura operative, in accordo con il Data Sheet del fornitore [6]:

$$\text{Density} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = -0.614254 * T - 0.000321 * T^2 + 1020.62$$

$$\text{Thermal Conductivity} \left(\frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right) = -0.000033 * T - 0.00000015 * T^2 + 0.118294$$

$$\text{Heat Capacity} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right) = 0.003313 * T + 0.0000008970785 * T^2 + 1.496005$$

$$\text{Kinematic Viscosity} \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right) = e^{\left(\frac{586.375}{T+62.5} - 2.2809 \right)}$$

$$\text{Vapour pressure(absolute, kPa)} = e^{\left(\frac{-9094.51}{T+340} + 17.6371\right)}$$

In tutte le relazioni la temperatura è espressa in °C.

3 Analisi dell'incertezza di misura in Solteca3

Un dato importante ai fini della caratterizzazione del prototipo LH02, ed in generale di qualsiasi altro prototipo, è l'incertezza correlata alle misure effettuate ed alle grandezze da loro derivate. Proviamo, qui di seguito, a darne una valutazione attendibile facendo riferimento all'impianto sperimentale Solteca3. Maggiori dettagli sui metodi applicati possono essere ricavati da [7-12].

3.1 Generalità sull'incertezza di una misura

Il tipo di incertezza che caratterizza le misurazioni può essere principalmente di tipo A e B. Tali incertezze base possono essere a loro volta combinate per valutare le incertezza correlate a loro possibili combinazioni (grandezze derivate).

3.1.1 Incertezza di tipo A

L'incertezza di tipo A è correlata al fatto che siano state fatte n misure e calcolato il valore medio, \bar{x} , e la deviazione standard, s . L'incertezza standard può essere allora stimata come:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Tale incertezza è storicamente detta anche deviazione standard della media o errore standard della media ed è correlata ad una distribuzione di tipo gaussiano.

3.1.2 Incertezza di tipo B

In caso in cui, invece, le informazioni sulla distribuzione delle misure siano scarse, è semplicemente possibile valutare i limiti superiori ed inferiori dell'incertezza. In tal caso, si suppone di avere una distribuzione di tipo rettangolare (misura equiprobabile nell'intervallo) e l'incertezza standard sarà:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

dove a è il semi-intervallo dei valori limite ($R_T/2$). Questa è la tipica situazione correlata ai dispositivi di misura elettronici o elettro-meccanici.

3.1.3 Combinazione di incertezze

Quando alcune grandezze di interesse sono derivate (calcolate) da altre, è comunque possibile assegnare loro una incertezza che deriverà dalla combinazione delle incertezze delle misure utilizzate.

Supponendo che la grandezza y sia funzione delle misure x_i : $y = f(x_i)$, allora, l'incertezza su y è calcolabile nel seguente modo

$$u(y) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)\right)^2}$$

3.2 Le misure base

Per l'impianto sperimentale Solteca3 esistono due tipi di misure base:

- Misura della temperatura del fluido termovettore o del mezzo di accumulo termico;
- Misura della portata del fluido termovettore.

Ad ognuna di queste misure base sarà allora collegabile una adeguata catena di misura che, oltre il dispositivo di misura stesso comprenderà i dispositivi di conversione analogico-digitale e di registrazione ed elaborazione.

3.2.1 Catena di misura

Attualmente, per Solteca3 la catena di misura è schematizzabile come mostrato nella figura seguente:

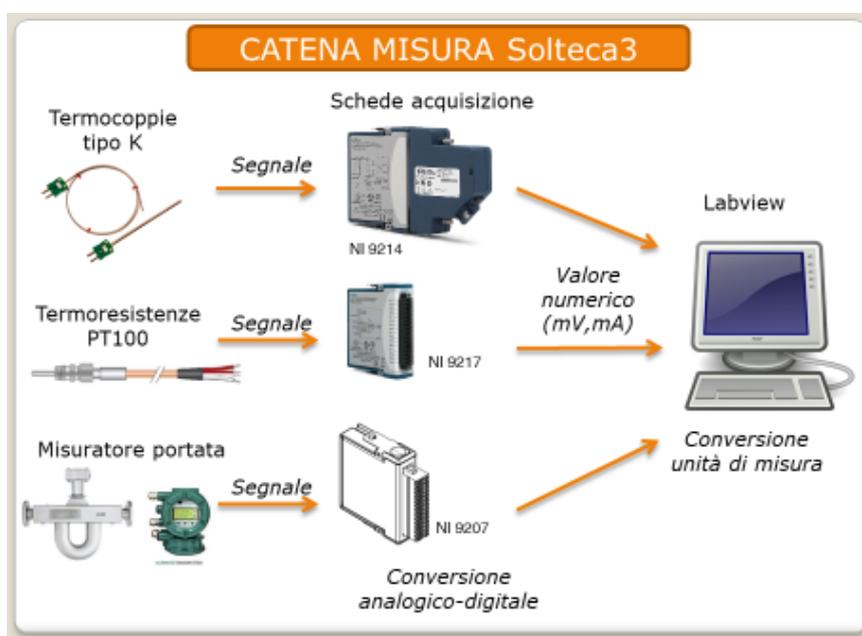


Figura 3-1- Catena di misura di Solteca3 (schema).

Il segnali analogici provenienti dai dispositivi di misura di temperature o portata sono ricevuti da una opportuna scheda di acquisizione che provvede ad effettuare una conversione analogica-elettrica (in mV o mA). Tale segnale, viene quindi letto tramite un software di acquisizione dedicato (es.: Labview) e quindi digitalizzato e registrato.

L'incertezza connessa alle singole schede di acquisizione è genericamente derivabile dai Data Sheet delle stesse. Per quanto riguarda l'incertezza connessa alla digitalizzazione dei segnali elettrici da parte del software è ritenuta essere molto piccola e viene spesso, in assenza di informazioni di dettaglio, trascurata.

3.2.2 Misura della temperatura

Per la misura della temperatura si sono adottati due diversi dispositivi: termocoppie (TC) e termoresistenze (RTD). Le termoresistenze sono più precise e più costose e vengono utilizzate quando la loro misura dovrà servire al calcolo di grandezze derivate molto sensibili, quale, ad esempio, il salto termico del fluido termovettore tra l'ingresso e l'uscita del prototipo.

In solteca3 vengono installate:

- **Termocoppie (TC):** Termocoppie di tipo K ad isolamento minerale di classe 1 (IEC60584) con giunto caldo isolato, guaina in AISI310 (1100°C) diam. 1mm x lung. 2m terminante con spina miniatura colore verde (norme IEC). Nella tabella seguente si possono vedere le tolleranze attese per le varie classi di precisione.

Tabella 3-1 – Classe di precisione per termocoppie di tipo K

TC - K	Classe di tolleranza 1	Classe di tolleranza 2	Classe di tolleranza 3
Intervallo di Temperatura	-40 ... +375° C	-40 ... +333° C	-167 ... +40°C
Tolleranza	± 1.5° C	± 2.5° C	± 2.5° C
Intervallo di Temperatura	+375 ... +1000°C	+333 ... +1200° C	-200 ... -167° C
Tolleranza	± 0.004 [t]	± 0.0075 [t]	± 0.015 [t]

- **Termo-resistenze (RTD):** PT100 a 4 fili ad isolamento minerale (resistente a vibrazioni; -100/500°C), singolo elemento sensibile di classe A (IEC60751), guaina in AISI316 diam. 3mm x lung. 15mm (sotto filetto), bussolotto di transizione (diam. 6,3mm x lung. 19mm; resina fino a 300°C), 4 m cavo isolato in PFA, raccordo scorrevole filettato con ogiva deformabile in acciaio inox diam. 3 mm x 1/8" gas conico completo di 4 boccole filettate femmina 1/8" gas a saldare. Nella tabella seguente si possono vedere le tolleranze attese per le varie classi di precisione.

Tabella 3-2 – Classe di tolleranza per termoresistenze di tipo PT100

Temperatura (°C)	Tolleranza			
	Classe A (±°C) (±Ω)		Classe B (±°C) (±Ω)	
-200	0,55	0,24	1,3	0,56
-100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,30
200	0,55	0,20	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79
500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,6	1,13
700	-	-	3,8	1,17
800	-	-	4,3	1,28
850	-	-	4,6	1,34

Norme IEC 751 - DIN 43760

Quindi, per una temperatura operativa media di 240°C è possibile fare la seguente ipotesi:

- TC: $R_T = 3.0$ °C
- TR: $R_T = 1.3$ °C

Per una TC o RTD con tolleranza R_T , l'incertezza standard è di tipo B (distribuzione rettangolare) e valutabile nel seguente modo:

$$u(T) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_T}{2} \right]$$

$$\frac{u(T)}{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_T}{2} \right] \frac{1}{T_m}$$

3.2.3 Misura portata

In Solteca3 è stato installato un misuratore di portata di tipo Rotamass TI Coriolis Mass flow meter con trasmettitore.



Figura 3-2- Misuratore di portata di tipo Rotamass TI Coriolis Mass flow meter con trasmettitore.

Questo strumento può operare fino a 350°C con un intervallo massimo di portata di 4350 kg/h ed è indipendente dalle caratteristiche del fluido di processo (calcola la densità del fluido). L’errore della misura della portata in massa è pari allo 0.1% mentre l’errore della determinazione della densità è di 3 kg/m³.

In tal caso si può dire che per una portata *w* l’intervallo di errore è: $R_w = 2 \cdot 0.1\% \cdot w$, e che l’incertezza di misura sarà:

$$u(w) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_w}{2} \right]$$

$$\frac{u(w)}{w} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_w}{2} \right] \frac{1}{w}$$

3.2.4 Schede di acquisizione

Le schede di acquisizione utilizzate sull’impianto Solteca3 sono relazionate ai dispositivi di misura utilizzati ed elencati in Tabella 3-3. Nell’ultima colonna sono riportati i valori di accuratezza previsti per ogni scheda: questi valori sono stati estratti dai rispettivi Data Sheet, parzialmente riportati in **Figura 3-3**.

Tabella 3-3 – Schede di acquisizione della National Instruments utilizzate

Dispositivo Di misura	Grandezza misurata	Scheda di acquisizione	Intervallo di errore (R _T o R _w)
Termocoppia (TC)	Temperatura	NI 9214	1.4 °C
Termoresistenza (TR)	Temperatura	NI 9217	1.0 °C
Rotamass TI Coriolis	Portata	NI 9207	0.87%

Occorre notare che per le schede per la misura della temperatura la casa costruttrice fornisce direttamente l’accuratezza di misura integrata con i corrispondenti dispositivi. Perciò tale data andrà a sostituire quello mostrato in precedenza per le sole termocoppie o termoresistenze.

Anche in questo caso, l'incertezza di misura sarà considerata di tipo B:

$$u(T_{ow}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R(T_{ow})}{2} \right]$$

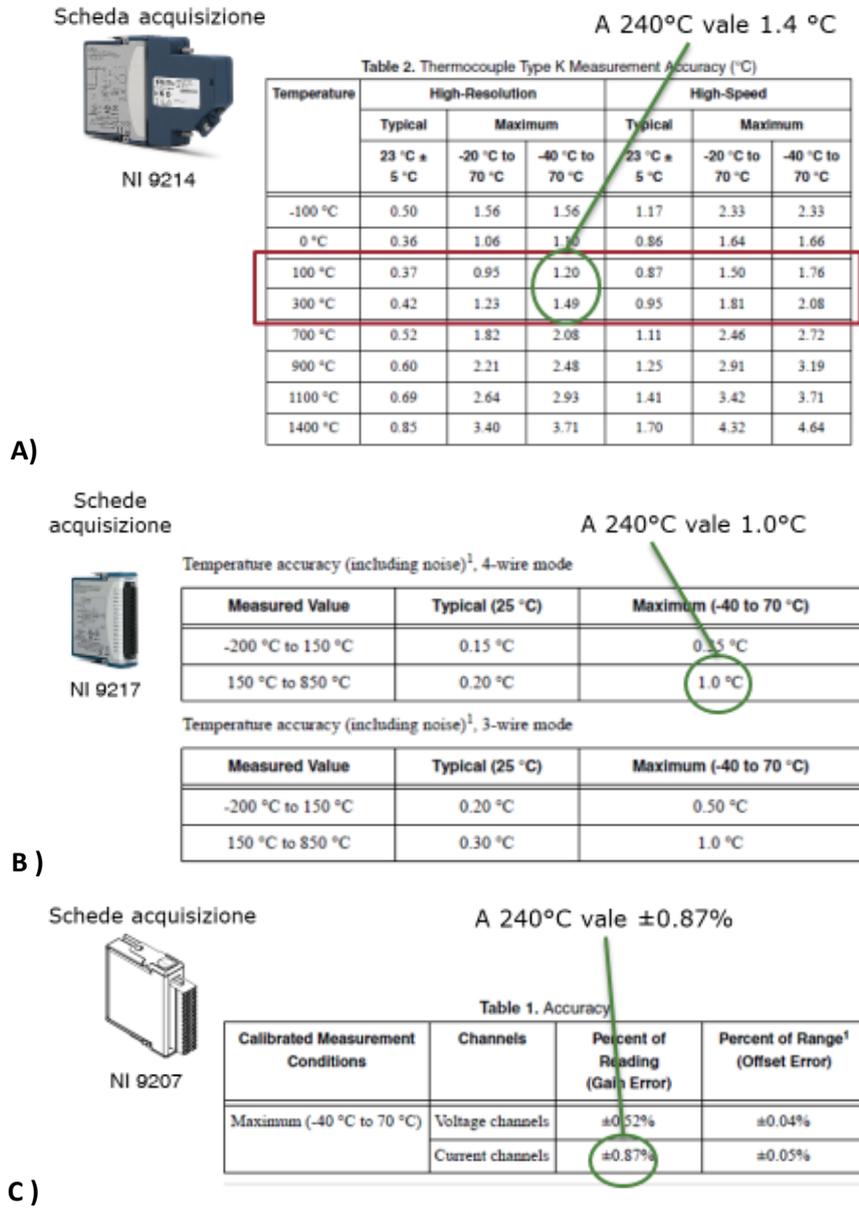


Figura 3-3- Accuratezza di misura delle schede di acquisizione utilizzate in Solteca3 estratta dei relativi Data-Sheet. In particolare sono riportate i dati delle schede NI9214(A), NI 9217 (B) e NI 9207 (C) della National Instruments.

