



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi collegati in serie e/o in parallelo. Analisi dei costi per l'elemento ottimizzato e per un modulo composto da più elementi

Adio Miliozzi

PROGETTAZIONE PRELIMINARE DI UN MODULO DI ACCUMULO TERMICO CONTENENTE PIÙ ELEMENTI COLLEGATI IN SERIE E/O IN PARALLELO. ANALISI DEI COSTI PER L'ELEMENTO OTTIMIZZATO E PER UN MODULO COMPOSTO DA PIÙ ELEMENTI.

Adio Miliozzi

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: 1

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

Pacco di lavoro: 2 Accumulo termico

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

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 PROGETTAZIONE PRELIMINARE DI UN MODULO DI ACCUMULO TERMICO	6
2.1 L'ELEMENTO BASE DI ACCUMULO TERMICO.....	6
2.2 IL MODULO DI ACCUMULO TERMICO	8
2.2.1 Il "container".....	8
2.2.2 Dimensionamento del coibente	8
2.2.3 Layout del modulo.....	9
3 ANALISI DEI COSTI DEL MODULO LH02	12
3.1 COSTO DI UN ELEMENTI BASE	12
3.1.1 Il mezzo di accumulo	12
3.1.2 Lo scambiatore.....	12
3.1.3 Il contenitore	12
3.1.4 Fluido termovettore (HTF).....	13
3.1.5 Previsione di costo dell'elemento base	13
3.2 COSTO DI UN MODULO	13
3.2.1 Il coibente.....	13
3.2.2 Il container	13
3.2.3 Tubazioni e raccordi	14
3.2.4 Controllo, strumentazione e componenti elettrici.....	14
3.2.5 Contingency	14
3.2.6 Previsione di costo del modulo.....	14
3.3 DISCUSSIONE.....	14
4 CONCLUSIONI.....	16
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	17
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	17

Sommario

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.15 del PAR2020 relativa alla "Caratterizzazione prototipo ottimizzato, progettazione preliminare e analisi costi di sistema di più elementi". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power-to-gas, e relative interfacce con le reti", afferente al PAR2021 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE 2019-2021.

Partendo dal progetto di un elemento base di accumulo termico a calore latente denominato LH02, linea di attività LA2.7, di capacità termica nominale pari a 20 kWh, progettato e realizzato dalla Nuova STEIM di Narni (TR) e caratterizzato termicamente in ENEA Casaccia utilizzando l'impianto sperimentale Soltec3, si è eseguita la progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico a calore latente, funzionante ad una temperatura operativa compresa tra i 200°C ed i 280°C.

Tale modulo è costituito da un insieme di 25 elementi base di accumulo (5 linee in parallelo con 5 elementi base in serie ognuna), di capacità termica nominale complessiva pari a 500 kWh, opportunamente coibentati e connessi ad un piping e a strumentazioni esterne. Tutto ciò è contenuto all'interno di un container da 20' che lo rende facilmente trasportabile ed integrabile con altri moduli a costituire un sistema di accumulo termico di maggiore dimensione. Il modulo potrà anche essere utilizzato, come batteria termica, all'interno di un distretto industriale energeticamente flessibile per raccogliere energia nei posti dove è in eccesso e trasportarla laddove è necessaria.

Una prima valutazione dei costi ha previsto un costo dell'elemento base di accumulo termico LH02 di circa 50 €/kWh ed un costo del modulo di accumulo termico LH02 di circa 74 €/kWh. Tali costi, pur essendo in linea con quelli di sistemi di accumulo termico commerciali, hanno dimostrato la possibilità di una ulteriore riduzione, che li renderebbe maggiormente competitivi, sia da un punto di vista economico (i TES attualmente in commercio costano dai 60 ai 100 €/kWh) che di compattezza (hanno una densità di energia superiore a 110 kWh/m³). Infatti, agendo sullo scambiatore (tubi alettati e spessori) e ottimizzando lo spessore del contenitore e del coibente, si potrebbe realisticamente raggiungere dei costi specifici dell'ordine dei 30 €/kWh per l'elemento base e 60 €/kWh per l'intero modulo.

Con quanto sopra esposto si chiude il lavoro di sviluppo e sperimentazione in laboratorio di un nuovo sistema di accumulo termico a calore latente (linee di attività LA2.2/2019, LA2.7/2020 e LA2.15/2021) che sia flessibile, compatto ed economico e si sono poste le basi affinché si possa avviare una fase sperimentale dimostrativa con un sistema TES simile al reale su larga scala (composto da uno o più moduli), da validare in un ambiente rilevante (TRL7).

1 Introduzione

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.15 del PAR2020 relativa alla "Caratterizzazione prototipo ottimizzato, progettazione preliminare e analisi costi di sistema di più elementi". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti", afferente al PAR2021 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE 2019-2021.

