



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi numerica e analisi tecnico-economica del dispositivo di accumulo termico a calore latente finalizzate alla sua ottimizzazione

Adio Miliozzi, Daniele Nicolini

ANALISI NUMERICA E ANALISI TECNICO-ECONOMICA DEL DISPOSITIVO
DI ACCUMULO TERMICO A CALORE LATENTE FINALIZZATE ALLA SUA OTTIMIZZAZIONE

Adio Miliozzi, Daniele Nicolini

Aprile 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: LA7 Analisi tecnico-economica, dimensionamento e realizzazione di un prototipo ottimizzato di tipo LHTES

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 ANALISI TECNICO-ECONOMICA.....	6
2.1.1 <i>Il concetto</i>	7
2.1.1.1 Il Sistema di accumulo.....	7
2.1.1.2 Il Modulo di accumulo.....	8
2.1.1.3 L' Elemento Base.....	9
2.1.1.4 Settori tecnologici di applicabilità.....	10
2.1.2 <i>Stato dell'arte e parametri di progetto</i>	10
2.1.3 <i>Analisi tecnico-economica</i>	12
2.1.3.1 Dati Base.....	12
2.1.3.2 Parametri.....	13
2.1.3.3 Valutazioni economiche.....	14
2.1.3.4 Confronto concetti Enea-TES-LH-01 e Enea-TES-LH-02.....	15
2.1.3.5 Confronto Moduli Enea-TES-LH-02.....	18
2.1.4 <i>Conclusione</i>	21
2.2 DIMENSIONAMENTO DEL NUOVO LHTES.....	23
2.2.1 <i>Tubazioni a serpentina</i>	23
2.2.2 <i>Contentore esterno</i>	24
2.2.3 <i>Coibentazione esterna</i>	25
2.2.4 <i>Altri dati</i>	25
2.3 ANALISI NUMERICA DEL NUOVO LHTES.....	26
2.3.1 <i>La geometria</i>	26
2.3.2 <i>I materiali</i>	27
2.3.2.1 Il fluido termovettore.....	27
2.3.2.2 Il materiale a cambiamento di fase (PCM).....	27
2.3.3 <i>Le condizioni al contorno</i>	28
2.3.3.1 Condizione di scambio termico.....	28
2.3.3.2 Condizione di carico.....	28
2.3.3.3 Perdite di calore verso l'esterno.....	30
2.3.3.4 Campo termico iniziale.....	30
2.3.4 <i>Il codice di calcolo</i>	30
2.3.5 <i>La magliatura</i>	31
2.3.6 <i>I modelli di comportamento</i>	31
2.3.6.1 Fluido termovettore.....	32
2.3.6.2 PCM.....	32
2.3.7 <i>Risultati e discussione - Fase di carico</i>	34
2.3.8 <i>Risultati e discussione - Fase di scarico</i>	44
2.3.9 <i>Conclusioni</i>	54
2.4 ANALISI DELL'EFFETTO DI ALETTE LONGITUDINALI.....	55
2.4.1 <i>La geometria</i>	55
2.4.2 <i>I materiali e modelli di comportamento</i>	56
2.4.2.1 L'acciaio.....	56
2.4.2.2 Il PCM.....	56
2.4.3 <i>Le condizioni al contorno</i>	56
2.4.3.1 Campo termico iniziale.....	57
2.4.3.2 Carichi termici.....	57
2.4.3.3 Scambio con l'ambiente.....	58
2.4.4 <i>Effetto del numero e della altezza delle alette</i>	58
2.4.5 <i>Effetto dello spessore delle alette</i>	66
2.4.6 <i>Conclusioni</i>	67
3 CONCLUSIONI.....	68
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	69
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	69

Sommario

La necessità di poter disporre di sistemi di accumulo termico, efficienti, affidabili, compatti e modulari, è un fattore chiave per l'efficientamento e la sostenibilità economica e ambientale dei processi energetici e produttivi. A tal fine, ENEA aveva sviluppato un prototipo di accumulo termico a calore latente, ENEA-TES-LH01, che doveva possedere elevata efficienza, basso costo, alta densità energetica/compattezza e flessibilità d'uso/modularità. Detto prototipo è stato caratterizzato termicamente evidenziando un buon comportamento termico del dispositivo ma ancora diversi limiti riconducibili ad un layout non ancora ottimizzato (perdite di calore, basso fattore di utilizzo, elevato rapporto acciaio/PCM). Nel presente documento è stato riportato il lavoro svolto all'interno della linea di attività LA2.7 del PAR2020 e finalizzato all'ottimizzazione sia delle prestazioni che dei costi di un nuovo sistema di accumulo termico a calore latente, ENEA-TES-LH02, evoluzione di quello sviluppato in precedenza. Una iniziale analisi tecnico-economica del dispositivo è stata utilizzata per ottimizzare i principali parametri progettuali sia degli elementi base che, successivamente, del modulo di accumulo da essi costituito. In particolare, si sono ottimizzati sia la configurazione per la tubazione di scambio termico, ovvero il rapporto tra diametro di influenza del tubo o l'altezza dei tubi verticali rispetto al diametro esterno della tubazione, che il numero e la disposizione degli elementi base in un modulo di accumulo. Sulla base di tale analisi si è quindi dimensionato il nuovo dispositivo ENEA-TES-LH02, contenente circa 300 kg di sale nitrato da utilizzare come mezzo di accumulo (PCM). Quindi, con l'ausilio di una serie di analisi numeriche FEM, si è verificata l'esistenza di buone prestazioni termiche del nuovo dispositivo in fase di carico (tempo di carico di 5 ore e un fattore di utilizzo del 95%) ma ancora insufficienti in fase di scarico (energia recuperata dopo 5 ore pari al 76% della capacità termica). Per incrementare l'efficienza del dispositivo e, quindi, la potenza media fornita si è ipotizzata l'adozione, come sistema addizionale di promozione della conducibilità, di una alettatura longitudinale da inserire nei tratti verticali della serpentina. Una ulteriore analisi FEM ha consentito di ottimizzare il numero (compreso tra 6 e 12), l'altezza (1-1.5 volte il raggio del tubo) e lo spessore (il minore possibile) di queste alette. Sulla base di tutte queste indicazioni sarà allora possibile passare alla successiva fase di dimensionamento effettivo e progettazione del prototipo LHTES ENEA-TES-LH02, e quindi alla sua realizzazione. Queste ulteriori fasi verranno documentate nei successivi rapporti tecnici afferenti a questa Linea di Attività.

1 Introduzione

La necessità di poter disporre di sistemi di accumulo termico (TES), efficienti, affidabili, compatti e modulari, è un fattore chiave per l'efficientamento e la sostenibilità economica e ambientale dei processi energetici e produttivi.

A tal fine, l'ENEA aveva sviluppato un prototipo di accumulo termico a calore latente per applicazioni a media temperatura (fino a 400°C), denominato ENEA-TES-LH01, che si basava sull'uso di materiali a cambiamento di fase e che era caratterizzato da elevata efficienza, basso costo e alta densità energetica (compattezza) e flessibilità d'uso (modularità).

Detto prototipo è stato caratterizzato termicamente in un precedente lavoro [1] in cui si sono verificate, in particolare, le prestazioni termiche e i tempi caratteristici di carica e scarica del calore, oltre che analizzati i fenomeni fisici associati.

La sperimentazione effettuata ha evidenziato un buon comportamento termico del dispositivo ma ancora diversi limiti come, ad esempio, le eccessive perdite di calore, un basso fattore di utilizzo ed un rapporto acciaio/PCM ancora troppo elevato, riconducibili ad un layout non ancora ottimizzato. Appare, allora, necessario identificare delle soluzioni progettuali che siano migliorative in termini di prestazioni e, conseguentemente, di costi.

A tal fine, nel presente lavoro, realizzato all'interno della linea di attività LA2.7 del PAR2020, si è analizzato e dimensionato un nuovo sistema di accumulo termico a calore latente, denominato ENEA-TES-LH02, che, partendo dalle caratteristiche base del precedente, ottimizza sia le prestazioni che i costi del dispositivo.

Ciò è stato fatto attraverso le seguenti fasi:

- Una analisi tecnico-economica del dispositivo tesa ad ottimizzare i principali parametri progettuali;
- Un nuovo dimensionamento del dispositivo in studio che rispondesse alle caratteristiche ottimizzate;
- Una serie di analisi numeriche finalizzate a verificare il comportamento termico del dispositivo di accumulo nelle fasi transitorie di carica e scarica del calore;
- Una serie di analisi numeriche tese a verificare gli eventuali benefici derivanti dall'introduzione di ulteriori sistemi di promozione della conducibilità del PCM.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Analisi Tecnico-Economica

Nell'ambito delle attività di sviluppo di nuovi "Sistemi di accumulo termico" condotte da ENEA è stato studiato un nuovo concetto di accumulo termico che utilizza come mezzo di accumulo un materiale a cambiamento di fase (calore latente) ed è caratterizzato da compattezza, efficienza e flessibilità.

Esso presenta alcuni elementi innovativi quali, ad esempio:

- Temperature operative medio-alte
- Una configurazione semplice (tipo tube&shell)
- Tubi di scambio disposti verticalmente (con promozione della convezione naturale, massimizzando gli effetti dei moti convettivi nella fase fluida del PCM sullo scambio termico)
- Tubi di scambio con sistemi di promozione della conduzione (alette)
- Sistema modulare e prefabbricato
- Può contenere diverse tipologie di PCM o NEPCM
- E' utilizzabile in sistemi a "cascata" (PCM multipli)
- E' facile da mantenere ed è rigenerabile (Economia circolare)

Sulla base di tale concetto, è stato quindi progettato e realizzato **un prototipo di sistema di accumulo a calore latente** (LHTES, Latent Heat Thermal Energy Storage) con capacità nominale di circa 8 kWh, denominato **ENEA-TES-LH01** (Figura 1).



Figura 1- Prototipo ENEA-TES-LH01 da circa 7kWh installato sull'impianto sperimentale Solteca3

Il sistema di accumulo scambia calore con un fluido termovettore (HTF) in un circuito idraulico, che cede (acquista) calore al modulo durante la fase di carica (scarica) dell'accumulo.

Al fine di caratterizzare termicamente il prototipo ENEA-TES-LH01 sono state effettuate una serie di prove sperimentali finalizzate alla caratterizzazione di questo concetto di accumulo termico a calore latente [1].

I risultati ottenuti hanno evidenziato come l'energia massima caricata (raggiungimento del regime stazionario) è proporzionale alla portata circolante nell'impianto di prova (tra 800 a 200 kg/h) e varia da 6.3 a 6.9 kWh con tempi, però, che variano tra 5 a 13.5 h. La potenza media di carico è maggiore con portate elevate: 1.8 kW a 800 kg/h, 1.29 kW a 400 kg/h e 0.8 kW a 200 kg/h. In scarico, invece, l'energia rilasciata dal PCM è identica (4.98 kWh) tra 800 e 400 kg/h (regime turbolento) mentre è inferiore (3.96 kWh) con

200 kg/h (regime laminare). I tempi crescono diminuendo della portata (da 6.5 a 8 h) e conseguentemente diminuisce la potenza di scarico (da 0.49 a 0.27 kW).

L'efficienza termica varia tra il 36 e il 20.2%. Le perdite termiche variano con la temperatura e sono mediamente di 250W. Infine, la prova di ciclaggio termico ha evidenziato un accumulo di 4.5kWh in 5h. Parte dell'energia caricata non è poi recuperata e rimane nel TES, incrementando ad ogni ciclo il valore massimo dell'energia accumulata (fino al 98% della sua capacità). Durante la fase di scarico, il prototipo cede un'energia di 4.5 kWh per ogni ciclo, fornendo una potenza media di 850 W ed il fattore di utilizzo è del 50%, indice di uno sfruttamento non ottimale del sistema. L'efficienza termica è del 90%.

Sulla base dei questi risultati è evidente che un ulteriore sforzo dovrà essere fatto per individuare soluzioni migliorative in termini di prestazioni e costi.

Scopo di questo documento sarà, allora, rivedere tale concetto e riprogettare il dispositivo di accumulo osservando il sistema non solo da un punto di vista termodinamico ma da quello prettamente economico. A tal fine, verranno eseguite una serie di valutazioni su diverse configurazioni del dispositivo che terranno in conto sia della sua capacità di accumulo che del suo costo.

2.1.1 Il concetto

2.1.1.1 Il Sistema di accumulo

Il concetto proposto si basa su **un sistema di accumulo termico** LHTES costituito da un certo numero N_m di moduli connessi idraulicamente in parallelo (**Figura 2**). Ogni modulo, identico agli altri, avrà una capacità termica C_m mentre l'intero LHTES avrà una capacità termica nominale:

$$C_{LHTES} = N_m * C_m$$

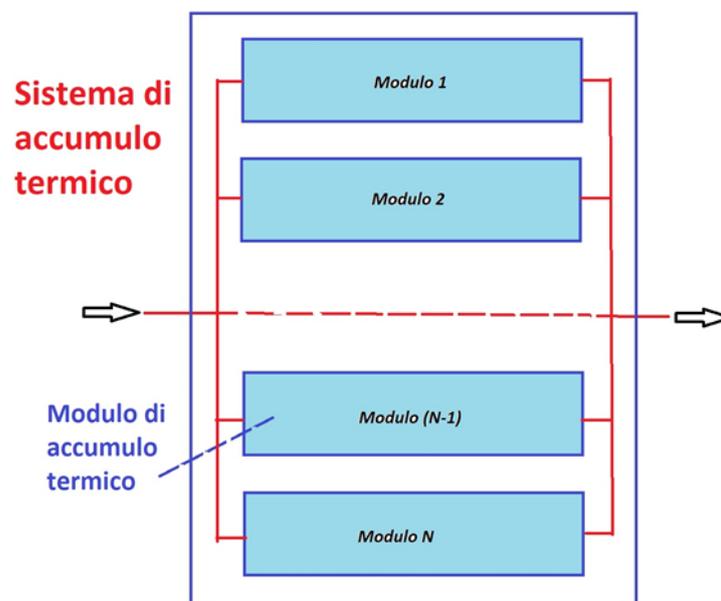


Figura 2- Schema di sistema di accumulo LHTES ad N moduli

2.1.1.2 Il Modulo di accumulo

Ogni **modulo** di accumulo sarà costituito, in modo simile ad altri esistenti (Figura 3), da un certo numero di elementi base connessi in modo da realizzare N_{lines} linee connesse in parallelo con ciascuna linea costituita da N_{ele} elementi base (Figura 4). Le linee saranno tutte identiche tra loro mentre gli elementi base, ognuno di capacità termica C_i , di una linea potranno differenziarsi in base al PCM in essi contenuto. In base a tale definizione, la capacità termica del modulo C_m sarà così determinata:

$$C_m = N_{lines} * \sum_{i=1}^{N_{ele}} C_i$$

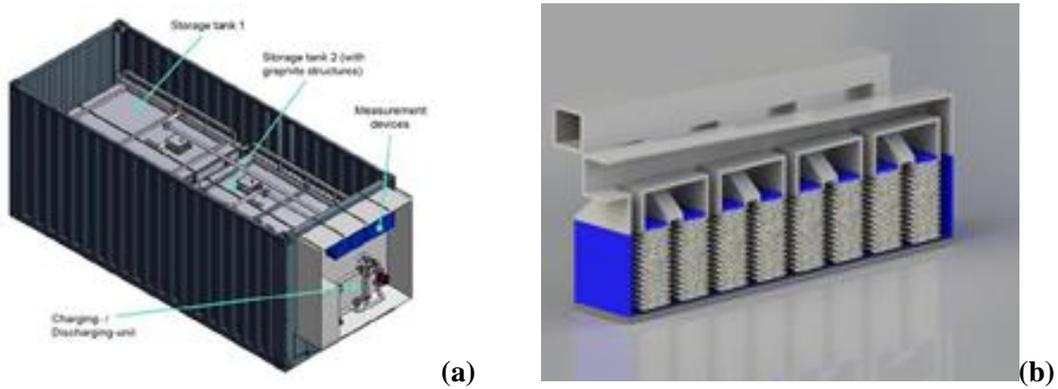


Figura 3- Esempi di moduli di accumulo con PCM a bassa temperatura (a) oppure a calore sensibile (b)

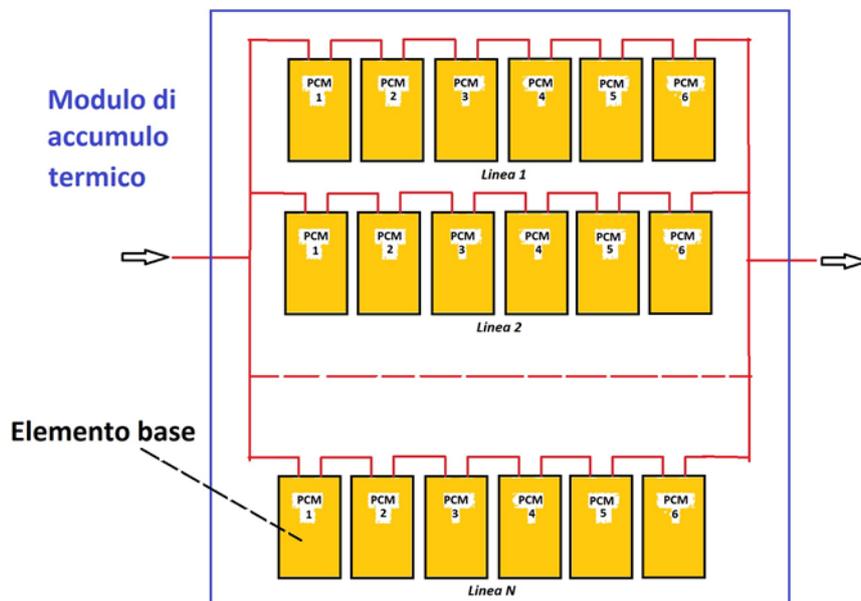


Figura 4- Schema di modulo di accumulo con N linee a 6 elementi base ciascuna

2.1.1.3 L' Elemento Base

L'elemento base è costituito da un contenitore metallico a forma di parallelepipedo a sviluppo verticale al cui interno è presente uno scambiatore a serpentina immerso in un mezzo di accumulo a cambiamento di fase (Figura 5). La serpentina è costituita da un tubo metallico al cui interno scorre il fluido termovettore. Il numero di tratti verticali e curve è un parametro di progetto (Figura 6). Il mezzo di accumulo, in genere un sale, avrà una temperatura di fusione medio-alta ($>120^{\circ}\text{C}$).

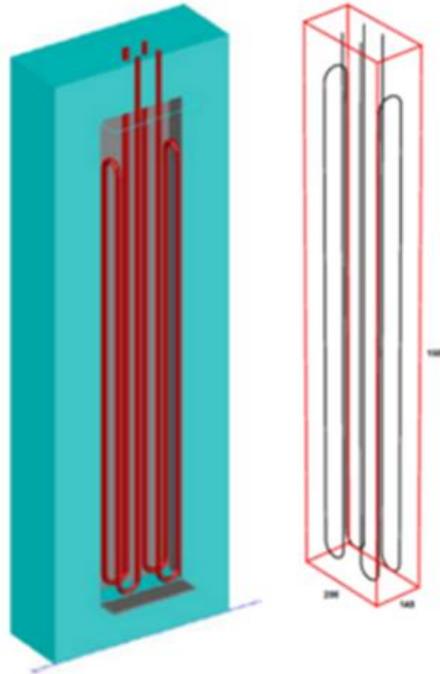
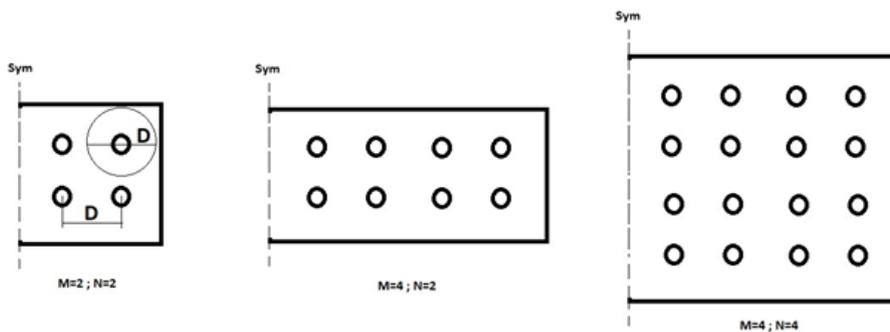


Figura 5- layout di un elemento base con 4 tratti verticali di serpentina



D=diametro zona di influenza di un tratto verticale

Figura 6- Semi sezioni di un elemento base con 2x2, 4x2 e 4x4 tratti verticali di serpentina

2.1.1.4 Settori tecnologici di applicabilità

Il concetto sviluppato può trovare applicazione in diversi settori tecnologici sia come accumulo di energia termica (calore) per aumentare la fruibilità delle fonti di energia rinnovabile sia come efficientamento energetico civile e industriale (Recupero di calore industriale).

In particolare, si possono citare come esempio:

- Impianti industriali che utilizzino calore a temperatura medio-alta
- Solare Termodinamico e accumulo termico per fonti di energia rinnovabile
- Calore per Processi Industriali
- Refrigerazione/Raffreddamento edifici/distretti
- Dissalazione

2.1.2 Stato dell'arte e parametri di progetto

Come già detto precedentemente, è stato realizzato un primo prototipo di elemento base denominato ENEA-TES-LH01. Si tratta di un Sistema di accumulo termico a calore latente da circa 7 kWh, operante a temperature medio-alte, con un fascio tubiero a sviluppo verticale (suddiviso in 2 rami paralleli) ed altre soluzioni realizzative studiate per migliorare lo scambio termico.

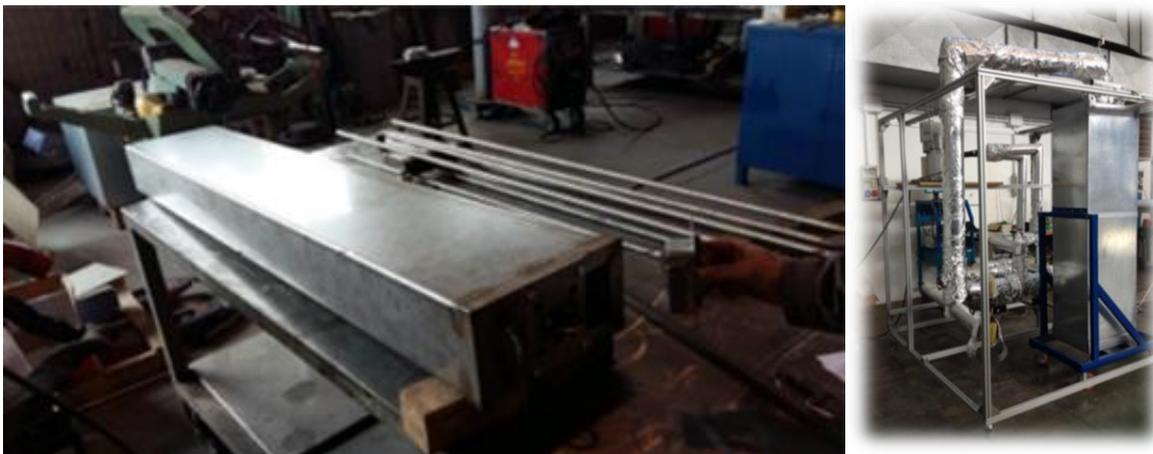


Figura 7- ENEA-TES-LH01: elemento base durante la realizzazione e prototipo assemblato e installato nell'impianto sperimentale ATES

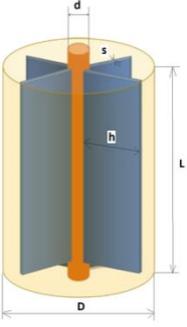
Il mezzo di accumulo a cambiamento di fase (PCM) utilizzato in questo prototipo è costituito dai cosiddetti "sali solari" (eutettico 60-40%wt di $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$) aventi le seguenti caratteristiche:

- Densità: 1850 kg/m³;
- calore specifico: 1700 J/(kg °C);
- conducibilità termica: 0.5 W/(m² °C);
- calore latente di fusione: 110 kJ/kg;
- temperatura media di fusione: 225 °C.

La dimensione del prototipo e le sue caratteristiche funzionali dovranno essere riviste ed ottimizzate sulla base dei risultati sperimentali ottenuti.

A tal fine, si è anche ricorso a quanto già presente in letteratura e che fornisce utili indicazioni di tipo progettuale. In particolare, si è fatto riferimento ad un articolo di Kalapala et al. [2] che illustra l'effetto di vari parametri sia geometrici che operativi sulle prestazioni di un sistema LHTES. Alcuni degli aspetti evidenziati sono stati riassunti nella seguente tabella:

Tabella 1 : Influenza di vari parametri progettuali e operativi sulle prestazioni di un sistema LHTES

Geometria	<p>Il rapporto ottimale lunghezza tratto verticale/diametro tubo (L/d) dovrebbe essere nell'intervallo 15-30 per consentire il corretto sviluppo dei moti convettivi nel PCM in fase liquida.</p> <p>Il rapporto ottimale diametro zona influenza/diametro tubo (D/d) dovrebbe essere nell'intervallo 3.5-4 per consentire il corretto sfruttamento del PCM nei tempi richiesti dall'applicazione. Esso dovrebbe essere basso per ridurre il tempo di fusione del PCM, e alto per aumentare la capacità di accumulo del sistema <i>es: $d=16\text{ mm}$; $L=30*d=480\text{mm}$; $D=4*d=64\text{mm}$</i></p>
Portata	<p>Una elevata portata, ovvero una alta velocità, del HTF è sinonimo di turbolenza e quindi di un elevato coefficiente h (o numero di Nusselt) di scambio termico HTF-parete tubo. Di contro, implica anche un basso salto termico in-out del HTF. Tale parametro ha una influenza minima in fase di solidificazione</p>
Temperatura ingresso HTF	<p>La temperatura di ingresso del HTF dovrebbe essere alta rispetto a quella di fusione del PCM, poiché la loro differenza è il motore dello scambio termico fluido-PCM. Il suo effetto è maggiore rispetto a quello della portata e valido anche in solidificazione</p>
Direzione di caricamento	<p>Il caricamento dall'alto favorisce la fusione del PCM e l'instaurazione di un termoclino nel LHTES.</p> <p>Il caricamento dal basso favorisce la solidificazione del PCM consentendo il riempimento degli spazi vuoti inferiori</p>
Alettature	<p>Le alettature longitudinali sono più efficaci poiché non impediscono lo sviluppo di moti convettivi nel PCM e il loro effetto è significativo soprattutto in fase di solidificazione.</p> <p>Lo spessore delle alette dovrebbe essere confrontabile con quello del tubo (es: 1-1.5 mm), la loro lunghezza radiale (altezza) circa 2 volte diametro tubo (es: 32 mm) mentre il loro numero non superiore a 4-5</p> 
PCM multipli (cascata)	<p>La temperature di fusione dei PCM dovrebbe essere in progressione geometrica <i>es: $T_{pcm1} > T_{pcm2} > T_{pcm3}$ con rateo 1.3 circa</i></p> <p>Invece, la frazione dei PCM dovrebbe essere in progressione aritmetica <i>es: $+0.6 \rightarrow pcm1/pcm2/pcm3 \quad 1.0/1.6/2.2$</i></p>

2.1.3 Analisi tecnico-economica

L'analisi tecnico economica verrà eseguita sulla base di una serie di dati fissi relativi ai materiali ed alle caratteristiche termodinamiche dell'elemento di base. Saranno inoltre considerati una serie di parametri di progetto relativi sia all'elemento di base che al modulo, alcuni dei quali saranno fatti variare in opportuni intervalli.

Qui di seguito la descrizione dei dati e dei parametri oltre che delle principali voci di costo che andranno a costituire la valutazione economica.

2.1.3.1 Dati Base

I principali dati dell'elemento di base, assunti costanti nell'analisi, sono mostrati nella tabella seguente:

Tabella 2 : Dati di base per l'analisi

Materiali	
<i>HSM - Sali solari</i>	
Densità	1850 kg/m ³
Calore specifico	1700 J/kg/K
Calore latente	110000 J/kg
Conducibilità	0.5 W/m/°C
Dilatazione dopo cambio fase	5 %
<i>Tube scambio, recipiente - AISI 316</i>	
densità	8000 kg/m ³
calore specifico	500 J/kg/K
conducibilità	15 W/m/°C
<i>HTF - olio diatermico, Therminol 66</i>	
densità	850 kg/m ³
calore specifico	1500 J/kg/K
conducibilità	0.16 W/m/°C
<i>Coibente - lana di roccia</i>	
densità	40 kg/m ³
calore specifico	1030 J/kg/K
conducibilità	0.037 W/m/°C
<i>Tipo</i>	<i>Knauf Insulation DP4</i>
<i>Spessore</i>	<i>140 mm</i>
<i>Costo</i>	<i>13 E/m²</i>
<i>Volume</i>	<i>0.14 m³/m²</i>
<i>Peso</i>	<i>5.60 kg/m²</i>
<i>Costo al kg</i>	<i>2.32 E/kg</i>
Proprietà termodinamiche	
temperatura ambiente	20 °C
temperatura minima	200 °C
temperatura massima	300 °C
salto termico	100 °C
coeff. scambio termico conv.	5 W/m ² /C
temperatura max parete est.	35 °C

2.1.3.2 Parametri

I principali parametri di progetto relativi all'elemento di base sono mostrati nella tabella seguente. Per alcuni di questi, oggetto di ottimizzazione, saranno indicati degli intervalli di valori.

Tabella 3 : Parametri di progetto per l'analisi

Modulo	
Numero Elementi di Base in serie	1-4
Numero linee di Elementi Base	1-4
Semi-unità	
Nr tubazioni verticali in orizzontale	2-6
Nr tubazioni verticali in profondità	2-6
Contenitore	
Spessore	2 mm
Tubo scambiatore	
Diametro esterno	16 mm
Spessore	1 mm
D/d (*)	4 (4.4)
L/d (*)	30 (85)
<i>(*) sulla base di dati letteratura. Tra parentesi i valori del prototipo realizzato (LH01)</i>	

Attraverso detti parametri si identificherà una particolare geometria, ovvero le dimensioni ed il peso del componente (**Figura 8**). Quindi lo si caratterizzerà valutando la sua capacità termica e, soprattutto, il suo costo specifico (per kWh accumulato)

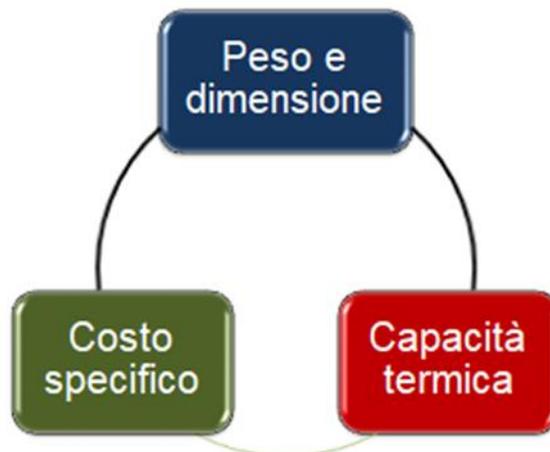


Figura 8- Schema ottimizzazione parametri

2.1.3.3 Valutazioni economiche

Per poter valutare il costo di un sistema di accumulo occorre quantificare tutte le voci che possono concorrere.