3.3 Misure derivate

La misura derivata di primario interesse è quella relative alla potenza termica trasmessa o recuperata (curva di potenza). Per arrivare a questa è però necessario identificare altre grandezze derivate intermedie.

3.3.1 Temperatura media

La temperature media ingresso/uscita del HTF è:

$$T_m = \frac{(T_{in} - T_{out})}{2}$$

Di conseguenza, la sua incertezza sarà:

$$u(T_m) = \sqrt{\left[\frac{\delta T_m}{\delta T_{in}} u(T_{in})\right]^2 + \left[\frac{\delta T_m}{\delta T_{out}} u(T_{out})\right]^2} = \frac{1}{2} \sqrt{u(T_{in})^2 + u(T_{out})^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} * u(T)$$

$$\frac{u(T_m)}{T_m} = \frac{\sqrt{2}}{2} * \frac{u(T)}{T}$$

3.3.2 Salto termico in-out HTF

Il salto termico ingresso/uscita del HTF è:

$$\Delta T = T_{in} - T_{out}$$

Di conseguenza, la sua incertezza sarà:

$$u(\Delta T) = \sqrt{\left[\frac{\delta \Delta T}{\delta T_{in}} u(T_{in})\right]^2 + \left[\frac{\delta \Delta T}{\delta T_{out}} u(T_{out})\right]^2} = \sqrt{u(T_{in})^2 + u(T_{out})^2} = \sqrt{2 * u(T)^2} = \sqrt{2} u(T)$$

$$\frac{u(\Delta T)}{\Delta T} = \sqrt{2} \frac{T_m}{\Delta T} \frac{u(T)}{T}$$

3.3.3 Incertezza su calore specifico HTF

I calore specifico del HTF è valutabile in funzione della sua temperatura media:

$$c_p = a + bT_m + cT_m^2$$

Per il Terminol66 (c_p in J/(kg °C)) le tre costanti sono: $a= 1496$, $b= 3.313$, $c=8.970785E-4$ (con T in °C). Occorre notare che queste costanti derivano da una serie di misure fatte in laboratorio che, a sua volta, avranno una propria incertezza (di tipo A, con distribuzione gaussiana) che andrebbe portata in conto. In questo contesto si ipotizza che tale incertezza sia trascurabile rispetto a quella derivante dalla valutazione della temperatura media e, quindi, viene trascurata.

Di conseguenza, la sua incertezza sarà:

$$u(c_p) = \sqrt{\left[\frac{\delta c_p}{\delta T_m} u(T_m)\right]^2} = (b + cT_m) * u(T_m)$$

$$\frac{u(c_p)}{c_p} = \frac{(b + cT_m) \cdot T_m}{c_p} \cdot \frac{u(T_m)}{T_m} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{(b + cT_m) \cdot T_m}{c_p} \cdot \frac{u(T)}{T}$$

3.3.4 Potenza termica

Infine, la potenza termica ceduta o recuperata dal HTF è:

$$P = wc_p\Delta T$$

Di conseguenza, la sua incertezza sarà:

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\left[\frac{\delta P}{\delta w} u(w)\right]^2 + \left[\frac{\delta P}{\delta c_p} u(c_p)\right]^2 + \left[\frac{\delta P}{\delta \Delta T} u(\Delta T)\right]^2}$$

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\left[\frac{u(w)}{w}\right]^2 + \left[\frac{u(c_p)}{c_p}\right]^2 + \left[\frac{u(\Delta T)}{\Delta T}\right]^2}$$

3.3.5 Incertezza estesa

Una volta determinate l'incertezza associate alla temperatura o alla potenza, possiamo valura l'incertezza "estesa" scegliendo un opportuno fattore di copertura k:

$$U(P) = k * u(P) \quad U(T) = k * u(T)$$

Se il fattore di copertura è k=2, l'incertezza estesa valutata corrisponde ad un livello di confidenza di circa il 95%.

3.4 Applicazione a SOLTECA3

In questo paragrafo applichiamo i concetti esposti in precedenza all'impianto Solteca3, le cui caratteristiche operative fondamentali sono qui di seguito riportate.

Le principali temperature di riferimento sono:

- Temperatura minima T_{\min} 200 °C
- Temperatura massima T_{\max} 280 °C
- Temperatura media T_m 240 °C

Per il salto termico medio del HTF tra ingresso ed uscita prototipo si ipotizza: $\Delta T = 10$ °C.

Il fluido termovettore è un olio diatermico del tipo Therminol 66 le cui caratteristiche principali, valutate alla temperatura media operativa, sono:

- Densità HTF ρ 854.71 kg/m³
- Calore specifico HTF c_p 2342.797 J/kg*K

La portata del HTF presa a riferimento è di 800 lit/h, che corrisponde a circa: $w = 0.19$ kg/s. La potenza scambiata, sulla base dei dati precedenti sarà di circa 4.5 kW. Nella tabella seguente viene riportato il intervallo di sensibilità dei principali dispositivi utilizzati nelle varie catene di misura.

Tabella 3-4 – Intervallo di sensibilità per i dispositivi di Solteca3

Dispositivo	Intervallo accuratezza
Termocoppia K classe 1+ NI9214	2.8 °C
Termoresistenza PT100 classe A + NI9217	2,0 °C
Flussimetro Coriolis	0.1 % 0.00038 kg/s
Scheda acquisizione NI9207	0.87 % 0.0033 kg/s
Software Labview	nd

3.4.1 Misure di temperatura

L'incertezza di misura per la temperatura utilizzando delle termocoppie di tipo K con scheda NI9214 sono mostrate in Tabella 3-5.. Invece, se si utilizza delle termoresistenze PT100 con scheda NI9217, l'incertezza calcolata è mostrata in Tabella 3-6.

Da questi valori si evince che l'accuratezza della misura di temperatura è sufficientemente elevata per entrambi i dispositivi (< 1%) ma che comunque l'uso di termoresistenze ha una maggiore precisione di circa il 30%. Ciò è sicuramente utile nel caso si debbano valutare delle grandezze derivate,

Tabella 3-5 – Incertezza di misura per la temperatura con termocoppie di tipo K

Sorgente di incertezza	Misura media	Errore ±	Distribuzione di Probabilità	Tipo di incertezza	Incertezza Standard
Termocoppia K classe 1+ NI9214	240	1.4 °C	Rettangolare	B	0.34%
Conversione analogico-digitale	240		Incluso in TC	B	
Conversione unità misura	240		Trascurabile	B	
Incetezza std di 10 letture ripetute			Non applicabile		
Incetezza standard combinata	240	0.81 °C	Assunta normale		0.34%
Incetezza estesa (95%)			Assunta normale (k=2)		0.68%

Tabella 3-6 – Incertezza di misura per la temperatura con termoresistenze PT100

Sorgente di incertezza	Misura media	Errore ±	Distribuzione di Probabilità	Tipo di Incertezza	Incetezza Standard
Termoresist. PT100/A + NI9217	240	1.0 °C	Rettangolare	B	0.24%
Conversione analogico-digitale	240	0 °C	Incluso in TR	B	0.00%
Conversione unità misura			Trascurabile	B	
Incetezza std di 10 letture ripetute			Non applicabile		
Incetezza standard combinata	240	0.58 °C	Assunta normale		0.24%
Incetezza estesa (95%)			Assunta normale (k=2)		0.48%

3.4.2 Misure di portata

L'incertezza di misura per la portata in massa utilizzando un flussimetro di Coriolis è mostrata in Tabella 3-7.

Tabella 3-7 – Incertezza di misura per la portata con flussimetro Coriolis

Sorgente di incertezza	Misura media	Errore \pm		Distribuzione di Probabilità	Tipo di incertezza	Incertezza Standard
Misura portata	0.1899354	0.00037987	kg/s	Rettangolare	B	0.12%
Conversione analogico-digitale	0.18993543	0.00330488	kg/s	Rettangolare	B	1.00%
Conversione unità misura				Trascurabile	B	
Incertezza std di 10 letture ripetute				Non applicabile		
Incertezza standard combinata				Assunta normale		1.12%
Incertezza estesa (95%)				Assunta normale (k=2)		2.23%

L'accuratezza della misura di portata è sicuramente inferiore a quella della temperatura e l'incertezza standard combinata supera il 1%.

3.4.3 Valutazione di potenza

Per valutare l'incertezza sulla potenza ceduta/recuperata occorre passare anche a determinare quella di altre grandezze accessorie. Nella tabella seguente la loro valutazione, differenziata a seconda si utilizzino termocoppie e termoresistenze nella determinazione del salto termico.

Tabella 3-8 – Incertezza di misura di alcune grandezze derivate

Grandezze Derivate	Con TC	Con TR
Salto termico - $u(DT)/DT$	11.431%	8.165%
Temperatura media - $u(Tm)/Tm$	0.238%	0.170%
Calore specifico - $u(cp)/cp$	0.09%	0.06%
Potenza ceduta/rilasciata - $u(P)/P$	11.49%	8.24%
Incertezza estesa	22.97%	16.48%
Incertezza W		733.48

Come si vede è proprio l'incertezza sul salto termico a determinare quella derivata sulla potenza. In particolare, si nota come l'utilizzo di termoresistenze riduca l'errore sulla curva di potenza di oltre un terzo rispetto alle TC, limitandolo a circa un 15% in termini di incertezza estesa (corrispondente, rispetto le potenze massime calcolate, a circa 700 W).

4 Il prototipo ENEA-TES.LH02

Il prototipo ENEA-TES-LH02 da caratterizzare termicamente è un elemento di accumulo termico da circa 20 kWh di tipo “tubo e guscio”, con tubazione interna di scambio termico a serpentina costituita principalmente da tubi alettati (Figura 4-1). Tale sistema contiene circa 300 kg di Sali Solari (SS) che fondono a circa 225 °C e costituiscono il materiale a cambiamento di fase del TES.

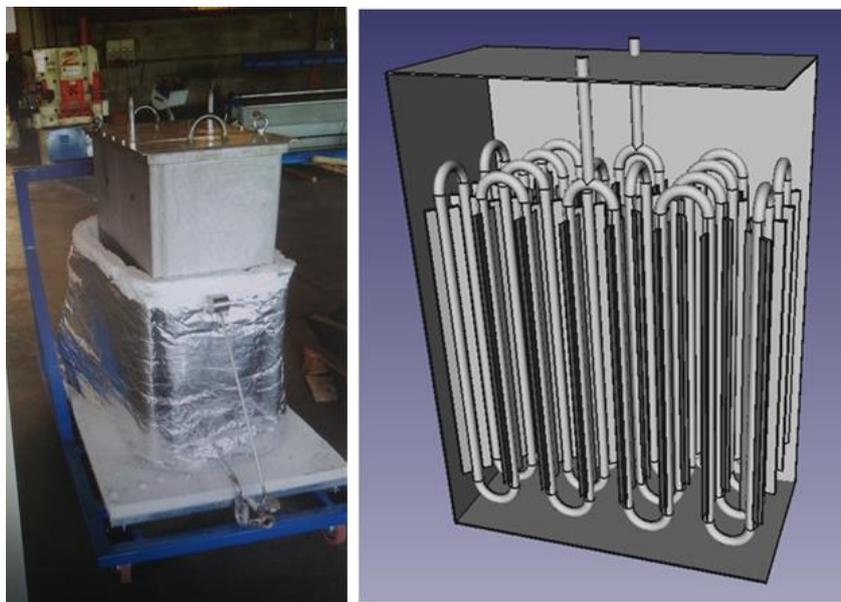
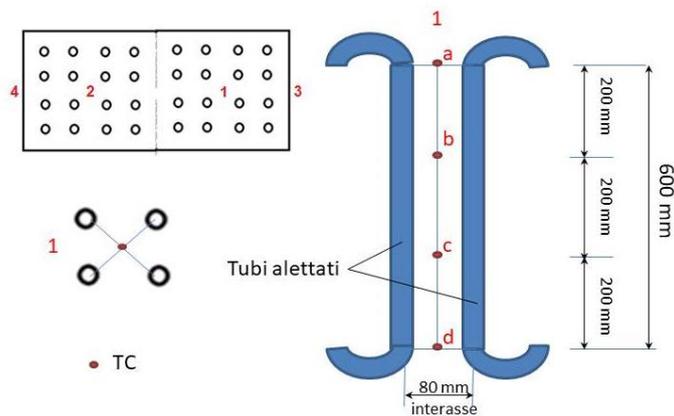


Figura 4-1- Foto del prototipo ENEA-TES-LH02 di tipo “tubo e guscio” a serpentina interna con tubi alettati.

I dettagli relativi alle dimensioni, alla progettazione ed alla realizzazione di questo prototipo possono essere ricavati da [1] e [2]. Al fine di poter mappare la situazione termica interna al sistema di accumulo termico, sono state installate 16 termocoppie di tipo K (8 interne ed 8 sulla parete del contenitore): la loro disposizione è quella indicata in Figura 4-2.



2, 3, 4, TC alla stessa quota

Identificazione TC: un numero (1, 2 3 4) una lettera (a, b, c, d)

Figura 4-2- Schema di posizionamento ed identificazione delle termocoppie di tipo K all'interno del prototipo ENEA-TES-LH02.

