



Ricerca di Sistema elettrico

Dimensionamento e progettazione di un prototipo ottimizzato di accumulo termico modulare a calore latente

A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore

DIMENSIONAMENTO E PROGETTAZIONE DI UN PROTOTIPO OTTIMIZZATO DI ACCUMULO TERMICO MODULARE A CALORE LATENTE

A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore

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 DIMENSIONAMENTO E SPECIFICHE TECNICHE.....	6
2.1.1 Dimensionamento.....	6
2.1.2 Specifiche Tecniche	8
2.1.2.1 Contenitore esterno	8
2.1.2.2 Tubazioni a serpentina.....	8
2.1.2.3 Acquisizione temperature	9
2.1.2.4 Coibentazione	9
2.2 PROGETTAZIONE DEL PROTOTIPO.....	11
3 CONCLUSIONI.....	14
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	14
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	14

Sommario

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.7 del PAR2020 relativa alla "Analisi tecnico-economica, dimensionamento e realizzazione di un prototipo ottimizzato di tipo LHTES". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti", afferenti al PAR2020 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE 2019-2021.

In una prima fase di questa attività è stato analizzato un sistema di accumulo termico in configurazione "tube&shell" utilizzante PCM, al fine di ottimizzarne sia le prestazioni che i costi. Attività condotta attraverso un'analisi tecnico-economica del dispositivo tesa a valutare l'influenza dei principali parametri progettuali sia degli elementi base che, successivamente, del modulo di accumulo da essi costituito. Su questa base si sono ipotizzate delle dimensioni ottimali per l'elemento LHTES ed effettuate delle analisi numeriche FEM di dettaglio per valutarne il comportamento. Infine, sempre attraverso delle analisi FEM, si è valutata l'adozione di un tubo di scambio ad alettatura verticale, ottimizzandone il numero e la dimensione delle alette, al fine di incrementare l'efficienza del dispositivo e, quindi, la potenza media fornita in fase di scarico.

In questo lavoro, si è dimensionato, sulla base delle analisi effettuate, un nuovo dispositivo per accumulo termico a calore latente denominato ENEA-TES-LH02. Quindi, si sono redatte le specifiche tecniche che sono state necessarie ad aprire un contratto esterno verso una ditta che provveda alla sua realizzazione. Infine, tenendo in conto alcune limitazioni imposte dalla disponibilità commerciale di alcuni componenti ed in particolare delle tubazioni ad alettatura longitudinale, si sono apportate alcune variazioni progettuali al layout del dispositivo in oggetto, al fine di assicurare comunque delle prestazioni adeguate.

Nel proseguimento della attività la ditta che si è aggiudicata il bando della realizzazione di questo dispositivo, la Nuova STEIM di Narni (TR), passerà alla stesura del progetto esecutivo e, quindi, alla realizzazione del manufatto. Il prototipo in oggetto sarà caratterizzato termicamente durante il PAR2021, linea di attività 2.15, utilizzando l'impianto sperimentale Soltec3 presente in ENEA Casaccia.

1 Introduzione

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.7 del PAR2020 relativa alla "Analisi tecnico-economica, dimensionamento e realizzazione di un prototipo ottimizzato di tipo LHTES". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti", afferenti al PAR2020 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE 2019-2021.

In una prima fase di questa attività, documentata in [1], è stato analizzato un sistema di accumulo termico in configurazione "tube&shell" utilizzante PCM, al fine di ottimizzarne sia le prestazioni che i costi sulla base di una analisi tecnico-economica del dispositivo tesa a valutare l'influenza dei principali parametri progettuali sia degli elementi base che, successivamente, del modulo di accumulo da essi costituito. Dai risultati ottenuti da questa analisi è stato possibile ipotizzare delle dimensioni ottimali per l'elemento LHTES e quindi sono state condotte delle analisi numeriche FEM di dettaglio per valutarne il comportamento. Sempre attraverso delle analisi FEM, si è inoltre valutata la possibilità di utilizzare un tubo di scambio ad alettatura verticale, ottimizzandone il numero e la dimensione delle alette, al fine di incrementare l'efficienza del dispositivo e, quindi, la potenza media fornita in fase di scarico.