Nella tabella seguente sono riportate le principali voci di spesa, così come identificate da un precedente documento [3], comprensive di relativa descrizione e corredate di una ipotesi di costo unitario (in genere per unità di peso, €/kg).

Tabella 4 : Principali voci di spesa per il sistema di accumulo

Componente	Descrizione	Costo Unit.	Commenti
Mezzo accumulato (HSM) - kg	Materiale a cambiamento di fase (solido-liquido) non additivato con nanoparticelle	0.8	Sono esclusi eventuali costi di fusione ed inserimento
Sistema incapsulamento HSM	I PCM non sono micro-, mini- o macro- incapsulati.	--	Tipo tube & shell. Nessun incapsulamento
Fluido termovettore - kg	Nei sistemi indiretti l'HTF va conteggiato separatamente	5	Olio diatermico
Sistema scambio termico - kg	Sistema indiretto con scambiatore interno (HTF-PCM).	10	Tubo serpentina AISI 316
Contenimento- kg	Recipiente di contenimento. Potrebbe essere in pressione.	3	Costo unitario acciaio lavorato
Fondazione, strutture supporto	TES appoggiato a terra. Sistema di fondazione non incluso. Necessita struttura supporto unità.	--	Variabile con dimensione modulo. Trascurata.
Sist isolamento termico - kg	Sistema di isolamento termico necessario per minimizzare le perdite verso l'ambiente esterno.	2.5	Pannello 140mm Knauf Insulation DP4 - 13Euro/mq
Tubazioni e raccordi - kg	Tubazioni e raccordi tra varie unità e con l'impianto.	--	Variabile con dimensione modulo. Trascurata.
Pompe	Le pompe non sono incluse. Vanno conteggiate nel sist. di circolazione esterno	--	Non presente nel concetto
Sistema riscaldamento	Sistema di riscaldamento dell'HSM di tipo elettrico.	--	Non presente nel concetto
Sistema di controllo e strumentazione	Sono gli strumenti (misuratori di temperatura, portata, pressione, livello, ...) e gli apparati (schede acquisizione, trasmissione dati, computer, SW, ..) atti al controllo del corretto funzionamento dell'intero sistema di accumulo.	3%	Percentuale costi precedenti. Valore da letteratura
Componenti elettrici	Tutti i componenti elettrici necessari ad alimentare il sistema TES (quadri elettrici, cavi, convertitori, batterie, ...)	3%	Percentuale costi precedenti. Valore da letteratura
Contingency	Progettazione, utili, ...	7%	Percentuale costi precedenti. Valore da letteratura

2.1.3.4 Confronto concetti Enea-TES-LH-01 e Enea-TES-LH-02

Il primo confronto effettuato ha riguardato il concetto relativo al prototipo realizzato (Enea-TES-LH-01) e quello di un nuovo elemento ottimizzato secondo i suggerimenti di letteratura (Enea-TES-LH-02). Ciò consiste nell'imporre i seguenti valori a due parametri di progetto fondamentali:

	<i>Enea-TES-LH-01</i>	<i>Enea-TES-LH-02</i>
<i>D/d</i>	4.38	4.00
<i>L/d</i>	85	30

Per ciascun concetto sono state valutate quattro diverse configurazioni per i tratti verticali della serpentina: **2x2, 4x2, 4x4 e 6x6**. In questa analisi, il modulo è immaginato essere costituito da un solo elemento base.

In **Tabella 5** sono riportati i principali risultati di questo confronto. In **Figura 9** è mostrata la variazione del costo specifico del modulo in funzione della capacità termica (kWh accumulati).

Un primo confronto, sulla base delle configurazioni utilizzate, mostra come il secondo concetto, proponendo un sistema di dimensioni e capacità termica ridotte, conduca a costi più elevati del primo. In realtà, se il confronto lo si fa più opportunamente sulla base della capacità di accumulo, ci si accorge che il secondo concetto presenta costi specifici confrontabili, se non inferiori, al primo. In particolare, un elemento base del tipo Enea-TES-LH-02 in configurazione 4x4 mostra un costo leggermente inferiore a quello del nostro prototipo, tipo Enea-TES-LH-01 in configurazione 2x2. Entrambi hanno una capacità di accumulo di circa 10 kWh. L'utilizzo di configurazioni maggiori non produce abbassamenti di costo significativi.

Tabella 5 : Principali risultati del confronto Enea-TES-LH-01 e Enea-TES-LH-02

Parametri di progetto		Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	
		D/d	4.38	4.38	4.38	4.38	4.00	4.00	4.00	4.00	
		L/d	85.00	85.00	85.00	85.00	30.00	30.00	30.00	30.00	
Elemento base											
Semiunità											
		nr tubazioni verticali in orizzontale	2	4	4	6	2	4	4	6	
		nr tubazioni verticali in lunghezza	2	2	4	6	2	2	4	6	
		passo	D	70	70	70	70	64	64	64	
		lunghezza tubi verticali	L	1360	1360	1360	1360	480	480	480	
tubo scambiatore											
		diametro esterno tubo	dt	16	16	16	16	16	16	16	
		lunghezza tubo	Lt	12.22	23.98	47.50	106.30	4.86	9.51	18.80	42.02
Modulo											
		Numero di Unità	N	1	1	1	1	1	1	1	
		Massa HSM	kg	104.52	209.20	418.56	941.95	35.16	70.40	140.88	317.08
		Massa recipiente	kg	22.76	38.35	48.03	75.80	9.02	15.39	20.14	33.36
		Massa olio TES	kg	1.60	3.14	6.22	13.91	0.64	1.24	2.46	5.50
		Massa scambiatore	kg	4.91	9.64	19.10	42.74	1.96	3.82	7.56	16.90
		massa tubi e raccordi	kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		massa coibente	kg	13.68	19.54	23.08	33.31	6.49	9.27	11.17	16.54
		massa struttura di supporto	kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		calore sensibile HSM	kWh	4.94	9.88	19.77	44.48	1.66	3.32	6.65	14.97
		calore latente HSM	kWh	3.19	6.39	12.79	28.78	1.07	2.15	4.30	9.69
		calore sensibile scambiatore	kWh	0.07	0.13	0.27	0.59	0.03	0.05	0.10	0.23
		calore sensibile recipiente	kWh	0.32	0.53	0.67	1.05	0.13	0.21	0.28	0.46
		calore sensibile olio	kWh	0.07	0.13	0.26	0.58	0.03	0.05	0.10	0.23
		Capacità max accumulo	kWh	8.58	17.07	33.75	75.49	2.91	5.79	11.44	25.59
		Massa complessiva sistema	kg	147.47	279.87	514.98	1107.72	53.27	100.13	182.22	389.38
		Volume complessivo sistema	m ³	0.40	0.61	0.83	1.40	0.18	0.27	0.36	0.60
		Perdite termiche verso l'esterno	W	295.89	390.94	447.28	610.42	154.09	204.01	236.34	328.42
		Perdite termiche giornaliere	kWh	7.10	9.38	10.73	14.65	3.70	4.90	5.67	7.88
				82.8%	55.0%	31.8%	19.4%	126.9%	84.5%	49.6%	30.8%
		Costo specifico	E/kWh	32.18	29.49	25.52	23.48	36.68	33.33	28.66	26.24

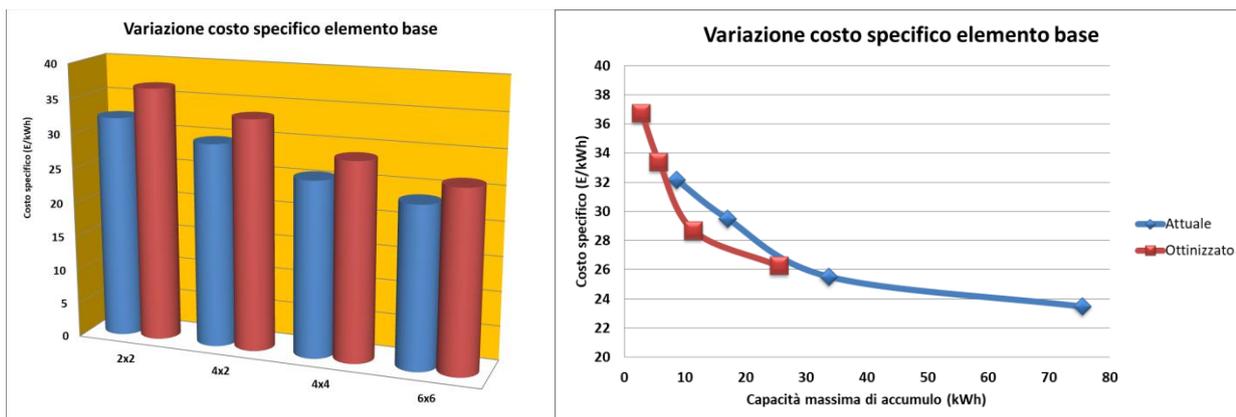


Figura 9- Variazione del costo dell'elemento base in funzione del kWh accumulato

In **Figura 10**, **Figura 11** e **Figura 12**, sono mostrate le distribuzioni dei pesi, delle capacità termiche e dei costi specifici per le configurazioni dei due concetti giudicate migliori: la 2x2 di Enea-TES-LH-01 e la 4x4 di Enea-TES-LH-02.

La distribuzione dei pesi mostra come la soluzione 2 presenti una riduzione del contributo del recipiente e della coibentazione a favore del PCM. Un leggero incremento si ottiene ovviamente per lo scambiatore e per il HTF. Conseguenza di ciò è un leggero incremento del contributo del PCM in termini di capacità termica rispetto alla soluzione 1.

Anche in termini di costo specifico la soluzione 2 presenta una riduzione del contributo del recipiente e della coibentazione ma, per contro, si ha un incremento, ovvio, del contributo del PCM, e di quello, ben più evidente, dello scambiatore.

Alla luce di quanto esposto si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il concetto LH02 dovrebbe, secondo letteratura, garantire un migliore scambio termico e ridotti tempi di carico e scarico (cosa da verificare con delle analisi di dettaglio)
- A pari tipologia di sezione l'LH02 sembra essere più costoso a causa della maggiore quantità di acciaio e della minore capacità termica
- Invece, a parità di capacità termica si vede che il costo è simile se non inferiore
- Tra la LH01 sezione 2x2 e la LH02 sezione 4x4 (elementi da circa 10 kWh) il secondo incrementa la % di HSM e riduce quella di acciaio, oltre che il costo specifico
- Elementi LH02 da oltre 20kWh sembrano essere meno convenienti
- L'uso di un acciaio al carbonio invece dell'inox dovrebbe ridurre i costi mentre l'uso di tubi ad alettatura verticale dovrebbe invece incrementare il costo del sistema di scambio. Ciò vale per entrambi i concetti

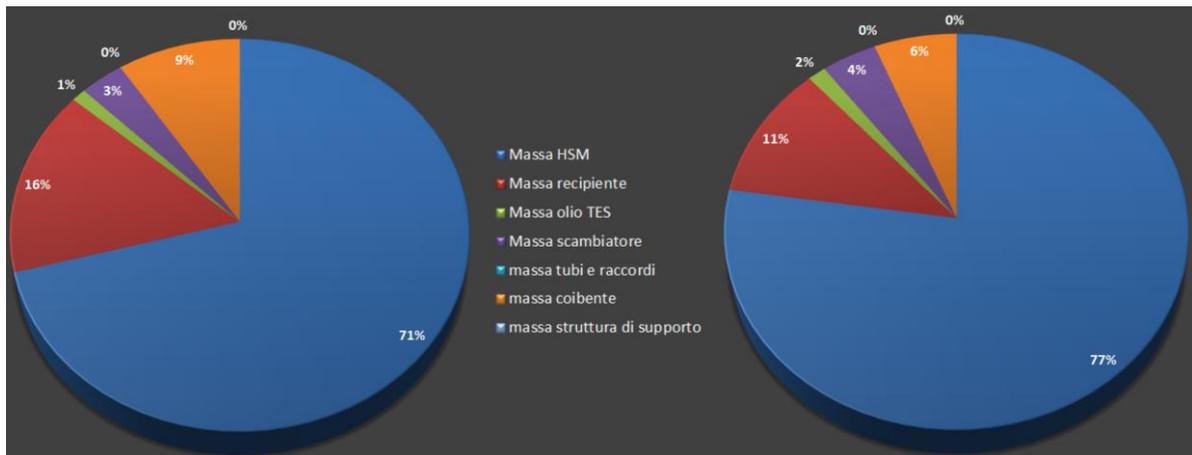


Figura 10- Confronto Enea-tes-LH-01 (2x2) e Enea-tes-LH-02 (4x4). Distribuzione dei pesi

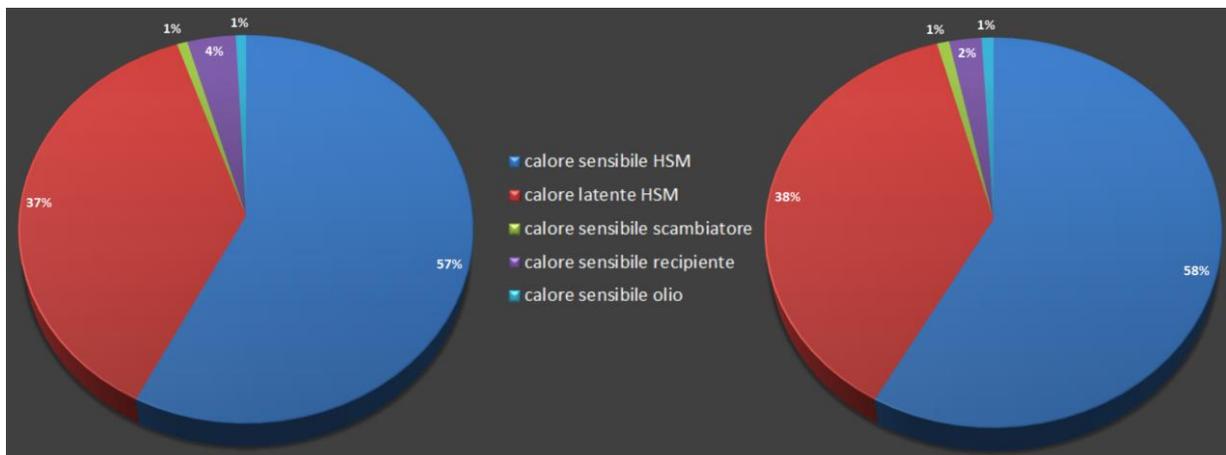


Figura 11- Confronto Enea-tes-LH-01 (2x2) e Enea-tes-LH-02 (4x4). Distribuzione capacità termica

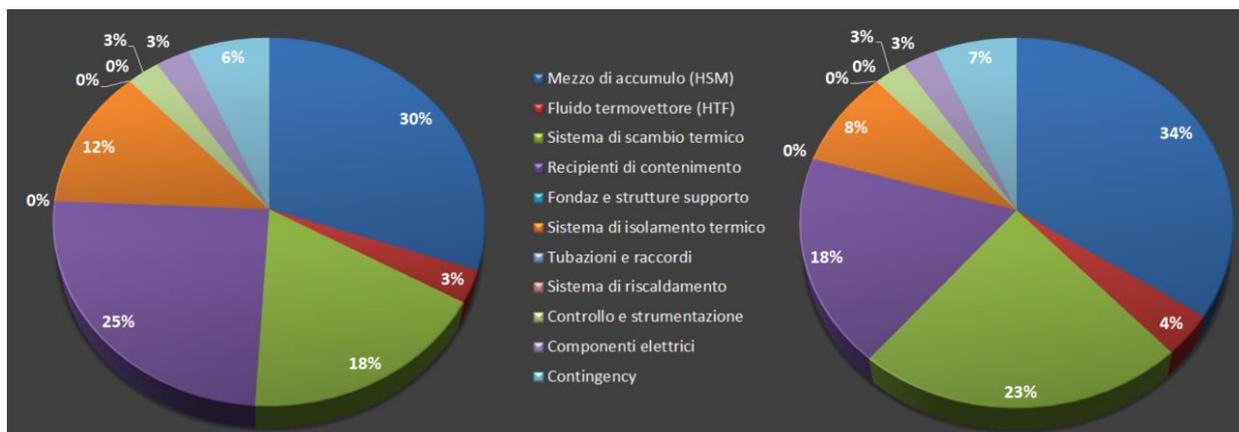


Figura 12- Confronto Enea-tes-LH-01 (2x2) e Enea-tes-LH-02 (4x4). Distribuzione dei costi

2.1.3.5 Confronto Moduli Enea-TES-LH-02

Nel precedente paragrafo si è sottolineato il vantaggio di una soluzione Enea-TES-LH-02 in configurazione 4x4 rispetto al prototipo realizzato. Utilizzando questa soluzione, vogliamo ora valutare le dimensioni più opportune per la realizzazione di moduli di accumulo termico.

Tale valutazione è stata condotta dapprima utilizzando una unica linea in cui si è fatto variare il numero di elementi base utilizzati da 1 a 4. Poi, ipotizzando linee con 3 elementi base, si è fatto variare il numero di linee sempre da 1 a 4.

In **Tabella 6** sono riportati i principali risultati di questo confronto. In **Figura 13** è mostrata la variazione del costo specifico del modulo in funzione della capacità termica (kWh accumulati).

Un primo confronto, sulla base delle configurazioni utilizzate, mostra come una riduzione di costo significativa sia ottenibile tramite un incremento del numero complessivo di elementi base sia se connessi in serie o in più linee di accumulo. Oltre i 10 elementi base (circa 100 kWh) il costo specifico, dopo essersi ridotto di circa il 10%, rimane pressoché costante.

Tabella 6 : Principali risultati del confronto di moduli tipo Enea-TES-LH-02 (4x4)

Elemento base			Caso	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Semiunità</i>											
				4	4	4	4	4	4	4	4
				4	4	4	4	4	4	4	4
	st	mm		1	1	1	1	1	1	1	1
Modulo											
Nr Elementi Base in serie	<i>Ns</i>			1	2	3	4	3	3	3	3
Nr Elementi Base in parallelo	<i>Np</i>			1	1	1	1	1	2	3	4
Numero di Unità	<i>N</i>			1	2	3	4	3	6	9	12
Massa HSM	kg		140.88	281.76	422.64	563.52		422.64	845.28	1267.92	1690.56
Massa recipiente	kg		20.14	40.29	60.43	80.58		60.43	120.86	181.30	241.73
Massa olio TES	kg		2.46	4.92	7.38	9.84		7.38	14.76	22.13	29.51
Massa scambiatore	kg		7.56	15.12	22.67	30.23		22.67	45.35	68.02	90.70
massa tubi e raccordi	kg		0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00
massa coibente	kg		11.17	14.98	18.79	22.60		18.79	27.78	36.77	45.75
massa struttura di supporto	kg		0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00
calore sensibile HSM	kWh		6.65	13.31	19.96	26.61		19.96	39.92	59.87	79.83
calore latente HSM	kWh		4.30	8.61	12.91	17.22		12.91	25.83	38.74	51.66
calore sensibile scambiatore	kWh		0.10	0.21	0.31	0.42		0.31	0.63	0.94	1.26
calore sensibile recipiente	kWh		0.28	0.56	0.84	1.12		0.84	1.68	2.52	3.36
calore sensibile olio	kWh		0.10	0.20	0.31	0.41		0.31	0.61	0.92	1.23
Capacità max accumulo	kWh		11.44	22.89	34.33	45.78		34.33	68.67	103.00	137.33
Massa complessiva sistema	kg		182.22	357.07	531.92	706.77		531.92	1054.03	1576.14	2098.26
Volume complessivo sistema	m3		0.36	0.54	0.72	0.91		0.72	1.20	1.68	2.16
Perdite termiche verso l'esterno	W		236.34	301.00	365.67	430.33		365.67	514.65	663.64	812.63
Perdite termiche giornaliere	kWh		5.67	7.22	8.78	10.33		8.78	12.35	15.93	19.50
			49.6%	31.6%	25.6%	22.6%		25.6%	18.0%	15.5%	14.2%
Costo specifico	E/kWh		28.66	27.75	27.44	27.29		27.44	27.04	26.90	26.84

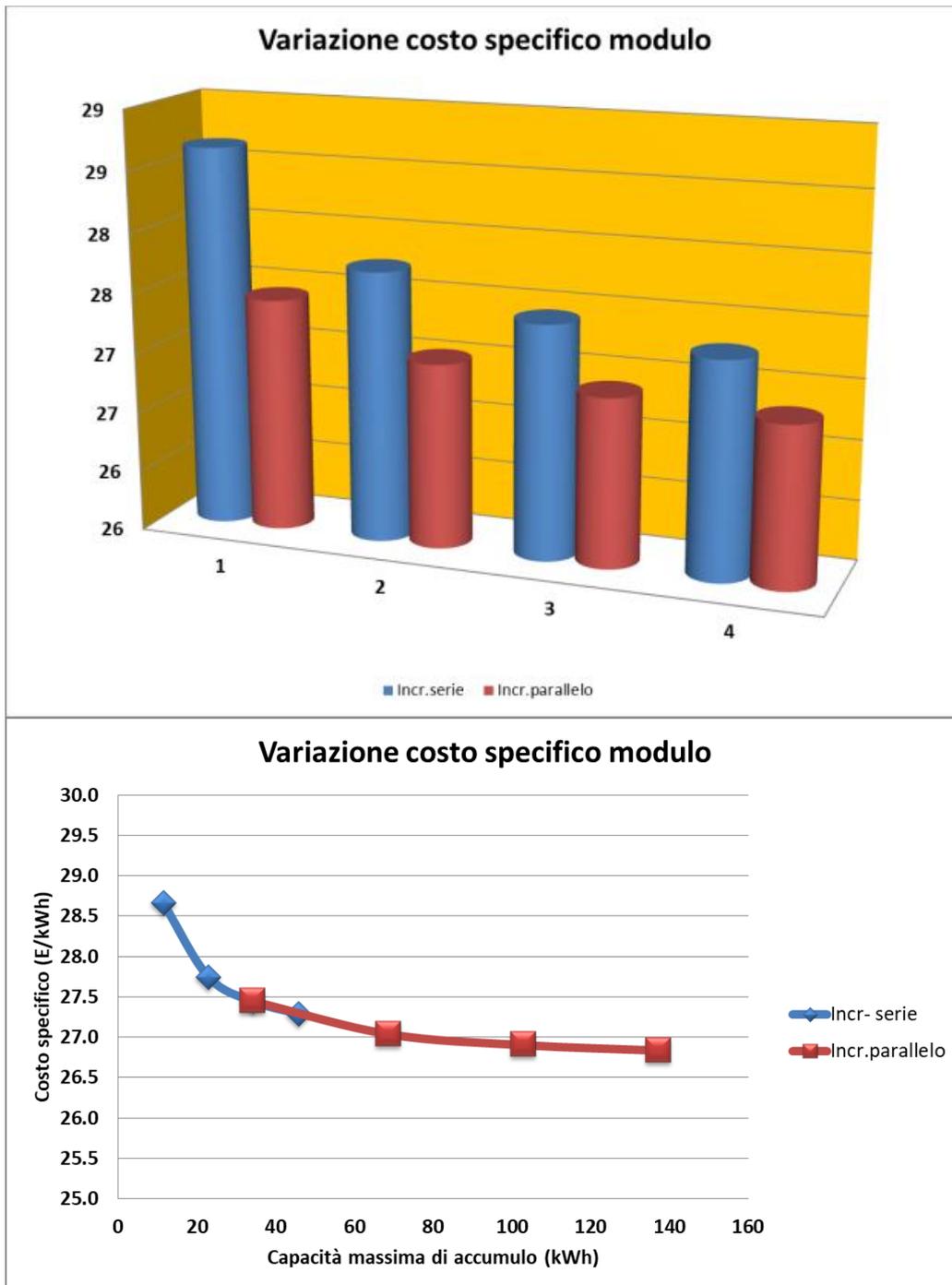


Figura 13- Variazione del costo di moduli con diverso numero di elementi base in funzione del kWh accumulato

In **Figura 14**, **Figura 15** e **Figura 16** sono mostrate le distribuzioni dei pesi, delle capacità termiche e dei costi specifici per il modulo con 3 linee di 3 elementi base, configurazione 4x4 di Enea-TES-LH-02, di capacità termica pari a circa 100 kWh_{th}.

La distribuzione dei pesi mostra come il modulo selezionato manifesti una ulteriore riduzione del contributo della coibentazione a favore principalmente del PCM.

Riguardo la capacità termica i vari contributi rimangono sostanzialmente invariati rispetto al singolo elemento di base.

Chiaramente, anche in termini di costo specifico il contributo della coibentazione risulta fortemente ridotto a favore di quello del PCM ma anche dello scambiatore e del recipiente.

Alla luce di quanto esposto si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il costo specifico del modulo si riduce con il numero complessivo di elementi base, ovvero con il numero di elementi base costituenti una linea e con il numero di linee
- Con circa 10 elementi base si ottiene una riduzione di costo di circa il 10%
- Detta riduzione è sostanzialmente dovuta alla ridotta percentuale di superficie esposta e, quindi, di isolante termico necessario
- Oltre i 10 elementi base il costo specifico rimane sostanzialmente costante
- Il costo specifico si attesta intorno ai 27 Euro/kWh_{th} circa
- Il costo dei sistemi di accumulo oggi in commercio (principalmente a calore sensibile) sono, chiavi in mano, tra i 60 ed i 100 euro/kWh_{th}.

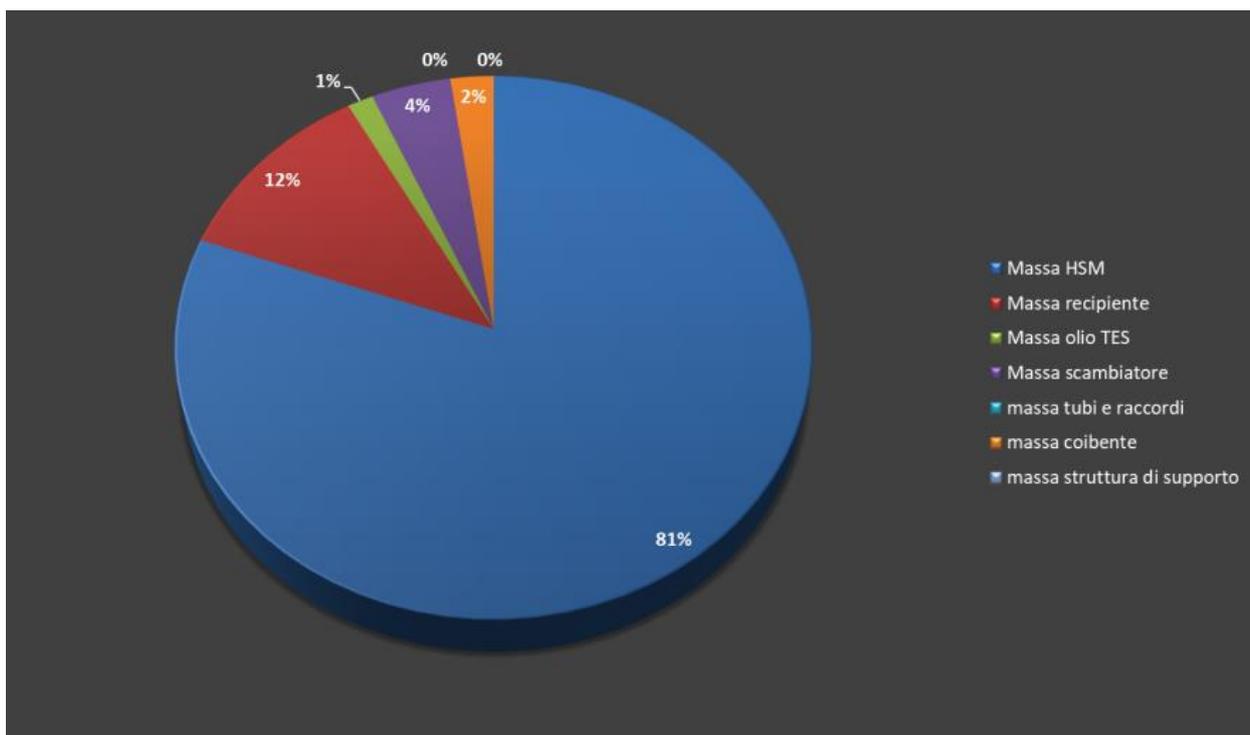


Figura 14- Distribuzione pesi caso con elemento base (4x4) e modulo (3x3; 100 kWh_{th})