5 Descrizione delle prove di caratterizzazione

Al fine di ottenere una completa caratterizzazione termica del prototipo LH02, misurando sia i tempi di carico e scarico che le prestazioni termica, si è proceduto in modo analogo a quanto fatto per LH01 [4].

In particolare, i test qui di seguito descritti verranno effettuati utilizzando l'impianto sperimentale Solteca3 presente presso il C.R Casaccia dell'ENEA (vedi paragrafo 2) e sfruttando la presenza di termoresistenze ad elevata precisione (PT100 Classe A) consente la misura del salto termico ingresso-uscita con minori incertezze (vedi paragrafo 3).

5.1 Le procedure di caratterizzazione termica.

Le procedure di test adottate per la caratterizzazione del prototipo LH02 sono, quindi, le seguenti:

- TEST 1: Curva di Potenza del HTF in carico/scarico
 - a. A portata massima
 - b. A portata media
 - c. A portata minima
- TEST 2: Perdite termiche ad una temperatura costante (240. 260. - metodo Energy balance)
- TEST 3: Perdite termiche a sistema inattivo durante un tempo t (metodo di confronto)
- TEST 4: Analisi carico/scarico TES in più cicli

5.1.1 TEST 1: Curva di Potenza del HTF in carico/scarico

In questo tipo di prova, finalizzata a ricavare la curva di potenza caratteristica del prototipo di accumulo, si prevede di caricare il sistema fino a un livello di accumulo termico del 100% e, successivamente, di scaricarlo fino ad un livello di carico dello 0%.

La procedura messa a punto per questa prova è una sorta di "test unificato" che può essere utilizzato per stimare almeno cinque indicatori di prestazioni:

- Tempi di carico e scarico,
- Perdite di calore (metodo Energy balance),
- Capacità termica di stoccaggio,
- Efficienza di stoccaggio,
- Fattore di utilizzo.

La procedura è sostanzialmente la seguente:

1. Riscaldare il TES alla portata nominale e alla temperatura minima fino a quando non si osserva una condizione stazionaria di fine carico;
2. Le perdite di calore dinamiche alla temperatura minima $P_{loss@T_{min}}$ possono essere misurate ora;
3. Caricare il TES alla portata nominale e alla temperatura massima fino a quando non viene osservato uno stato stazionario di fine carico (Livello di accumulo del **100%**. Potrebbero essere utilizzati diversi criteri di fine carico, a condizione che siano chiaramente descritti);
4. Le perdite di calore dinamiche alla temperatura massima $P_{loss@T_{max}}$ e il tempo caratteristico nominale di carico $t_{charge}^{0 \rightarrow 100}$ (tempo intercorso tra l'inizio della fase di carico t_0 e l'istante t_{100} di fine pieno carico) possono essere misurate ora;
5. Scaricare il TES alla portata nominale e alla temperatura minima fino a quando non si osserva una condizione stazionaria di fine scarico (Livello di accumulo **0%**);
6. Le perdite di calore dinamiche alla temperatura minima $P_{loss@T_{min}}$ e il tempo di scarico tempo caratteristico nominale di scarico $t_{discharge}^{100 \rightarrow 0}$ (tempo intercorso tra l'inizio della fase di scarico t_{100} e l'istante t_0 di fine pieno scarico) possono essere misurate ora;

Le fasi di riscaldamento e di carico/scarico del sistema sono schematizzate come in **Figura 5-1**: le temperature di riferimento saranno, quindi, di 200 °C, come temperatura minima T_{min} , e 280°C, come temperatura massima T_{max} .

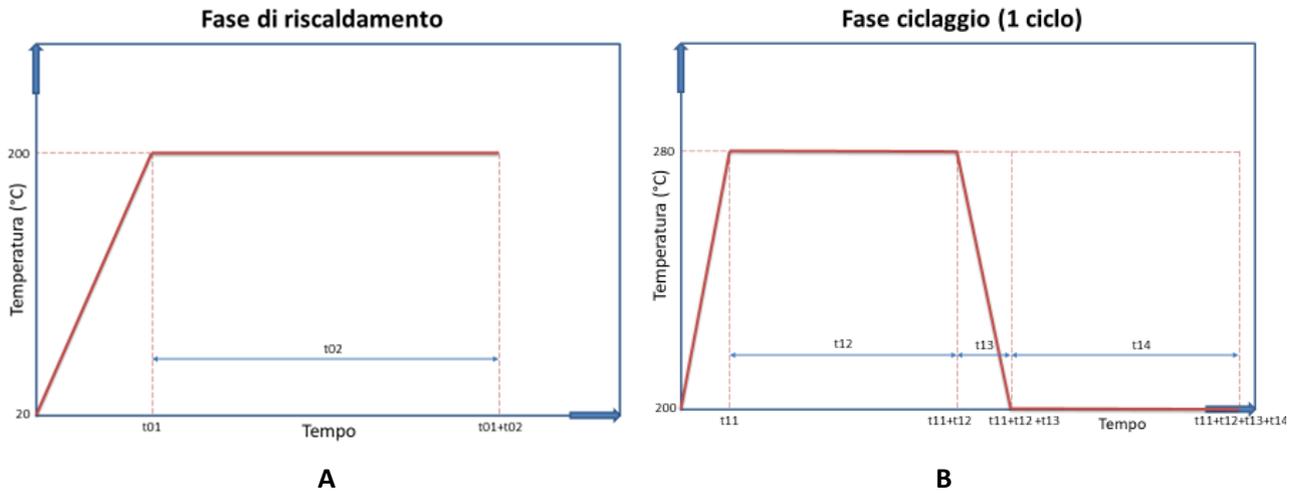


Figura 5-1- Set point della temperatura di ingresso del HTF per le fasi di riscaldamento (A) e di carico/scarico (B).

In esse, tenendo conto della necessità di raggiungere uno stato stazionario si sono ipotizzati i seguenti tempi operativi, modificabili in base alle esigenze:

- Fase 1 - Riscaldamento a 200°C: $t_{01} = 2$ ore $t_{02} = 13$ ore
- Fase 2 - Carico a 280°C: $t_{11} = 1$ ora $t_{12} = 20$ ore
- Fase 3 - Scarico a 200°C $t_{13} = 1$ ora $t_{14} = 20$ ore

Il test in questione sarà ripetuto con tre possibili livelli di potenza: massima, metà e minima. Ciò equivale, sostanzialmente, a variare la portata del sistema. Su tale base si analizzeranno i seguenti tre casi:

- **Test #1/a** Curva di Potenza del HTF con carico/scarico completo a portata massima
- **Test #1/b** Curva di Potenza del HTF con carico/scarico completo a portata media
- **Test #1/c** Curva di Potenza del HTF con carico/scarico completo a portata minima

Le relative condizioni di prova saranno le seguenti:

Tabella 5-1 – Condizioni di prova per il Test#1 del prototipo LH02

Condizione	Test #1/a	Test #1/b	Test #1/c
Portata in massa (kg/h)	800	400	200
Velocità HTF ingresso TES (m/s)	1.1	0.56	0.28
Iniziale –T HTF ingresso (°C)	200	200	200
Carico –T HTF ingresso (°C)	280	280	280
Scarico - T HTF ingresso (°C)	200	200	200

Essendo il prototipo costituito internamente da due rami in parallelo, identici tra loro e ciascuno con una sezione pari alla sezione di ingresso, sia la portata che la velocità del fluido termovettore in ciascun ramo risulteranno dimezzate rispetto a quella di ingresso.

I risultati base delle suddette prove saranno le misure, riferite al HTF, di: temperatura di ingresso $T_{HTF,in}(t)$, temperatura di uscita $T_{HTF,out}(t)$ e portata $w(t)$. Da queste è allora possibile ricavare la curva di potenza caratteristica del prototipo, da cui poi calcolare tutte le altre grandezze derivate. Tale curva è data dalla seguente relazione:

$$P_{HTF}(t) = w(t)\Delta h_{HTF}(t)$$

In cui:

$$\begin{aligned} \Delta h_{HTF}(t) &= h_{HTF,out}(t) - h_{HTF,in}(t) \\ \Delta h_{HTF}(t) &= c_{p,HTF}(T_{HTF,out})T_{HTF,out}(t) - c_{p,HTF}(T_{HTF,in})T_{HTF,in}(t) \end{aligned}$$

La variazione di potenza a fine carico o scarico è chiaramente (quasi) nulla poiché l'unica potenza costante fornita è quella per compensare le perdite di calore

$$\begin{aligned} P_{Loss}(t_{100}) &= P_{HTF}(t_{100}) && \text{in carico} \\ P_{Loss}(t_0) &= P_{HTF}(t_0) && \text{in scarico} \end{aligned}$$

L'energia trasmessa/rilasciata dal HTF è:

$$E_{charge} = \int_{t_0}^{t_{100}} P_{HTF}(\xi) d\xi \quad E_{discharge} = \int_{t_{100}}^{t_0} P_{HTF}(\xi) d\xi$$

Così come, in modo analogo, l'exergia trasmessa/rilasciata dal HTF è:

$$\epsilon_{charge} = \int_{t_0}^{t_{100}} \left(1 - \frac{T_o}{T_{in}}\right) P_{HTF}(\xi) d\xi \quad \epsilon_{discharge} = \int_{t_{100}}^{t_0} \left(1 - \frac{T_o}{T_{out}}\right) P_{HTF}(\xi) d\xi$$

L'energia teorica di accumulo potrà essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$\begin{aligned} E_{theor,HSM} &= M_{HSM} \{ c_{p,HSM}(T_{HSM,max})T_{HSM,max} - c_{p,HSM}(T_{HSM,min})T_{HSM,min} + \Delta H_{lat} \} \\ &+ M_{HTF} (c_{p,HTF}(T_{HTF,max})T_{HTF,max} - c_{p,HTF}(T_{HTF,min})T_{HTF,min}) \\ &+ M_{steel} c_{p,steel} (T_{HTF,max} - T_{HTF,min}) \end{aligned}$$

Ciò che è verrà conteggiato o meno nella relazione precedente, per valutare la capacità teorica di accumulo, dovrà essere indicato chiaramente: mezzo di accumulo, HTF, riempitivo, pareti, contenitori, scambiatori di calore integrati, isolamento termico.

In conclusione, si valuteranno alcune grandezze caratterizzanti il prototipo in questione:

Capacità di accumulo (o di progetto)

$$SC = \frac{E_{discharge}}{SC}$$

Potenza termica media

$$P_{mean} = \frac{SC}{t_{discharge}^{100 \rightarrow 0}}$$

Fattore di carico:

$$CR = \frac{E_{charge}(T_{out,charge})}{E_{theor,HSM}}$$

Rateo di utilizzo:

$$UR = \frac{E_{discharge}(T_{out,discharge})}{E_{theor,HSM}}$$

Efficienza di accumulo

$$\eta_{TES}(T_{out,charge}, T_{out,discharge}) = \frac{E_{discharge}(T_{out,discharge})}{E_{charge}(T_{out,charge})}$$

Efficienza exergetica di accumulo

$$\eta_{ex} = \frac{\epsilon_{discharge}}{\epsilon_{charge}}$$

5.1.2 TEST 2: Perdite termiche ad una temperatura costante

Le perdite termiche a temperatura costante, $P_{lost}(T)$, del prototipo in esame, anche se non possono essere estrapolate per sistemi TES di maggiore dimensione, forniscono delle interessanti indicazioni. Per determinarle è possibile utilizzare la portata massima del Test 1, per massimizzare lo scambio termico e, quindi, abbreviare i tempi, ed applicare il metodo "Energy balance", in analogia a quanto già fatto durante il Test 1.

La procedura per quantificare dette perdite termiche ad una temperatura T_{SM} è la seguente:

- Preriscaldare il prototipo di accumulo, alla portata stabilita, ad una temperatura prossima a T_{min} . Questa situazione deve essere verificata misurando la temperatura all'interno del prototipo.
- Caricare il prototipo TES finché il sistema è "quasi" isotermico ad una temperatura costante $T_{SM}(t)$. A tal fine, è necessario misurare $T_{HTF,in}(t)$ e $T_{HTF,out}(t)$, così come la temperatura ambiente, T_{∞} .

$$T_{SM}(t) = \frac{T_{HTF,in}(t) + T_{HTF,out}(t)}{2}$$

- Misurare il flusso di HTF, $q_{HTF}(t)$, calcolare le perdite di calore di potenza, P_{lost} , alla temperatura del HSM assunta costante, T_{SM} , bilanciandolo con la potenza del HTF in carico.

$$P_{HTF}(t) = \rho_{HTF} q_{HTF}(t) \bar{c}_{p,HTF} (T_{HTF,out}(t) - T_{HTF,in}(t)) = P_{lost}(t, T_{SM} - T_{\infty})$$

Nel caso in esame, avendo già misurato nel Test 1 le perdite termiche a 200 e 280°C, è possibile limitarsi ad almeno un paio di temperature differenti come 240 e 260 °C, avendo cura di evitare l'intervallo di cambio di fase (220-230°C) in cui il raggiungimento dello stazionario è più difficoltoso.