Nel presente lavoro, sintetizzando i risultati ottenuti in precedenza, si è effettivamente dimensionato il nuovo dispositivo da realizzare, denominato ENEA-TES-LH02, e quindi, proceduto alla stesura delle specifiche tecniche. Sulla base di esse sarà possibile, in una fase successiva, passare alla realizzazione del nuovo prototipo LHTES.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Dimensionamento e specifiche tecniche

2.1.1 Dimensionamento

In Tabella 1 sono riportati i principali parametri geometrici da utilizzare per la progettazione di dettaglio e la realizzazione del prototipo LHTES ENEA-TES-LH02, ottenuti dalle valutazioni tecnico economiche ed analisi FEM effettuate nella precedente fase del lavoro [1].

Tabella 1 – Parametri geometrici

Parametro	Unità	Valore
Materiale contenitore	-	AISI 304
Larghezza contenitore	mm	640
Profondità contenitore	mm	320
Altezza contenitore	mm	900
Spessore contenitore	mm	2-3
Numero scambiatori (simmetrici)	-	2
Materiale scambiatori	-	AISI 304
Configurazione tubi verticali di uno scambiatore	-	4x4
Interasse tratti rettilinei	mm	80
Lunghezza tubi verticali (L)	mm	600
Diametro esterno tubo scambiatore (d0)	mm	20
Diametro interno tubo scambiatore (di)	mm	17
Spessore tubo scambiatore (s)	mm	1.5
Numero tratti curvi a 180° di uno scambiatore	-	15
Raggi di curvatura tratti curvi a 180°	mm	40
Lunghezza sezioni in/out	mm	220
Distanza minima scambiatore fondo contenitore	mm	40
Lunghezza totale tubo di uno scambiatore	m	11.74
Numero alette tubo verticale	-	4-6
Altezza alette	mm	20-25
Spessore alette	mm	1
Volume totale occupabile dal PCM in fase solida	m ³	0.15
Variazione altezza PCM (Sale solare) dopo fusione	mm	50
Massa presunta PCM (Sale solare)	kg	300
Capacità termica presunta ($\Delta T=100^{\circ}C$)	kWh _{th}	23

In Figura 2-1 è possibile osservare la configurazione dei tubi verticali (matrice 4x4) di uno scambiatore, che occupa metà contenitore, ed un esempio di tubo a 12 alette longitudinali di tipo commerciale, utilizzate come sistema di promozione della conducibilità termica.

Invece, in Figura 2-2 è mostrato l'insieme delle due tubazioni di scambio termico connesse in parallelo, all'interno del contenitore, sia nel caso si adottasse un semplice tubo verticale liscio che in quello con un tubo con i tratti verticali con alettatura longitudinalmente.

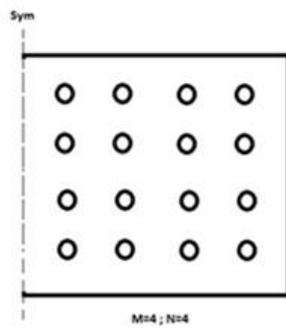


Figura 2-1- Configurazione dei tubi verticali in uno scambiatore (4x4 su metà contenitore), a sinistra, ed esempio di tubo a 12 alette longitudinali, a destra.