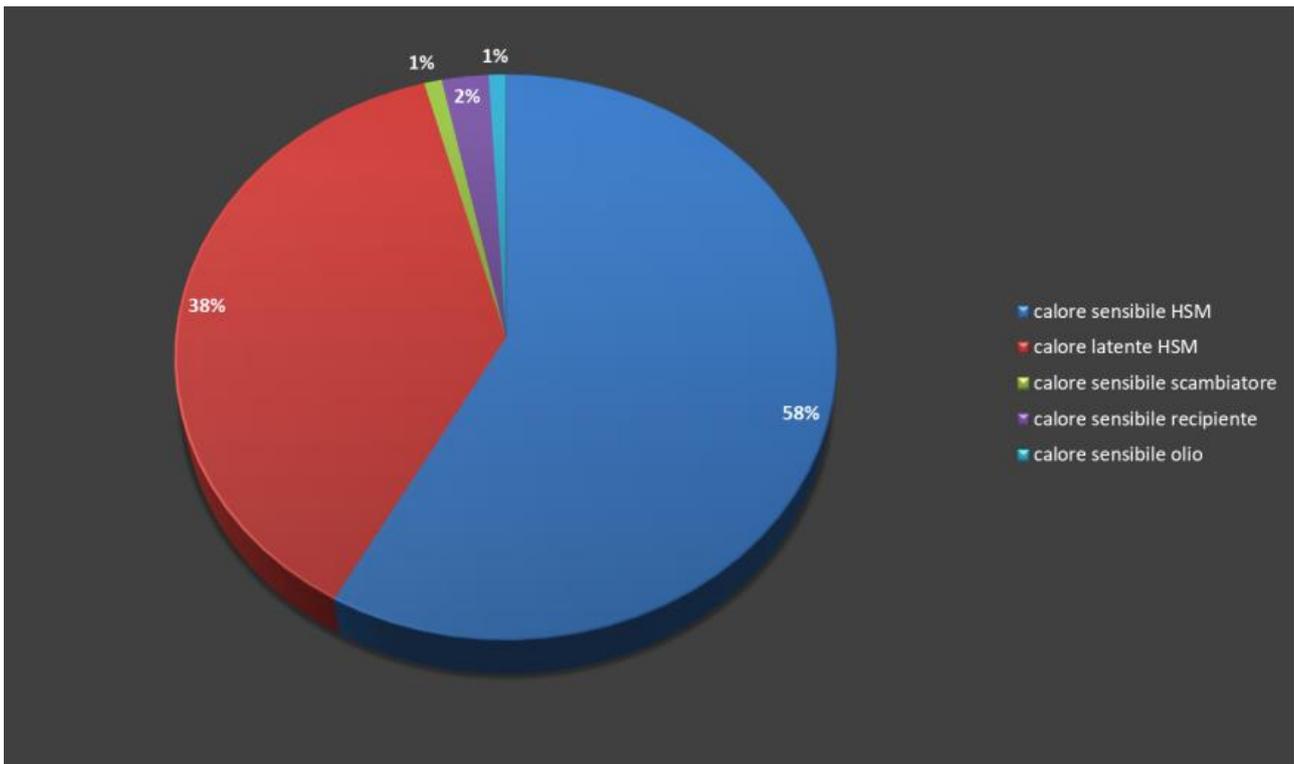


Figura 15- Distribuzione capacità termica con elemento base (4x4) e modulo (3x3; 100 kWh_{th})

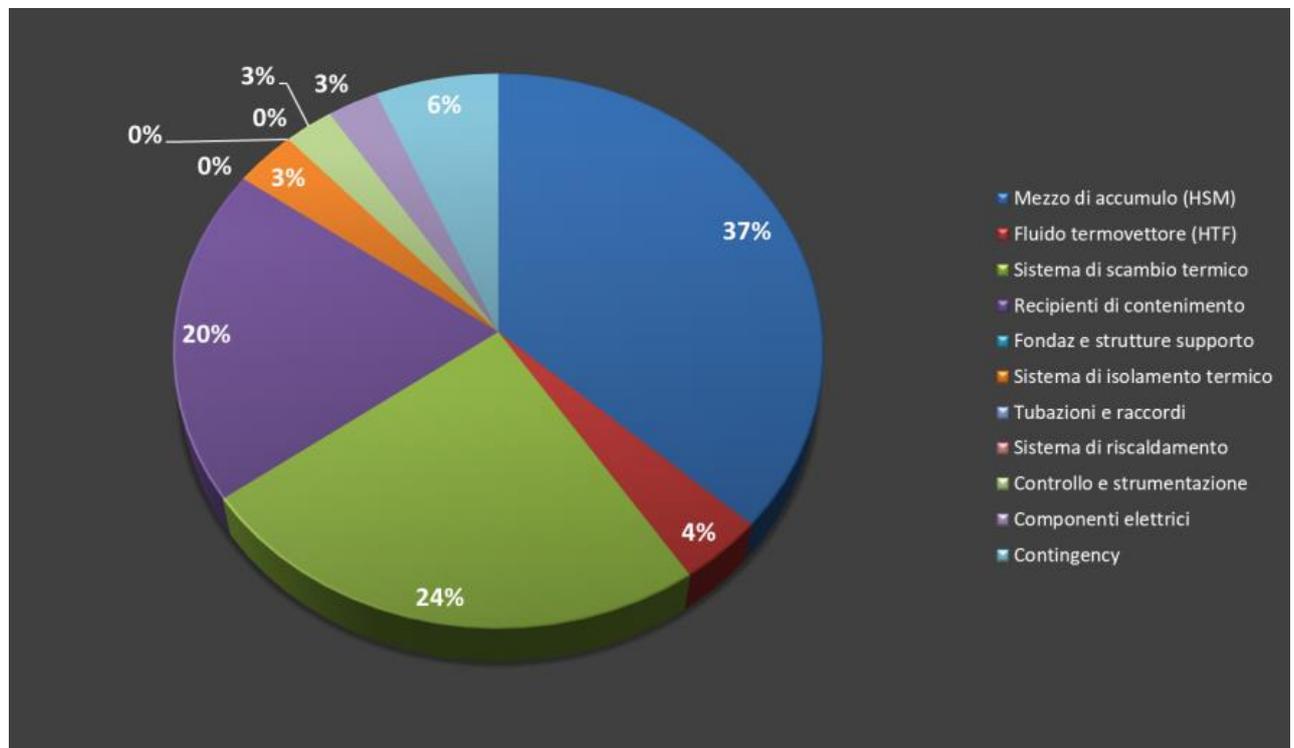


Figura 16- Distribuzione costi caso con elemento base (4x4) e modulo (3x3; 100 kWh_{th})

2.1.4 Conclusione

Alcuni risultati finali dell'analisi condotta potranno essere così riassunti:

- L'elemento base LH02 nella configurazione (4x4) può essere una buona soluzione che dovrebbe coniugare l'aspetto economico con quello tecnico. La verifica dell'aspetto tecnico andrebbe fatta in dettaglio al fine di confermare le ipotesi fatte per i parametri di progetto.
- Il modulo dovrà avere un numero complessivo di elementi base superiore a 10 per garantire l'economicità della soluzione.
- Il modulo potrà avere delle serie con un numero di elementi base che sarà funzione delle condizioni di utilizzo del sistema e dei vincoli esterni.
- Nel modulo, il numero di serie collegate in parallelo dovrà essere tale da garantire il numero minimo di elementi base complessivi.
- La capacità termica di un intero modulo sarà determinata dal numero complessivo di elementi base presente, ovvero dal prodotto degli elementi base di una serie per il numero di serie collegate in parallelo.
- La capacità termica di un intero modulo sarà superiore ai 100 kWh
- Il costo specifico del sistema di accumulo, fatti salvi i ricarichi ed i costi di commercializzazione, è di circa 27 Euro/kWh

2.2 Dimensionamento del nuovo LHTES

Sulla base dei risultati della precedente analisi tecnico-economica è ora possibile procedere ad un primo dimensionamento di un dispositivo di accumulo termico a calore latente operante nell'intervallo di temperatura compreso tra 200 e 300°C, denominato Enea-TES-LH-02.

Questo sarà costituito da:

- Un **contenitore esterno metallico** a forma di parallelepipedo
- **Due tubazioni a serpentina** disposte simmetricamente rispetto al piano mediano verticale che taglia il lato di base maggiore
- Una opportuna **coibentazione esterna** per limitare le perdite termiche, comprensiva di lamiera di protezione
- Supporti e strumentazione per **acquisizione** di temperature (termocoppie)

2.2.1 Tubazioni a serpentina

Le due tubazioni a serpentina, ciascuna lunga circa 11.75m, saranno costituite da un tubo in acciaio AISI316 di diametro esterno 20 mm e spessore 1-1.5 mm.

Ciascuna tubazione è costituita da 16 tratti di tubazione verticale disposti secondo una matrice 4x4 e 15 tratti curvi a 180°, che raccordano i predetti tratti rettilinei. I tratti rettilinei avranno un interasse di 80 mm e saranno lunghi circa 600 mm ($D/d=4$ e $L/d=30$). I tratti curvilinei a 180° avranno un raggio di curvatura pari a 40 mm e collegheranno alternativamente le sezioni inferiori o superiori di due tratti verticali consecutivi. Ogni tratto curvilineo è lungo circa 125.7 mm.

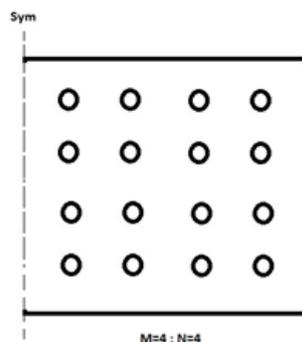


Figura 17- Semi sezione di un elemento base con serpentina a 4x4 tratti verticali

Le sezioni superiori iniziale e finale dei due tratti verticali di una serpentina si uniranno alle analoghe sezioni dell'altra serpentina per poi proseguire verso l'alto (per circa 220 mm) ed essere collegate al coperchio del contenitore esterno metallico, dal quale proseguiranno verso l'esterno. Le parti più basse delle due tubazioni dovranno essere distanti circa 40 mm dal fondo del contenitore.

I tratti di tubo verticale, per incrementare la conducibilità termica nel mezzo di accumulo dovranno essere realizzati con tubi alettati longitudinalmente. Le alettature longitudinali sono le più efficaci poiché non impediscono lo sviluppo di moti convettivi nel PCM e il loro effetto è significativo soprattutto in fase di solidificazione. Lo spessore delle alette dovrebbe essere confrontabile con quello del tubo (es: 1 mm), la loro lunghezza radiale (altezza) circa 2 volte il diametro del tubo (es: 25 mm) mentre il loro numero non superiore a 4-6.

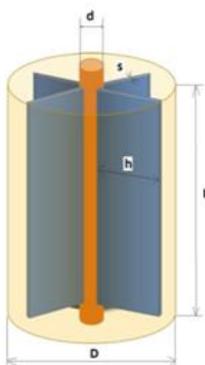


Figura 18- Semi sezione di un elemento base con serpentina a 4x4 tratti verticali

Le due tubazioni di ingresso ed uscita dall'unità dovranno, esternamente al coperchio superiore, presentare due apposite sezioni in grado di alloggiare due termoresistenze immerse nel fluido termovettore per rilevare la temperatura di ingresso ed uscita del fluido.

2.2.2 Contenitore esterno

Il contenitore esterno metallico avrà una base di 320x640 mm ed una altezza di 900 mm. E' realizzato con lamiere di acciaio AISI316 o equivalenti di spessore 2-3 mm.

Nella parte superiore sarà realizzato un coperchio a tenuta dal quale usciranno le sezioni esterne dei tubi di ingresso ed uscita del fluido termovettore. Dallo stesso usciranno anche tutti i cavi delle termocoppie utilizzate.

Tale contenitore dovrà consentire il suo svuotamento dal mezzo di accumulo in fase liquida attraverso una opportuna valvola di scarico posizionata sul fondo, il quale dovrà avere la necessaria pendenza.

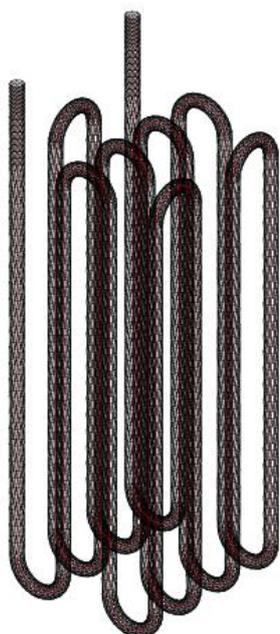


Figura 19- Tubazione a serpentina con disposizione 4x4. I tratti verticali potrebbero essere alettati.

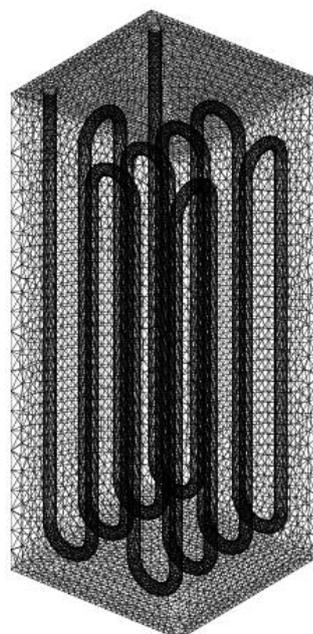


Figura 20- Vista di metà contenitore con una tubazione a serpentina ed il volume occupato dal mezzo di accumulo termico.

2.2.3 Coibentazione esterna

Il contenitore sarà isolato termicamente tramite un opportuno coibente esterno.

Le parti laterali e quella superiore potranno essere coibentate tramite l'uso di materassini di lana di roccia di spessore circa 150 mm.

La parte sottostante dovrà essere coibentata tramite un materiale isolante rigido (piaste, mattonelle, ...) di resistenza termica equivalente al precedente e in grado di sostenere il peso del dispositivo senza danneggiarsi.

2.2.4 Altri dati

Nel contenitore dovranno essere inseriti circa 300 kg di sale nitrato. L'intero dispositivo dovrebbe pesare circa 400 kg ed esercitare sul fondo una pressione di quasi 2000kg/m².

La capacità termica, per l'intervallo di temperature indicato, è di circa 25 kWh_{th} di cui circa il 40% (10 kWh_{th}) di solo calore latente.

2.3 Analisi numerica del nuovo LHTES

Per poter meglio comprendere il comportamento termico del nuovo prototipo ENEA-TES-LH02 appena dimensionato si può ricorrere ad una modellizzazione numerica del componente e ad una sua analisi per verificarne la risposta.

Un modello FEM consente di avere una buona approssimazione del sistema mantenendo tempi computazionali accettabili, a confronto con modelli CFD. Detti modelli, però, simulano solo uno scambio termico puramente conduttivo e non tengono conto del trasporto di calore e massa associato al cambiamento di fase (PCM in fase liquida), sottostimando le prestazioni del sistema di accumulo. Questo, invece, accade nei modelli CFD che, però, richiedono molte risorse computazionali, sia in termini di potenza di calcolo che di tempo di calcolo.

In un precedente lavoro [4] si è sviluppato un modello di tipo termodinamico conduttivo, in cui si tiene conto del contributo dello scambio termico convettivo all'interno del PCM in fase liquida, utilizzando un modello FEM basato sul "metodo della conducibilità termica effettiva" [5]. Tale modello ha evidenziato, con tutte le approssimazioni del caso, una risposta termica del sistema più simile a quella di un modello CFD. Detto metodo sarà adottato anche in questo calcolo. Il codice di calcolo FEM utilizzato è CAST3M.

2.3.1 La geometria

Il sistema ENEA-TES-LH02, mostrato per metà in **Figura 23**, è costituito da quattro elementi base:

- Il **fluido termovettore** che scorre all'interno del tubo di scambio cedendo o ricevendo calore dal sistema di accumulo;
- Il **tubo di scambio termico a serpentina**, in acciaio, che trasferisce il calore dal fluido termovettore al PCM e viceversa;
- Il **PCM**, che andrà a riempire lo spazio compreso tra la superficie esterna del tubo di scambio e la parete di un contenitore;
- Il **contenitore**, che nel caso in oggetto ha una forma prismatica.

In **Tabella 7** sono riportati i principali parametri geometrici utilizzati per la realizzazione del modello e derivati dal dimensionamento precedente.

Tabella 7 – Parametri generali di calcolo

PARAMETRI GENERALI CALCOLO		
Rapporto L/d ₀	-	30
Rapporto D/d ₀	-	4
Configurazione tubi verticali semi elemento	-	4x4
Diametro esterno tubo scambiatore (d ₀)	(mm)	20
Diametro interno tubo scambiatore (d _i)	(mm)	17
Spessore tubo scambiatore (s)	(mm)	1.5
Area passaggio tubo scambiatore	(mm ²)	254
Diametro equivalente PCM (D) o passo tubi	(mm)	80
Altezza sezione verticale (L)	(mm)	900

A partire da tali parametri è facile dedurre che:

- La variazione di altezza del PCM a seguito della espansione dovuta al cambio di fase solido-liquido è di circa 50 mm;
- La lunghezza totale del tubo di scambio è 11.74 m;
- La lunghezza del tratto di espansione superiore 5.06E-02 m
- La superficie totale del tubo di scambio è 0.73 m²;
- Il volume totale occupabile del PCM solido è 7.94E-02 m³;

Nei successivi modelli viene trascurata la presenza del tubo in acciaio e del contenitore simulando esclusivamente il fluido termovettore ed il PCM.

2.3.2 I materiali

In assenza del tubo in acciaio e del contenitore, i materiali rappresentati nel modello FEM sono soltanto i seguenti:

- Il fluido termovettore (HTF);
- Il materiale a cambiamento di fase (PCM).

Qui di seguito vengono riportate le loro principali caratteristiche fisiche e successivamente descritti i modelli di comportamento implementati nei calcoli.

2.3.2.1 Il fluido termovettore

Il fluido termovettore è un olio diatermico, Paratherm-NF, le cui caratteristiche fisiche sono state considerate costanti per l'intervallo di temperature operativo (200-300°C) e pari ai valori corrispondenti alla temperatura media ($T_{media}=250^{\circ}C$).

Esso è caratterizzato da: densità ρ_f , calore specifico $c_{p,f}$, conducibilità k_f e viscosità dinamica μ_f . Da queste proprietà è quindi possibile valutare il numero di Prandtl corrispondente:

$$Pr_f = \frac{\mu_f c_{p,f}}{k_f}$$

In **Tabella 8** sono riportate le caratteristiche fisiche considerate:

Tabella 8 – Caratteristiche fluido termovettore

HTF (olio diatermico)		
Densità (ρ_f)	(kg/m ³)	741
Conducibilità termica (k_f)	(W/(m °C))	0.09
Calore specifico ($c_{p,f}$)	(J/(kg °C))	3109
Viscosità dinamica (μ_f)	(Pa s)	0.00049
Numero di Prandtl	-	16.96

2.3.2.2 Il materiale a cambiamento di fase (PCM)

Il materiale a cambiamento di fase considerato è una miscela (60-40%wt) di nitrati di sodio e potassio (sali solari), le cui caratteristiche sono riportate nella **Tabella 9**.

Tabella 9 – Caratteristiche materiale a cambiamento di fase

PCM (sali solari)		
Densità (ρ_{pcm})	(kg/m ³)	1952
Conducibilità termica (k_{pcm})	(W/(m °C))	0.487
Calore specifico ($c_{p,pcm}$)	(J/(kg °C))	1648
Calore latente (ΔH_{pcm})	(J/kg)	110000
Temperatura inizio fusione (T_{m1})	(°C)	219
Temperatura fine fusione (T_{m2})	(°C)	232
Temperatura media di fusione $T_m=(T_{m1}+T_{m2})/2$	(°C)	226
Viscosità dinamica (μ_{pcm})	(Pa s)	0.004909
Coefficiente di dilatazione termica (α)	(1/°C)	3.4365E ⁻⁴
Numero di Prandtl	-	16.6

In base a tali caratteristiche ed alle dimensioni del sistema LH02 ne consegue che:

- La massa del PCM è di circa 155 Kg;
- Il calore sensibile massimo accumulabile è di 7.1 kWh;

- Il calore latente massimo accumulabile è di 4.7 kWh;
- La capacità di accumulo termico nominale è di 11.8 kWh.

2.3.3 Le condizioni al contorno

2.3.3.1 Condizione di scambio termico

Il fluido termovettore è rappresentato solo in termini funzionali come un fluido che lambisce la parete interna del tubo e la cui temperatura ha una determinata evoluzione temporale. Il suo flusso idraulico è caratterizzato dalla sua velocità all'interno del tubo di scambio, ovvero dalla sua portata. Nella **Tabella 10** sono riportati i dati caratteristici del flusso.

Tabella 10 – Dati caratteristici del flusso del fluido termovettore

flusso HTF		
Velocità	(m/s)	0.6
Portata	(kg/s)	0.1

L'HTF transita nel tubo con una portata in massa w operando tra la temperatura massima T_H e quella minima T_L . Nota la portata è possibile valutare il tipo di flusso del HTF calcolando il numero di Reynolds

$$\Re_f = \frac{4w}{\mu_f \pi d_i}$$

E da questo il numero di Nusselt corrispondente:

- se $Re_f < 2300$ (regime laminare) $Nu_f = 1.86 \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} \Re_f^{0.33} Pr_f^{0.33}$
- se $Re_f > 10000$ (regime turbolento) $Nu_f = \frac{\frac{f}{8}(\Re_f - 1000)Pr_f}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(Pr_f^{2/3} - 1)}$ (correlazione di Gnielinski)
con
 $f = (0.79 * \ln(\Re_f) - 1.64)^{-2}$ (friction factor - smooth walls)
- se In transizione $Nu_f = 0.0033\Re_f Pr_f^{0.37}$

Nelle condizioni date, il numero di Reynolds nell'intervallo operativo è pari a 15425, identificando un tipo di flusso turbolento. Poiché l'olio ha un numero di Prandtl circa 17, applicando la correlazione di Gnielinski, si ottiene un valore del numero di Nusselt di 164 e quindi un coefficiente convettivo di scambio termico pari a:

$$h_{HTF} = 868 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Tale coefficiente è ipotizzato rimanere costante per tutto l'intervallo di temperature operative. Il carico termico è indotto dalla variazione nel tempo della temperatura del fluido termovettore.

2.3.3.2 Condizione di carico

Per il modello proposto si effettueranno due simulazioni numeriche: una di carico del LHTES, nella quale il sistema accumula il calore ricevuto dal fluido termovettore, e una di scarico, nella quale il sistema cede il calore al fluido termovettore raffreddandosi.

Nella fase di carica la temperatura del fluido termovettore in ingresso parte dalla temperatura operativa minima, $T=200^{\circ}\text{C}$, per arrivare dopo 15 minuti alla temperatura operativa massima, $T=300^{\circ}\text{C}$. Questa temperatura viene quindi mantenuta per 5 ore. L'andamento descritto è riportato in [Tabella 11](#) e mostrato in [Figura 21](#).

Nelle simulazioni di carica del sistema la forzante è quindi rappresentata dalla condizione di flusso termico a coefficiente di trasporto convettivo costante e temperatura del fluido termovettore con andamento riportato in [Tabella 11](#), applicata alla parete del PCM a contatto con il tubo in acciaio.

Tabella 11 – Andamento temperatura del fluido termovettore in ingresso nella fase di carica

Tempo (h)	Tempo (s)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0.00	0	200
0.25	900	300
5.25	18900	300

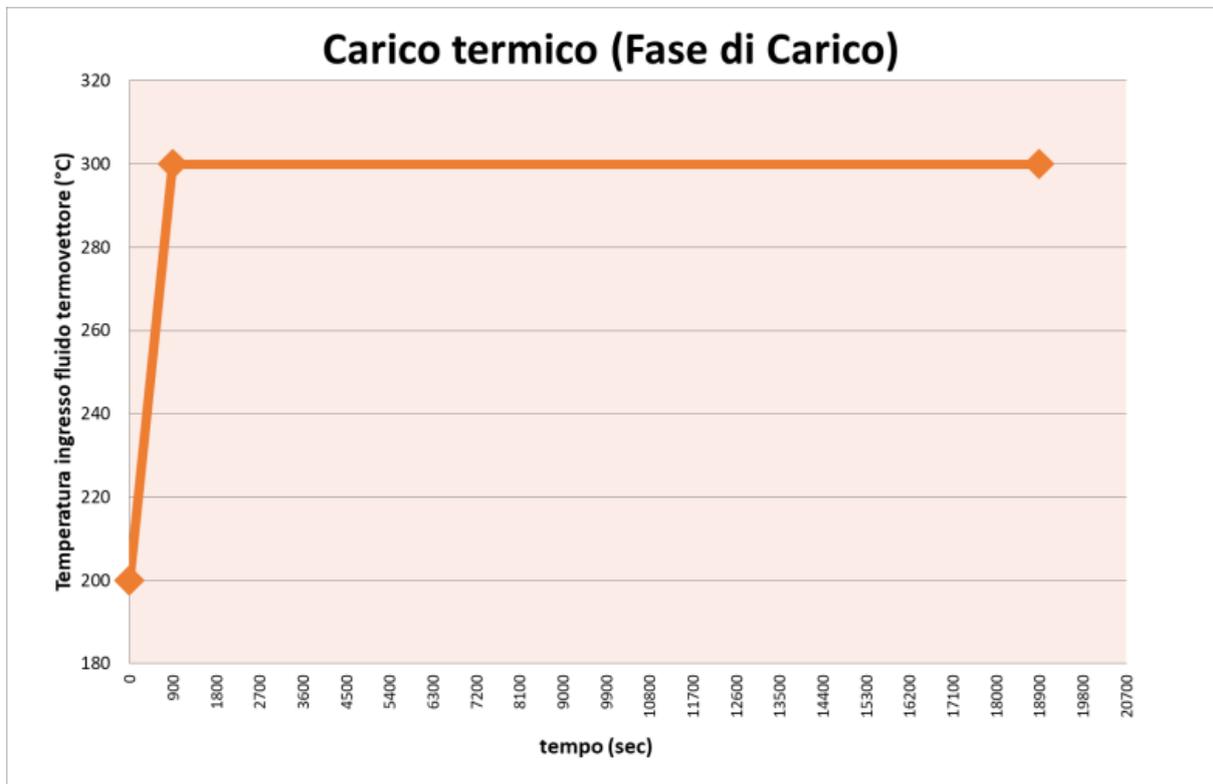


Figura 21 - Andamento temperatura ingresso del HTF durante la fase di carico

Nella fase di scarica la temperatura del fluido termovettore in ingresso parte dalla temperatura operativa massima, $T=300^{\circ}\text{C}$, per arrivare dopo 15 minuti alla temperatura operativa minima, $T=200^{\circ}\text{C}$. Questa temperatura viene quindi mantenuta per 5 ore. L'andamento descritto è riportato in [Tabella 12](#) e mostrato in [Figura 22](#).

Nelle simulazioni di scarica del sistema la forzante è quindi rappresentata, anche in questi casi, dalla condizione di flusso termico a coefficiente di trasporto convettivo costante e temperatura del fluido termovettore con andamento riportato in [Tabella 12](#), applicata alla parete del PCM a contatto con il tubo in acciaio.

Tabella 12 – Andamento temperatura del fluido termovettore in ingresso nella fase di scarica

Tempo (h)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
0.00	0	300
0.25	900	200
5.25	18900	200

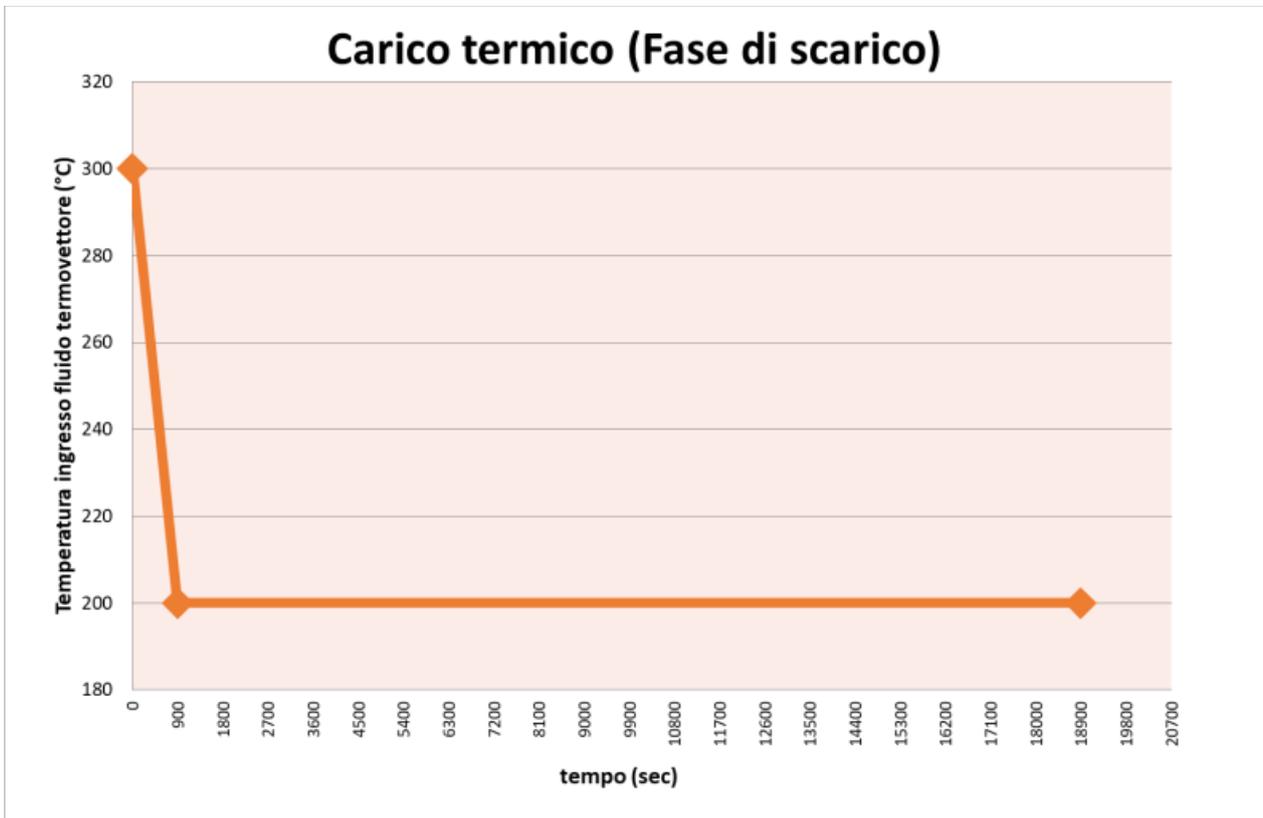


Figura 22 - Andamento temperatura ingresso del HTF durante la fase di scarico

2.3.3.3 Perdite di calore verso l'esterno

Il sistema è ipotizzato essere sostanzialmente adiabatico. Ciò può essere realizzato imponendo, sulla superficie laterale del volume di PCM, un coefficiente convettivo di scambio termico verso l'ambiente quasi nullo: $h_{amb} = 0.0001 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$. La presenza di un opportuno isolante termico dovrebbe condurre invece ad un coefficiente convettivo di circa $0.41 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$. La temperatura dell'ambiente si considera costante e pari a 20°C.

2.3.3.4 Campo termico iniziale

Nelle simulazioni di carica del sistema, la temperatura iniziale del modello è posta costante e pari alla temperatura minima operativa, $T=200\text{°C}$, con il PCM in stato solido (rateo di fuso = 0).

Nelle simulazioni di scarica del sistema, la temperatura iniziale del modello è posta costante e pari alla temperatura massima operativa, $T=300\text{°C}$, con il PCM in stato liquido (rateo di fuso = 1).

2.3.4 Il codice di calcolo

Per l'analisi FEM del presente studio è stato utilizzato un codice di calcolo denominato CAST3M. Questo è un codice di calcolo agli elementi finiti, sviluppato presso il Dipartimento di Meccanica e Tecnologia (DMT) del Commissariato per l'Energia Atomica Francese (CEA) di Saclay (Parigi). Lo sviluppo di CAST3M è inserito all'interno di una attività di ricerca nel campo della meccanica e termo-meccanica con l'obiettivo di

costruire uno strumento di alto livello capace di essere usato come valido supporto per la progettazione, il dimensionamento e l'analisi di strutture e componenti, nel campo nucleare così come in settori tradizionali dell'industria. In accordo con ciò, CAST3M si presenta come un sistema completo, che integra non solo le funzioni di calcolo, ma anche le funzioni di costruzione del modello (pre-processore) e di trattamento dei risultati (post-processore). CAST3M è un programma potente, flessibile ed ottimizzato in particolare per problemi di meccanica lineare elastica in statica e dinamica (vibrazioni, estrazione di autovalori), problemi di analisi termica e di trasferimento di calore, problemi non lineari (materiali elastici, plastici, viscosi), e problemi di dinamica passo a passo.