Una prova completa può essere strutturata secondo lo schema di **Figura 5-2**, in cui gli intervalli temporali indicativi sono i seguenti:

- | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|
| • Fase 1: Riscaldamento a 200°C: | t_01 = 2 ore | t_02 = 10 ore |
| • Fase 2: Sistema da 200 a 240°C: | t_03 = 1 ora | t_04 = 10 ore |
| • Fase 3: Sistema da 240 a 260°C: | t_05 = 1 ora | t_06 = 10 ore |
| • Fase 4: Sistema da 260 a 280°C: | t_07 = 1 ora | t_08 = 10 ore |

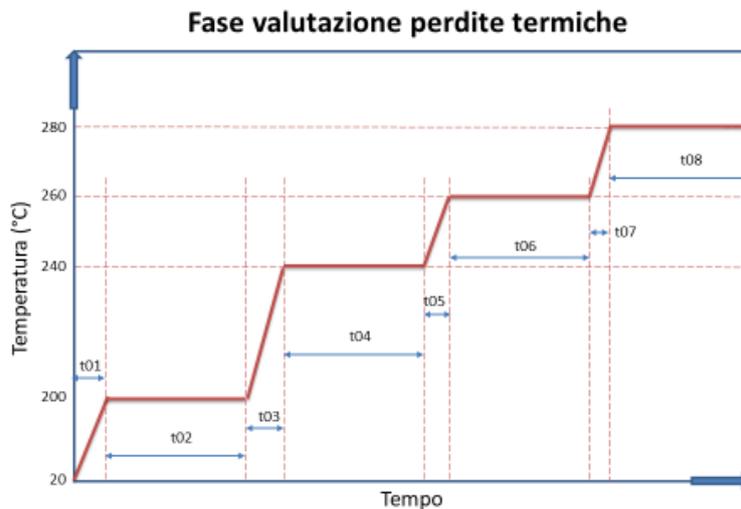


Figura 5-2- Set point della temperatura di ingresso del HTF per la fase di valutazione delle perdite termiche a temperatura costante.

5.1.3 TEST 3: Perdite termiche a sistema inattivo durante un tempo t^*

Altro tipo di perdite termiche interessanti sono quelle connesse al mantenimento della inattività di un TES per un determinato tempo t . La loro valutazione verrà fatta comparando (metodo di confronto) l'energia disponibile dopo l'inattività con quella che si avrebbe nel caso $t^*=0$ (sistema sempre attivo).

A tal fine, sarà necessario disporre della potenza termica media per uno scarico completo (Test 1):

$$P_{100\%,mean} = \frac{1}{t_{discharge}^{100 \rightarrow 0}} \int_{t_{100}}^{t_0} P_{HTF}(t) dt$$

In questo test occorre effettuare una nuova fase di carico termico fino ad avere il prototipo di accumulo completamente carico (100%). Quindi, si interrompe la circolazione del HTF e si lascia il prototipo inattivo per un certo tempo t .

A causa delle perdite termiche, il livello di accumulo, dopo il tempo t^* , si riduce al livello di accumulo A . Si sottolinea che in tale prova la temperatura ambiente dovrebbe essere il più possibile costante. A questo punto si effettua uno scarico completo, e si calcola la corrispondente potenza media, $P_{A,mean}$:

$$P_{A,mean} = \frac{1}{t_{discharge}^{A \rightarrow 0}} \int_{t_{1,A}}^{t_0} P_{HTF}(t) dt$$

L'energia persa nell'intervallo temporale t , $P_{Idle_lost,t}$, sarà calcolata dalla seguente relazione

$$tP_{Idle_lost,t}^A = t_{discharge}^{100 \rightarrow 0} P_{100\%,mean} - t_{discharge}^{A \rightarrow 0} P_{A,mean}$$

Nota: questo test potrebbe essere integrato con il Test 2. Al termine del Test 2, a 280°C, il sistema può essere considerato carico al 100%. Se il sistema rimane spento o in bypass per un tempo t , esso si porta ad un livello di carico A . A questo punto si riattiva la circolazione portando il sistema a circa 200°C, ad un livello di carico 0%.

5.1.4 TEST 4: Analisi carico/scarico TES in più cicli

Questo test è finalizzato a verificare il comportamento del TES dopo ripetuti cicli di carico/scarico i cui tempi siano compatibili con l'applicazione cui è destinato. Nel nostro caso la scelta potrebbe essere compatibile con un sistema solare a concentrazione.

Il Test 4 è perfettamente analogo al Test 1 in cui si ripete per N volte un tipico ciclo di carico/scarico di circa 12 ore (Figura 5-3).

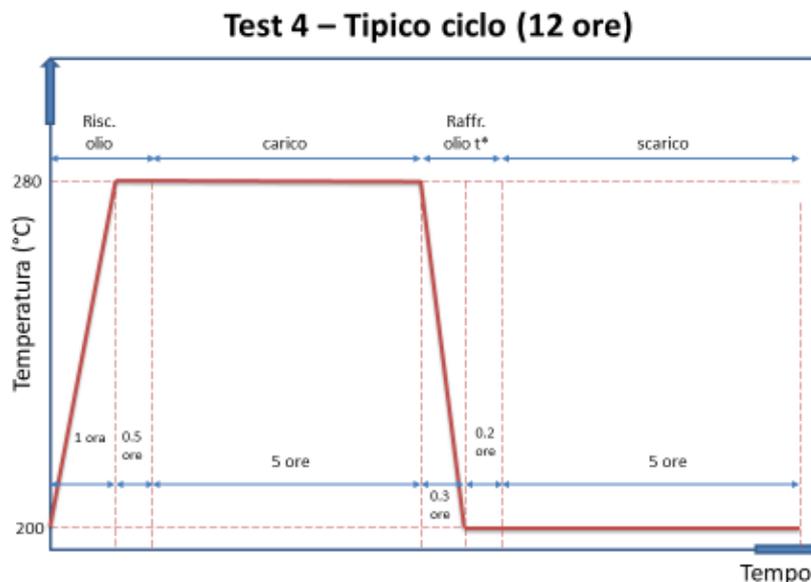


Figura 5-3- Set point della temperatura di ingresso del HTF per un ciclo termico di carico/scarico di 12 ore.

In sintesi il Test 4 prevede le seguenti azioni:

- Preriscaldare il prototipo TES ad una temperatura prossima a quella nominale $T_{HSM}=200^{\circ}\text{C}$ o circa 10°C in meno, verificandone il valore attraverso una misura delle temperature interne al HSM;
- L'intera procedura viene eseguita in condizioni di portata $q_{HTF}(t)$ e temperatura di ingresso del fluido $T_{HTF,in}(t)$ mantenute costanti sia per il carico che per lo scarico;

- Riscaldare l’HTF: rampa da 200 a 280 °C in circa 1 ora, a cui segue una fase a temperatura costante di 30 minuti;
- Caricare il TES, con olio a 280°C, per 5 ore, fino a un livello di accumulo A, compatibile con il tempo di carico disponibile.
- Raffreddamento l’HTF: chiusura circolazione e rampa da 280 a 200 °C in circa 15 min, a cui segue una fase a temperatura costante di 15 minuti;
- Scaricarlo subito dopo, con olio a 200°C per 5 ore, a livello di carico B, compatibile con il tempo di scarico disponibile;
- Ripetere il ciclo carico-scarico per altri N-1 cicli, al fine di verificare l’andamento delle prestazioni nel tempo.

L’intervallo di tempo t^* tra il carico e lo scarico è molto piccolo, il minimo necessario per il passaggio del sistema alla temperatura nominale di scarico (stato di ricircolo), per poi riprendere il pompaggio.

5.2 Analisi delle condizioni fluidodinamiche interne.

L’impianto sperimentale Solteca3, dopo essere stato caricato con l’olio diatermico Therminol 66, sarà programmato per farlo circolare ad una portata volumetrica costante con temperature operative tra i 200 ed i 280°C. Tale portata sarà differente nelle diverse prove sperimentali potendo assumere tre diversi valori: 800, 400 e 200 litri/ora.

Il fluido termovettore scorrerà all’interno dello scambiatore del prototipo LH02 assumendo una velocità che sarà funzione, oltre che della portata e delle proprietà del fluido stesso, anche delle dimensioni del tubo di scambio. Il tubo è caratterizzato da un diametro esterno di 20 mm ed uno spessore di 2 mm. Di conseguenza, il diametro interno sarà pari a 16 mm. Lo scambiatore è costituito da due serpentine in parallelo. Ogni serpentina è costituita da 16 tubi rettilinei da 600 mm e una serie di raccordi a 180°, per una lunghezza complessiva di 11.75 m. Da questi valori è anche possibile dedurre la velocità in ingresso ed in una singola serpentina del fluido termovettore:

Tabella 5-2 – Portata e velocità fluido termovettore in LH02

Proprietà	Unità	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Portata ingresso	lit/h	800	500	200
Portata ingresso	m ³ /s	2.22 10 ⁻⁴	1.39 10 ⁻⁴	5.55 10 ⁻⁵
Velocità ingresso	m/s	1.10	0.69	0.27
Velocità in una serpentina	m/s	0.55	0.35	0.14

A partire dai dati riportati in precedenza è quindi possibile calcolare, per i tre valori di riferimento di portata e velocità, i numeri di Reynolds e di Nusselt e, quindi, valutare il coefficiente di scambio termico.

In **Figura 5-4** sono mostrati gli andamenti del numero di Reynolds in funzione della temperatura per i tre casi considerati. Per i primi due test, a portata maggiore, si osserva che il Numero di Reynolds, sopra i 200 °C, è superiore a 4000. Quindi, in questi casi si avrà un deflusso dell’HTF di tipo turbolento. Al contrario, per il terzo test, Re è appena superiore a 2000 quando la temperatura del fluido è intorno ai 200°C per essere di circa 4000 intorno ai 280 °C. In questo test il deflusso avverrà interamente in un regime di transizione tra quello laminare e quello turbolento.

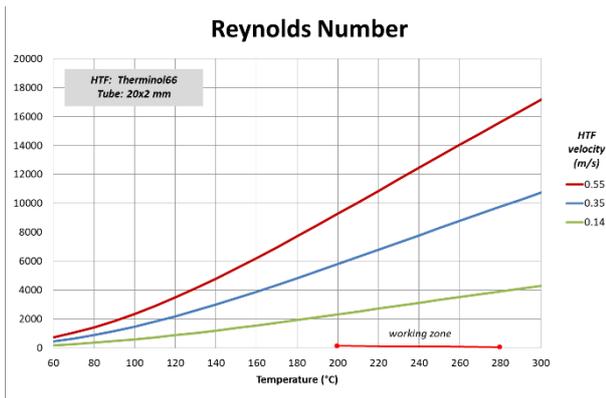


Figura 5-4- Numero di Reynolds per i casi considerati.

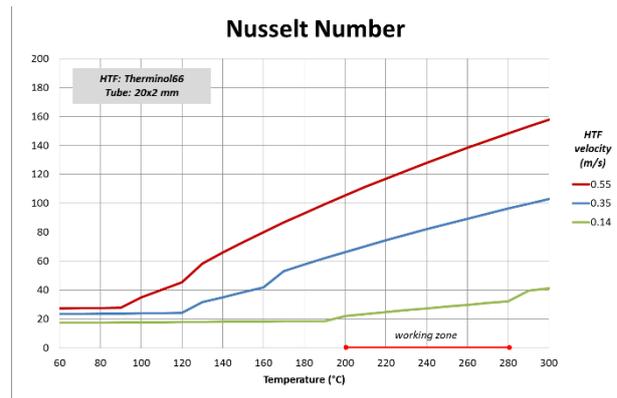


Figura 5-5- Numero di Nusselt per i casi considerati.

Le conseguenze di quanto detto si possono riscontrare anche negli andamenti delle curve relative al numero di Nusselt (Figura 5-5). Nu è stato calcolato utilizzando le seguenti correlazioni:

$$Nu_f = \begin{cases} 1.86 \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} Re_f^{0.33} Pr_f^{0.33} & \text{se } Re_f < 2300 \text{ (regime laminare)} \\ 0.0033 Re_f Pr_f^{0.37} & \text{se } 2300 < Re_f < 4000 \text{ (transizione)} \\ \frac{(f/8)(Re_f - 1000) Pr_f}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr_f^{2/3} - 1)} & \text{se } Re_f > 4000 \text{ (regime turbolento)} \end{cases}$$

In cui:

$$f = (0.79 \ln(Re_f) - 1.64)^{-2}$$

Per i primi due test il regime di transizione si esaurisce a 120°C e 180°C, rispettivamente, passando poi ad un regime di tipo turbolento. Invece, per il terzo caso la zona di transizione inizia e termina esattamente in corrispondenza delle due temperatura limite dell'intervallo operativo.

In linea con il valore di Nusselt è, chiaramente, il coefficiente di scambio termico h (Figura 5-6). Per i vari test esso varia tra 700 e 900 W/m²°C per il primo, tra 350 e 450 W/m²°C per il secondo e, infine, tra 100 e 200 W/m²°C per il terzo. Chiaramente, l'ultimo test è quello che dal punto di vista dello scambio termico è più penalizzato, soprattutto alla temperatura operativa più bassa.

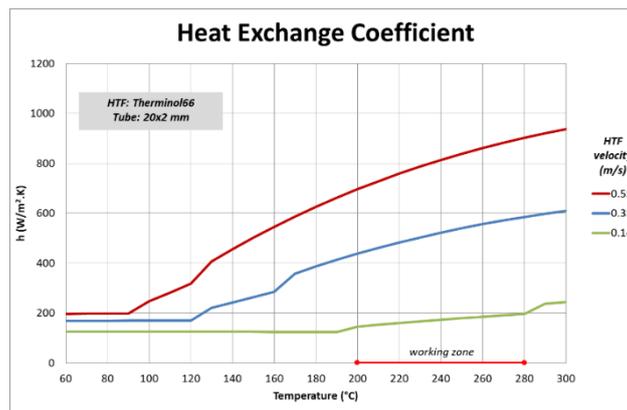


Figura 5-6- Coefficiente di scambio termico h calcolato.