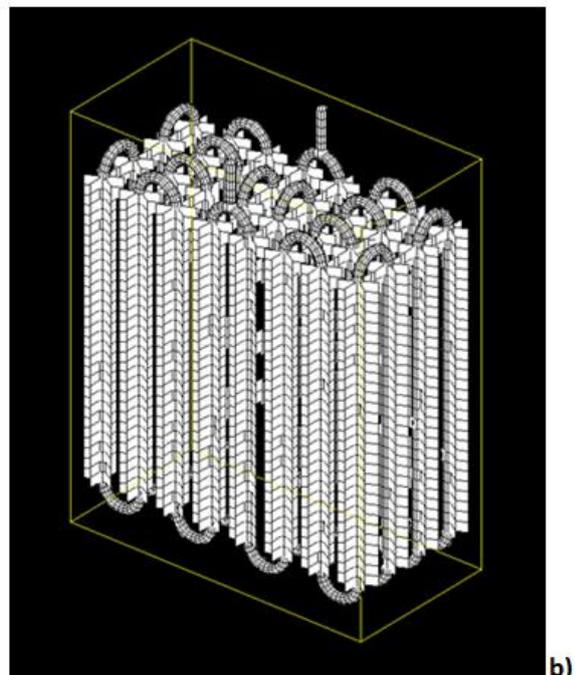
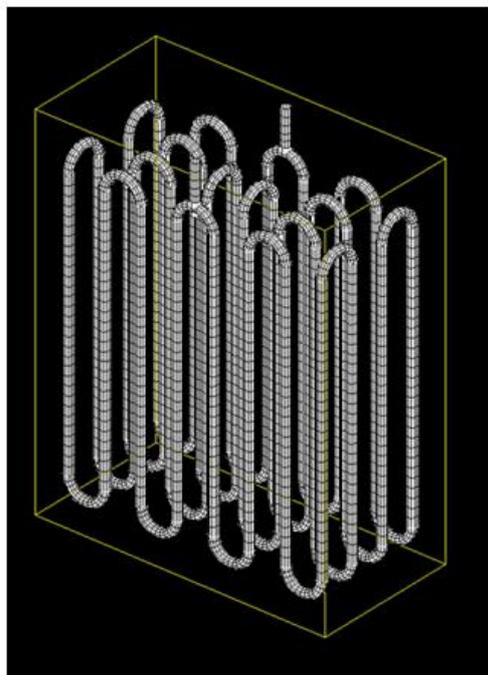


Figura 2-2- Vista del contenitore con le due tubazione a serpentina connesse in parallelo con i tratti verticali in assenza (a) o presenza (b) di alettatura longitudinale (6 alette).

2.1.2 Specifiche Tecniche

Qui di seguito sono riportate le specifiche tecniche elaborate per procedere alla progettazione e realizzazione di un prototipo di dispositivo di accumulo termico a calore latente ENEA-TES-LH02 operante nell'intervallo di temperatura compreso tra 200 e 300°C.

Il dispositivo è costituito da:

- un **contenitore esterno metallico** a forma di parallelepipedo;
- **due tubazioni a serpentina** disposte simmetricamente rispetto il piano mediano verticale che taglia il lato di base maggiore;
- una opportuna **coibentazione esterna** per limitare le perdite termiche, comprensiva di lamiera di protezione;
- alcuni supporti e la strumentazione per **acquisizione** di temperature (termoresistenze/termocoppie)

Le temperature di esercizio si prevedono comprese tra la temperatura ambiente e 300°C. La pressione di esercizio del fluido termico e dei PCM è prevista essere inferiore a 1,5 ata.

Nel contenitore dovranno essere inseriti circa 300 kg di sale nitrato di sodio e potassio (sale solare). L'intero dispositivo dovrebbe pesare circa 400 kg ed esercitare sul fondo una pressione di quasi 20kN/m².

La capacità termica, per l'intervallo di temperature indicato, è di circa 23 kWh_{th} di cui circa la metà (10 kWh_{th}) di solo calore latente.

2.1.2.1 Contenitore esterno

- Il contenitore esterno metallico avrà una base di 320x640 mm ed una altezza di 900 mm. Sarà realizzato con lamiere di acciaio AISI 304 di spessore 2-3 mm.
- Nella parte superiore sarà realizzato un coperchio facilmente apribile per ispezione, 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.
- Sempre sulla parte superiore del contenitore dovranno essere presenti opportuni sistemi di ancoraggio (es: golfare ad anello opportunamente avvitate sulla struttura) per consentirne la movimentazione con carroponte, anche a componente completo e pieno.
- Per consentire il suo svuotamento dal mezzo di accumulo in fase liquida, alla temperatura di 240-260 °C, la parete di fondo del contenitore dovrà essere realizzata in leggera pendenza e dotata di un foro di drenaggio con tubazione esterna munita di sifone e tappo basculante fornito di maniglia per la manovra a PCM caldo.
- Il contenitore dovrà prevedere la possibilità di aggancio a morsetti elettrici sia su questo sistema di scarico sia sulla parte superiore del contenitore (es: potrebbe inserirsi nel sistema di fissaggio di una delle golfare di sollevamento). L'opportunità di applicare una tensione elettrica è dovuta alla eventuale necessità di fondere il PCM ed evitarne la solidificazione in fase di scarico.