2.3.5 La magliatura

La magliatura corrispondente al modello geometrico (semi unità ENEA-TES-LH02) è tridimensionale (3D) e realizzata in modo semi automatico. Il fluido termovettore è rappresentato tramite una semplice linea descritta nel verso di percorrenza del fluido, ovvero dall'ingresso alto verso l'uscita. Il tubo di scambio non è direttamente rappresentato e la sua superficie esterna è in comune con il PCM. Il PCM andrà a riempire lo spazio compreso tra la superficie esterna del tubo di scambio e la parete interna di un contenitore, che a sua volta non verrà rappresentato.

La magliatura volumetrica è costituita da 17205 elementi tetraedrici a 4 nodi (TET8) per un totale di 38076 nodi.

Sono stati definiti, e quindi parte della magliatura, anche:

- La superficie esterna del volume, in grado di scambiare calore con l'ambiente;
- La superficie fluida a contatto con il tubo di scambio;
- Gli elementi di interfaccia tra la superficie fluida e la superficie del tubo di scambio.

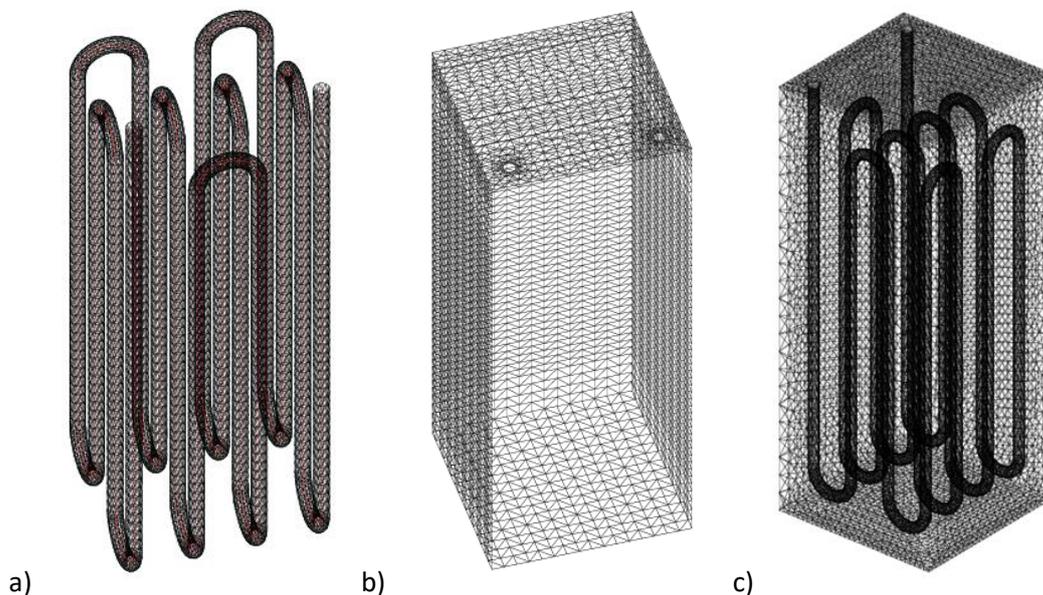


Figura 23- Semi elemento/Unità di accumulo termico LHTES ENEA-TES-LH02: a) tubo a serpentina; b) semi contenitore esterno; c) insieme semi elemento

2.3.6 I modelli di comportamento

Qui di seguito vengono descritti i modelli di comportamento implementati nel calcolo.

2.3.6.1 Fluido termovettore

Per il fluido termovettore è quindi utilizzato un modello di comportamento advettivo, con le temperature del fluido che variano lungo la linea di percorrenza. Tali temperature sono riportate a livello della superficie fluida che scambierà con la superficie del tubo scambiatore in relazione al coefficiente convettivo di scambio termico imposto.

2.3.6.2 PCM

Il modello di comportamento adottato per il PCM è quello tipico di un materiale a cambiamento di fase in cui oltre la temperatura T raggiunta è calcolata anche la frazione f di volume fuso (liquido).

Adottando per il PCM i valori costanti riportati in [Tabella 9](#) si otterrà uno scambio termico e di trasporto di calore di tipo puramente conduttivo. In realtà, la fusione del PCM (liquefazione), in congiunzione a gradienti termici ed effetti gravitazionali, può condurre all'insorgere di moti convettivi del PCM liquido che conducono ad un trasporto di calore di tipo convettivo naturale, e quindi più efficace.

Per tenere conto della convezione naturale nel PCM in fase liquida in modelli numerici di tipo FEM (con trasferimento di calore per sola conduzione) si può utilizzare il "metodo della conducibilità termica efficace". Tale approccio si è dimostrato adatto per una ottimizzazione rapida durante le prime fasi di progettazione.

In questo metodo, una correlazione per il numero di Nusselt del mezzo di accumulo liquido viene utilizzata per modificare la conducibilità termica originale di un PCM stazionario nella sua fase liquida. La conducibilità termica effettiva è definita come la conducibilità termica che un fluido immobile nello spazio dovrebbe trasmettere per equiparare un fluido in movimento.

Gli aspetti prettamente teorici sono stati ampiamente trattati in un precedente lavoro [4] cui si demanda per maggiori dettagli. Va precisato che questo modello è stato sviluppato per applicazioni che presentano un numero di Rayleigh compreso tra 10^5 e 10^8 , un numero di Stefan compreso tra 0.4 e 4.5 ed numero di Biot compreso tra 1 e 7.

Valutando la conducibilità effettiva secondo tale metodo e sulla base dei dati riportati per questa analisi si ottiene:

$$Nu_{NC,max} = 2.25$$

$$k_{eff} = 1.1 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$$

Quindi, nei successivi calcoli, la conducibilità del PCM viene impostata come variabile con la temperatura nel modo seguente:

- $k = 0.487 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$, per temperature del PCM inferiori a quella di inizio fusione ($T < T_{m1}$);
- k variabile linearmente tra $0.487 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$ e $1.1 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$, per temperature del PCM tra inizio e fine fusione ($T_{m1} < T < T_{m2}$);
- $k = 1.1 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$, per temperature del PCM superiori a quella di fine fusione ($T > T_{m2}$);

Tale andamento è visibile nella seguente [Figura 24](#).

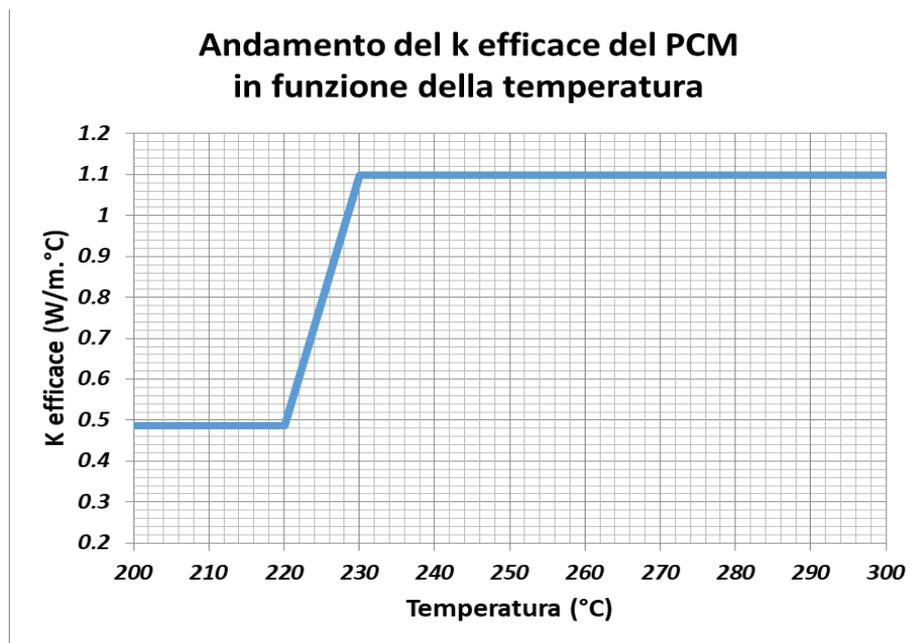


Figura 24 - Andamento di k del PCM in funzione della temperatura

Il caso in esame presenta un numero di Rayleigh, Ra , pari a circa $1.7E7$ ed un numero di Stefan, Ste , di circa 1.12, quindi entrambi all'interno del range di applicazione del modello. Invece il numero di Biot, Bi , risulta pari a circa 87 e quindi fuori al range di applicazione del modello.

2.3.7 Risultati e discussione - Fase di carico

Qui di seguito sono illustrati i risultati della simulazione FEM della fase di carico del sistema ENEA-TES-LH02.

In **Figura 25** è riportata la distribuzione delle temperature sul volume del PCM, sia intero che sezionato, e sulla superficie di scambio termico PCM-HTF e, in **Figura 26**, del rateo di PCM fuso sul volume del PCM, sia intero che sezionato. Inoltre, in **Figura 27** e **Figura 28** sono riportate lo stesso tipo di distribuzioni precedenti in vari istanti del transitorio, per evidenziarne l'evoluzione temporale.

Dopo circa 5 ore di carica del sistema LH02, il PCM ha raggiunto la temperatura massima operativa ovunque ad eccezione del fondo del contenitore e, soprattutto, di una larga porzione dello strato superiore dello stesso. Di conseguenza, il PCM risulta trovarsi in fase liquida ovunque, fatta eccezione della porzione superiore citata.

Osservando le evoluzioni temporali del campo termico o del rateo di fuso, si nota come questo inizi nelle zone di PCM attorno al tubo di scambio per poi propagarsi rapidamente in tutta la zona centrale del TES. Successivamente, il riscaldamento si propagherà verso la base del sistema e, più lentamente, verso la parte superiore dello stesso. Dopo circa 2 ore di transitorio larga parte del PCM è già in fase liquida. Tale rapidità è prevalentemente dovuta al fatto che appena fonde il PCM che circonda il tubo ricevitore questo praticamente raddoppia la propria conducibilità termica efficace e, quindi, la capacità di trasporto del calore (diffusività).

Riguardo la porzione superiore del sistema LH02 occorre dire che in questo studio è stata immaginata completamente riempita di PCM: ciò non è vero nel caso reale. Infatti, la superficie libera del PCM solido si trova a circa 50 mm dal tappo superiore. Dopo il cambio di fase solido-liquido, la stessa si sposta verso l'alto di circa 38 mm lasciando ancora liberi 12 mm. Quindi, il PCM ancora solido, presente nella parte superiore, nella realtà non dovrebbe essere presente.

Inoltre, l'utilizzo del metodo del k efficace consente di tenere conto della presenza di moti convettivi nel PCM liquido, fornendo una migliore risposta, ma non consente comunque di simulare completamente il fenomeno fisico (vedi [4]). Nella realtà, tali moti portano il PCM fuso verso la parte superiore del contenitore facilitando il riscaldamento di questa zona: tale tipo di trasporto verticale non può essere tenuto in conto in una simulazione FEM.

In **Figura 29** è mostrata l'evoluzione delle temperature di ingresso e uscita e del salto termico ingresso-uscita del HTF mentre in **Figura 30** quella della potenza trasmessa e dell'energia ceduta dallo stesso HTF.

Gli andamenti delle temperature di ingresso ed uscita del HTF mostrano come quest'ultima cresca rapidamente nei primi minuti per poi rallentare non appena inizia il cambio di fase del PCM e ricrescere velocemente dopo le 2 ore di transitorio, avvicinandosi alla temperatura di ingresso.

La differenza tra le due ha un picco iniziale di circa 25 °C, con una potenza trasmessa di circa 8 kW. Quindi, entro le 2 ore, la differenza rimane tra i 10 ed i 15 °C, con una potenza trasmessa di 2-5 kW. Infine, tale differenza si riduce velocemente al di sotto dei 5 °C, con una potenza trasmessa inferiore a 1 kW.

Il fluido trasmette perciò al PCM una energia complessiva che supera i 10 kWh nelle prime 3 ore per attestarsi, alla fine del transitorio, a circa 11.5 kWh (pari al 95% della capacità del sistema).

In **Figura 31** è mostrata l'evoluzione delle temperature di parete e ambiente e del salto termico parete-ambiente mentre in **Figura 32** quella della potenza e dell'energia perse verso l'ambiente esterno.

In accordo con le condizioni imposte, le perdite verso l'ambiente sono praticamente nulle.

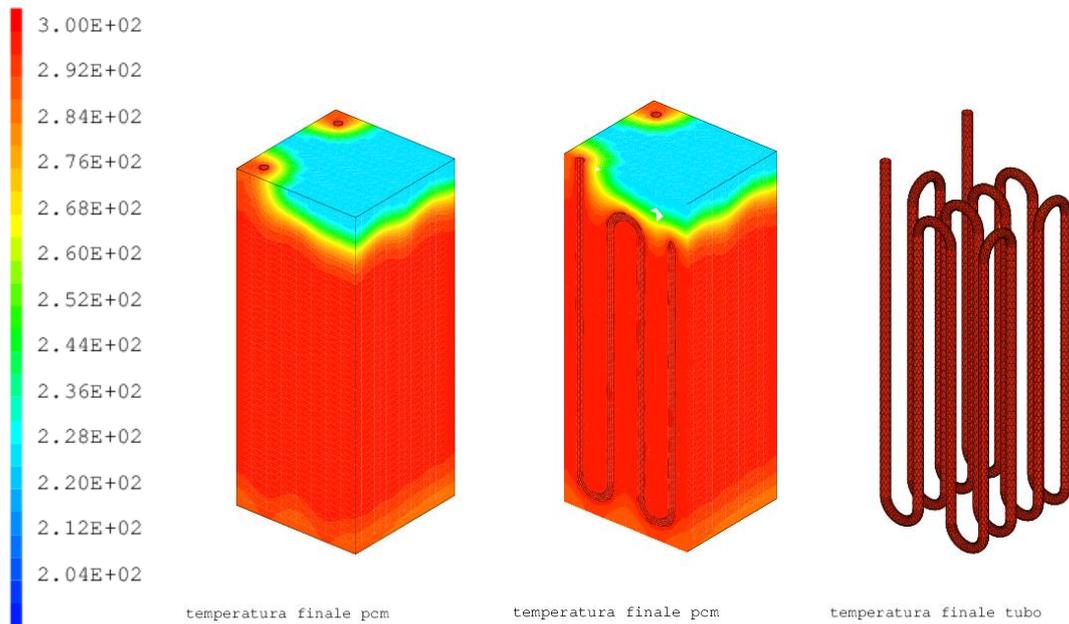


Figura 25 – Distribuzione delle temperature a fine transitorio su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato; iii) superficie di scambio termico PCM-HTF

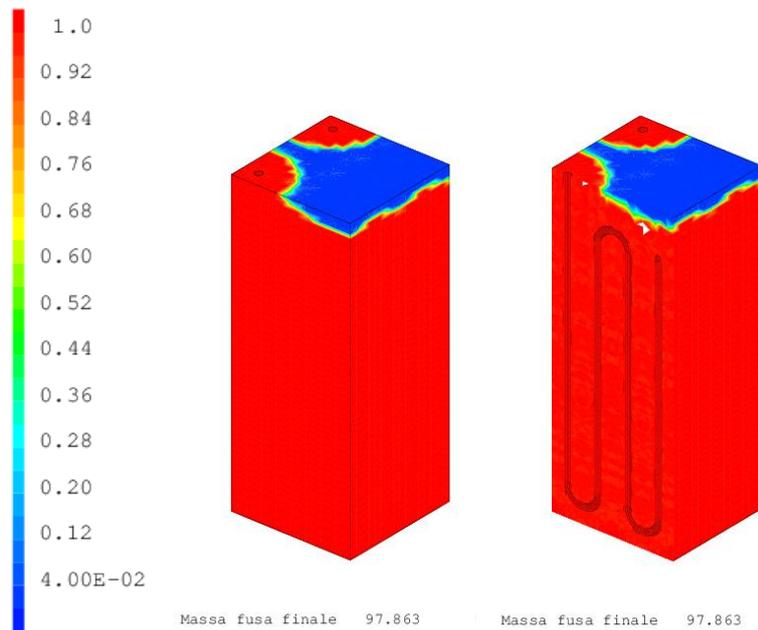


Figura 26 - Distribuzione del rateo di PCM fuso a fine transitorio su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato.

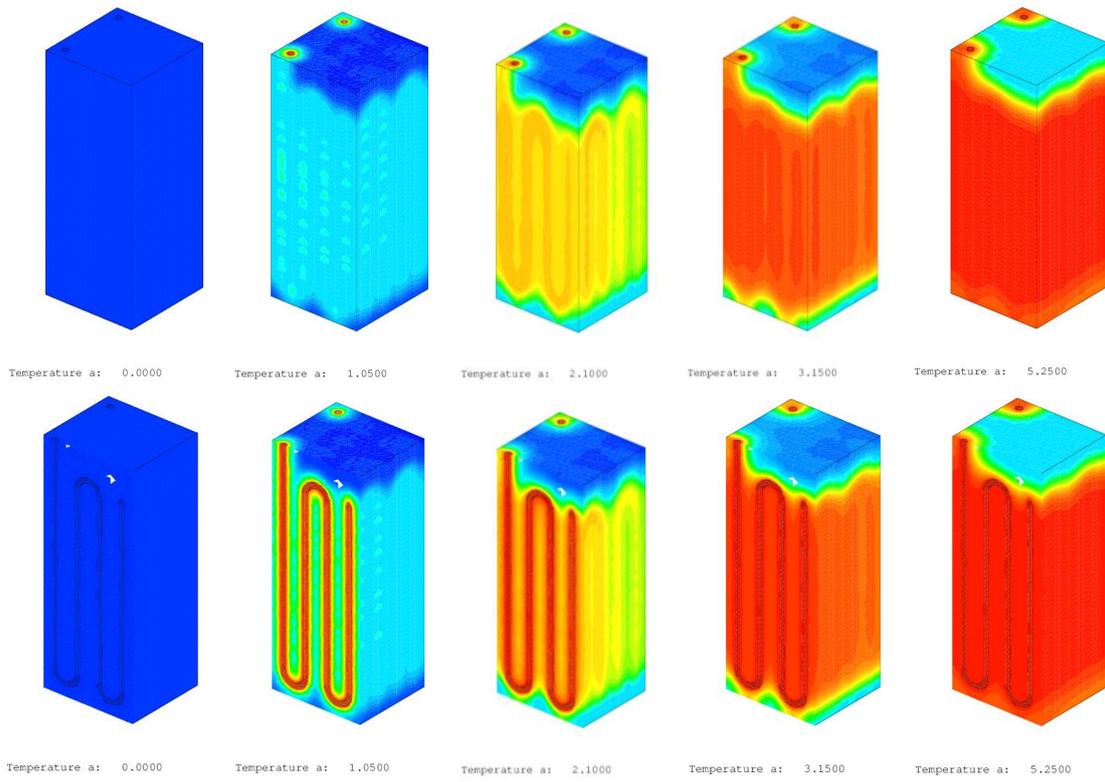


Figura 27 – Distribuzione delle temperature a vari istanti su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato.

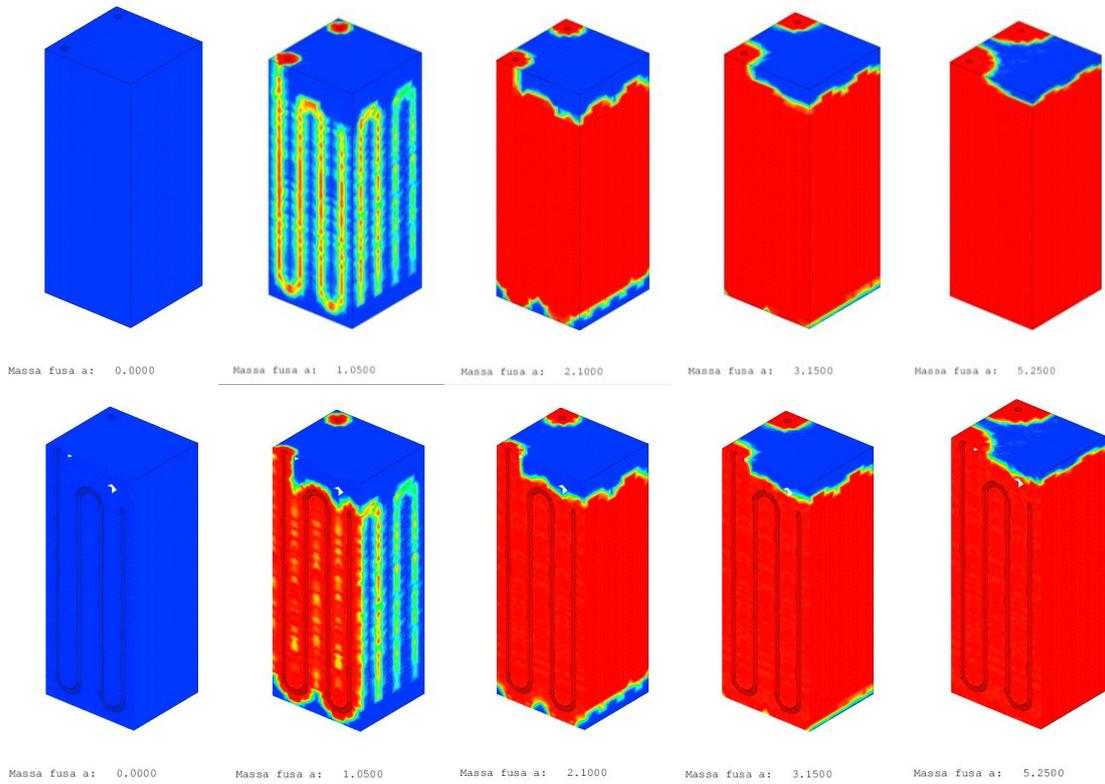
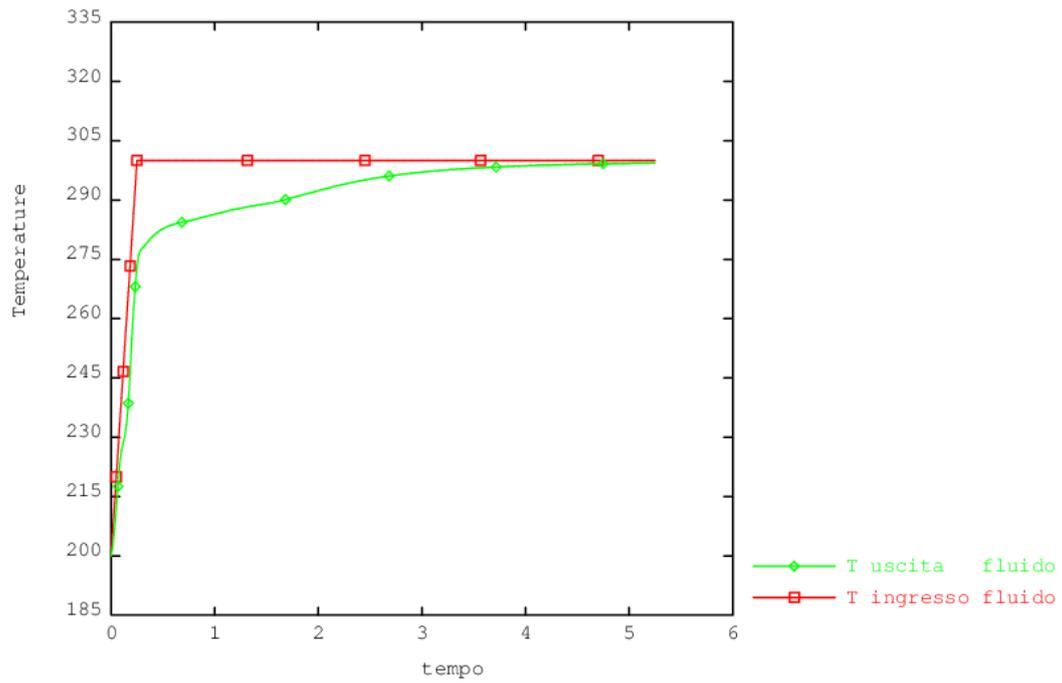
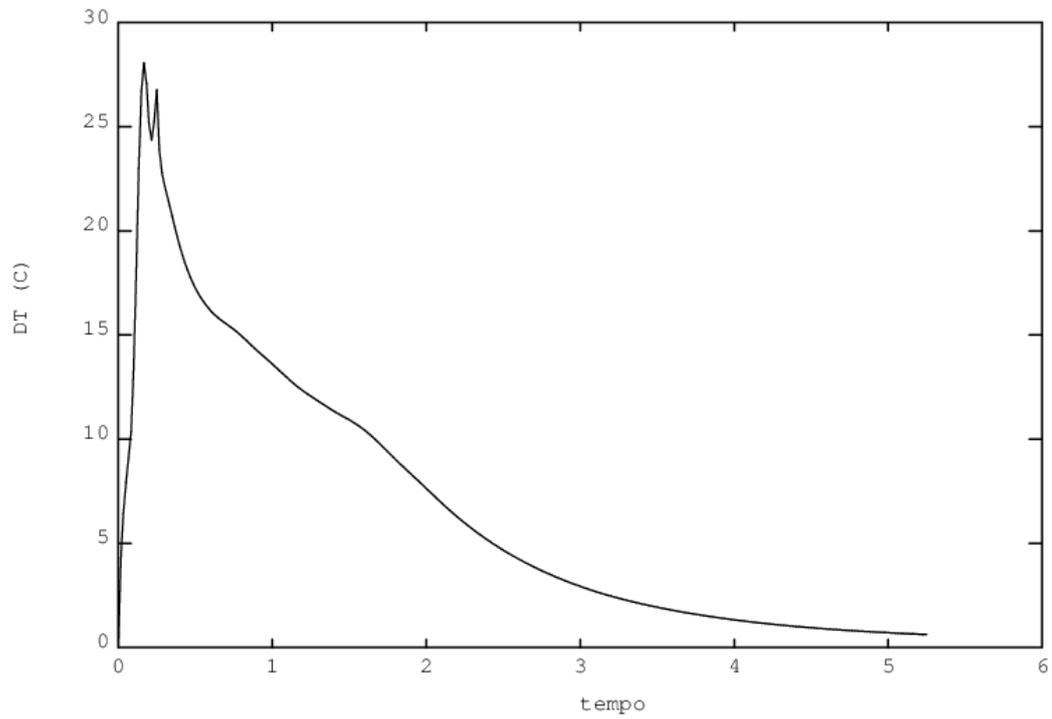


Figura 28 - Distribuzione del rateo di PCM fuso a vari istanti su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato.

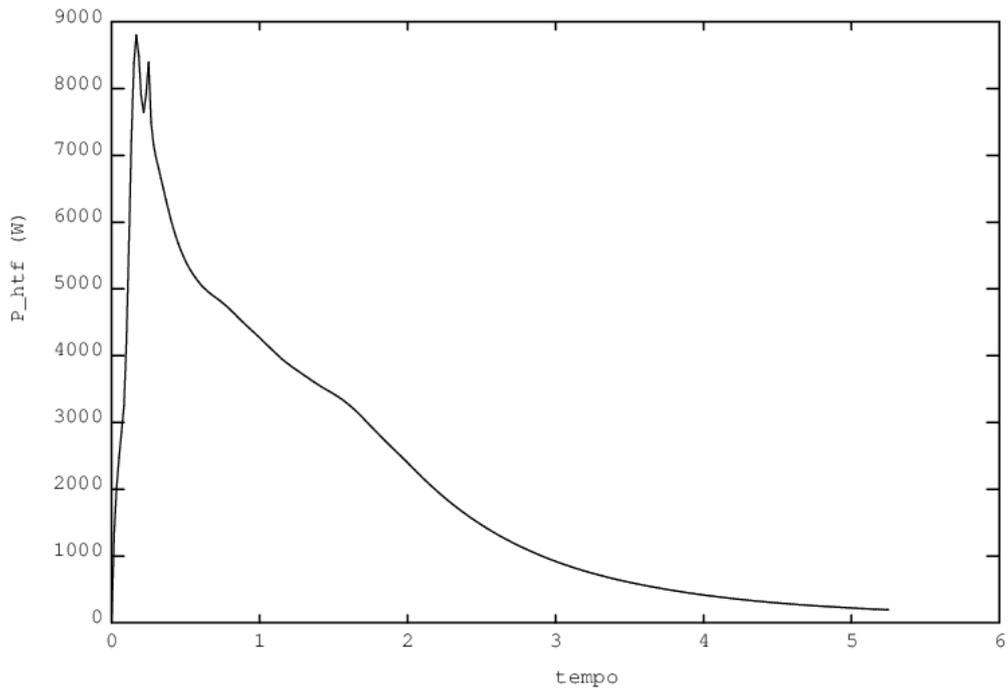


temperature ingresso uscita e fluido

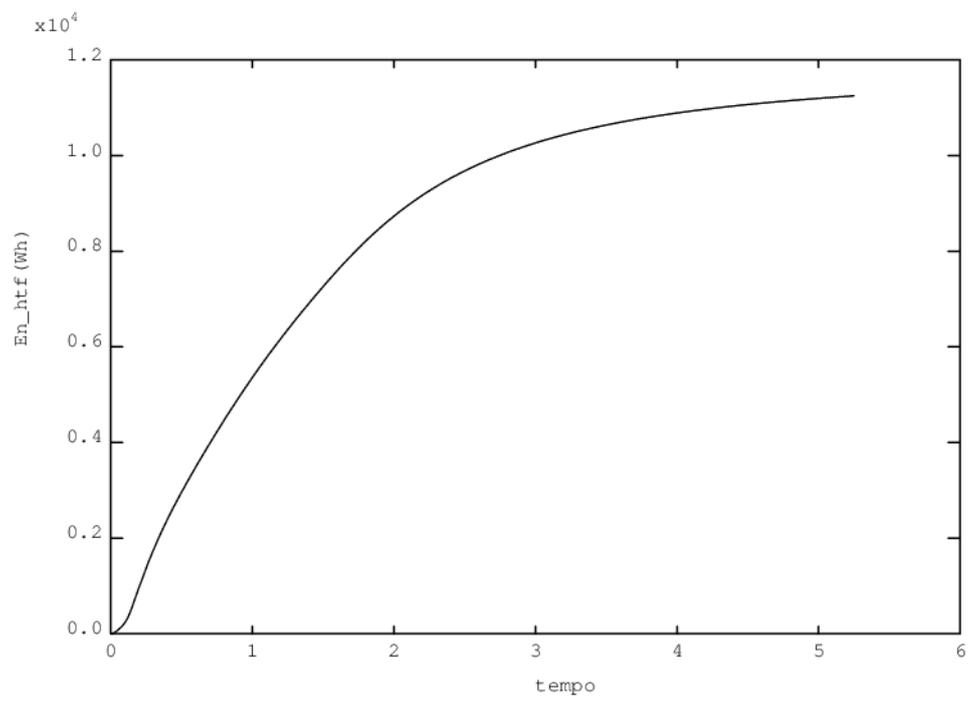


DT ingresso-uscita provino

Figura 29 – Evoluzione delle temperature di ingresso e uscita e del salto termico ingresso-uscita del HTF.