Durante la linea di attività LA2.7 dello scorso PAR2020, si è ottimizzato e dimensionato un nuovo dispositivo per accumulo termico a calore latente (con PCM), in configurazione "tube&shell", denominato ENEA-TES-LH02 [1-4]. Successivamente, si sono prodotte le specifiche tecniche necessarie per la sua realizzazione.

Nella prima parte della linea LA2.15, il prototipo LH02 è stato progettato e realizzato dalla Nuova STEIM di Narni (TR) [5] e, quindi, installato e caratterizzato termicamente in ENEA Casaccia utilizzando l'impianto sperimentale Soltec3 [6].

Sulla base dell'esperienza maturata nella progettazione e sperimentazione di un elemento base di accumulo termico, si è, nel presente lavoro, proceduto ad una progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico, contenente più elementi base di accumulo ed alla analisi dei costi sia per l'elemento base che per il modulo stesso.

In tal modo, si sono poste le basi per una futura sperimentazione in un sistema simile al reale su larga scala (dimostrativo composto da uno o più moduli), da validare in un ambiente rilevante (TRL7).

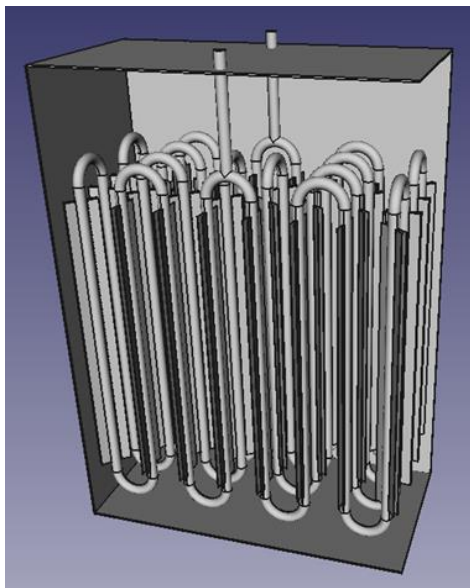


Figura 1-1 Elemento base di accumulo termico di nuovo tipo con contenitore parzialmente aperto e della vista dello scambiatore posto al suo interno [4].

In tutto questo documento, si ipotizzerà che il sistema di accumulo termico a calore latente (LHTES) presentato avrà una temperatura operativa compresa tra i 200°C ed i 280°C.

2 Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico

Un sistema completo di accumulo termico (TES) a calore latente è immaginato essere costituito da una serie di moduli, di designata capacità termica, connessi in parallelo.

Ogni modulo è, a sua volta, costituito da una serie di elementi base di accumulo termico collegati in serie e/o in parallelo. (Figura 2-1).

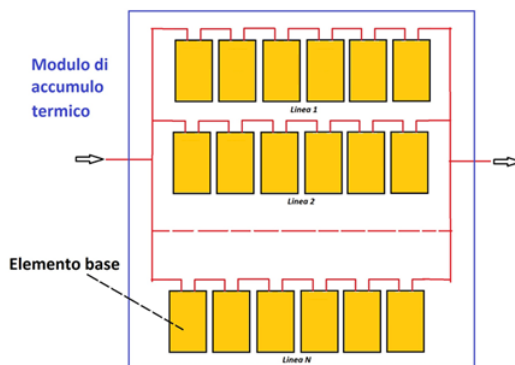


Figura 2-1 Schema di modulo di accumulo termico con N linee ad M elementi

Le N linee saranno tutte costituite da un identico numero M di elementi base, ciascuno dei quali avrà una capacità termica nominale C_i . In base a tale definizione, la capacità termica del modulo C_m sarà così determinata:

$$C_m = N * \sum_{i=1}^M C_i \quad \text{Eq. 1}$$

2.1 L'elemento base di accumulo termico

La configurazione dell'elemento base è mostrata sinteticamente in Figura 1-1 e definita in dettaglio in [4].

Esso è costituito principalmente da un tubo di scambio termico metallico in acciaio INOX AISI 304, suddiviso in due rami, e da un mezzo di accumulo termico (HSM) a cambiamento di fase, in questo caso del sale solare (SS, miscela di nitrati di sodio e potassio). I tratti ascendenti lo scambiatore sono stati alettati al fine di promuovere la conducibilità termica nel HSM. Il tutto si trova in un contenitore sempre in acciaio.

In Figura 2-2 è mostrato il contenitore di un elemento base da cui fuoriescono le porzioni di tubo di ingresso ed uscita del fluido termovettore (HTF) e lo stesso contenitore, reso parzialmente trasparente in cui è visibile lo sviluppo dello scambiatore interno. Invece, in Figura 2-3 è possibile vedere più in dettaglio, secondo due differenti viste, lo scambiatore di un elemento base. Infine, in Figura 2-4 è riportata una foto dello scambiatore realizzato dalla ditta Nuova Steim ed un'altra che mostra lo stesso scambiatore durante una prova di tenuta idraulica con aria a 10 bar.