2.1.2.2 Tubazioni a serpentina

- Le due tubazioni a serpentina saranno costituite da una tubo in AISI 316 o AISI 304 di diametro esterno 20 mm e spessore 1-1.5 mm.
- Ciascuna tubazione sarà costituita da 16 tratti di tubazione verticale disposti secondo una matrice 4x4 e 15 tratti curvi a 180°, che raccorderanno i predetti tratti rettilinei.

- I tratti rettilinei avranno un interasse di 80 mm e saranno lunghi circa 600 mm. I tratti curvilinei a 180°C 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 sarà lungo circa 125.7 mm.
- 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, 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.
- Lo spessore delle alette dovrebbe essere confrontabile con quello del tubo (es: 1 mm), la loro lunghezza radiale (altezza) circa pari al diametro tubo (es: 20-25 mm) mentre il loro numero non superiore a 4-6.
- Dopo la realizzazione delle due tubazioni, dovrà essere effettuata una prova di flussaggio all'interno delle stesse, per appurare che queste presentino analoghe perdite di carico (assenza di difetti interni). Questa verifica è necessaria per assicurare che in fase di prove sperimentali il flusso di HTF si divida in parti uguali tra le due tubazioni.

2.1.2.3 Acquisizione temperature

- Le due tubazioni di ingresso ed uscita dall'unità dovranno, esternamente al coperchio superiore, presentare due apposite sezioni in grado di alloggiare due termoresistenze PT100 classe A immerse nel fluido termovettore per rilevare la temperatura di ingresso ed uscita del fluido.
- In 4 posizioni ed uniformemente distribuite in altezza, dovranno essere applicate 16 termocoppie di tipo K. Di queste, 8 si troveranno all'interno del contenitore (posizioni 1-2) e 8 sulla superficie esterna (posizioni 3 e 4).

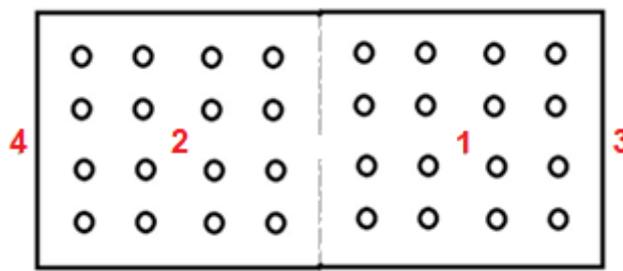


Figura 2-3 Posizioni di installazione di 16 termocoppie di tipo K, 4 per posizione ed uniformemente distribuite in altezza, di cui 8 interne al contenitore (posizioni 1-2) e 8 esterne (posizioni 3 e 4).

2.1.2.4 Coibentazione

- 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 il cui spessore dovrà garantire una resistenza termica di almeno 6 (m² °C)/W.

- La parte sottostante potrà essere coibentata tramite un materiale isolante rigido (piastre, mattonelle, ..) di resistenza termica equivalente al precedente e in grado di sostenere il peso del dispositivo senza danneggiarsi.
- La coibentazione, con finitura in lamierino di alluminio, dovrà essere realizzata per installazioni al coperto.

Complessivamente l'elemento di accumulo sarà costituito da:

- scambiatore formato da fascio tubiero e contenitore;
- coibentazione smontabile;
- elementi di raccordo;
- n. 2 sezioni di misura con installazione termo-resistenze ;
- n. 16 termocoppie (fornite da ENEA) da installare sul fascio tubiero e sul contenitore;

2.2 Progettazione del prototipo

Sulla base delle specifiche sopra riportate ENEA e la ditta Nuova STEIM di Narni (TR), incaricata della costruzione del prototipo ENEA-TES-LH02 hanno rivisto il progetto preliminare in ragione dei metodi di realizzazione e dei materiali effettivamente disponibili sul mercato.

Ad esempio, uno degli elementi critici del sistema sono i tubi con alettatura longitudinale. In Italia, le ditte che li realizzano sono molto poche: quella individuata è la Russillo Impianti di Ossona (MI). Questa è in grado di fornire tubi da 20 mm con massimo 4 alette longitudinali, del tipo riportati in Figura 2-4.