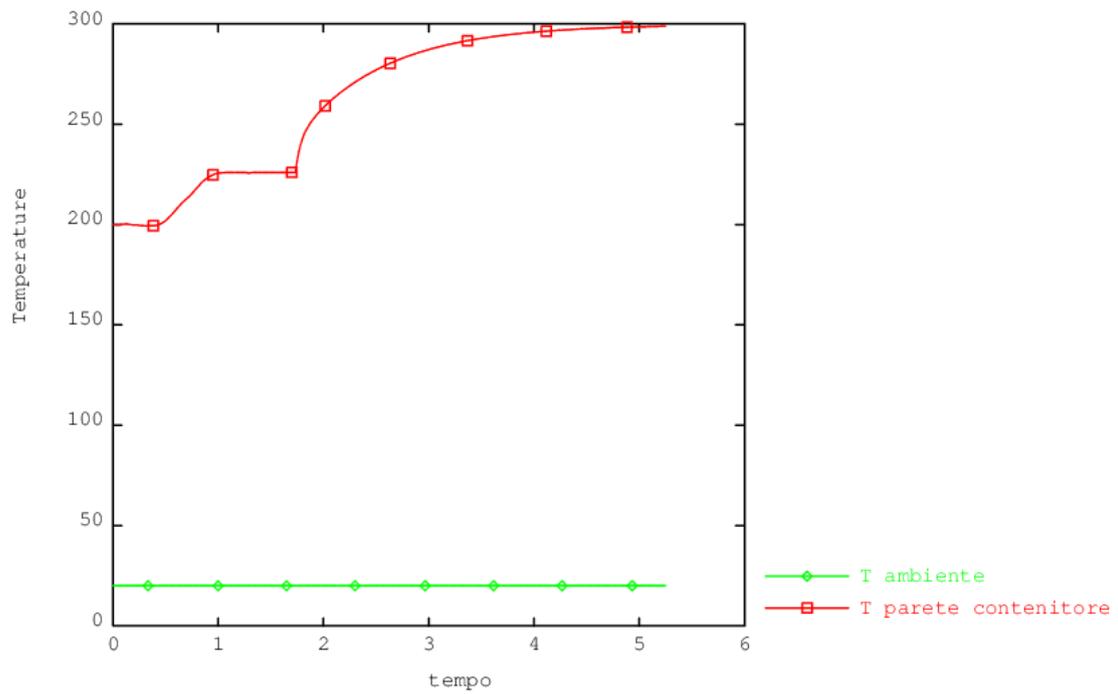


Pot. istantanea trasmessa dal fluido

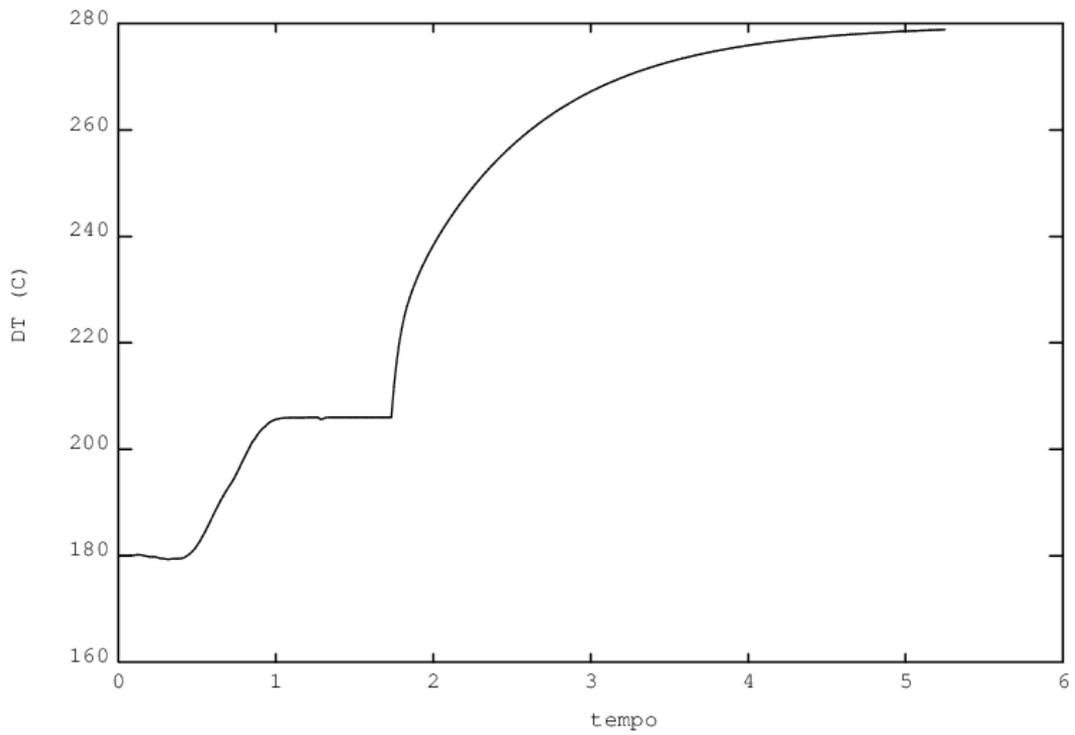


Energia trasmessa dal fluido

Figura 30 - Evoluzione della potenza trasmessa e dell'energia ceduta dal HTF.

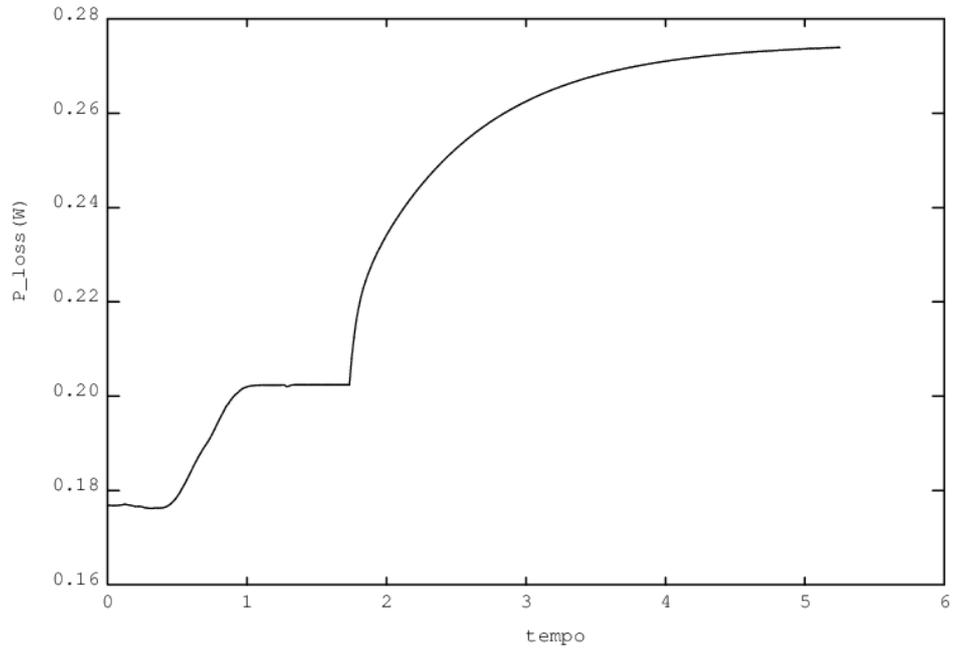


temperature parete contenitore e ambiente

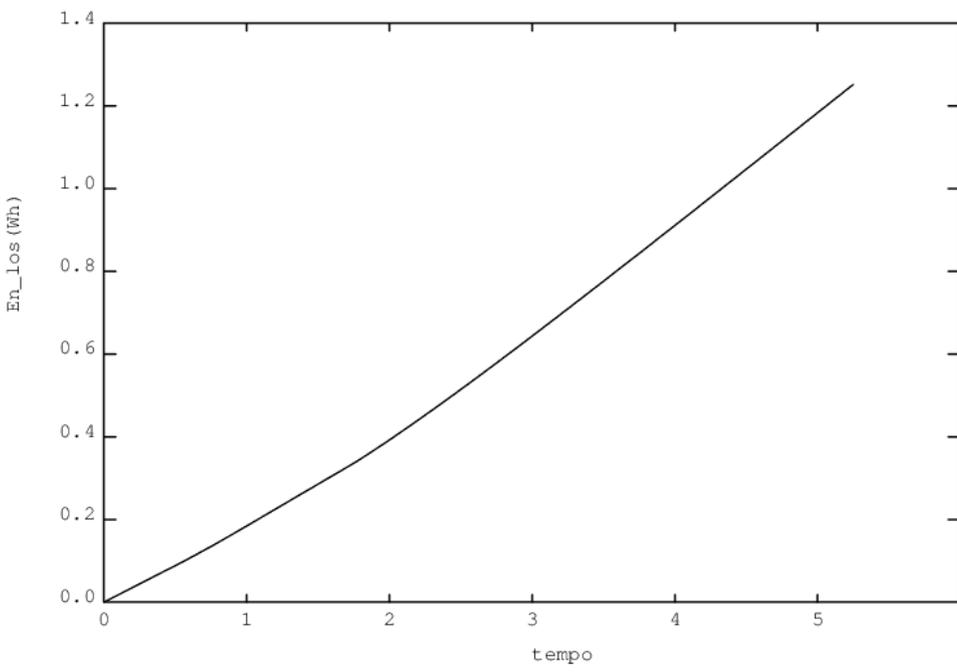


DT contenitore-ambiente

Figura 31 – Evoluzione delle temperature di parete e ambiente e del salto termico parete-ambiente.

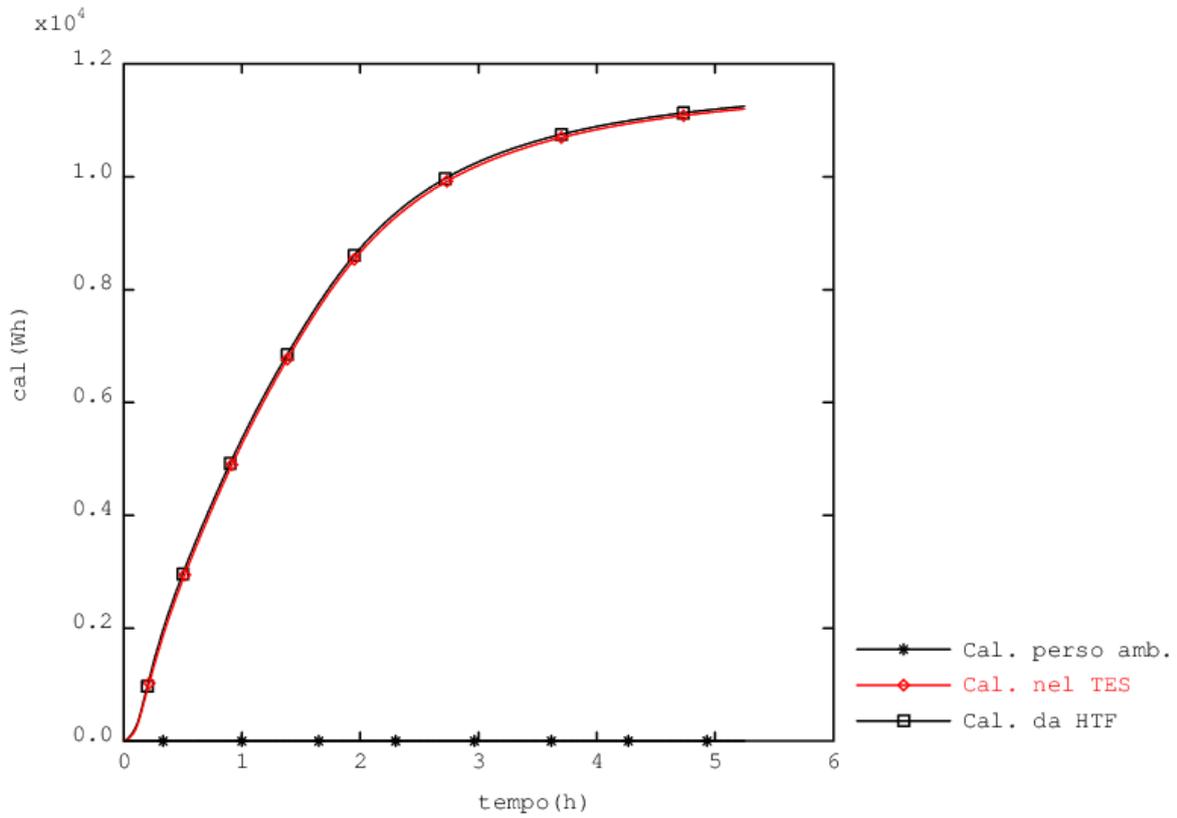


Pot. istantanea persa dal coibente



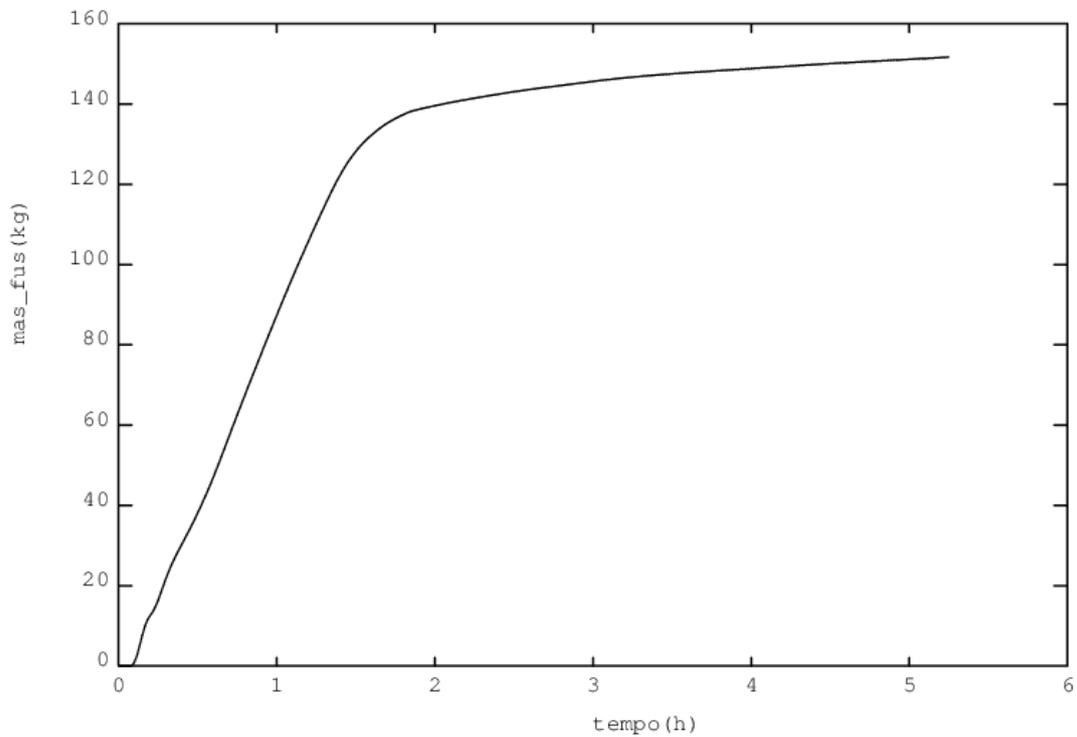
Energia persa dal TES

Figura 32 - Evoluzione della potenza e dell'energia persa verso l'ambiente.



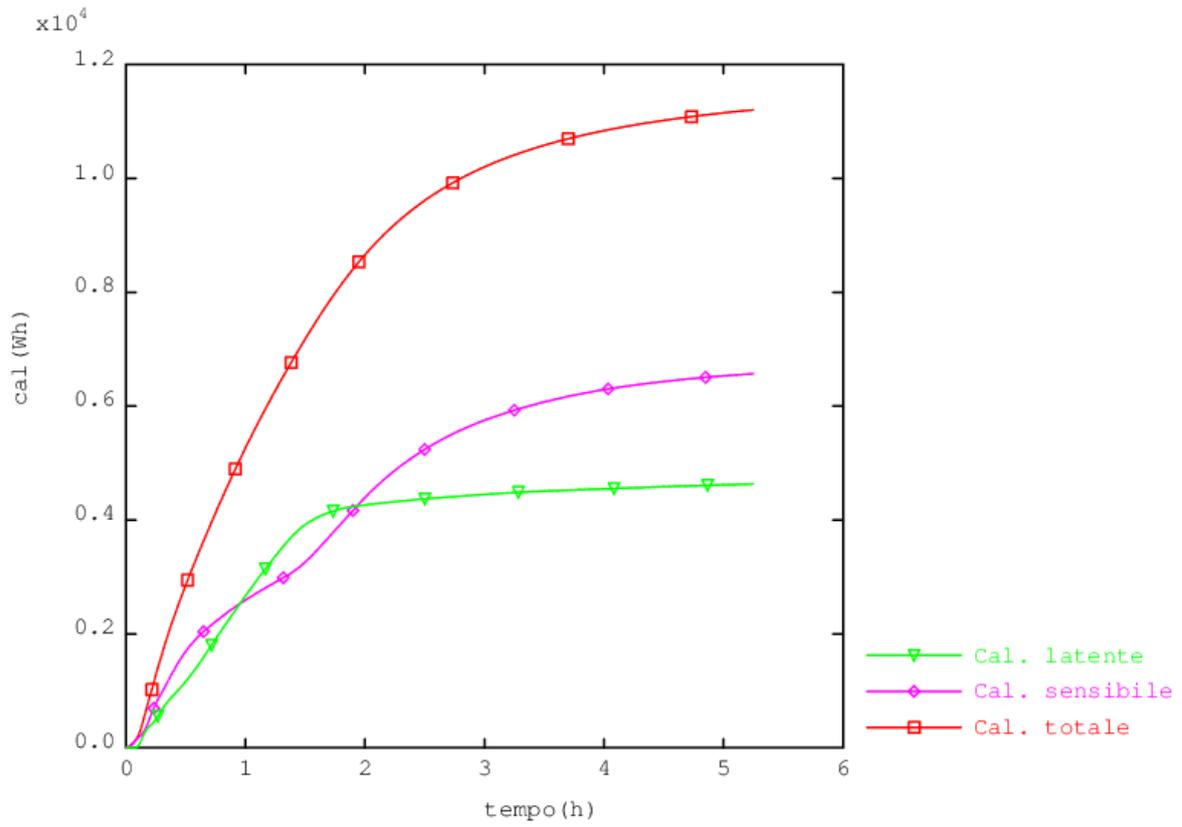
Bilancio calore

Figura 33 – Evoluzione del calore fornito dal HTF, accumulato nel PCM, e perso.

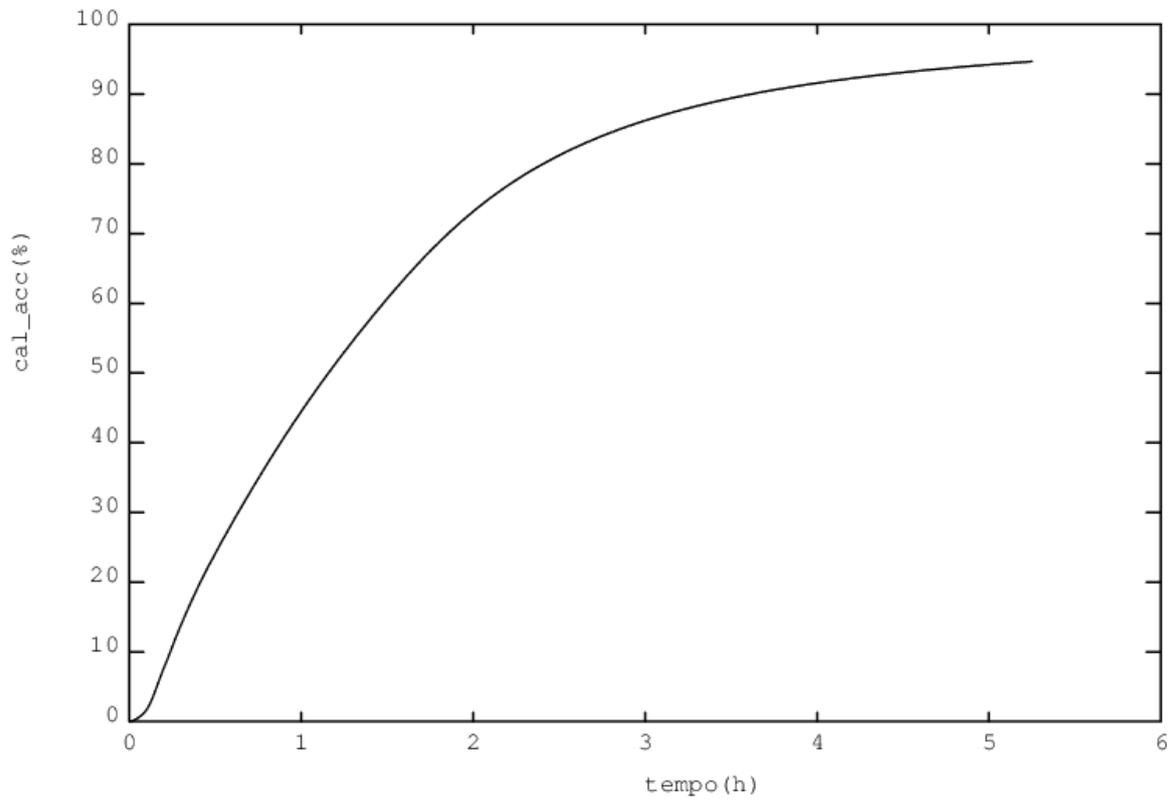


Evoluzione massa fusa

Figura 34 – Evoluzione della quantità di massa fusa



Evoluzione calore sensibile e latente



Evoluzione % calore accumulato

Figura 35 – Evoluzione del calore accumulato e delle sue componenti sensibile e latente.

In [Figura 33](#) è mostrata l'evoluzione del calore fornito dal HTF, accumulato nel PCM, e di quello perso, in [Figura 34](#) l'evoluzione della massa fusa e in [Figura 35](#) l'evoluzione del calore accumulato e delle sue componenti sensibile e latente.

Ovviamente, essendo il sistema quasi-adiabatico, il calore accumulato nel PCM segue lo stesso andamento di quello fornito dal HTF. Questo è costituito per il 60% da calore sensibile e per il restante 40% da calore latente.

Larga parte del calore latente viene accumulato entro le prime due ore, periodo in cui è evidente anche un rallentamento nell'accumulo di calore sensibile.

2.3.8 Risultati e discussione - Fase di scarico

Qui di seguito sono illustrati i risultati della simulazione FEM della fase di scarico del sistema ENEA-TEST-LH02.

In **Figura 36** è riportata la distribuzione delle temperature sul volume del PCM, sia intero che sezionato, e sulla superficie di scambio termico PCM-HTF e, in **Figura 37**, del rateo di PCM fuso sul volume del PCM, sia intero che sezionato. Inoltre, in **Figura 38** e **Figura 39** sono riportate lo stesso tipo di distribuzioni precedenti in vari istanti del transitorio, per evidenziarne l'evoluzione temporale.

Dopo circa 5 ore di scarica del modulo LH02 il PCM non ha ancora raggiunto la temperatura minima operativa nella larga parte del PCM, ad eccezione delle parti molto prossime al tubo di scambio. Di conseguenza, il PCM risulta in fase solida soprattutto nel cuore del dispositivo, nelle zone comprese tra i tratti verticali della serpentina.

Osservando le evoluzioni temporali del campo termico o del rateo di fuso, si nota come la solidificazione inizi nelle zone di PCM attorno al tubo di scambio per poi propagarsi sempre più lentamente nella zona centrale del TES e poi nelle parti più lontane. A fine transitorio solo la parte centrale del PCM è in fase solida.

Tale rallentamento è prevalentemente dovuto al fatto che appena il PCM che circonda il tubo ricevitore solidifica questo dimezza la propria conducibilità termica efficace e, quindi, la capacità di trasporto del calore (diffusività): lo scambio termico da pseudo convettivo si riduce a semplicemente conduttivo.

In **Figura 40** è mostrata l'evoluzione delle temperature di ingresso e uscita e del salto termico ingresso-uscita del HTF mentre in **Figura 41** quella della potenza assorbita e dell'energia estratta dallo stesso HTF.

Gli andamenti delle temperature di ingresso ed uscita del HTF mostrano come quest'ultima diminuisca rapidamente nei primi minuti per poi tendere nel tempo ad approssimare la temperatura di ingresso, senza evidenziare rallentamenti dovuti al cambio di fase.

La differenza tra le due ha un picco iniziale di circa 28 °C, con una potenza trasmessa di circa 8.5 kW. Successivamente, tale differenza decresce esponenzialmente fino a essere di circa 2 °C. La potenza trasmessa ha un identico andamento: dopo 1 ora è di 2.2 kW, a 2 ore 1.2 kW per arrivare a circa 800 W.

Il fluido estrae perciò dal PCM una energia complessiva di 9 kWh a fine transitorio (pari solo al 75% della energia iniziale del sistema).

In **Figura 42** è mostrata l'evoluzione delle temperature di parete e ambiente e del salto termico parete-ambiente mentre in **Figura 43** quella della potenza e dell'energia perse verso l'ambiente esterno.

Anche in questo caso, le perdite verso l'ambiente sono praticamente nulle.

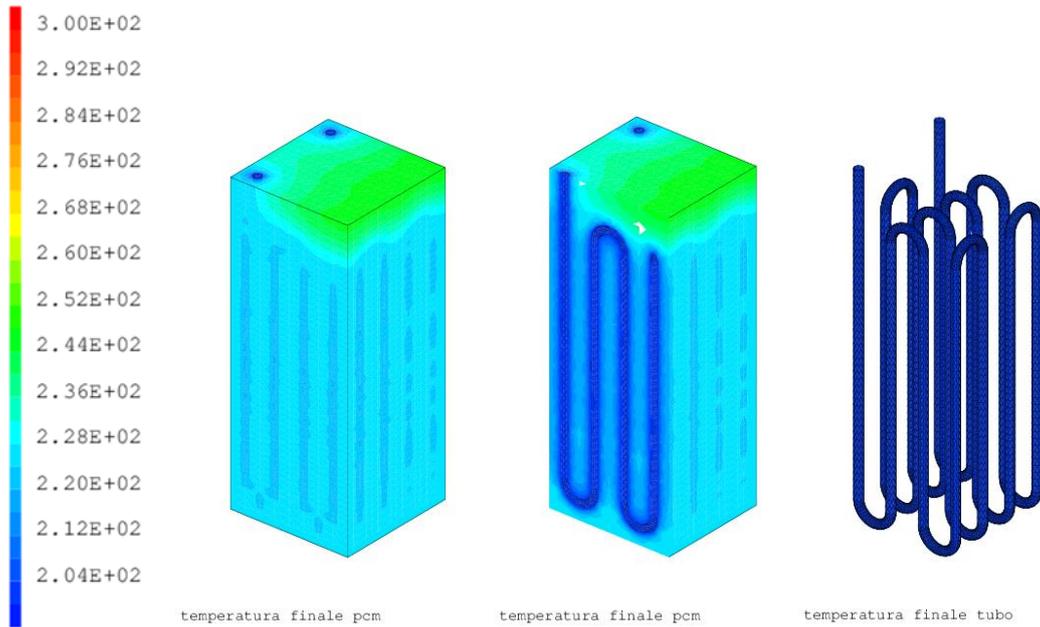


Figura 36 – Distribuzione delle temperature a fine transitorio su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato; iii) superficie di scambio termico PCM-HTF

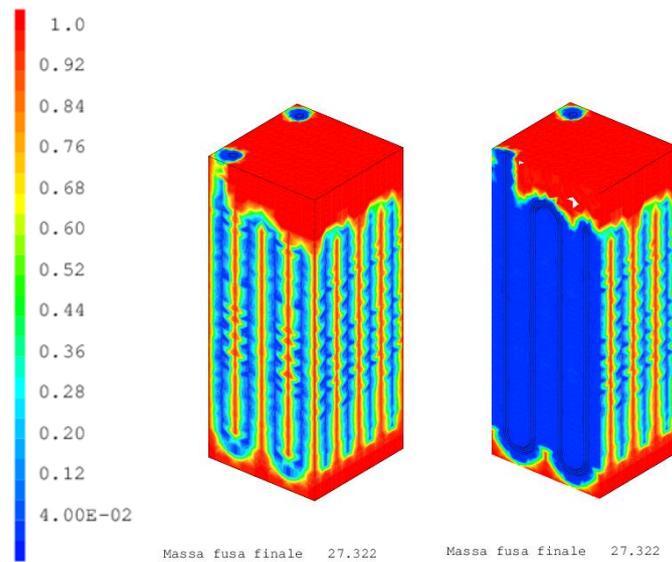


Figura 37 - Distribuzione del rateo di PCM fuso a fine transitorio su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato.