6 Risultati della caratterizzazione

Qui di seguito sono riportati i risultati dei test di caratterizzazione eseguiti sul prototipo LH02, descritti nel capitolo precedente. L'intervallo di temperatura operativa selezionato per il fluido termovettore è 200-280 °C. Affinché venga assicurato tale intervallo, il set-point di temperatura da realizzare all'interno di Solteca3 è mantenuto circa 10 °C maggiore: 210-290°C. La portata del fluido è, a seconda dei vari test, compresa tra 200 e 800 kg/h.

6.1 Risultati del Test 1

6.1.1 Test 1a

Nel test 1° la portata del fluido è stata mantenuta costante e pari a 800 kg/h.

In **Figura 6-1/A** è evidenziato l'andamento delle temperature di ingresso (RTD2) ed uscita (RTD1) del fluido termovettore da LH02 durante le tre fasi di riscaldamento, carico e scarico del sistema. Come è facile notare, al termine della fase di riscaldamento e soprattutto di carico non si raggiunge un effettivo stato "quasi" stazionario poiché i tempi scelti risultano essere abbastanza limitati. Ciò è anche dovuto al fatto che la temperatura in ingresso è sicuramente non costante e molto inferiore a quella target.

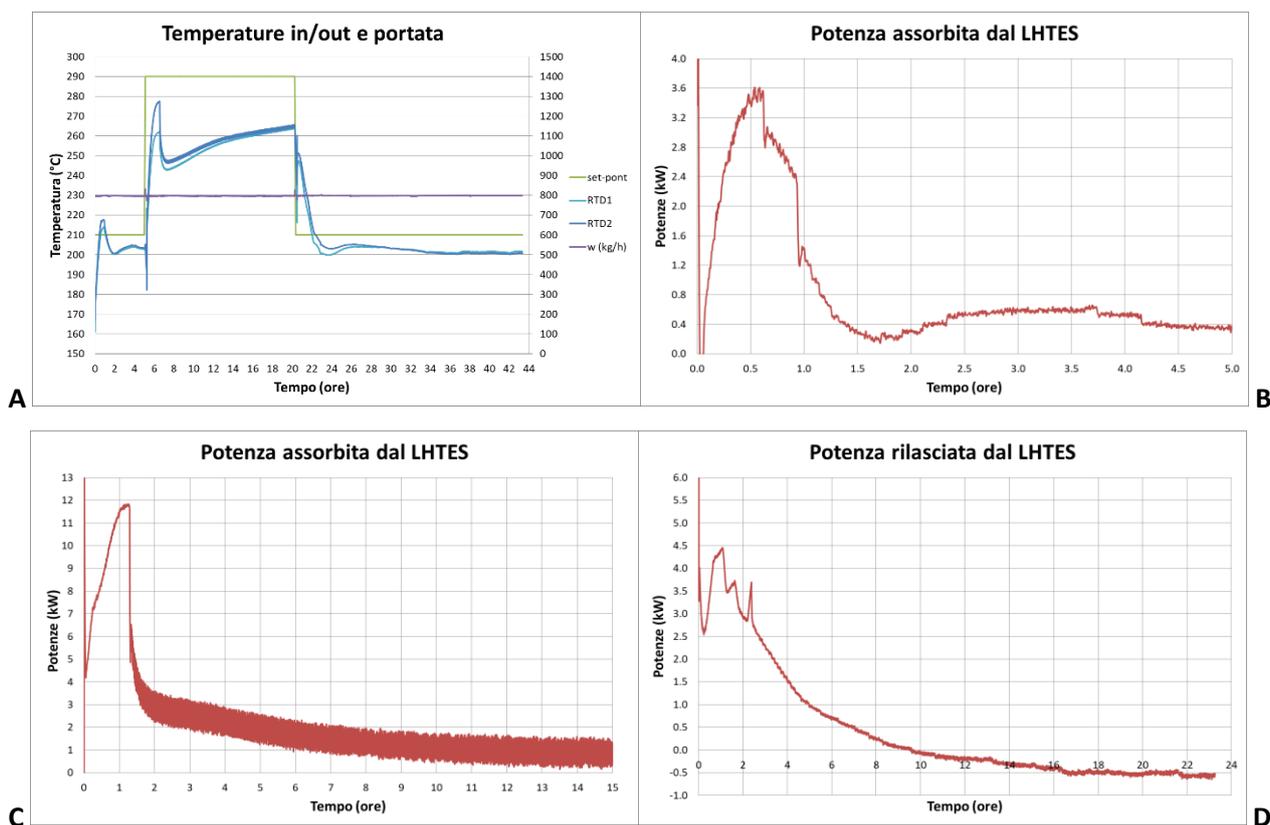


Figura 6-1- Test 1a. Andamento delle temperature di set point e di ingresso ed uscita dal LH02 (A). Andamento delle potenze di riscaldamento (B), di carico (C) e di scarico (D).

Tale non stazionarietà è anche visibile dall'andamento delle curve di potenza per le fasi di riscaldamento (**Figura 6-1/B**) e carico (**Figura 6-1/C**). Al contrario la curva di potenza della fase di scarico è ben stabilizzata oltre la ventesima ora (**Figura 6-1/D**).

Gli stazionari a fine fase possono essere indicativi del livello delle perdite termiche relative alle rispettive temperature di riferimento: a 200 °C, 366.91 W, a 280 °C, 866.74 W e, nuovamente a 200 °C, 533.85 W.

In **Figura 6-2/A** e **B** sono riportati gli andamenti, rispettivamente, delle energie accumulate ed estratte durante le due fasi di carico e scarico. Attraverso dette curve è allora possibile determinare anche i tempi caratteristici di carico e scarico del sistema LH02.

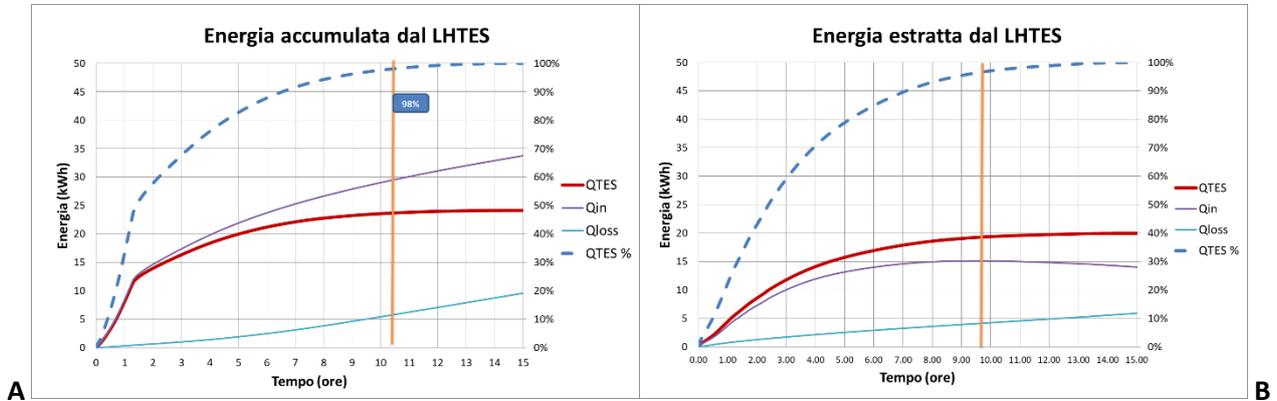


Figura 6-2- Andamenti dell'energia fornita o rilasciata dal fluido termovettore, dal mezzo di accumulo e di quella persa durante le fasi di carico (A) e scarico (B).

Il tempo di carico del sistema può essere identificato come il tempo necessario a caricare circa il 98% dell'energia massima accumulabile nel TES: nel nostro caso è di circa 10.5 ore. Invece, il tempo di scarico è definibile come il tempo in cui la potenza asportata dal fluido è nulla (da lì in poi servirà solo a compensare le perdite termiche): in questo caso è di circa 9.5 ore.

Durante la fase di carico l'HTF ha fornito 33.7 kWh, di cui 24.2 sono stati realmente accumulati. In fase di scarico, il TES ha fornito circa 20 kWh, di cui circa 15 sono stati ceduti al HTF.

Occorre notare che per calcolare la quantità di energia accumulata o rilasciata dal TES è stato necessario valutare in modo accurato le perdite termiche: ciò è stato possibile sfruttando le valutazioni effettuate al termine del Test 2, cui si rimanda per i dettagli.

6.1.2 Test1b

Nel test 1b la portata del fluido è stata mantenuta costante e pari a 400 kg/h.

In **Figura 6-3/A** è evidenziato l'andamento delle temperature di ingresso (RTD2) ed uscita (RTD1) del fluido termovettore da LH02 durante le tre fasi di riscaldamento, carico e scarico del sistema. In questo caso, i tempi scelti sembrano condurre al termine di tutte le fasi al raggiungimento di uno stato "quasi" stazionario. Invece, durante la fase di carico, permane il fatto che Solteca3 non è in grado di mantenere la temperatura in ingresso costante e prossima a quella target.

Tale non stazionarietà è anche visibile dall'andamento delle curve di potenza per le fasi di riscaldamento (**Figura 6-3/B**) e carico (**Figura 6-3/C**). Al contrario la curva di potenza della fase di scarico è ben stabilizzata oltre la ventesima ora (**Figura 6-3/D**).

Gli stazionari a fine fase possono essere indicativi del livello delle perdite termiche relative alle rispettive temperature di riferimento: a 200 °C, 463.12 W, a 280 °C, 770.58 W e, nuovamente a 200 °C, 420.72 W.

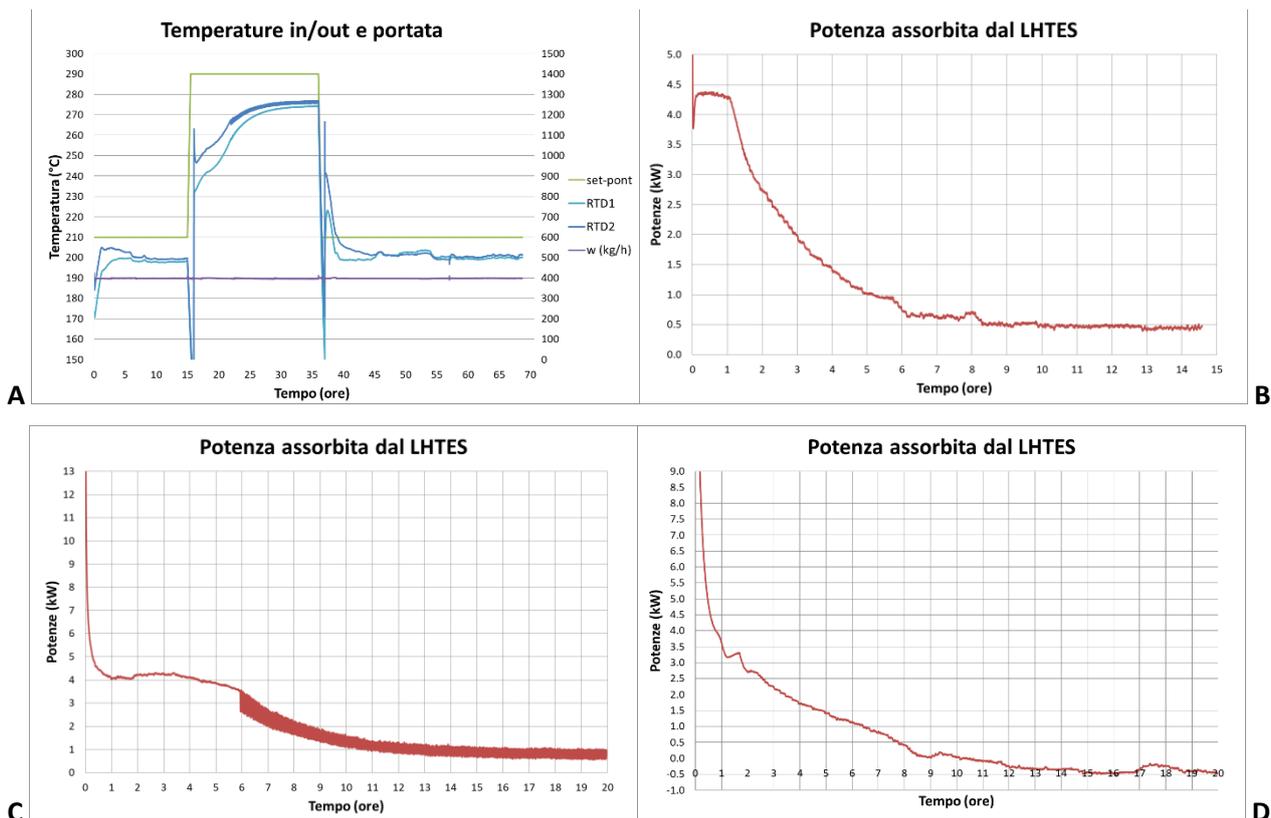


Figura 6-3- Test 1b. Andamento delle temperature di set point e di ingresso ed uscita dal LH02 (A). Andamento delle potenze di riscaldamento (B), di carico (C) e di scarico (D).

In Figura 6-4/A e B sono riportati gli andamenti, rispettivamente, delle energie accumulate ed estratte durante le due fasi di carico e scarico. Attraverso dette curve è allora possibile determinare anche i tempi caratteristici di carico e scarico del sistema LH02.