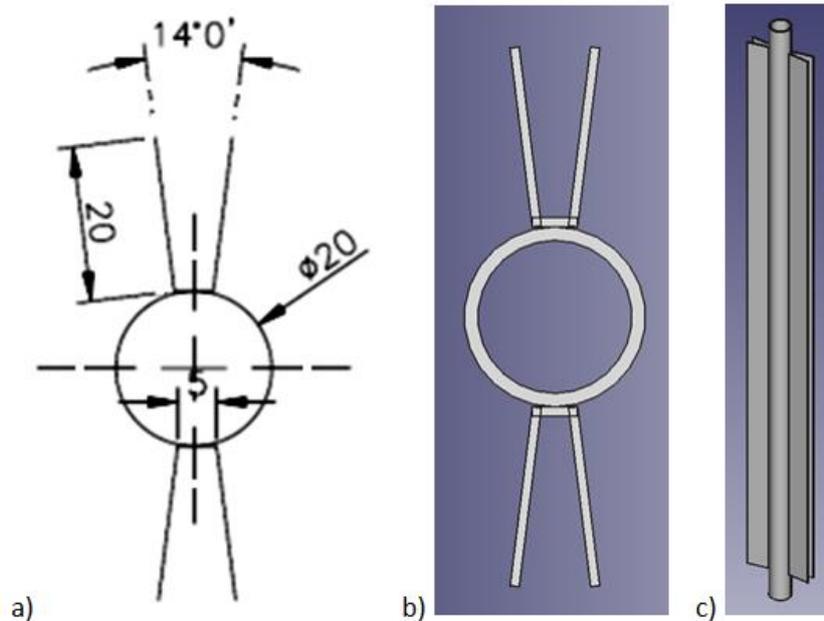


Figura 2-4 Tubo ad alettatura longitudinale: a) Schema di tubo fornito da Russillo Impianti; b) modello in sezione del tubo in fornitura; c) modello completo di tubo in fornitura.

Purtroppo, questa tipologia di fornitura ha 4 alette longitudinali che soddisfano numericamente i requisiti ma non sono equi-spaziate e creano una direzione preferenziale di trasmissione del calore. Per ovviare a tale inconveniente si è dovuto rivedere il layout della disposizione dei tubi alettati al fine di creare le condizioni migliori per lo sfruttamento di tutto il PCM del prototipo. In particolare, si sono disposti i tubi secondo lo schema di Figura 2-5 in cui, per un quarto della sezione dello scambiatore, è mostrata la disposizione dei tubi ed il relativo modello CAD.

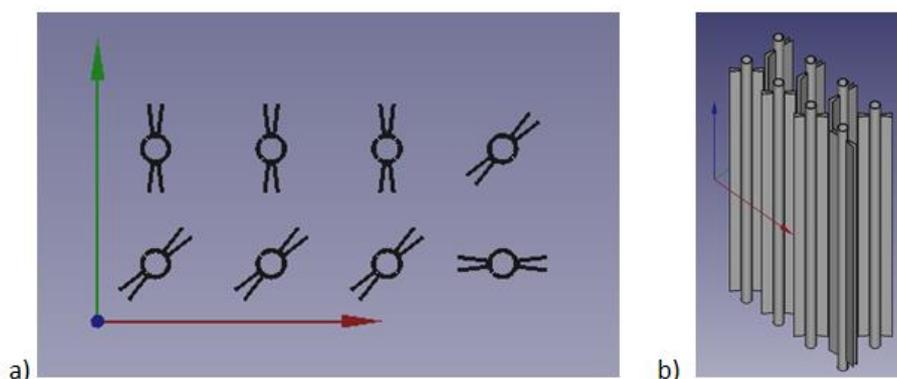


Figura 2-5 Schema della disposizione dei tubi ad alettatura longitudinale: a) Schema di tubo fornito da Russillo Impianti; b) modello in sezione del tubo in fornitura; c) modello completo di tubo in fornitura.

In Figura 2-6 è invece visibile, per l'intero scambiatore, l'insieme dei tubi ad alettatura longitudinale disposti secondo lo schema precedente.