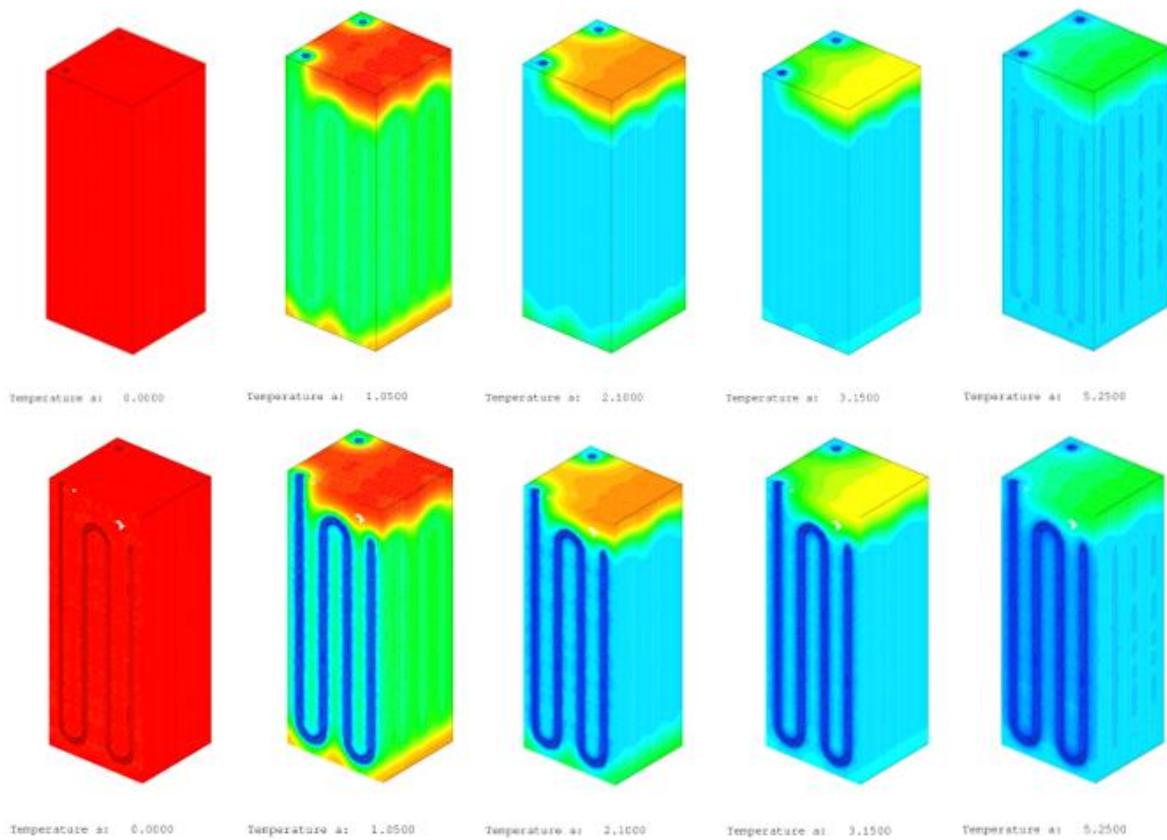


Figura 38 – Distribuzione delle temperature a vari istanti su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato.

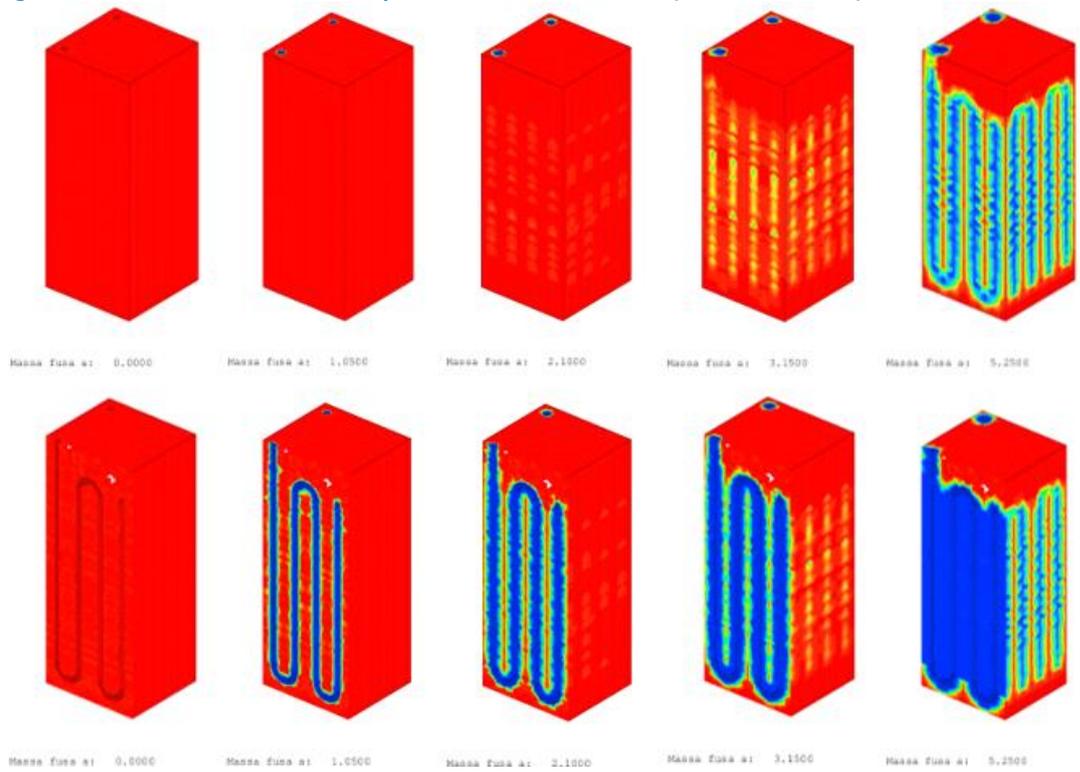
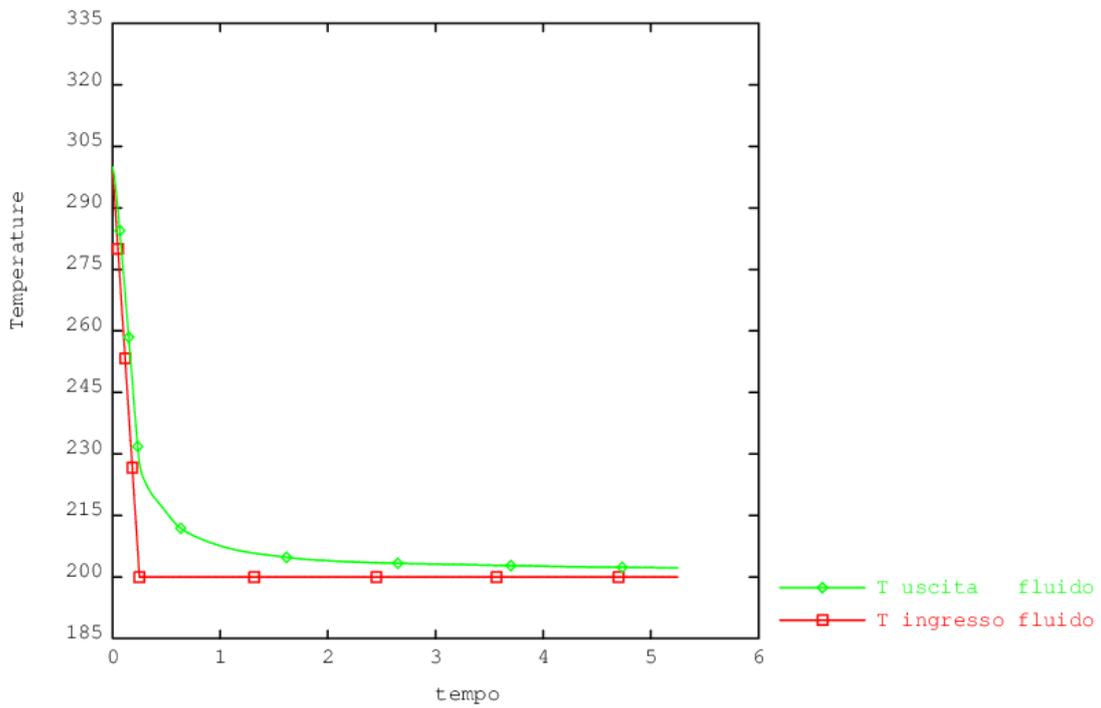
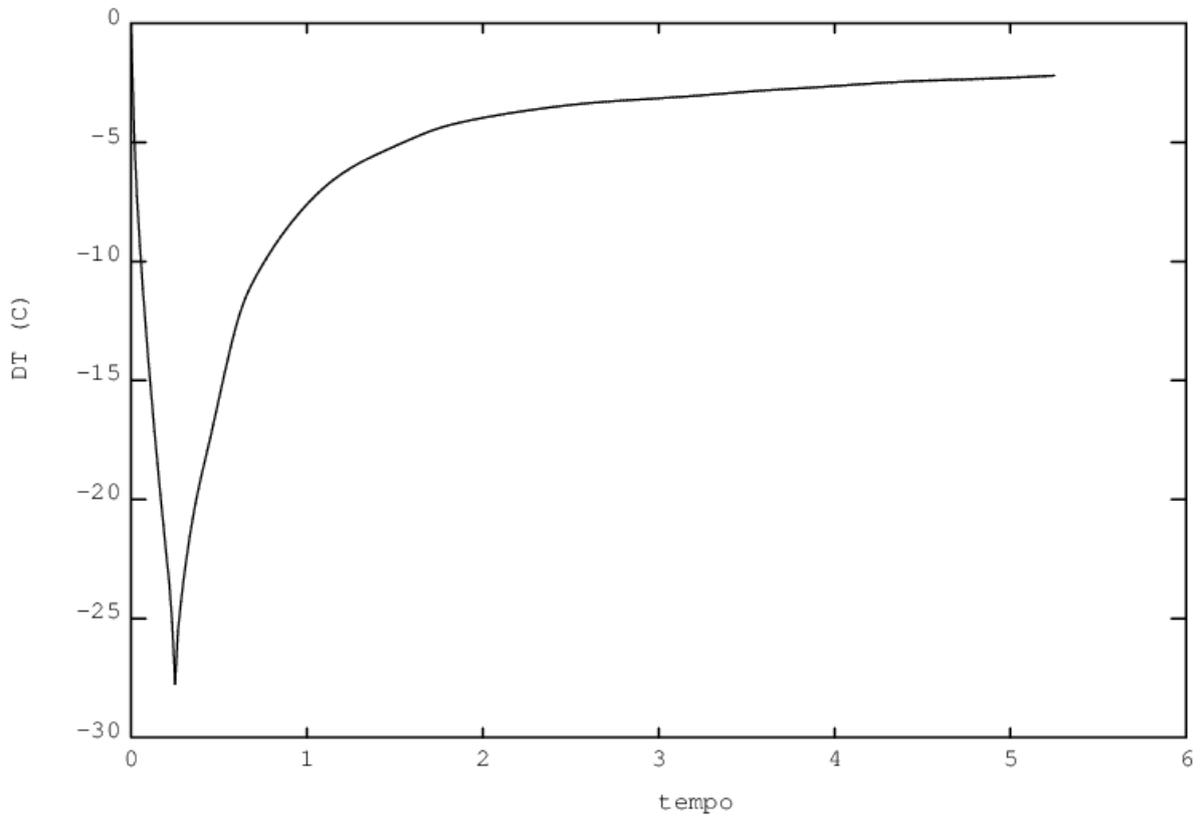


Figura 39 - Distribuzione del rateo di PCM fuso a vari istanti su: i) volume PCM; ii) volume PCM sezionato.

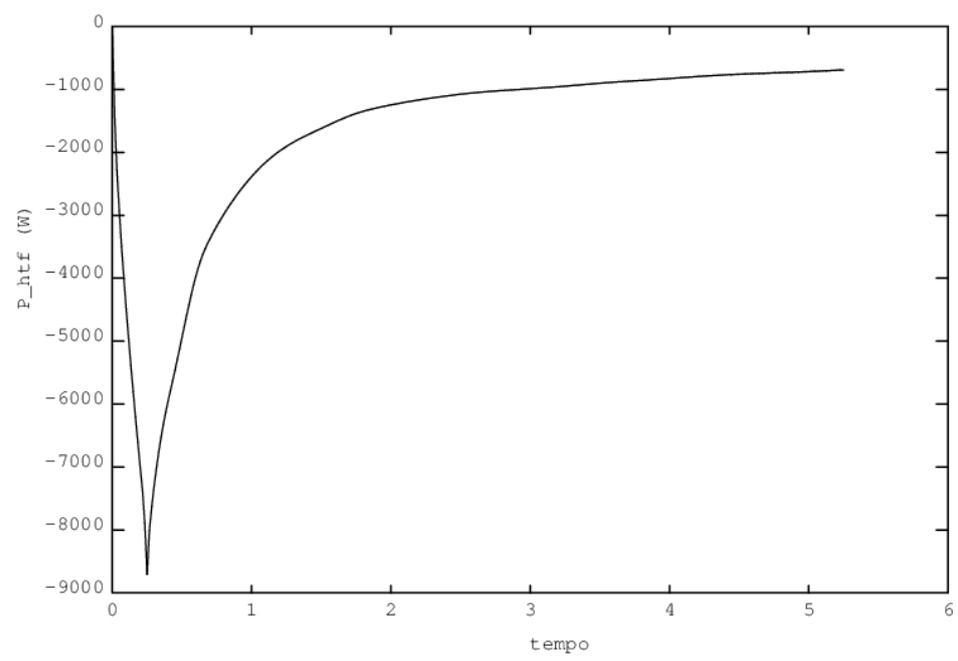


temperature ingresso uscita e fluido

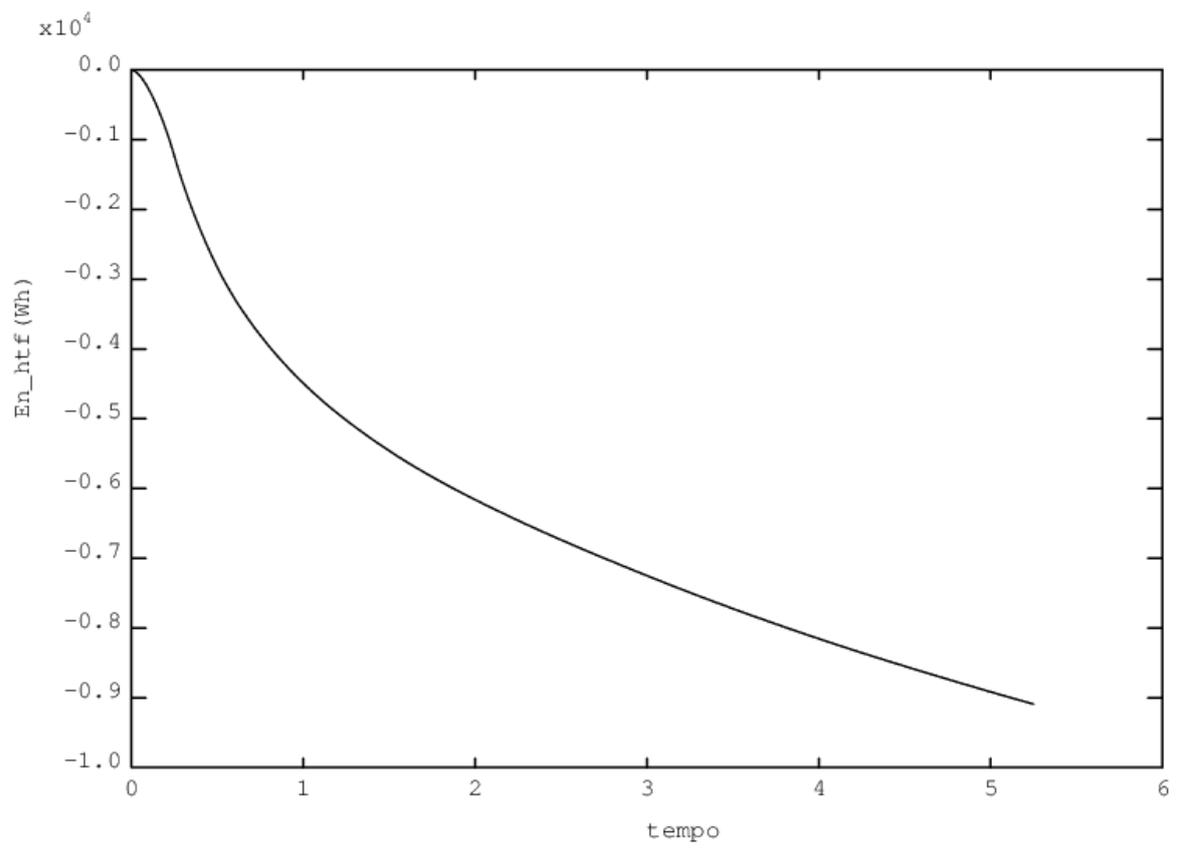


DT ingresso-uscita provino

Figura 40 – Evoluzione delle temperature di ingresso e uscita e del salto termico ingresso-uscita del HTF.

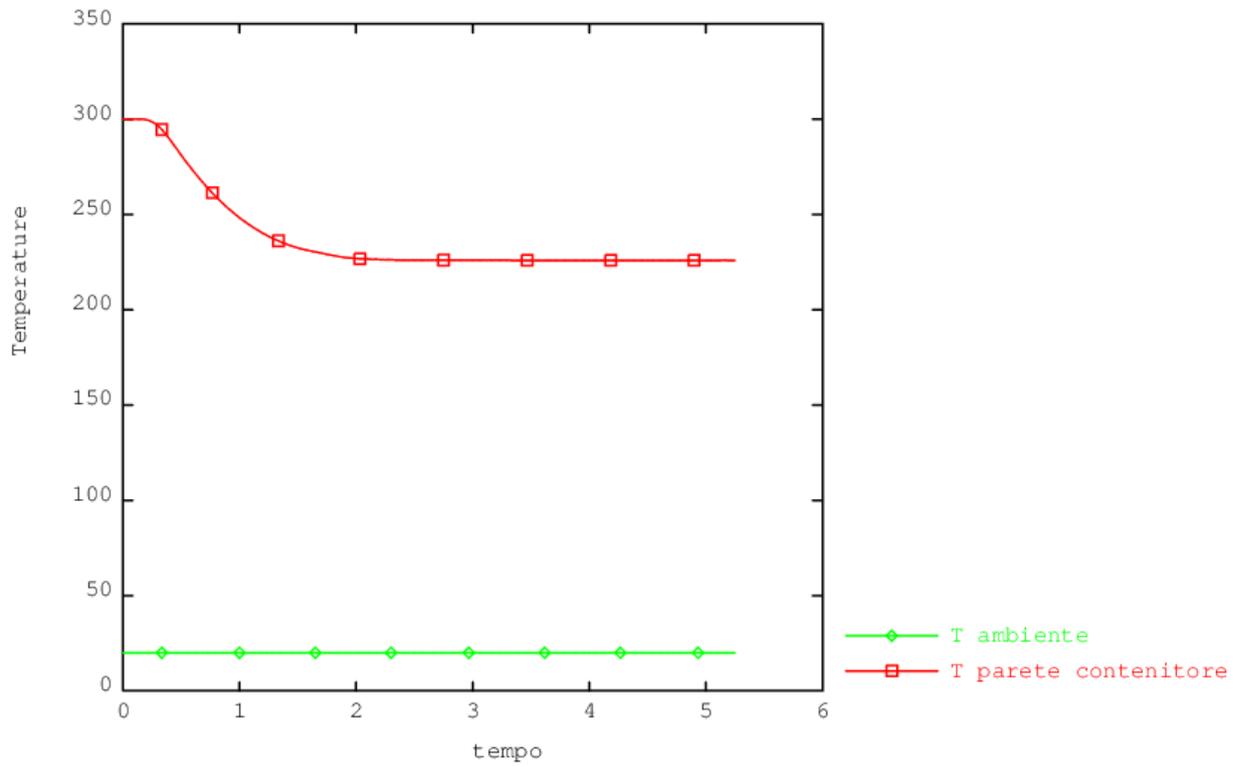


Pot. istantanea trasmessa dal fluido

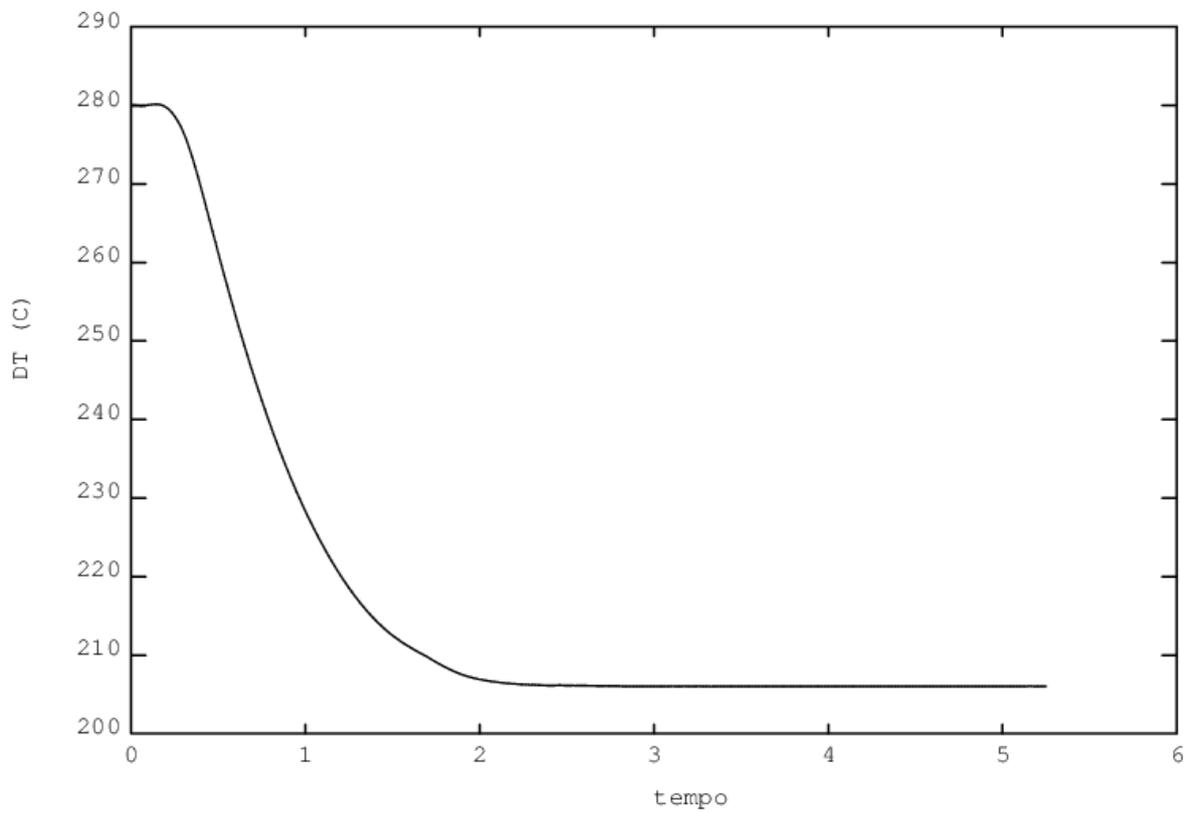


Energia trasmessa dal fluido

Figura 41 - Evoluzione della potenza trasmessa e dell'energia estratta dal HTF.

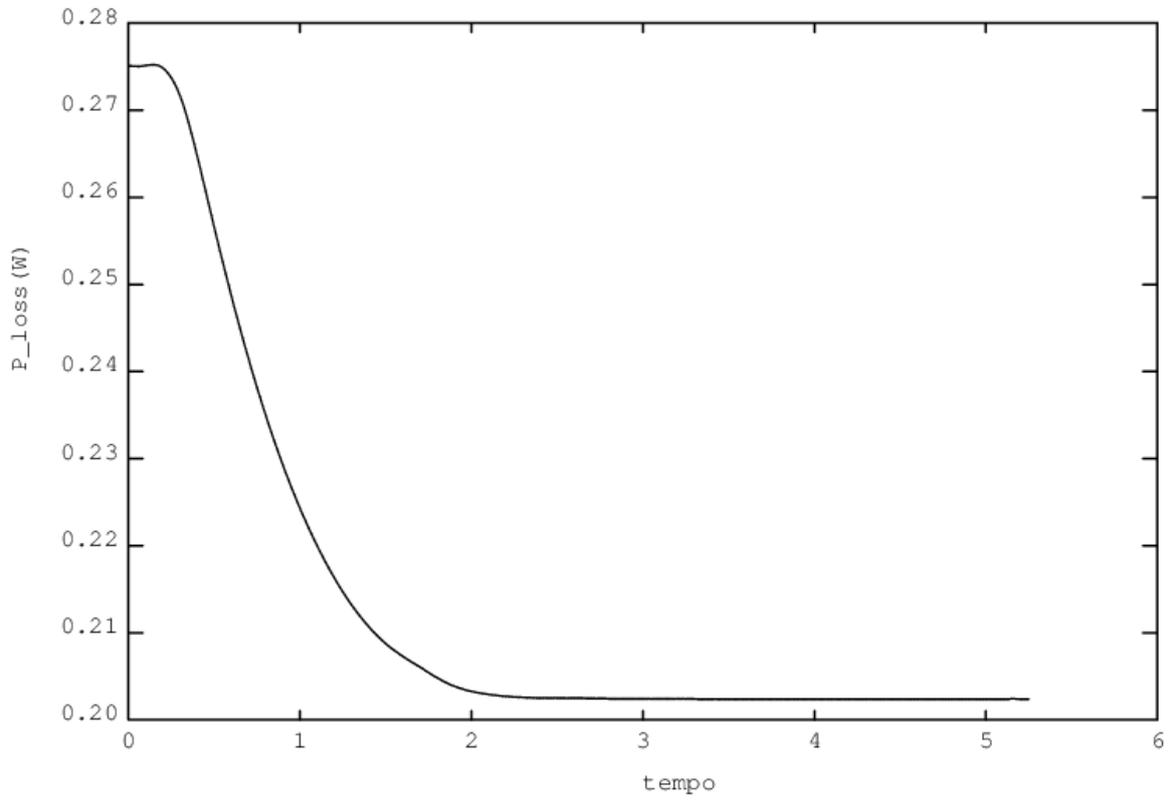


temperature parete contenitore e ambiente

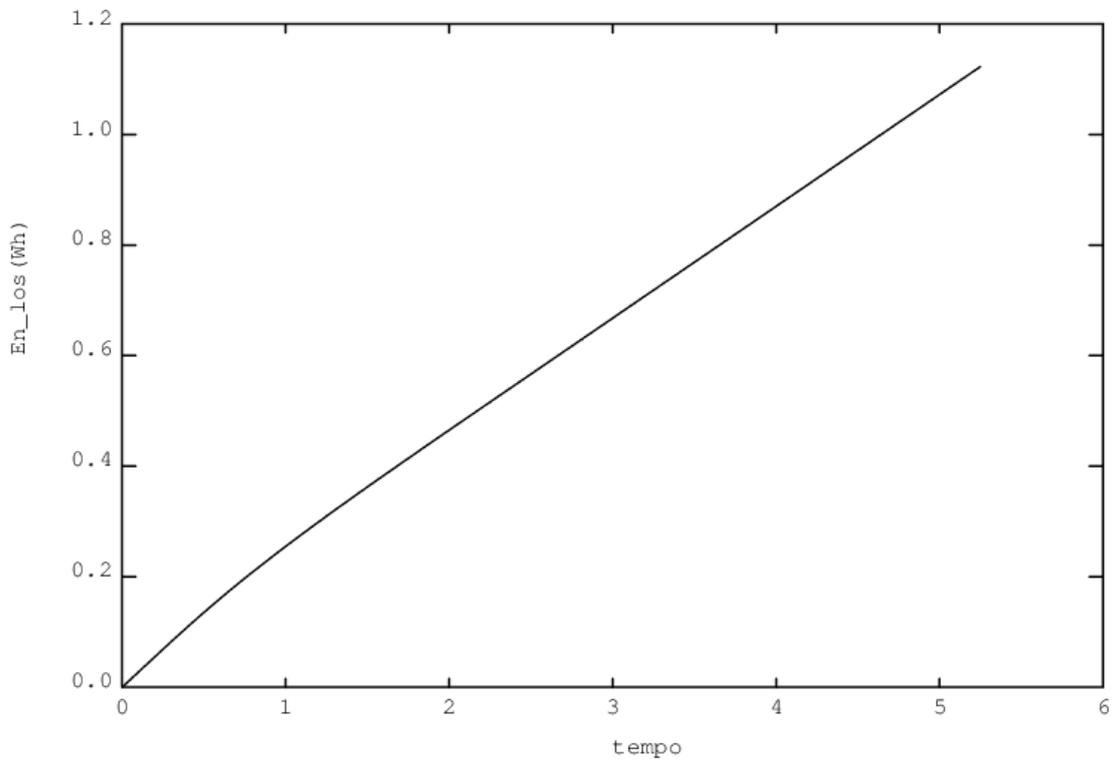


DT contenitore-ambiente

Figura 42 – Evoluzione delle temperature di parete e ambiente e del salto termico parete-ambiente.