In ogni elemento base sarà presente circa 300 kg di SS che assicurerà, negli intervalli di temperatura previsti, una capacità termica nominale per l'elemento di circa 20 kWh. Il suo peso si supera i 380 kg.

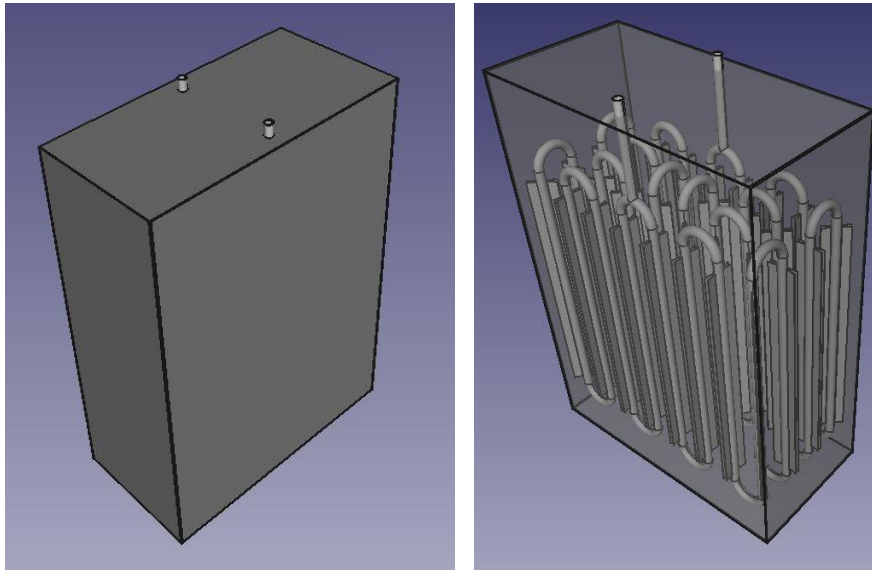


Figura 2-2 Elemento base: vista esterna del singolo contenitore con tubazioni di ingresso/uscita (sinistra) e stessa vista con contenitore in trasparenza (destra).

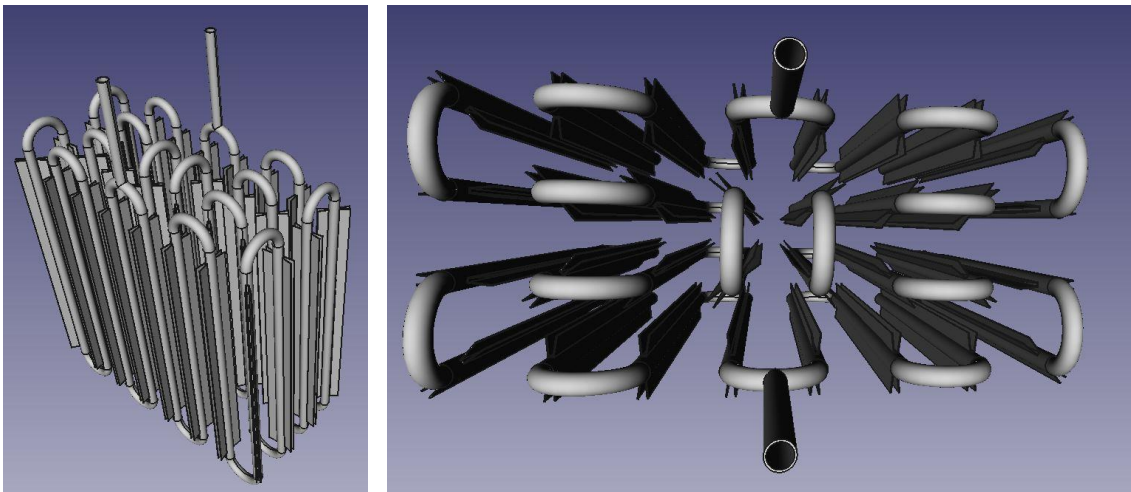


Figura 2-3 Elemento base: vista dello scambiatore sia laterale (sinistra) che dall'alto (destra).



Figura 2-4 Elemento base: vista dello scambiatore realizzato (sinistra) e sua prova di tenuta a 10 bar (destra).

2.2 Il modulo di accumulo termico

Il modulo, visto come insieme di elementi base di accumulo, può essere costituito in infiniti modi e dimensioni. Per poter effettuare una valutazione di costo si farà riferimento ad una soluzione particolare attualmente in studio.