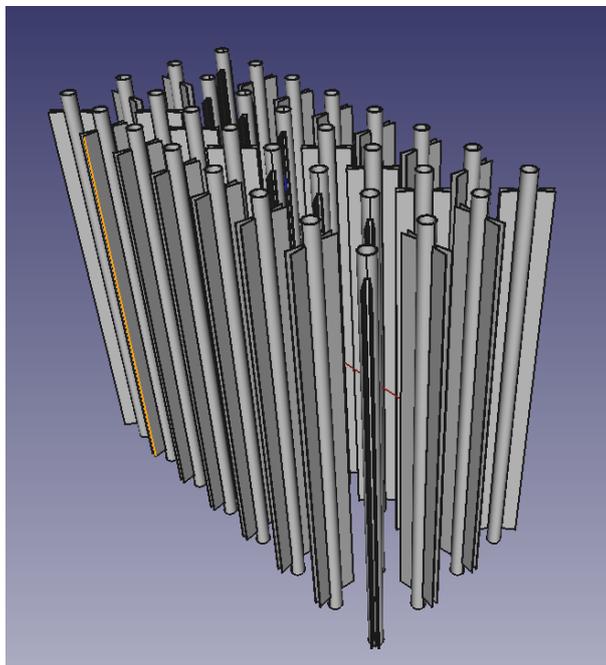


Figura 2-6 Insieme di tubi ad alettatura longitudinale dello scambiatore di calore del prototipo ENEA-*TES-LH02*.

I tubi alettati verranno quindi connessi attraverso una serie di tubi curvi a 180° secondo lo schema originario al fine di realizzare due tubazioni di scambio termico simmetriche rispetto al piano mediano verticale perpendicolare al lato più lungo del prototipo (Figura 2-7).

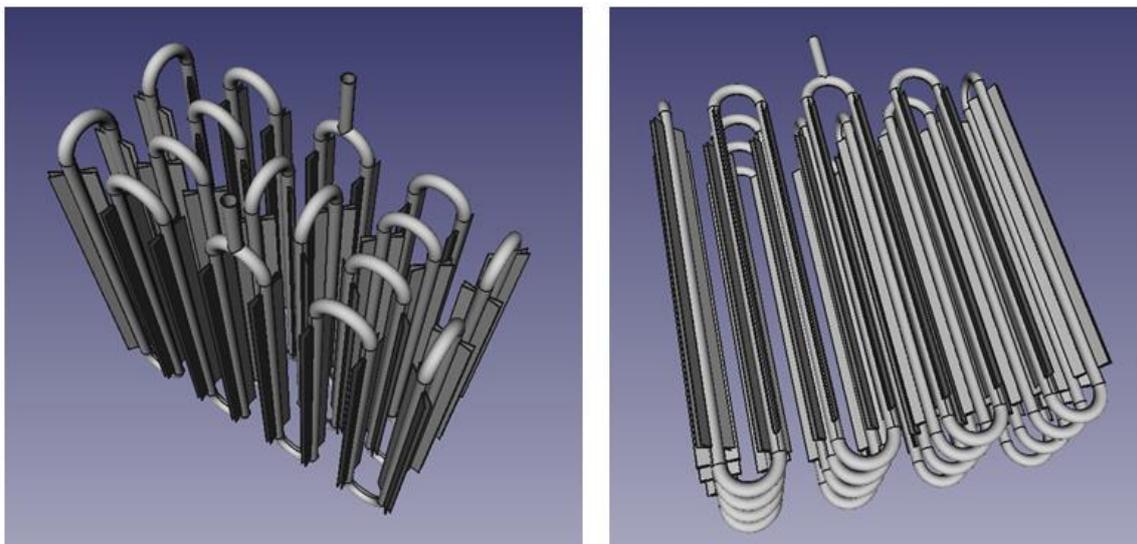


Figura 2-7 Vista, sia superiore che inferiore, dell'intero scambiatore, costituito da tubi alettati rettilinei e tubi curvi che realizzano due sezioni simmetriche parallele.

Infine, l'intero scambiatore sarà collocato all'interno di un contenitore delle dimensioni richieste in cui saranno versati i circa 300 kg di PCM (sale solare) che fungerà da mezzo di accumulo termico.

In Figura 2-8 è mostrato sia lo scambiatore all'interno del contenitore parzialmente aperto sia lo stesso contenitore completamente chiuso. Dal contenitore usciranno esclusivamente le tubazioni di ingresso ed uscita del fluido termovettore.