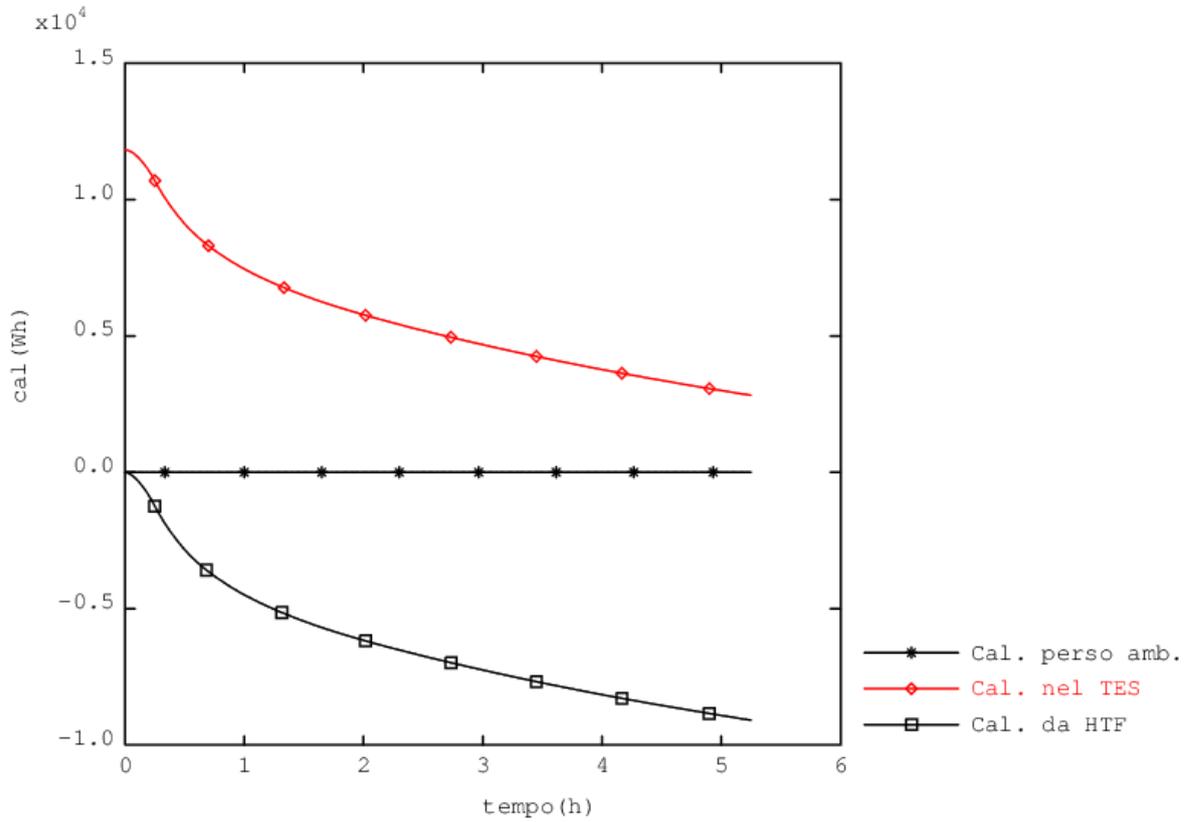


Pot. istantanea persa dal coibente



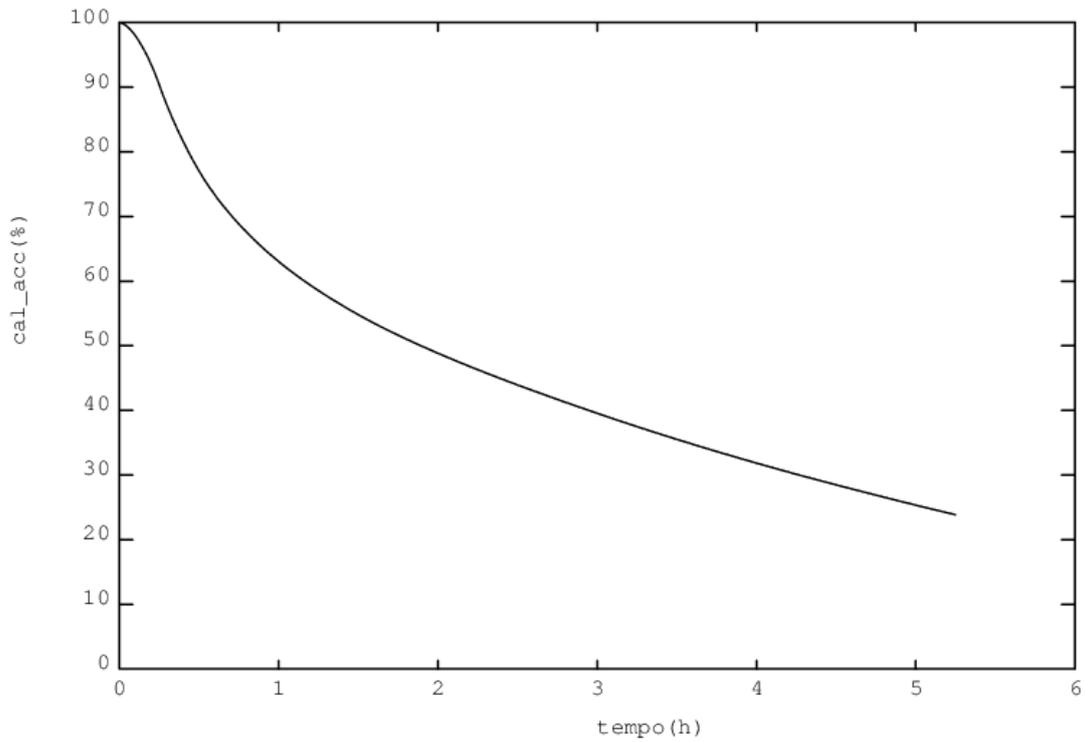
Energia persa dal TES

Figura 43 - Evoluzione della potenza e dell'energia persa verso l'ambiente.



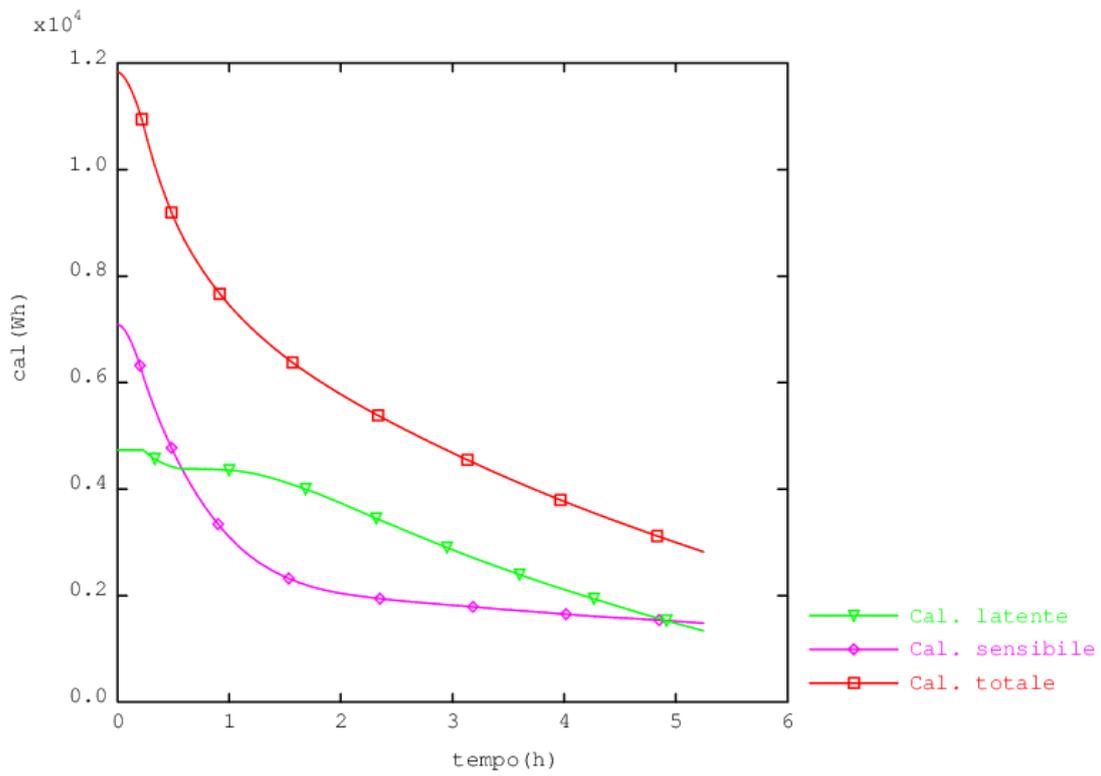
Bilancio calore

Figura 44 – Evoluzione del calore assorbito dal HTF, accumulato nel PCM, e perso.

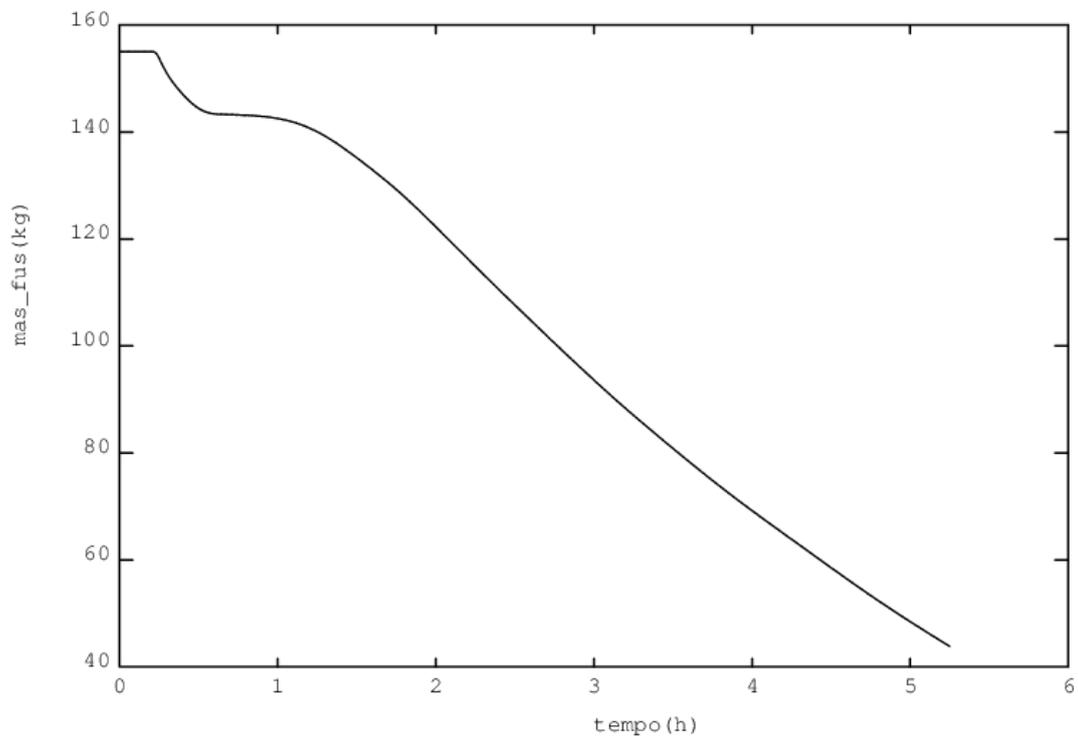


Evoluzione % calore accumulato

Figura 45 – Evoluzione della quantità di massa fusa



Evoluzione calore sensibile e latente



Evoluzione massa fusa

Figura 46 – Evoluzione del calore accumulato e delle sue componenti sensibile e latente.

In **Figura 44** è mostrata l'evoluzione del calore assorbito dal HTF, accumulato nel PCM, e di quello perso, in **Figura 45** l'evoluzione della massa fusa e in **Figura 46** l'evoluzione del calore accumulato e delle sue componenti sensibile e latente.

Ovviamente, anche il calore accumulato nel PCM segue lo stesso andamento di quello estratto dal HTF.

L'andamento del calore accumulato, sia come calore sensibile che latente mostra in modo evidente un processo di scarico molto lento ed ancora largamente incompleto a fine transitorio.

In tale istante, deve ancora fondere più del 27% della massa di PCM.

2.3.9 Conclusioni

Le dinamiche di carico e scarico del sistema ENEA-TES-LH02 mostrano delle sostanziali differenze.

In fase di carico esso ha prestazioni sufficientemente in linea con quanto atteso.

Dopo 5 ore, ha accumulato energia pari al 95% della sua capacità (fattore di carico). Ciò è dovuto, oltre che alle caratteristiche proprie del layout, anche alla simulazione della presenza di moti convettivi che incrementano il trasporto del calore dopo la fusione del PCM.

Al contrario, durante lo scarico, la immediata solidificazione del PCM attorno al tubo di scambio favorisce uno scambio puramente conduttivo, di sua natura più lento, e quindi un recupero di energia dopo 5 ore da parte del fluido termovettore di solo il 76% della sua capacità (fattore di scarico/efficienza).

La bassa efficienza e l'insufficiente potenza media fornita (<2kW) fanno ritenere necessario l'adozione di sistemi aggiuntivi di promozione della conducibilità che, senza alterare le condizioni di carico, favoriscano lo scarico del TES. Una soluzione potrebbe essere quella di utilizzare per i tratti verticali della serpentina dei tubi ad alettatura longitudinale.

2.4 Analisi dell'effetto di alette longitudinali

Come suggerito nelle conclusioni del paragrafo precedente, per risolvere le problematiche connesse ad una bassa conducibilità/diffusività termica del PCM sono spesso utilizzati dei mezzi di promozione della conducibilità che uniti al mezzo di accumulo ne migliorano le prestazioni in termini di conducibilità termica efficace.

I metodi di promozione della conducibilità sono molteplici, ma quelli forse più semplici e più utilizzati, in un sistema di tipo "shell&tube", sono le alettature del tubo di scambio termico tra fluido termovettore e mezzo di accumulo. Le alettature possono essere sia trasversali che longitudinali e sono generalmente caratterizzate dal numero (o dal passo), dallo spessore e dall'altezza.

Nel nostro caso verranno prese in considerazione delle alette longitudinali in quanto queste, in una tubazione verticale, svolgono la loro funzione senza ostacolare gli eventuali moti convettivi che si creano nel PCM in fase liquida e che contribuiscono a migliorare lo scambio termico.

L'obiettivo che ci si propone è quello di valutare il numero e le dimensioni ottimali di queste alette longitudinali in modo da massimizzare l'efficacia dello scambio termico e minimizzare la quantità di acciaio da introdurre nel sistema, con conseguente riduzione della densità di energia e incremento del costo.

A tal fine si sono effettuate una serie di valutazioni numeriche su una sezione di un singolo canale (tubo) di una unità di accumulo termico LHTES, in cui lo scambio termico ed il trasporto del calore è supposto essere puramente conduttivo.

Per i calcoli effettuati, utilizzando il codice agli Elementi Finiti (FEM) Cast3M, si è utilizzato una magliatura 2D comprendente il tubo alettato ed il PCM.

L'azione del fluido termovettore HTF che scorre all'interno della tubazione è stata simulata attraverso una temperatura imposta variabile nel tempo ed un coefficiente di scambio convettivo h .

Si suppone che le pareti esterne della sezione siano adiabatiche.

2.4.1 La geometria

Il modello geometrico 2D è costituito da due elementi base:

- Il tubo di scambio termico alettato
- Il PCM

Il tubo di scambio in acciaio ha una sezione circolare di determinato diametro e spessore. Da questa sezione si diramano radialmente un numero N di alette caratterizzate da un determinato spessore ed altezza: il numero e le caratteristiche geometriche delle alette saranno i parametri della presente analisi.

Il PCM andrà a riempire lo spazio compreso tra la superficie esterna del tubo di scambio e la parete di un contenitore, non rappresentato, anch'esso di forma circolare.

In **Tabella 1** sono riportati i principali parametri geometrici utilizzati per la realizzazione del modello.

Tabella 13 – Principali parametri geometrici per il calcolo

Diametro esterno tubo scambiatore	(mm)	20
Spessore tubo scambiatore	(mm)	1
Diametro contenitore PCM	(mm)	80

La magliatura corrispondente al modello geometrico è stata realizzata in modo automatico parametrizzandola rispetto al numero e alle caratteristiche geometriche delle alette. Gli elementi finiti utilizzati sono dei quadrati a 4 nodi (QUA4).

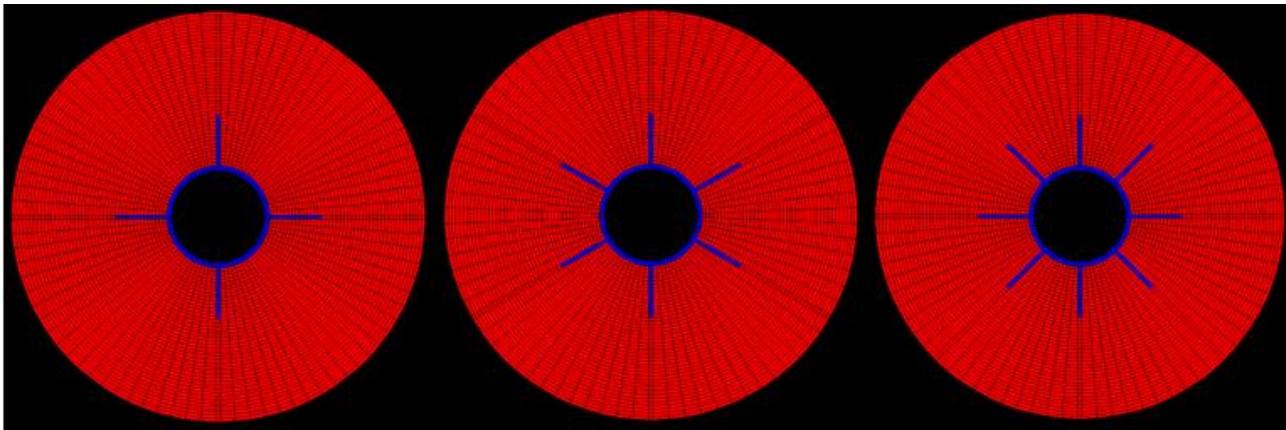


Figura 47 – Esempio di magliature (tubo scambiatore+PCM) di sezioni a 4, 6 ed 8 alette longitudinali

2.4.2 I materiali e modelli di comportamento

Nel modello sono rappresentati soltanto due tipi di materiali:

- L'acciaio del tubo alettato;
- Il materiale a cambiamento di fase.

Qui di seguito vengono riportate le loro principali caratteristiche termofisiche, e successivamente vengono descritti i modelli di comportamento implementati nel calcolo.

2.4.2.1 L'acciaio

Per il tubo di scambio e le alettature è stato considerato un acciaio inossidabile AISI 316 per il quale vengono considerate le seguenti caratteristiche (ipotizzate costanti per l'intervallo di temperature operative):

Tabella 14 – Caratteristiche dell'acciaio inossidabile AISI 316

Densità	(kg/m ³)	8000
Conducibilità termica	(W/(m ² °C))	15
Calore specifico	(J/(kg °C))	510

2.4.2.2 Il PCM

Il PCM qui considerato è una miscela eutettica di nitrati di sodio e potassio (NaNO₃-KNO₃ 60-40%wt) le cui caratteristiche sono le stesse riportate nella precedente analisi FEM.

Il modello di comportamento adottato per il PCM è quello tipico di un materiale a cambiamento di fase in cui oltre alla temperatura T raggiunta è calcolata anche la frazione f di volume fuso (liquido). Lo scambio termico ed il trasporto di calore sono di tipo puramente conduttivo. La conducibilità termica è stata mantenuta costante al variare della temperatura, senza tenere conto del suo incremento apparente dovuto all'instaurarsi di moti convettivi nella fase fluida causati dalla fusione del PCM (liquefazione), in congiunzione a gradienti termici ed effetti gravitazionali, che conducono ad un trasporto di calore di tipo convettivo naturale, e quindi più efficace.

2.4.3 Le condizioni al contorno

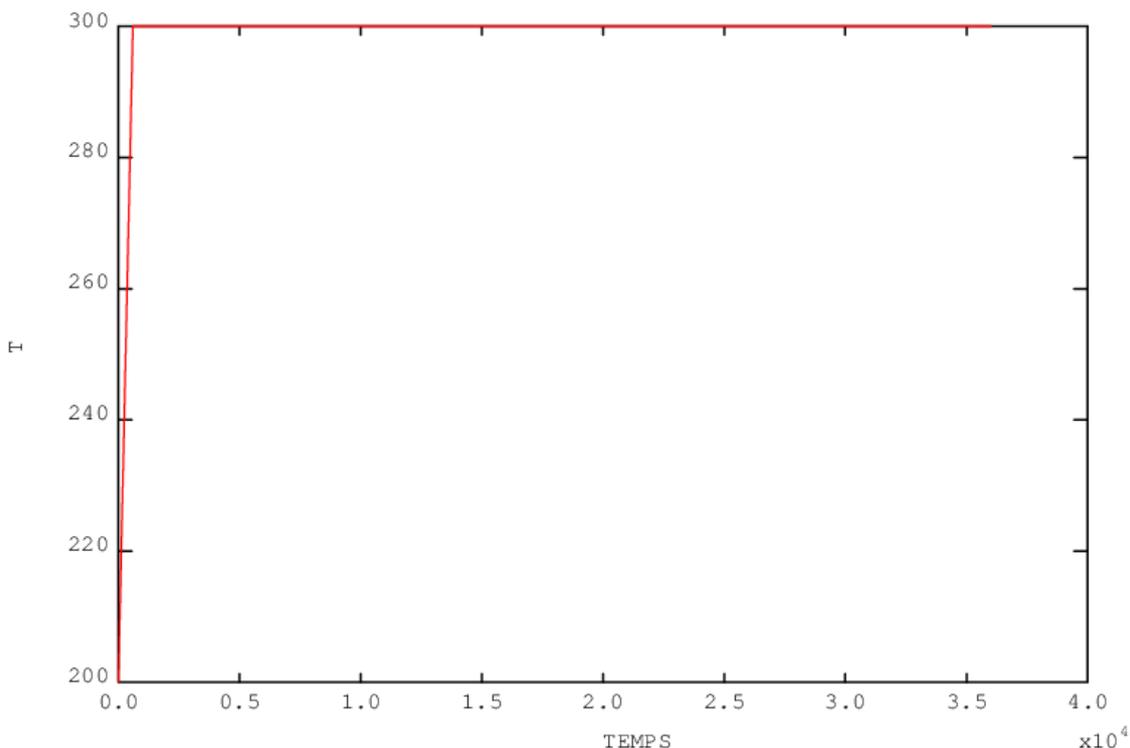


Figura 49- Andamento della temperatura del fluido termovettore (in °C) nel tempo (in secondi)

Il fluido avrà uno scambio termico convettivo con la parete interna del tubo in acciaio caratterizzato da un coefficiente h pari a 600 W/ (m²°C).

2.4.3.3 Scambio con l’ambiente

Lo scambio termico con l’ambiente esterno è stato considerato nullo, ovvero si ipotizza che il sistema sia adiabatico.

2.4.4 Effetto del numero e della altezza delle alette

Al fine di valutare l’influenza del numero di alette e della loro altezza sulle prestazioni termiche del canale LHTES sono state eseguite analisi FEM utilizzando le geometrie e le condizioni precedentemente descritte.

Il numero di alette è stato considerato pari a 2, 4, 6 ed 8, e la loro altezza pari a 0.5, 10 e 25 mm. Il loro spessore è mantenuto uguale a 1 mm. In **Tabella 15** è evidenziata la mappa dei calcoli effettuati ed il loro numero identificativo.

Tabella 15 – Numero identificativo del calcolo in funzione del numero delle alette e della loro altezza (in mm)

Alette	a/nr	2	4	6	8
altezza (mm)	0.5	11	12	13	14
altezza (mm)	10	21	22	23	24
altezza (mm)	25	31	32	33	34

Invece, in **Tabella 16** sono riportati i principali risultati ottenuti evidenziando soprattutto le prestazioni energetiche e dinamiche e le variazioni rispetto al calcolo “11” (N=2, a=0.5mm), equiparabile ad un tubo senza alettature.

In realtà, tutta la serie “1x”, data la dimensione molto ridotta delle alette, può essere considerata come se queste fossero assenti. Ciò risulta evidente dalle variazioni rispetto alle serie “2x” e “3x” sia della superficie di scambio in gioco (Figura 50) che della quantità di acciaio presente (Figura 51).

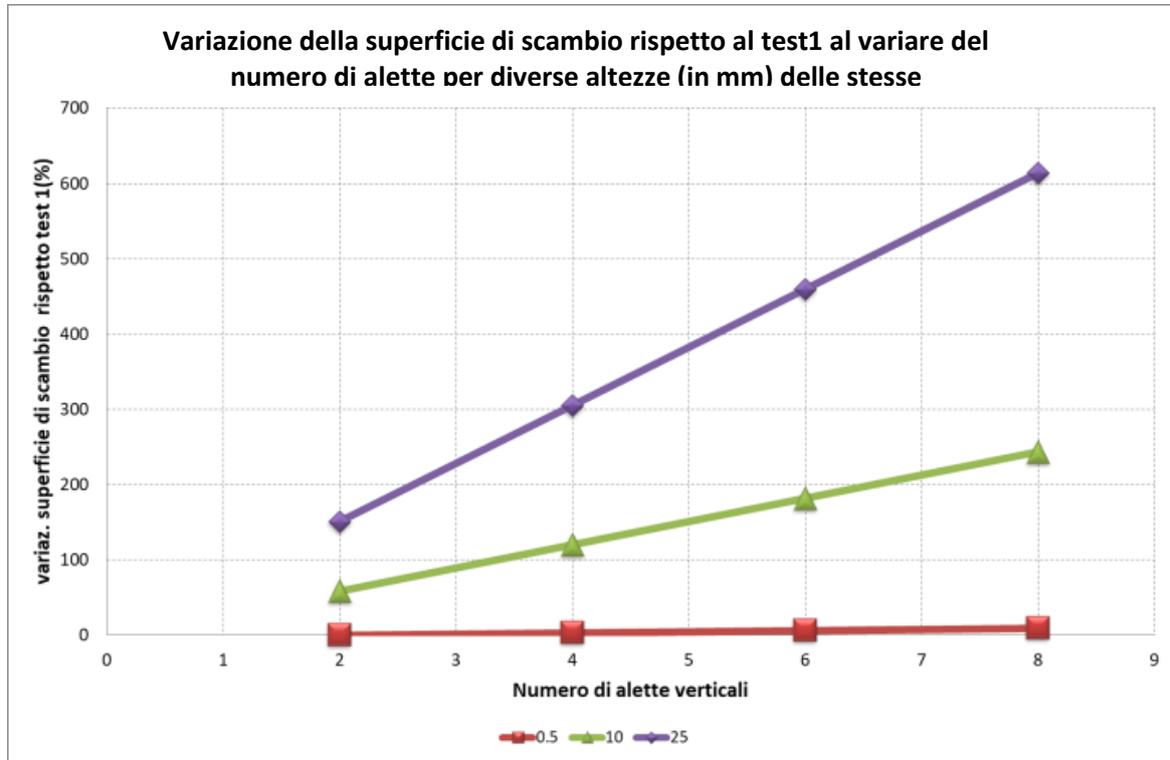


Figura 50- Variazione della superficie di scambio termico rispetto al test “1”

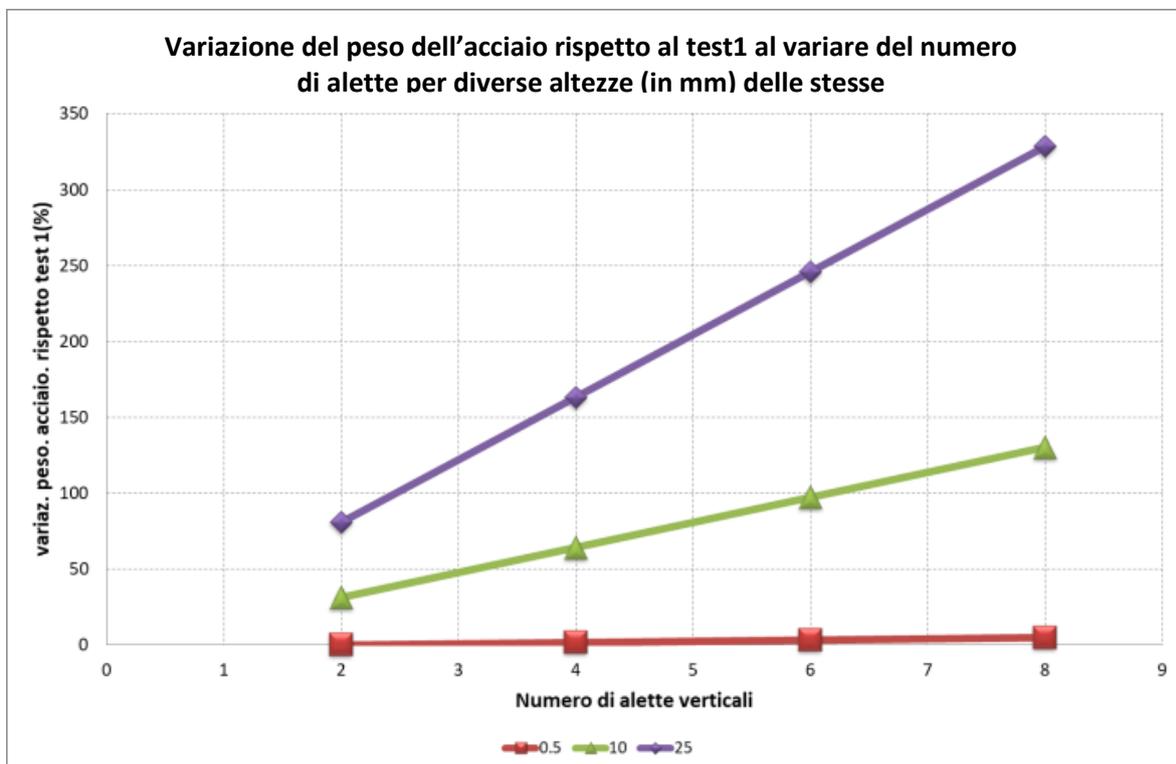


Figura 51- Variazione del peso dell'acciaio rispetto al test “1”

Chiaramente, più si incrementano il numero di alette e la loro altezza più aumenta la superficie di scambio (migliora la trasmissione) ed il peso dell'acciaio presente (ma anche il costo del dispositivo). Con 8 alette e una altezza di 25 mm si incrementa la superficie di scambio al massimo di 6 volte mentre il peso triplica. Se l'altezza è invece di 10 mm, si la superficie di scambio al massimo incrementa di 2.5 volte mentre il peso di 1.25 volte.

Tabella 16 – Principali risultati delle simulazioni al variare del numero delle alette e della loro altezza

Caso	11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	33	34
altezza aletta (m)	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02
numero alette	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
spessore aletta (m)	1.00E-03											
volume pcm (m3)	4.70E-03	4.70E-03	4.70E-03	4.70E-03	4.68E-03	4.66E-03	4.64E-03	4.62E-03	4.65E-03	4.60E-03	4.55E-03	4.50E-03
volume tubo (m3)	6.06E-05	6.16E-05	6.26E-05	6.36E-05	7.96E-05	9.96E-05	1.20E-04	1.40E-04	1.10E-04	1.60E-04	2.10E-04	2.60E-04
massa pcm (kg)	8.6996	8.6964	8.6957	8.6933	8.6644	8.6261	8.5902	8.5527	8.6089	8.5151	8.4237	8.3307
massa tubo (kg)	0.48488	0.49284	0.50091	0.50891	0.63688	0.79684	0.95691	1.1169	0.87688	1.2768	1.6769	2.0769
massa totale (kg)	9.1845	9.1893	9.1966	9.2022	9.3013	9.423	9.5471	9.6696	9.4858	9.792	10.101	10.408
max. cal. lat. pcm (Wh)	265.82	265.72	265.70	265.63	264.75	263.58	262.48	261.33	263.05	260.18	257.39	254.55
max. cal. sen. pcm (Wh)	410.81	410.66	410.63	410.52	409.15	407.34	405.65	403.88	406.53	402.10	397.79	393.39
max. cal. sen. acc (Wh)	6.87	6.98	7.10	7.21	9.02	11.29	13.56	15.82	12.42	18.09	23.76	29.42
capacità term. nom. (Wh)	683.50	683.37	683.43	683.36	682.92	682.21	681.68	681.03	682.00	680.37	678.93	677.37
superficie scambio (m2)	6.48E-02	6.68E-02	6.88E-02	7.08E-02	1.03E-01	1.43E-01	1.83E-01	2.23E-01	1.63E-01	2.63E-01	3.63E-01	4.63E-01
T pcm max (°C)	298	298	298	298	298	299	299	299	299	299	300	300
T pcm min (°C)	272	273	273	273	279	287	291	293	283	293	297	299
%massa fusa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
tempo fine fusione (h)	1.875	1.875	1.875	1.875	1.78	1.53	1.33	1.23	1.75	1.37	1.1	0.95
energia caricata (Wh)	590.7	591.4	592.1	592.8	619.0	640.6	653.2	660.4	633.3	660.4	670.6	673.3
efficienza carico	86.42	86.54	86.64	86.75	90.64	93.90	95.82	96.97	92.86	97.06	98.77	99.40
%cal sens	61.11	61.12	61.12	61.13	61.23	61.36	61.50	61.63	61.43	61.76	62.09	62.42
%cal lat	38.89	38.88	38.88	38.87	38.77	38.64	38.50	38.37	38.57	38.24	37.91	37.58
var% ener caric risp test1	0.00	0.12	0.24	0.36	4.79	8.45	10.58	11.80	7.21	11.80	13.53	13.98
var% tempo fus. risp test1	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.07	-18.40	-29.07	-34.40	-6.67	-26.93	-41.33	-49.33
var% peso acc. risp test1	0.00	1.64	3.31	4.96	31.35	64.34	97.35	130.35	80.84	163.32	245.84	328.33
var% sup scambio (test1)	0.00	3.08	6.17	9.25	58.61	120.31	182.01	243.71	151.16	305.41	459.65	613.90

Al contrario di peso e superficie le prestazioni non hanno una variazione lineare. Infatti, le migliorate condizioni di scambio e trasporto del calore tendono a ridurre la differenza tra la temperatura massima e minima nel PCM e quindi ad uniformare le prestazioni. In particolare, sia l'efficienza di caricamento (Figura 52) che la variazione dell'energia caricata (Figura 53) migliorano molto passando da 2 a 4 alette, ma i benefici sono più ridotti passando a 6 ed 8 alette. La variazione energetica con l'incremento dell'altezza è invece molto evidente tra 0.5 e 10 mm ma risulta essere molto inferiore passando da 10 a 25 mm.