Affinché il modulo di accumulo termico possa essere dotato di opportuna flessibilità, sia a livello di composizione di un sistema di accumulo di grandi dimensioni che di utilizzo dell'energia termica accumulata (batteria termica), si è pensato di poterlo realizzare all'interno di un contenitore facilmente trasportabile.

2.2.1 Il "container"

Ad esempio, contenitori di questa tipologia sono gli attuali "container", utilizzati per il trasporto merci sia su gomma che per nave. I container sono di diverse tipologie e dimensioni.



Figura 2-5 Singolo container (sinistra) e composizione di vari container affiancati ed impilati (destra).

Nel nostro caso, ci è sembrato adeguato l'utilizzo di un container da 20' le cui dimensioni interne sono dell'ordine di:

- Larghezza: 2310 mm
- Altezza : 2360 mm
- Lunghezza: 5860 mm

Dette dimensioni (in particolare l'altezza e la larghezza), insieme allo spessore necessario alla corretta coibentazione, determineranno il numero massimo di elementi di accumulo da utilizzare e quindi la capacità termica nominale del modulo stesso.

2.2.2 Dimensionamento del coibente

All'interno del contenitore gli elementi base andranno a costituire una opportuna matrice costituita da N righe per M colonne, realizzando un parallelogramma con una serie di pareti piane da coibentare.

Tali pareti, operanti ad una temperatura media ipotetica di 240 °C, dovranno essere coibentate per minimizzare le perdite termiche.

Il tipo di coibente qui identificato è il ProRox SL 960 della Rockwool, un pannello rigido di spessore 100 mm e dimensioni 1000x600 mm. Questo pannello ha un costo di circa 30 €/m², IVA inclusa (sito Rockprice [7]). Il ProRox SL 960 ha un valore di conducibilità nell'intervallo, di temperature considerato, abbastanza basso rispetto al costo e descritto dalla relazione:

$$k(T) = 2.8 * 10^{-7} T^2 + 6.5217 * 10^{-5} * T + 0.03594805 \quad \text{Eq. 2}$$

Per poter limitare la temperatura della parete esterna del coibente a valori inferiori ai 35 °C, come richiesto dalla normativa, e flussi di calore disperso inferiori a 50 W/m² è necessario avere uno spessore complessivo

di circa 300 mm, corrispondenti a 3 strati di pannelli. Tale dato è stato ottenuto attraverso l'applicativo RockAssistant [8] della Rockwool e verificato attraverso un semplice bilancio termico con un foglio Excel, come illustrato in **Tabella 2-1**.

Tabella 2-1 Bilancio termico di una coibentazione piana realizzata con ProRox SL 960

Strato	k (W/(m.C))	S (m)	R (m ² .C/W)	T1 (°C)	T2 (°C)	Tmed (°C)
1	0.0622	0.1	1.607591	240.00	182.31	211.15
2	0.0517	0.1	1.935216	182.31	112.86	147.58
3	0.0419	0.1	2.387351	112.86	27.18	70.02
esterno h ((W/(m ² .C))	5		0.2	27.18	20.00	
Spessore coibente		0.3				
R _{coib}	((m ² .C)/W)		5.93			
R _{tot}	((m ² .C)/W)		6.13			
flusso	(W/m ²)	35.88				
k medio	(W/(m.C))	0.0505				

Come è facile vedere, avendo impostato una temperatura ambiente di 20 °C, si ottiene una temperatura di parete di circa 27 °C ed un flusso di calore verso l'esterno inferiore ai 36 W/m².

2.2.3 Layout del modulo

Note, allora le sezioni disponibili nel container e gli spessori necessari per la coibentazione degli elementi di accumulo, questi ultimi potranno essere disposti secondo una configurazione che possa prevedere almeno 5 linee, connesse tra di loro in parallelo, ciascuna composta da 5 elementi base connessi in serie, per un totale di 25 elementi base. L'ingombro complessivo di detto insieme di elementi base sarà allora di 3.2 m di profondità, 1.6 m di larghezza e 0.9 m di altezza ed avrà una superficie esterna di scambio termico pari a 18.9 m².

Gli elementi estremi di ciascuna linea saranno collegati alle tubazioni di ingresso ed uscita del fluido termovettore. La superficie esterna verrà, infine, coibentata con uno spessore di 300 mm di coibente. L'ingombro complessivo, escluse le tubazioni esterne alla coibentazione, sarà di 3.8 m di profondità, 2.2 m di larghezza e 1.5 m di altezza.

Un modulo siffatto sarà caratterizzato da una capacità di accumulo di circa 500 kWh termici e un livello di perdite termiche quantificate in 16.7 kWh/giorno, ovvero il 3.2% della capacità termica nominale del modulo.