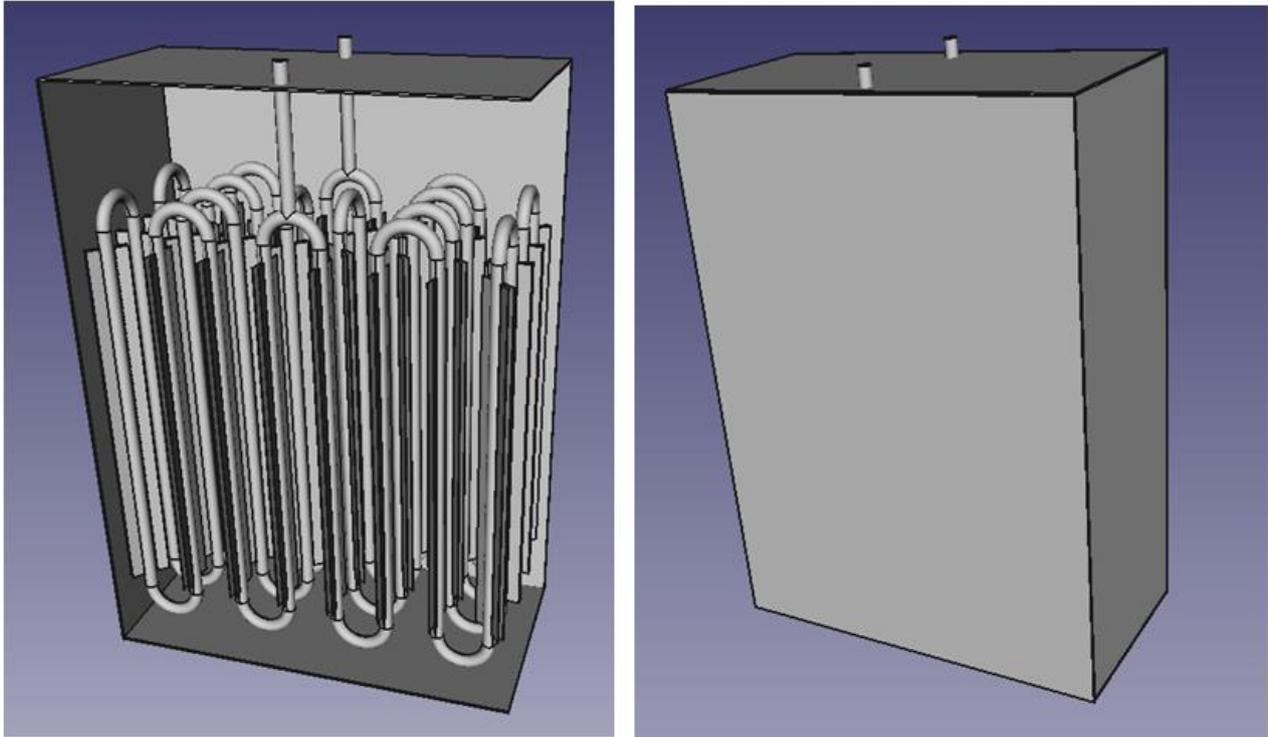


Figura 2-8 Vista della lo scambiatore posto all'interno del contenitore parzialmente aperto (a sinistra) e dello stesso contenitore completamente chiuso (a destra).

3 Conclusioni

In questo lavoro, si è dapprima dimensionato, sulla base delle analisi effettuate nella prima parte della attività LA2.4, il nuovo dispositivo per accumulo termico a calore latente denominato ENEA-TES-LH02.

Quindi, si sono redatte le specifiche tecniche che sono state necessarie ad aprire un contratto esterno verso una ditta che provveda alla sua realizzazione.

Infine, tenendo in conto alcune limitazioni imposte dalla disponibilità commerciale di alcuni componenti ed in particolare delle tubazioni ad alettatura longitudinale, si sono apportate alcune variazioni progettuali al layout del dispositivo in oggetto, al fine di assicurare comunque delle adeguate prestazioni.

Nel proseguo della attività la ditta che si è aggiudicata il bando della realizzazione di questo dispositivo, la Nuova STEIM di Narni (TR), passerà alla stesura del progetto esecutivo e, quindi, alla realizzazione del manufatto. Il prototipo in oggetto sarà caratterizzato termicamente durante il PAR2021, linea di attività 2.15, utilizzando l'impianto sperimentale Soltec3 presente in ENEA Casaccia.

4 Riferimenti bibliografici

- 1 Adio Miliozzi, Daniele Nicolini, Analisi numerica e analisi tecnico-economica del dispositivo di accumulo termico a calore latente finalizzate alla sua ottimizzazione, Report RdS_PTR2020_183

5 Abbreviazioni ed acronimi

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