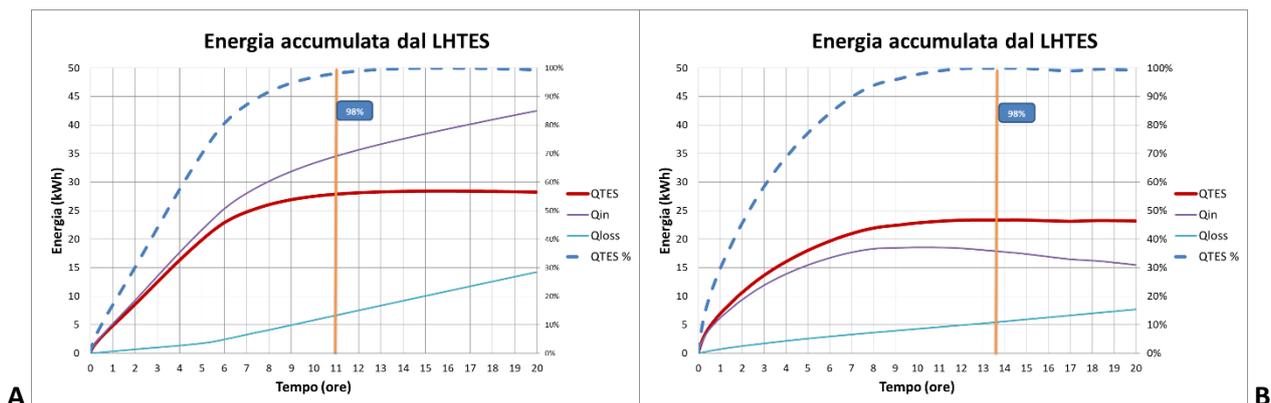


Figura 6-4- Andamenti dell'energia fornita o rilasciata dal fluido termovettore, dal mezzo di accumulo e di quella persa durante le fasi di carico (A) e scarico (B).

Il tempo di carico del sistema (98% dell'energia massima accumulabile nel TES) è valutato in circa 11 ore, mentre quello scarico (potenza asportata nulla) è di circa 10 ore.

Durante la fase di carico l'HTF ha fornito 42.5 kWh, di cui 28.4 sono stati realmente accumulati. In fase di scarico, il TES ha fornito circa 23.4 kWh, di cui circa 18.6 sono stati ceduti al HTF.

6.1.3 Test1c

Nel test 1c la portata del fluido è stata mantenuta costante e pari a 200 kg/h.

In **Figura 6-5/A** è evidenziato l'andamento delle temperature di ingresso (RTD2) ed uscita (RTD1) del fluido termovettore da LH02 durante le tre fasi di riscaldamento, carico e scarico del sistema. In questo caso, i tempi scelti sembrano condurre al termine di tutte le fasi al raggiungimento di uno stato "quasi" stazionario ad eccezione parzialmente della fase di carico. Inoltre, durante la fase di carico, permane il fatto che Solteca3 non è in grado di mantenere la temperatura in ingresso costante e prossima a quella target.

Tale stazionarietà non completa è anche visibile dall'andamento della curva di potenza per la fase di carico (**Figura 6-5/C**). Al contrario le curve di potenza delle fasi di riscaldamento (**Figura 6-5/B**) e di scarico (**Figura 6-5/D**) sono prossime ad uno stato stazionario.

Gli stazionari a fine fase possono essere indicativi del livello delle perdite termiche relative alle rispettive temperature di riferimento: a 200 °C, 487.8 W, a 280 °C, 1054.9 W e, nuovamente a 200 °C, 326.9 W.

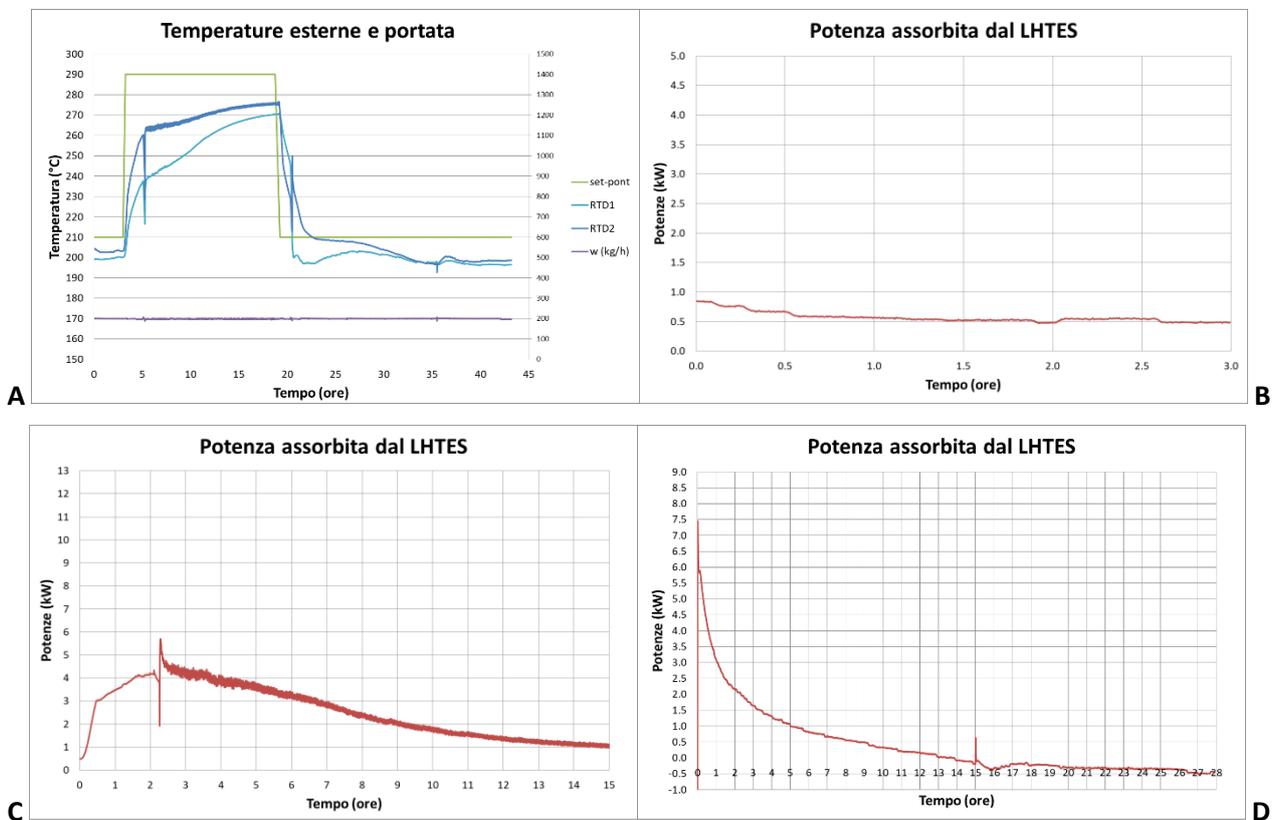


Figura 6-5- Test 1c. Andamento delle temperature di set point e di ingresso ed uscita dal LH02 (A). Andamento delle potenze di riscaldamento (B), di carico (C) e di scarico (D).

In **Figura 6-6/A** e **B** sono riportati gli andamenti, rispettivamente, delle energie accumulate ed estratte durante le due fasi di carico e scarico. Attraverso dette curve è allora possibile determinare anche i tempi caratteristici di carico e scarico del sistema LH02.

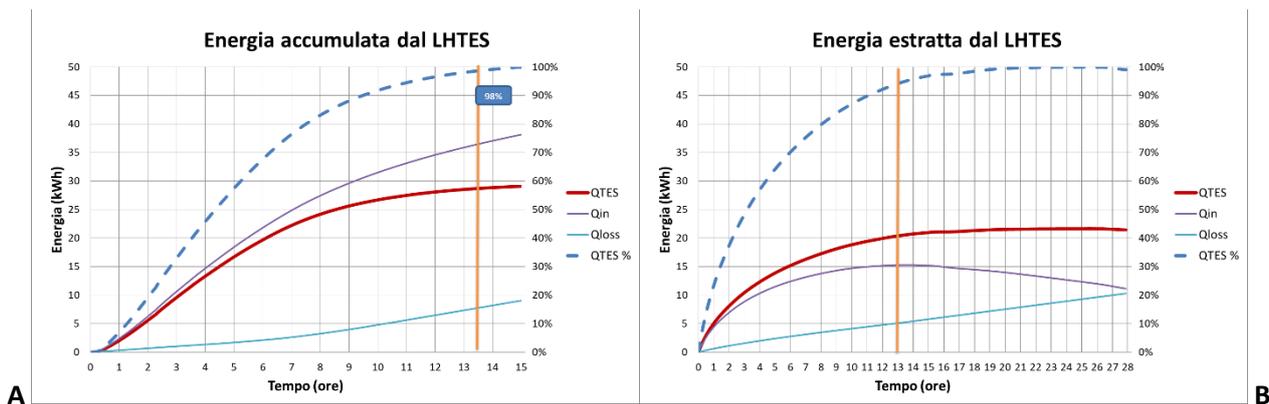


Figura 6-6- Andamenti dell’energia fornita o rilasciata dal fluido termovettore, dal mezzo di accumulo e di quella persa durante le fasi di carico (A) e scarico (B).

Il tempo di carico del sistema (98% dell’energia massima accumulabile nel TES) è valutato in circa 13.5 ore, ed è sostanzialmente identico a quello dire quello scarico (potenza asportata nulla) è di circa 10 ore.

Durante la fase di carico l’HTF ha fornito 38.2 kWh, di cui 29.1 sono stati realmente accumulati. In fase di scarico, il TES ha fornito circa 21.7 kWh, di cui circa 15.3 sono stati ceduti al HTF.

6.1.4 Sintesi risultati

Per completare la caratterizzazione del modulo si dovranno valutare, sulla base dei dati precedentemente mostrati, altre grandezze caratteristiche.

Per la valutazione di alcune di queste sarà necessario riferirsi alla Capacità di Accumulo Teorica del prototipo. Tale caratteristica è valutata come segue:

- Si considerano una temperatura ambiente di 20 °C e una temperatura operativa minima e massima rispettivamente di 200 °C e 280 °C;
- Saranno presi in conto quattro componenti fondamentali: il PCM, l’acciaio (scambiatore e contenitore), il fluido termovettore e il coibente;
- Il PCM ha una massa di 306 kg, un calore latente di 110000 J/kg, un calore specifico di 1430 J/kg/°C se solido e 1540 J/kg/°C se liquido. L’energia massima accumulabile nel PCM è di 21.69 kWh (il 92.58% del totale);
- L’acciaio ha una massa di 89 kg ed un calore specifico di 500 J/kg/°C. L’energia massima accumulabile nell’acciaio è di 0.99 kWh (il 4.22% del totale);
- Il fluido termovettore ha una massa di 4.3 kg, un calore specifico minimo e massimo di rispettivamente 2194 J/kg/°C e 2494 J/kg/°C. L’energia massima accumulabile nell’acciaio è di 0.31 kWh (il 1.32% del totale);
- Il coibente (Morgan ThermalCeramics) ha una massa di 81 kg, un calore specific di 490 J/kg.C e una temperatura media di lavoro di 110 °C minima e 150 °C massima (variazione di 40 °C). L’energia massima accumulabile nell’acciaio è di 0.44 kWh (il 1.88% del totale);
- La Capacità di Accumulo Teorica sarà, quindi, di 23.43 kWh.

Quindi, in **Tabella 6-1** è riportata la valutazione delle principali grandezze caratterizzanti il comportamento del prototipo LH02 durante il Test 01.

Tabella 6-1 – Principali risultati caratterizzanti il comportamento del prototipo LH02 durante il Test 01

Caratteristica	Unità	Test1a	Test1b	Test1c
Portata in massa di riferimento	<i>kg/h</i>	800	400	200
Potenza persa a 200 °C (riscaldamento)	<i>W</i>	366.9	463.1	487.8
Potenza persa a 280 °C (carico)	<i>W</i>	866.7	770.6	1054.9
Potenza persa a 200 °C (scarico)	<i>W</i>	533.8	420.7	326.9
<i>Charging Phase</i>				
Tempo di carico	<i>h</i>	10.5	11	13.5
Energia massima caricata	<i>kWh</i>	33.76	42.49	38.16
Exergia massima caricata	<i>kWh</i>	31.14	39.25	35.26
Energia accumulata dal TES	<i>kWh</i>	24.15	28.43	29.09
<i>Discharging Phase</i>				
Tempo di scarico	<i>h</i>	10	10	13.5
Energia massima scaricata	<i>kWh</i>	15.15	18.57	15.30
Exergia massima scaricata	<i>kWh</i>	13.74	16.86	13.87
Energia ceduta dal TES	<i>kWh</i>	19.98	23.37	21.65
Potenza media di carico	<i>kW</i>	3.22	3.86	2.83
Potenza media di scarico	<i>kW</i>	1.51	1.86	1.13
Capacità di accumulo	<i>kWh</i>	15.15	18.57	15.30
Fattore di utilizzo		64.64%	79.27%	65.31%
Efficienza energetica		44.87%	43.71%	40.11%
Efficienza exergetica		44.13%	42.96%	39.35%

Da questi dati si verifica come il sistema, nelle condizioni di prova del Test 01, evidenzia dei tempi di carico e scarico dell'ordine delle 10 ore con una capacità di accumulo media di 16 kWh. La potenza media di scarico è perciò dell'ordine di 1.6 kW.

Tali risultati, come evidenziato in precedenza, risentono del fatto che la temperatura in ingresso durante le fasi di carico e scarico non è rimasta costante e spesso diversi gradi meno del target. Tale limite è connesso alla capacità di riscaldamento di Solteca3, a sua volta condizionato dalla temperatura limite dell'olio diatermico (inferiore a 325 °C). Ovviamente, la causa scatenante è da individuare nel forte assorbimento di calore da parte del TES in fase di carico e, in particolare, durante il cambio di fase. Ciò provoca un forte raffreddamento del fluido in uscita che Solteca3, successivamente, non è in grado di riportare al valore target di temperatura (incremento di alcune decine di °C).

Nonostante queste problematiche, l'LH02 presenta un fattore di utilizzo del 70% ed una efficienza tra il 40% e il 45%.