In **Figura 2-6** è possibile vedere una singola linea composta da 5 elementi base connessi in serie e l'insieme delle 5 linee connesse in parallelo (modulo non coibentato). Invece, in **Figura 2-7** si osserva la stessa matrice di elementi a sua volta connessa alle tubazioni di ingresso/uscita del HTF e poi coibentata sia parzialmente che e totalmente. Infine, in **Figura 2-8**, si vede quale sia l'ingombro del modulo coibentato rispetto al piano calpestabile del "container".

Come è possibile vedere, l'occupazione in larghezza è quasi completa mentre in profondità rimangono disponibili circa 2 m di spazio per poter allocare ulteriore strumentazione e accessori. Nel caso non fosse utilizzato a tal fine, lo spazio rimasto potrebbe allocare al massimo altre 3 file di elementi base arrivando a circa 800 kWh di capacità nominale per il modulo.

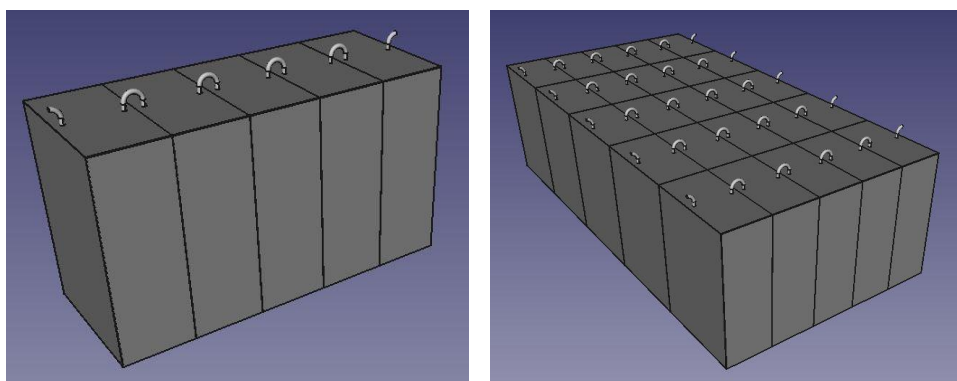


Figura 2-6 Modulo: vista di una linea con 5 elementi base connessi in serie (sinistra) e di 5 linee connessi in parallelo (destra).

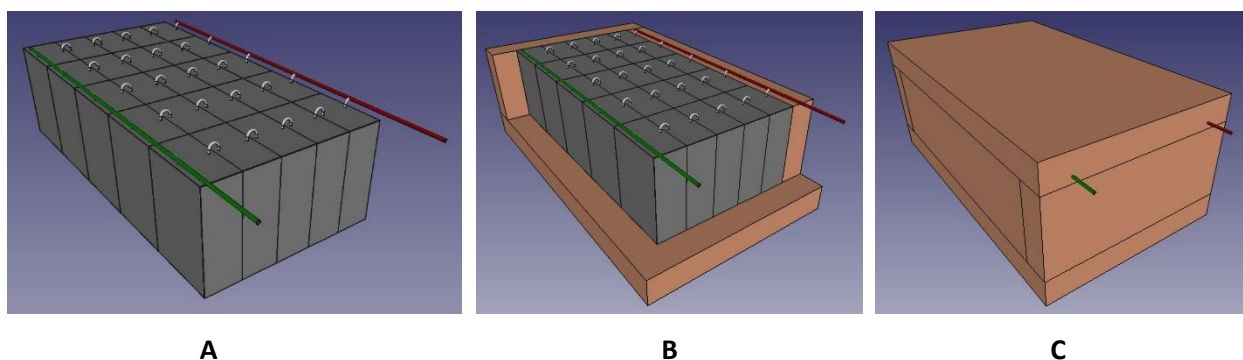


Figura 2-7 Modulo: vista della matrice di elementi connessi alle tubazioni di ingresso/uscita HTF (A) e della stessa matrice con una coibentazione parziale (B) e totale (C).

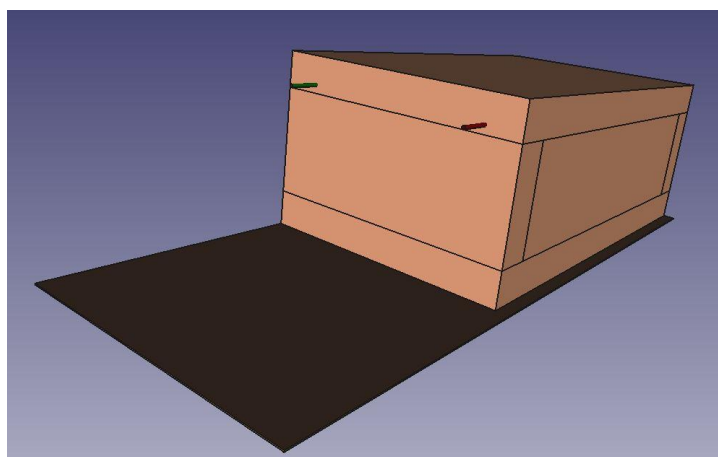


Figura 2-8 Modulo: ingombro della matrice di elementi coibentati rispetto al piano del "container".