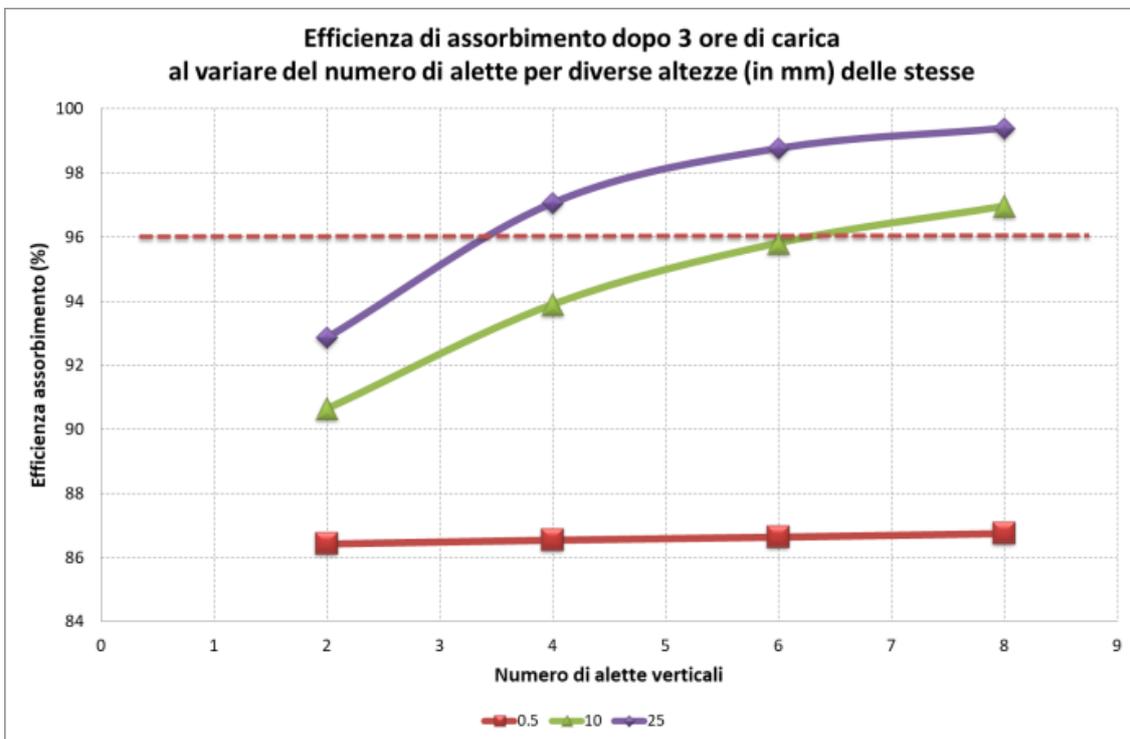


Figura 52- Efficienza di caricamento dopo 3 ore in funzione del numero di alette e della loro altezza

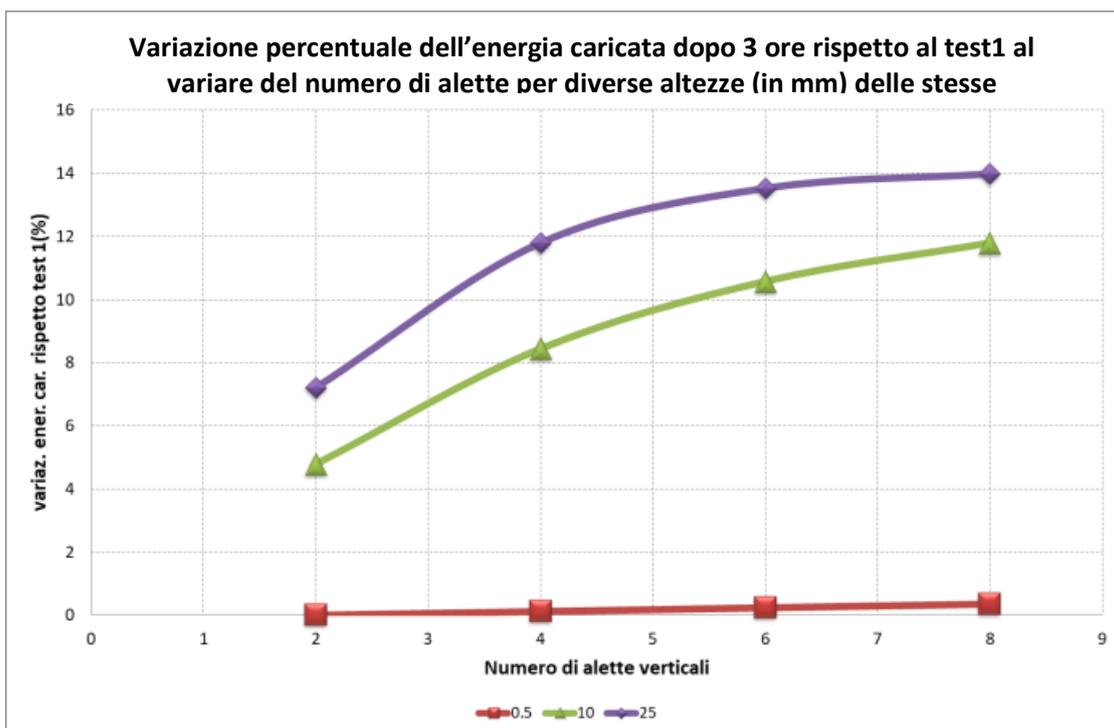


Figura 53- Variazione della energia caricata dopo 3 ore rispetto al test "1"

Da un punto di vista dinamico (Figura 54), è possibile osservare un andamento molto simile al precedente anche per il tempo necessario alla completa fusione del PCM (calore latente), con una sua riduzione che può arrivare anche al 50% di quello necessario in assenza di alette.

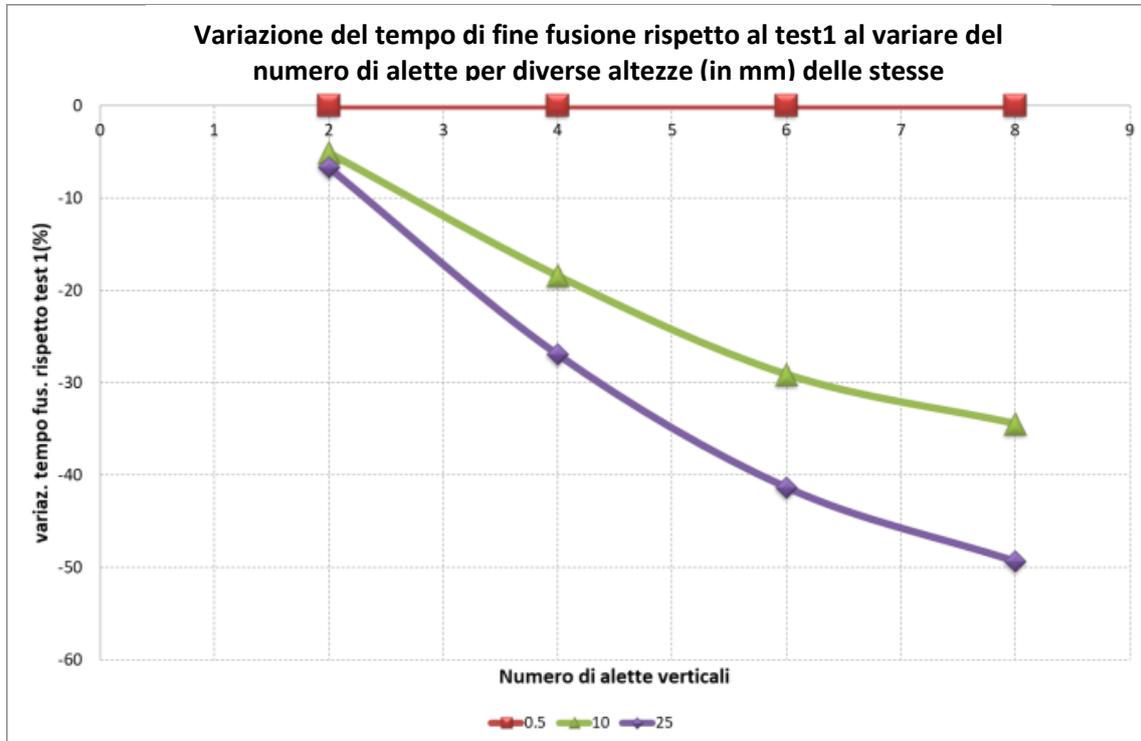


Figura 54- Variazione del tempo di completa fusione del PCM rispetto al test "1"

In

Tabella 17 ed in Tabella 18 sono mostrate, al fine di compararle, le evoluzioni temporali dei campi di temperatura e della frazione di massa fusa nel PCM per quattro delle configurazioni analizzate (casi 11, 23, 24 e 34). In conclusione, tenendo conto delle migliorate condizioni di scambio termico (promozione della conducibilità) derivanti dall'incremento del numero di alette e della loro altezza, dal fatto che oltre le 6 alette e i 10 mm di altezza i benefici tendono a saturare e che aumentando detti parametri tenda ad incrementare linearmente anche il peso/costo del componente, si può ipotizzare una configurazione ideale costituita da un tubo con 6 o 8 alette di altezza circa una volta e mezza il raggio del tubo (15 mm).

Tabella 17 – Evoluzione del campo di temperature nel PCM

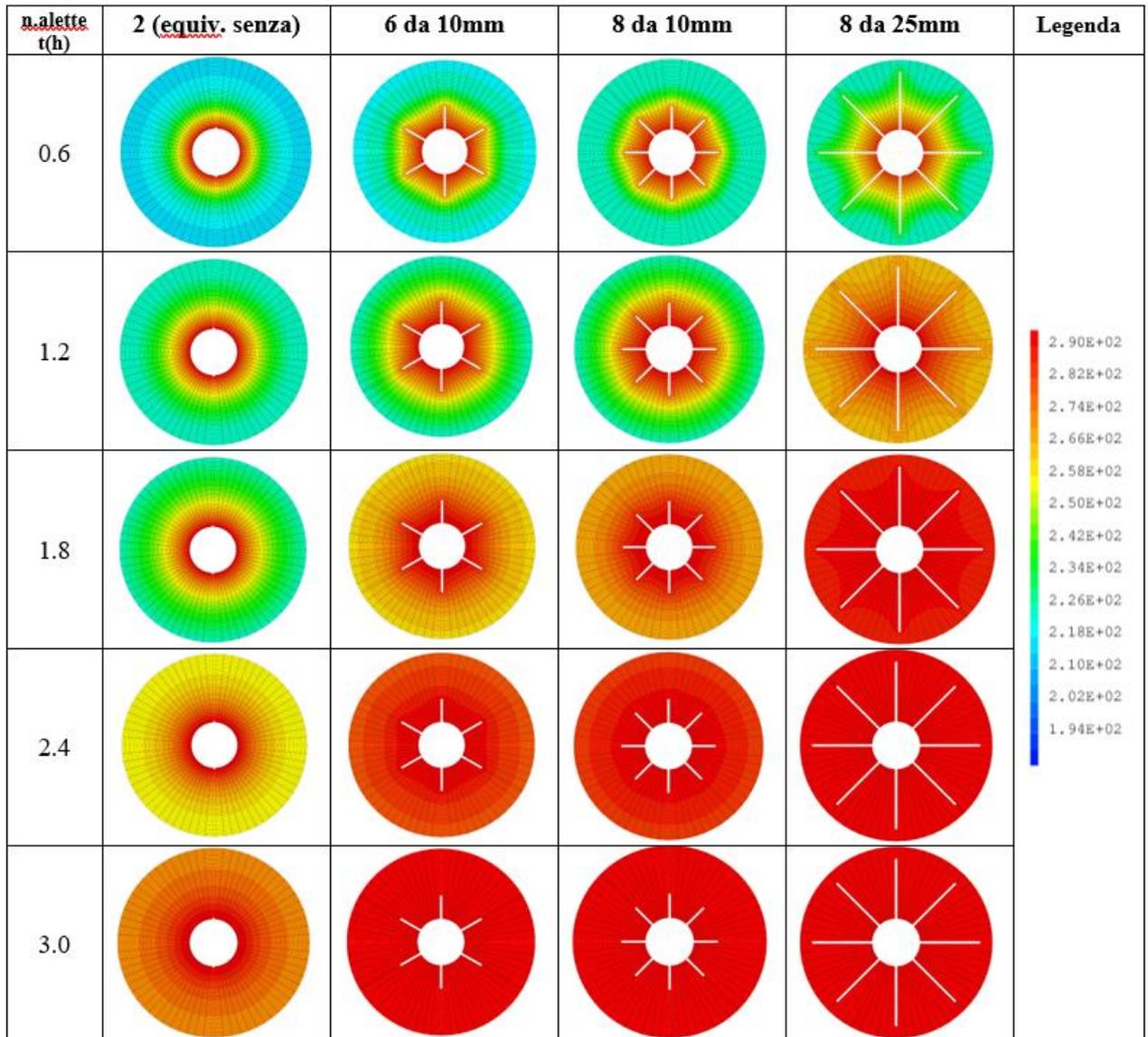
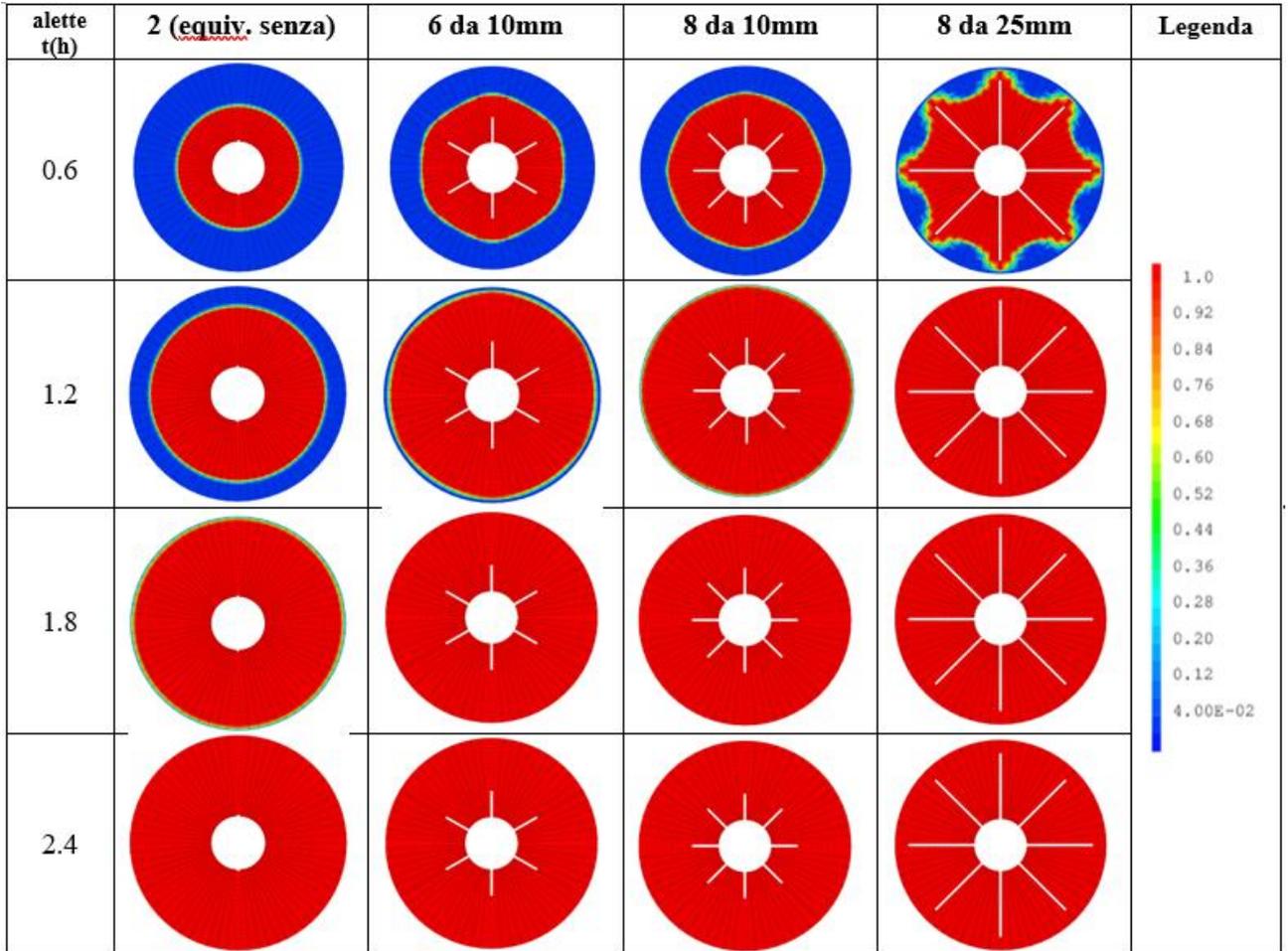


Tabella 18 – Evoluzione della frazione di massa fusa del PCM



2.4.5 Effetto dello spessore delle alette

Ora, facendo riferimento ad un tubo con 8 alette longitudinali di altezza 10 mm, possiamo anche indagare l'influenza dello spessore delle stesse sulle prestazioni termiche. Tenendo presente che comunque lo spessore dovrebbe essere "simile" a quello del tubo di scambio, si sono considerati spessori di 1 mm (caso 24 precedente), 0.8 mm (caso 24b) e 0.5 mm (caso 24c). In **Tabella 19** sono riportati i principali risultati relativi ai tre casi menzionati. Questi sono anche graficati in **Figura 55**.

Tabella 19 – Principali risultati delle simulazioni al variare dello spessore delle alette

Caso	24	24b	24c
altezza aletta (m)	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02
numero alette	8	8	8
spessore aletta (m)	1.00E-03	8.00E-04	5.00E-04
volume pcm (m3)	4.62E-03	4.64E-03	4.67E-03
volume tubo (m3)	1.40E-04	1.24E-04	9.97E-05
massa pcm (kg)	8.5527	8.5884	8.6395
massa tubo (kg)	1.1169	0.98911	0.79735
massa totale (kg)	9.6696	9.5775	9.4368
max. cal. lat. pcm (Wh)	261.33	262.42	263.98
max. cal. sen. pcm	403.88	405.56	407.98
max. cal. sen. acc (Wh)	15.82	14.01	11.30
capacità term. nom.	681.03	682.00	683.26
superficie scambio (m2)	2.23E-01	2.23E-01	2.23E-01
T pcm max (°C)	299	299	299
T pcm min (°C)	293	292	290
%massa fusa	100	100	100
tempo fine fusione (h)	1.23	1.28	1.36
energia caricata (Wh)	660.4	657.9	650.6
efficienza carico	96.97	96.47	95.22
%cal sens	61.63	61.52	61.36
%cal lat	38.37	38.48	38.64
var% ener caric risp	0.00	-0.38	-1.48
var% tempo fus. risp	0.00	4.07	10.57
var% peso acc. risp test1	0.00	-11.44	-28.61
var% sup scambio	0.00	0.00	0.00

Da questi dati si evince che riducendo lo spessore delle alette non vengono sostanzialmente variate la superficie di scambio termico, l'energia carica e l'efficienza di caricamento.

Ovviamente, riducendo lo spessore, la quantità di acciaio impegnata risulta ridursi proporzionalmente fino ad un massimo del 30% circa. Al contrario, il tempo di completa fusione si incrementa leggermente (massimo il 10%) al ridursi dello spessore, essendo legato alla massa di acciaio presente.

Il risultato porterebbe a considerare ottimali spessori molto piccoli, fatte salve le problematiche connesse alla loro eventuale saldabilità al tubo di scambio ed alla corrosione esercitata dal PCM (generalmente sale).

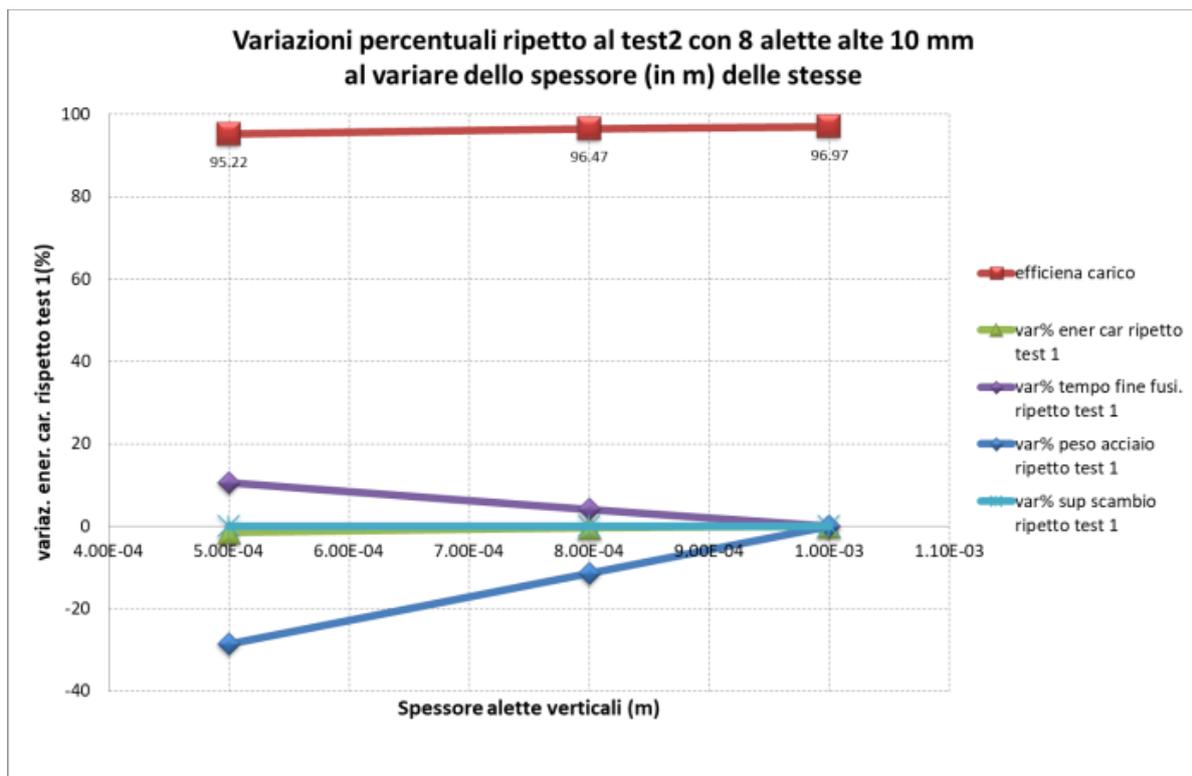


Figura 55- Variazione della superficie di scambio termico rispetto al test “1”

2.4.6 Conclusioni

In questo paragrafo si è analizzata l’influenza di alette longitudinali esercitata sulle prestazioni termiche di un canale di un sistema di accumulo termico di tipo “shell&tube” con tubazione verticale. Il numero e le dimensioni (altezza e spessore) ottimali di queste alette sono state valutate in modo da massimizzare l’efficacia dello scambio termico e minimizzare la quantità di acciaio da introdurre nel sistema, con conseguente riduzione della densità di energia e incremento del costo. I principali risultati ottenuti sono i seguenti:

- il numero, l’altezza e lo spessore hanno una influenza diretta sul peso dell’acciaio presente e, quindi, sul costo del componente. Queste dovranno essere limitate a valori ragionevoli;
- il numero di alette ha una forte influenza quando questo è limitato (2-4). Quando, invece, è superiore a 6 l’incremento delle prestazioni tende a ridursi. Un numero di alette ottimale potrebbe essere superiore a 6 e non eccedere le 12;
- le prestazioni risentono moltissimo della altezza delle alette anche se, come nel caso precedente, l’effetto si smorza rapidamente. Una altezza pari ad 1 od 1.5 volte il raggio del tubo (nel nostro caso 10-15 mm) sembra essere un valore ottimale;
- l’influenza dello spessore delle alette sembra essere molto limitata sulle prestazioni del sistema. Gli spessori più piccoli sembrerebbero essere quelli ottimali ma si dovranno tenere in conto sia le problematiche della loro eventuale saldabilità al tubo di scambio sia quelle della corrosione esercitata dal PCM.

Sulla base di queste indicazioni sarà allora possibile progettare un sistema LHTES, del tipo in studio presso Enea, che possa utilizzare un adeguato sistema di promozione della conducibilità termica basato sull’uso di tubazioni con alettatura longitudinale, come quella di [Figura 56](#).



Figura 56- Esempio di tubo a 12 alette prodotto dalla Russillo impianti

3 Conclusioni

Nel presente documento è stato riportato il lavoro svolto all'interno della linea di attività LA2.7 del PAR2020 e finalizzato all'ottimizzazione sia delle prestazioni che dei costi di un nuovo sistema di accumulo termico a calore latente, denominato ENEA-TES-LH02, basato sulle caratteristiche di un analogo sistema sviluppato in precedenza (ENEA-TES-LH01).

Attraverso una prima analisi tecnico-economica del dispositivo si sono ottimizzati i principali parametri progettuali sia dell'elemento base che, successivamente, del modulo di accumulo costituito da questi. In particolare si è verificato che un elemento basato su una configurazione 4x4 per singola tubazione di scambio con un rapporto tra diametro di influenza del tubo o altezza dei tubi verticali rispetto al diametro esterno della tubazione pari, rispettivamente, a 4 e 30 garantisce sia delle buone prestazioni termiche che un basso costo. Inoltre, un modulo dovrà essere costituito da una serie di elementi base, connessi in serie e parallelo, superiore a 10 con una capacità termica superiore ai 100 kWh ed un costo specifico valutabile in circa 27 Euro/kWh.

Sulla base di tale analisi si è quindi dimensionato il nuovo dispositivo Enea-tes-LH-02 le cui caratteristiche principali sono: un intervallo di temperatura operativa tra 200 e 300°C; due tubazioni a serpentina, ciascuna lunga circa 12m, disposte simmetricamente; un tubo in acciaio di diametro esterno 20 mm e spessore 1-1.5 mm; due sezioni di tubo in ingresso/uscita dal dispositivo; un contenitore esterno metallico con base di 320x640 mm e altezza di 900 mm e coperchio rimovibile a tenuta; circa 300 kg di sale nitrato da utilizzare come mezzo di accumulo (PCM).

Con l'ausilio di una serie di analisi numeriche FEM del dispositivo così dimensionato, si è verificato che in fase di carico si hanno delle buone prestazioni termiche, caratterizzate da un tempo di carico di 5 ore ed un fattore di carico del 95%. Al contrario, durante lo scarico, le prestazioni risultano essere, a causa di uno scambio puramente conduttivo, più basse: dopo circa 5 ore l'energia recuperata è solo il 76% della sua capacità termica.

Per incrementare l'efficienza del dispositivo e, quindi, la potenza media fornita (<2kW) si può ricorrere all'adozione di sistemi addizionali di promozione della conducibilità quali, ad esempio, l'alettatura longitudinale, da inserire nei tratti verticali della serpentina.

Il numero e le dimensioni (altezza e spessore) ottimali di queste alette sono state valutate attraverso una ulteriore analisi FEM, attraverso la quale si è dedotto che: un numero di alette ideale è compreso tra 6 e 12; la loro altezza deve essere pari a 1-1.5 volte il raggio del tubo; il loro spessore deve essere il minore possibile fatte salve le problematiche di saldabilità e corrosione.

Sulla base di tutte queste indicazioni sarà allora possibile passare alla successiva fase di dimensionamento effettivo e progettazione del prototipo LHTES ENEA-tes-LH02 e, quindi, alla sua realizzazione. Queste ulteriori fasi verranno documentate nei successivi rapporti tecnici afferenti a questa Linea di Attività.

4 Riferimenti bibliografici

- 1 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, ENEA.
- 2 L. Kalapala, JK. Devanuri, “Influence of operational and design parameters on the performance of a PCM based heat exchanger for thermal energy storage – A review”, 2018, Journal of Energy Storage, 20, 497–519
- 3 A. Miliozzi, “Sistemi di Accumulo Termico: indici chiave di prestazione (KPI) e metodi per valutare le prestazioni ed i costi”, ENEA DTE/STT/2017/07
- 4 D. NICOLINI, A. MILIOZZI, “Sviluppo di un modello numerico semplificato per la valutazione delle prestazioni termiche di LHTES”, Report RdS/PTR2019/123, ENEA
- 5 S.S. Mostafavi Tehran, Y. Shoraka, G. Diarce, R.A. Taylor, “An improved, generalized effective thermal conductivity method for rapid design of high temperature shell-and-tube latent heat thermal energy storage systems”, Renewable Energy, 132 (2019), 694-708
- 6 Sito CAST3M: <http://www-cast3m.cea.fr/>

5 Abbreviazioni ed acronimi

FEM	Finite Analysis Methods
HTF	Heat Transfer Fluid
HSM	Heat Storage Medium
LHTES	Latent Heat TES
TES	Thermal Energy Storage
PAR	Piano Annuale di Ricerca
PCM	Phase Change Material
NEPCM	Nano Enhanced PCM