6.2 Risultati del Test 2

Con il Test 02 sono state valutate le perdite termiche del sistema di accumulo termico in corrispondenza di alcune temperature mantenute costanti (stazionari).

Le temperature considerate sono state: 200°C, 240°C, 260°C e 280°C. La temperatura corrispondente a 220°C non è stata considerata perché corrispondente all'intervallo di cambio di fase del PCM e quindi di difficile interpretazione. Il Test 02 è stato ripetuto per due diversi valori di portata in massa: 400 kg/h e 800 kg/h.

In **Figura 6-7** sono mostrati gli andamenti ottenuti per le temperature e le potenze fornite mentre in **Tabella 6-2** sono riportati i valori desunti per le perdite alle temperature di riferimento. Anche in questo caso si può

notare come tra i 200 °C ed i 240 °C (cambio di fase del PCM) ci sia una certa difficoltà ad arrivare uno stato finale stazionario.

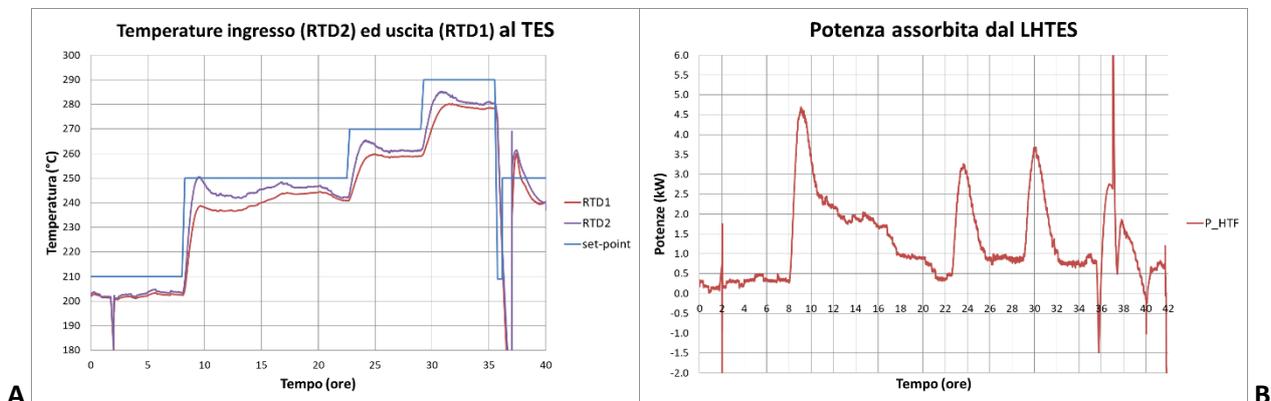


Figura 6-7- Andamenti delle temperature in/out del fluido termovettore (A) e della potenza fornita al TES (B) con una portata in massa di 400 kg/h.

Tabella 6-2 – Perdite di calore stimate a diversi livelli di temperatura e di portata in massa

Temp. di riferimento (°C)	Perdite di calore (W)		
	a 400 kg/h	a 800 kg/h	Media
200	321	368	344
240	685	509	597
260	860		860
280	729	760	745

I dati in rosso indicano degli stati non completamente stazionari

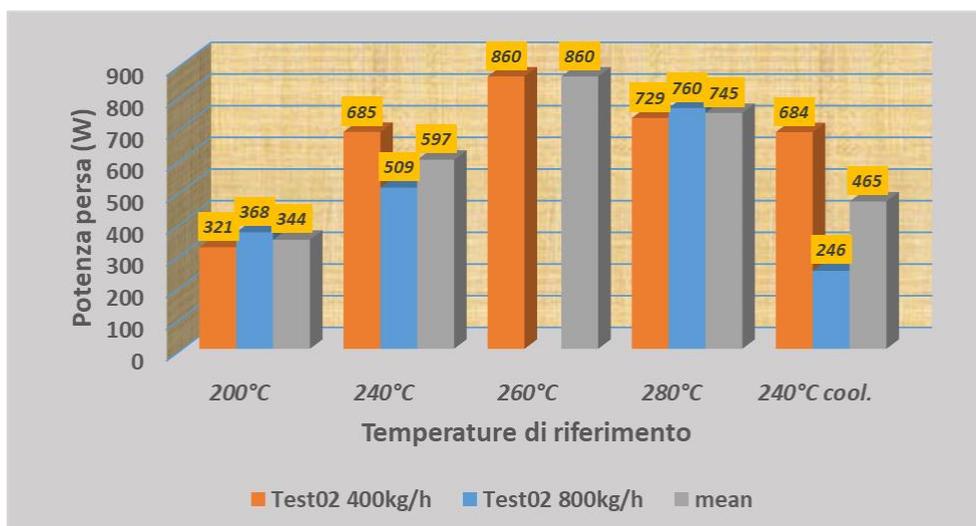


Figura 6-8- Grafico a barre delle perdite di calore stimate a diversi livelli di temperatura e di portata in massa.

A partire dai dati delle perdite stimati durante il Test 02, si è ipotizzato un set di valori di riferimento per la perdita sperimentale e quindi si è identificata una curva polinomiale che li approssimasse:

$$P_{persa} = -0.00468487 * T^3 + 3.35995 * T^2 - 791.858 * T + 61920.5$$

In **Tabella 6-3** ed in **Figura 6-9** sono mostrati i valori della potenza persa sperimentale ipotizzata e i valori della curva approssimante. L'errore commesso con l'approssimazione si aggira intorno al 10%.

La curva della potenza persa è stata utilizzata per la valutazione dell'energia termica accumulata/rilasciata nel TES con l'accortezza di utilizzare una temperatura pari alla media delle temperature delle 8 termocoppie collocate sulla parete del contenitore (linee 3 e 4).

Tabella 6-3 – Potenza persa sperimentale (ipotesi) e calcolata. Errore corrispondente.

Temperatura	200	220	240	260	280
Ipotesi di potenza persa sperimentale	460	480	597	860	770
Potenza persa calcolata	468	449	644	829	778
Errore	1.7%	-6.5%	7.9%	-3.6%	1.1%

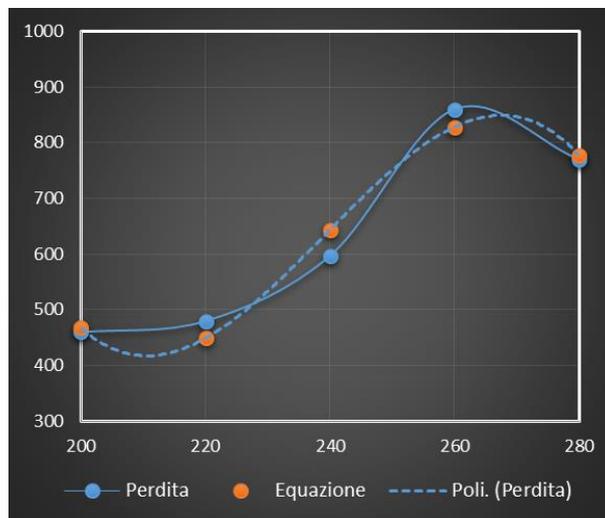


Figura 6-9- Ipotesi di potenza persa sperimentale e curva polinomiale approssimante.

6.3 Risultati del Test 3

Nel Test 3 si sono valutate le perdite di calore a sistema fermo. A tal fine, si sono effettuati due caricamenti successivi a 200°C ed a 280°C e, quindi, scaricato il TES. Al termine di ogni caricamento si è arrestato il sistema per un tempo determinato (circa 1-3 ore). La portata è mantenuta costante a 400 kg/h.

Al fine di limitare le problematiche inerenti il difficoltoso raggiungimento di uno stato stazionario ad una definita temperatura si è deciso di processare i dati misurati in modo differente a quanto previsto. Invece di esaminare il sistema come un "black-box" tramite le temperature e la portata del fluido termovettore, si sono analizzate le temperature interne associabili al PCM e calcolando un valore di energia accumulata associabile.

A tal fine si è suddiviso l'LH02 in 15 blocchi (**Figura 6-10**) ed associando ad ogni blocco una temperatura media estrapolata dai valori di temperatura misurati dalle termocoppie confinanti con il suddetto blocco.

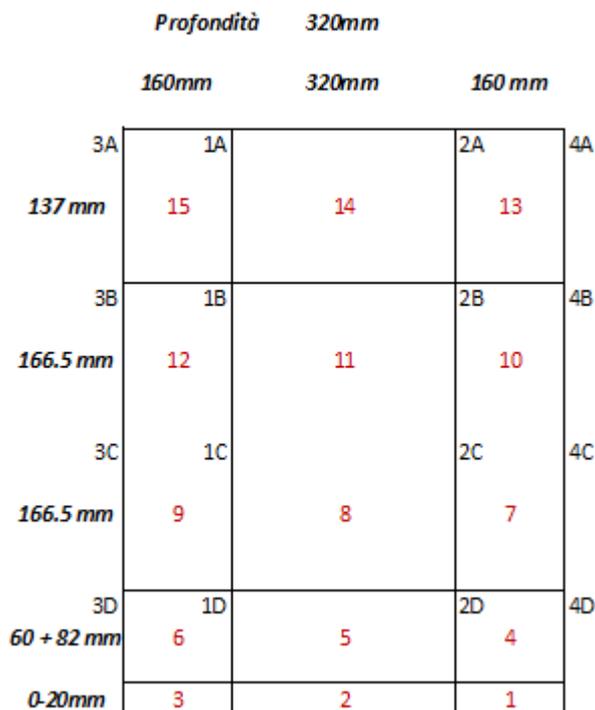


Figura 6-10- Schema di suddivisione in blocchi di LH02.

Conoscendo, per ogni blocco, la sua massa, la sua variazione di temperatura e le proprietà termiche del PCM, è allora possibile calcolare, istante per istante il calore accumulato. la differenza dell'energia accumulata tra l'inizio e la fine di ogni arresto divisa per la durata dello stesso fornisce un valore medio di potenza persa (Tabella 6-4).

Tabella 6-4 – Potenza persa sperimentale dopo arresto del sistema LH02.

		Primo arresto	Secondo arresto
Temperatura media	°C	210	270
Tempo inizio arresto	Ore	7.62	24.63
Tempo fine arresto	Ore	9.89	25.80
Durata arreto	Ore	2.27	1.17
Energia iniziale accumulata nel PCM	kWh	33.48	45.44
Energia finale accumulata nel PCM	kWh	32.05	44.91
Energia persa dal PCM	kWh	1.43	0.53
Potenza media persa	W	630	453

Così facendo, la potenza persa è dell'ordine di 630 W a 210°C e di 453 W a 270 °C. Questi valori sebbene simili non sono molto in linea con quelli precedentemente valutati (le perdite maggiori sembrano essere a temperature più basse). Ciò lascia in effetti dei dubbi sulla buona riuscita dell'esperimento e/o sulla metodologia di calcolo. Ciò è anche testimoniato, nonostante una precaria stazionarietà, dalla curva di potenza, che indicherebbe circa 800 W a 270 °C e 400 W a 200°C (Figura 6-11).

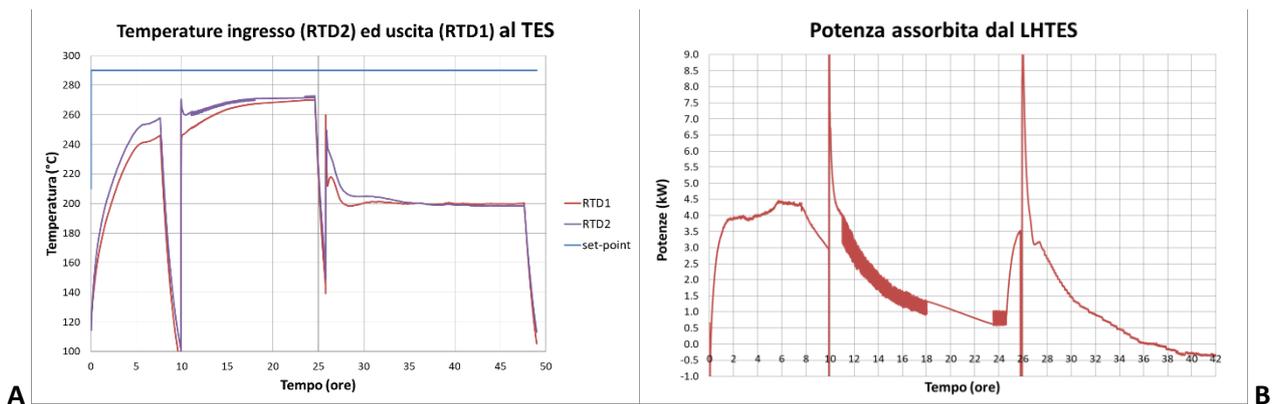


Figura 6-11- Andamenti delle temperature in/out del fluido termovettore (A) e della potenza fornita al TES (B) con una portata in massa di 400 kg/h per il Test 3.

6.4 Risultati del Test 4

Nel Test 4 si sono effettuati cinque cicli di carico e scarico del sistema di accumulo LH02 per verificarne il comportamento termico. Ogni ciclo è composto da una fase di carico di durata 6 ore (1 ora di salita della temperatura in ingresso e 5 di permanenza) e da una fase di scarico di durata 6 ore (1 ora di discesa della temperatura in ingresso e 5 di permanenza). La portata in massa è mantenuta costante e pari a 400 kg/h.

In **Figura 6-12** sono presentati gli andamenti della temperatura del fluido termovettore sia in ingresso che in uscita ed i bilanci di energia per il sistema (fornita dal HTF, persa verso l'ambiente e accumulata nel PCM).