Il peso complessivo di un modulo sarà di circa 10 tonnellate e la distribuzione dei singoli pesi è mostrata in [Figura 2-9](#). Il PCM contribuisce al peso complessivo per il 73% e il coibente per l'8%. Anche l'acciaio (scambiatore e contenitore) dà un buon contributo in peso, ben il 18%, testimoniando una presenza importante da un punto di vista funzionale ma che energeticamente è poco importante: ciò è visibile dalla [Figura 2-10](#), che riporta la ripartizione dell'energia accumulabile nel modulo.

L'acciaio contribuisce solo per il 4% della capacità termica, poco più del HTF (1%) e del coibente (2%). Ovviamente il ruolo principale per quanto concerne la capacità di accumulo lo gioca il PCM. Esso contribuisce complessivamente per circa il 93%, equamente distribuito sotto forma di calore sensibile (48%) e calore latente (45%).

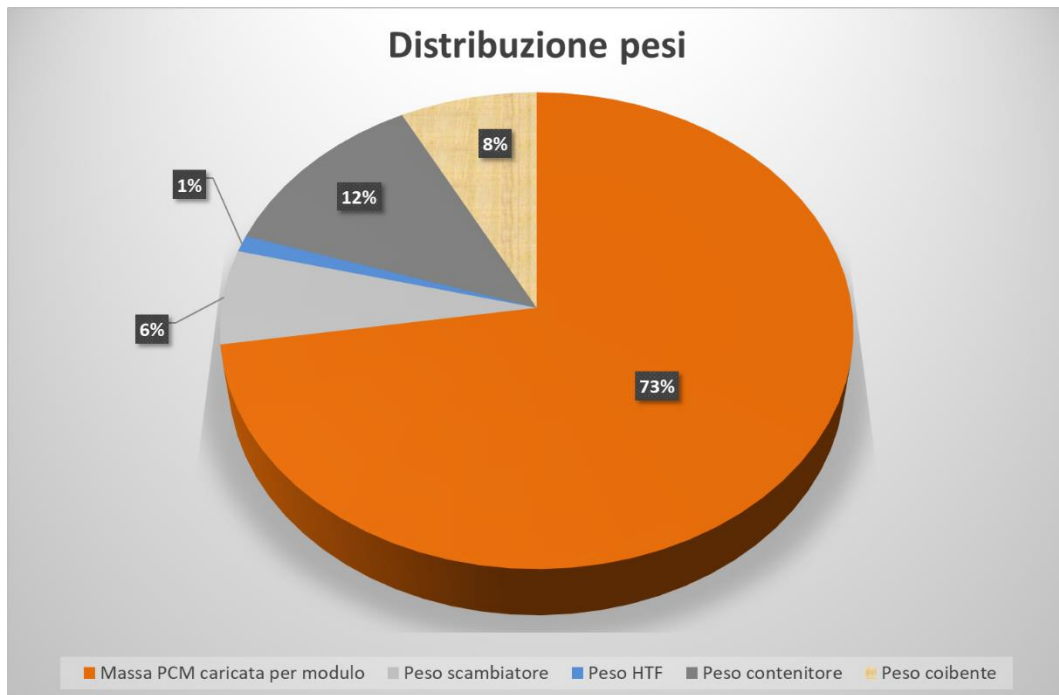


Figura 2-9 Distribuzione dei pesi tra i componenti di un modulo completo da 500 kWh.

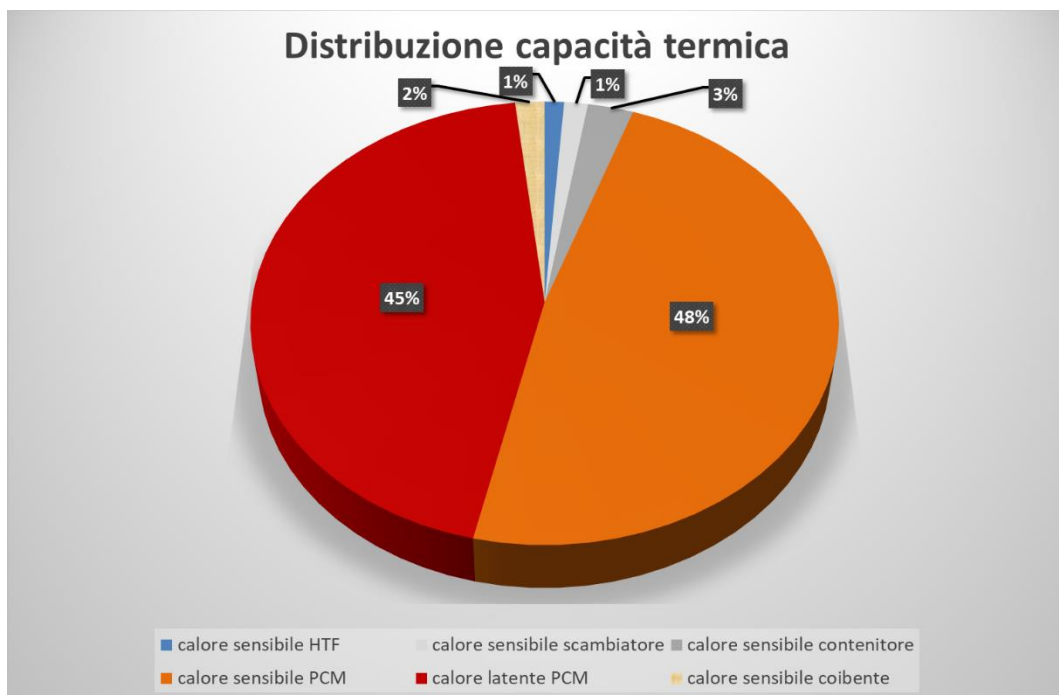


Figura 2-10 Distribuzione della capacità termica nominale tra i componenti di un modulo completo da 500 kWh.

3 Analisi dei costi del modulo LH02

Dopo aver descritto e dimensionato i vari componenti di un sistema di accumulo termico a calore latente possiamo valutarne i costi relativi. Ovviamente, si procederà per passi successivi valutando prima i costi di un singolo elemento base e, infine, quello dei moduli di accumulo, base per la realizzazione di un sistema TES di grandi dimensioni. In tutti i casi, la manodopera non verrà valutata in dettaglio ma stimata essere paragonabile al costo dei materiali utilizzati, ovvero applicando un fattore 2 a questi ultimi quando necessario.

3.1 Costo di un elementi base

Gli elementi di costo principali per un elemento base sono:

1. Il mezzo di accumulo
2. Lo scambiatore
3. Il contenitore
4. Il fluido termovettore

3.1.1 Il mezzo di accumulo

L'HSM a cambiamento di fase (PCM) utilizzato in questo ambito è il sale solare. Questo è largamente utilizzato in ENEA per lo sviluppo di nuovi sistemi solari a concentrazione ed è acquistato ad un prezzo che si aggira intorno agli 0.8 €/kg. Nel modulo proposto dovranno essere allocati circa 7500 kg di SS per un costo complessivo:

$$\text{Costo mezzo accumulo} = 7500 * 0.8 = 6000 \text{ €}$$

3.1.2 Lo scambiatore

Lo scambiatore è costituito da 32 tratti rettilinei alettati, da 32 curve a 180° e da 2 tratti rettilinei di ingresso ed uscita per l'HTF. Un tubo alettato è costituito da 4 alette di altezza 20 mm, spessore 1 mm e lunghezza 500 mm. La lunghezza complessiva di uno scambiatore è di poco inferiore ai 24 m ed è realizzato in acciaio AISI304.

Il tubo in acciaio, spazzolato o decapato, elettrounito TIG crudo e in barre da 3.0 m, è venduto su internet [9] ad un prezzo di circa 5 €/m ovvero a 5.60 €/kg. I tubi alettati dovranno essere forniti a parte (lavorazione più complessa) ed assemblati ai tratti rettilinei e curvi: ciò potrà essere portato in conto applicando un fattore di lavorazione maggiorato e pari a 3.

Essendo il peso complessivo degli scambiatori del modulo di circa 661 kg, il suo costo è:

$$\text{Costo scambiatori} = (661 * 5.60) * 3 = 11098 \text{ €}$$

3.1.3 Il contenitore

I contenitori dei singoli elementi base sono realizzati in acciaio, il cui costo lavorato è ipotizzato essere intorno ai 6 €/kg. Il peso dei contenitori è di 1268 kg, per un costo di:

$$\text{Costo contenitori} = (1280 * 3.00) * 2 = 7609 \text{ €}$$

3.1.4 Fluido termovettore (HTF)

Come fluido termovettore viene utilizzato un olio diatermico, il Therminol 66, largamente acquistato in ENEA ad un costo di circa 9 €/kg, IVA inclusa. Poiché nei sistemi indiretti l'HTF va conteggiato separatamente ed occorrendone circa 114.8 kg per riempire gli elementi base, occorre prevedere un costo di:

$$\text{Costo HTF} = 114.8 * 9.00 = 1035 \text{ €}$$

3.1.5 Previsione di costo dell'elemento base

Riassumendo quanto riportato in precedenza si ottiene il costo degli elementi base utilizzati nel modulo in esame (**Tabella 3-1**).