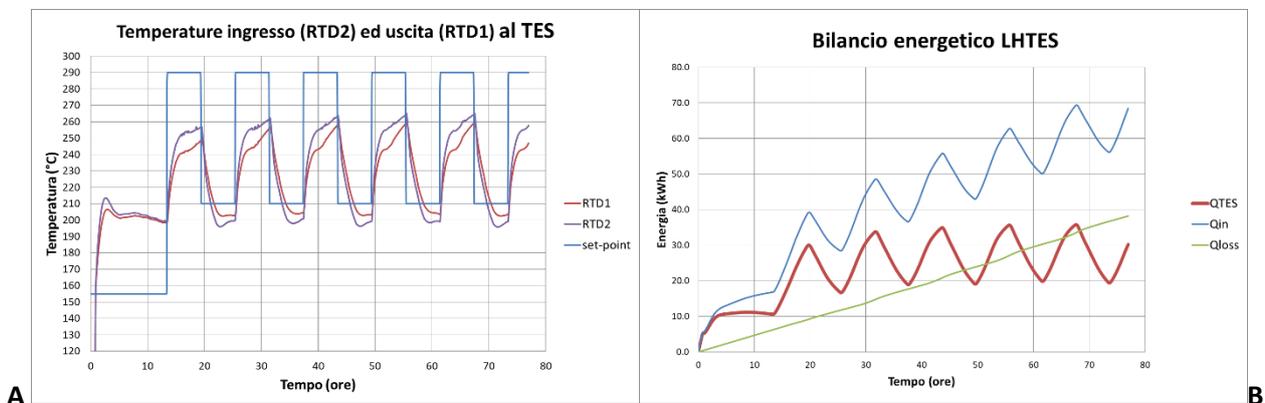


Figura 6-12- Andamenti delle temperature in/out del fluido termovettore (A) e bilanci energetici del sistema (B) con una portata in massa di 400 kg/h.

E' possibile osservare come ci sia comunque un assestamento iniziale del sistema di accumulo che dura per almeno due cicli. Successivamente, i restanti cicli hanno un andamento molto simile e ripetitivo.

Ciò è anche confermato dalle principali caratteristiche estrapolate dai vari cicli (potenza media, fattore di utilizzo ed efficienza) e riportate in **Tabella 6-5**.

Tabella 6-5 – Principali risultati della prova di ciclaggio termico del sistema di accumulo LH02.

Numero Ciclo	Q HFT in kWh	Q HFT fin kWh	Q HFT out kWh	Pot. Media kW	Fatt. util. 54.28%	Effic. Term. 66.42%
1	22.39	11.58	10.82	1.80	45.64%	48.30%
2	20.16	8.23	11.93	1.99	50.33%	59.17%
3	19.14	6.36	12.78	2.13	53.93%	66.79%
4	19.78	7.17	12.61	2.10	53.20%	63.75%
5	19.21	6.01	13.20	2.20	55.69%	68.72%

In particolare, si osserva che dal terzo ciclo in poi la potenza termica media fornita si attesta poco sopra ai 2 kW, con un fattore di utilizzo del 54% ed una efficienza termica del 66%. La capacità di accumulo del sistema LH02, in relazione alle condizioni di utilizzo dello stesso, si attesta intorno ai 13 kWh.

Si sottolinea, ancora una volta, che non potendo la temperatura in ingresso del fluido termovettore essere prossima a quella del set-point (**Figura 6-12/A**) viene meno una delle condizioni richieste per ottenere dei risultati indipendenti dall'impianto sperimentale adottato.

7 Discussione dei risultati e confronto LH01-LH02

In questa attività il nuovo sistema di accumulo LH02 è stato oggetto di una serie di prove sperimentali atte a caratterizzarne il comportamento termico. I principali risultati ottenuti sono qui di seguito esposti e discussi:

- Sono state utilizzate tre diverse portate in massa, mantenute costanti durante tutti i vari test effettuati, pari a 200 kg/h, 400 kg/h e 800 kg/h. A ciascuna portata corrisponde una diversa velocità del fluido termovettore e, quindi, diverse condizioni di scambio termico fluido-parete scambiatore. In particolare, la portata di 200 kg/h conduce ad un regime di transizione laminare-turbolento che se da un lato permette di trasferire maggiore calore al PCM, a causa del tempo di permanenza nello scambiatore più lungo, dall'altro peggiora le condizioni di scambio termico e rallenta la dinamica di carico/scarico. Le altre due portate producono dei regimi completamente turbolenti;
- L'intervallo di temperatura operativa del fluido in ingresso a LH02 doveva essere 200-280°C. Purtroppo le dimensioni del sistema di accumulo e le prestazioni dell'impianto Solteca3 non hanno consentito di ottenere una temperatura in ingresso, soprattutto per i valori maggiori, vicina al set-point desiderato. Il venir meno di questa condizione rende i risultati funzione dell'impianto sperimentale e quindi non confrontabili con altri;
- I tempi di carico caratteristici del sistema (98% dell'energia massima caricata) sono dell'ordine delle 10-11 ore (oltre 13 per la portata minima). Anche i tempi caratteristici di scarico sono simili e dell'ordine delle 10 ore;
- La capacità di accumulo effettiva del sistema risulta essere di 15-18 kWh, rispetto ai circa 23 kWh teorici. Il sistema verrà caricato con una potenza media di circa 3-4 kW e fornisce, invece, una potenza media di 1.6 kW;
- Il fattore di utilizzo di LH02 risulta essere del 65-80% mentre l'efficienza energetica è intorno al 44% e quella exergetica al 43%;
- Le perdite di calore verso l'ambiente sono funzione della temperatura e valutate tra 360 e 860 kW rispettivamente a 200°C e 260°C. Tali perdite sono state approssimate attraverso una curva polinomiale di terzo grado appositamente calibrata. Tali perdite risultano superiori a quelle di progetto anche se la temperatura di parete, inferiore ai 35°C, è compatibile con il dato progettuale: ciò potrebbe essere indice dell'esistenza di alcune perdite di calore concentrate;

- In prove cicliche di carico/scarico con cicli di 12 ore (6 ore di carico e 6 ore di scarico) si evidenzia la necessità di effettuare due cicli completi per ottenere un assestamento termico del sistema. Dal terzo ciclo in poi la potenza termica media è di circa 2 kW, con un fattore di utilizzo del 54% ed una efficienza termica del 66%. La capacità di accumulo è di circa 13 kWh. Tali dati sono congruenti ai tempi di carico e scarico ridotti rispetto a quelli caratteristici.

Il dispositivo LH02 è stato ideato come evoluzione del LH01, realizzato in precedenza ed oggetto di caratterizzazione durante la prima annualità del PTR2019-2021 [4]. Un loro confronto diretto è purtroppo molto complesso, non tanto per le condizioni di prova (temperatura massima del fluido a 260°C in LH01 invece di 280°C in LH02), la notevole variazione di dimensione e di capacità di accumulo nominale (8 kWh per LH01 e 24 kWh per LH02) quanto per le condizioni di prova che risultano, nel secondo caso, fortemente condizionate dal comportamento di Solteca3.

Nonostante ciò è possibile fare delle brevi considerazioni:

- In LH01 la capacità di accumulo teorica era di 8 kWh con circa 100 kg di sali solari ed uno scambiatore realizzato con un tubo da 16 mm. Invece, in LH02 la capacità di accumulo teorica è di 24 kWh con circa 300 kg di sali solari ed uno scambiatore realizzato con un tubo alettato da 20 mm;
- A causa del diametro del tubo incrementato, LH02 presenta delle velocità del fluido termovettore quasi dimezzate rispetto ad LH01 e, quindi, delle condizioni di scambio termico ridotte;
- LH01 mostra delle perdite intorno ai 350 W a 260°C, ovvero circa 240 W/m², mentre LH02 ha perdite di circa 860 W alla stessa temperatura, ovvero 280 W/m². La coibentazione del LH02 ha una efficacia simile a quella di LH01;
- L'LH02 rilascia in fase di scarico una energia di circa 16 kWh con un fattore di utilizzo intorno al 70%. Invece, in LH01 l'energia rilasciata era di circa 5 kWh con un fattore di utilizzo inferiore al 60%;
- La potenza media fornita dal LH01 era di circa 0.45 kW (7.17 kW/m³) mentre quella di LH02 è di circa 1.6 kW (8.68 kW/m³), equivalente a circa quattro sistemi LH01 connessi in parallelo;
- L'efficienza termica di LH01 era dell'ordine del 35 % mentre quella relativa al LH02 è di circa il 44%.

Dai confronti precedenti è possibile comprendere, nonostante tutte le differenze esistenti a livello di prototipo e di funzionamento dell'impianto di prova, che l'LH02 ha delle prestazioni sicuramente superiori a quelle evidenziate con LH01. Ciò è collegabile ai benefici, del fattore di scala oltre che all'incremento della superficie di scambio termico.

8 Conclusioni

In questo lavoro il nuovo prototipo di un elemento base di accumulo termico a calore latente denominato LH02, realizzato nella prima fase della presente linea di attività (LA 2.15) è stato sottoposto ad una completa caratterizzazione termica utilizzando l'impianto sperimentale denominato Solteca3.

Il prototipo, riempito con 300 kg di sale solare come PCM ed avente una capacità nominale di accumulo di circa 20 kWh, è stato fatto operare in un intervallo di temperature compreso tra 200 °C e 280°C con una portata variabile di olio diatermico Therminol66 compresa tra i 200 kg/h e gli 800 kg/h.

I test effettuati hanno riguardato, prove di carico e scarico a ciclo singolo e lunga durata, prove di caratterizzazione delle perdite di calore e prove multi-ciclo di breve durata. Al termine dei test si sono valutati i principali parametri chiave di prestazione del componente.

La caratterizzazione ha evidenziato come detti parametri abbiano avuto un netto miglioramento rispetto quelli ottenuti con il prototipo precedente, l'LH01, in ragione del fattore di scala adottato (capacità nominale di 24 kWh contro 8 kWh) e di una serie di accorgimenti tecnici (aumento della superficie di scambio interna con uso di tubi alettati e di maggiore diametro).

Tali miglioramenti si sono riscontrati nonostante il fatto che l'impianto sperimentale ha incontrato grosse difficoltà nell'imporre le condizioni di funzionamento ideali per la caratterizzazione. In particolare, non è stato possibile mantenere una temperatura massima di ingresso prossima a quella impostata di 280°C. Poiché questa è risultata essere di 10-20 °C più bassa ed essendo la differenza di temperatura tra quella di ingresso del fluido e quella di fusione del sale il motore dello scambio termico, è evidente che il trasferimento di calore è più limitato e la dinamica del sistema ritardata. Ovviamente ciò è correlato alle maggiori dimensioni di LH02 (300 kg di sale) e, quindi, dell'elevato calore assorbito in special modo durante il cambio di fase del PCM.

Per poter, in futuro, caratterizzare correttamente sistemi di questa capacità sarà allora necessario apportare le dovute modifiche all'impianto Solteca3, affinché possa fornire una temperatura in ingresso coincidente con quella di set-point, oppure utilizzare altri impianti in grado di rispondere ai requisiti desiderati.

Terminata la caratterizzazione di LH02, il passo successivo, sempre all'interno di questa linea di attività, dovrà essere quello di effettuare una progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi di accumulo di questo tipo e di effettuare una analisi dei costi sia per il singolo per elemento e per l'intero modulo. In questo modo si saranno poste le basi per una futura sperimentazione in un sistema simile al reale, su larga scala, da dimostrarsi in un ambiente rilevante.

Riferimenti bibliografici

- 1 A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore. Dimensionamento e progettazione di un prototipo ottimizzato di accumulo termico modulare a calore latente. Report RdS_PTR2020_184
- 2 A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore, Realizzazione di un prototipo ottimizzato di accumulo termico modulare a calore latente, Rds/PTR2021/263
- 3 D. Mazzei, G. Giorgi, R. Liberatore, G. Napoli, A. Miliozzi, Caratterizzazione termica di un elemento di accumulo termico realizzato con calcestruzzo base a temperature medio-alte a seguito di un ripetuto carico ciclico. Report RdS/PAR2019/118
- 4 A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Mazzei, D. Nicolini, Caratterizzazione termica di un prototipo LHTES modulare con l'utilizzo dell'impianto sperimentale Solteca3. Analisi ed interpretazione dei dati sperimentali, Report RdS/PTR2019/122
- 5 R. Liberatore, A. Miliozzi, D. Nicolini, G. Napoli, G. Giorgi, Messa a punto impianto Solteca3, Report RdS_PTR2020_182.
- 6 Data Sheet Terminol 66
- 7 A. Miliozzi, Analisi dell'incertezza di una misura. Applicazione all'impianto ATES, DTE/STT/2017/09
- 8 Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2), A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, Stephanie Bell, Centre for Basic, Thermal and Length Metrology, National Physical Laboratory, ISSN 1368-6550, August 1999, Issue 2 with amendments March 2001
- 9 NASA HANDBOOK, Measurement Uncertainty Analysis. Principles and Methods, NASA Measurement Quality Assurance Handbook – ANNEX 3, July 2010
- 10 UKAS publication, M3003, The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, Edition 1, December 1997.
- 11 EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999, European co-operation for Accreditation.
- 12 E. Rojas, R. Bayón, R. Adinberg, L. Valenzuela, D. Laing, X. Py, T. Bauer, F. Fabrizi, Definition of standardised procedures for testing thermal storage prototypes for concentrating solar thermal plants, D15.2, SFERA Project, Dec 2011

Abbreviazioni ed acronimi

HTF	Heat Transfer Fluid (fluido termovettore)
LHTES	Latent Heat TES (Accumulo termico a calore latente)
TES	Thermal Energy Storage (Accumulo termico)
PCM	Phase Change Material (Materiale a cambiamento di fase)
SS	Solar Salt (Sale Solare)