Tabella 3-1 Previsione di costo per gli elementi base di un modulo

Componente	Quantità	Unità	Costo Unitario	Costo (€)
<i>Mezzo di accumulo (HSM)</i>	7500.0	kg	0.80	6000.00
<i>Fluido termovettore (HTF)</i>	114.8	kg	9.00	1032.82
<i>Sistema di scambio termico</i>	661.0	kg	16.79	11097.74
<i>Recipienti di contenimento</i>	1268.1	kg	6.00	7608.79
Totale Elementi Base	25	-	1029.57	25739.35

Il costo complessivo dei 25 elementi base è di circa 25740 €, ovvero di 1030 € per elemento base. Poiché detti elementi sono in grado di accumulare circa 513 kWh termici, il loro costo specifico si aggira intorno ai 50 €/kWh di energia accumulata.

La densità di energia accumulata è di circa 111 kWh/m³.

3.2 Costo di un modulo

Al costo finale del modulo di accumulo in esame concorrono, oltre gli elementi base, anche altre voci di costo:

5. Il coibente
6. Il container
7. Le tubazioni e raccordi
8. Controllo, strumentazione e componenti elettrici
9. Spese contingenti (Contingency)

3.2.1 Il coibente

Come detto in precedenza, la coibentazione è pensata essere realizzata con pannelli Prorox SL 960 di spessore 100 mm e densità 100 kg/m³. Il costo di questi pannelli è di 30.20 €/m², IVA inclusa, ovvero a 3.02 €/kg. Essendo il peso complessivo del coibente pari a 793 kg ed essendo necessaria una sua lavorazione, il costo stimato è:

$$\text{Costo coibentazione} = (793 * 30.20) * 2 = 4792 \text{ €}$$

3.2.2 Il container

Per il container (Struttura di supporto del modulo) si è estrapolato un costo ipotetico mediando i valori trovati su alcuni siti specializzati nella vendita di container commerciali da 20' per trasporto merci:

$$\text{Costo container} = 2200 \text{ €}$$

3.2.3 Tubazioni e raccordi

Per valutare le tubazioni, le valvole ed i raccordi necessari al modulo, oltre quelli citati, è consigliato prendere [10] circa il 3% del costo dei materiali del sistema di accumulo esclusa la coibentazione (ovvero il costo degli elementi base:

$$\text{Costo coibentazione} = 25739.35 * 3\% = 772 \text{ €}$$

3.2.4 Controllo, strumentazione e componenti elettrici

In questa voce dovrebbero essere compresi 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 e tutti quei componenti elettrici necessari ad alimentare il sistema TES (quadri elettrici, cavi, convertitori, batterie, ...).

Per la sua valutazione è consigliato prendere [10] circa il 7% del costo dei materiali del sistema di accumulo esclusa la coibentazione (ovvero il costo degli elementi base:

$$\text{Costo controllo} = 25739.35 * 7\% = 1802 \text{ €}$$

3.2.5 Contingency

In questa voce dovrebbero essere compresi tutti i costi accessori, quali, ad esempio, la progettazione. del costo complessivo.

Per la sua valutazione è consigliato prendere [10] circa il 7% del costo complessivo (somma dei precedenti):

$$\text{Costo contingency} = 35304.80 * 7\% = 2471 \text{ €}$$

3.2.6 Previsione di costo del modulo

Riassumendo quanto riportato in precedenza si ottiene il costo di moduli di accumulo termico LH02 in esame ([Tabella 3-2](#)).

Tabella 3-2 Previsione di costo di un modulo di accumulo termico LH02

Componente	Quantità	Unità	Costo Unitario	Costo (€)
Elementi base	25	-	1029.57	25739.35
Sistema di isolamento termico	793.2	kg	6.04	4791.56
Container	1.0	u	2200	2200.00
Tubazioni e raccordi	25739.3	Euro	3%	772.18
Controllo, strum. e comp.i elettrici	25739.3	Euro	7%	1801.75
Contingency	35304.8	Euro	7%	2471.34
Totale Modulo				37776.19

Il costo complessivo di un modulo di accumulo termico del tipo in esame è di circa 37776 €. Poiché la sua capacità termica nominale è di circa 513 kWh termici, il suo costo specifico si aggira intorno ai 74 €/kWh di energia accumulata.

3.3 Discussione

Quanto precedentemente riportato ci fornisce una previsione di costo per il singolo elemento base di circa 1030 € e per un modulo di accumulo termico da 500 kWh (25 elementi) di circa 38000 €. Se consideriamo il solo elemento base il costo specifico sarebbe di 50 €/kWh, dato perfettamente in linea con quello dei sistemi di accumulo attualmente commercializzati.

Per poter analizzare meglio questi costi occorre ripartire il contributo delle varie voci, come fatti in [Figura 3-1](#).

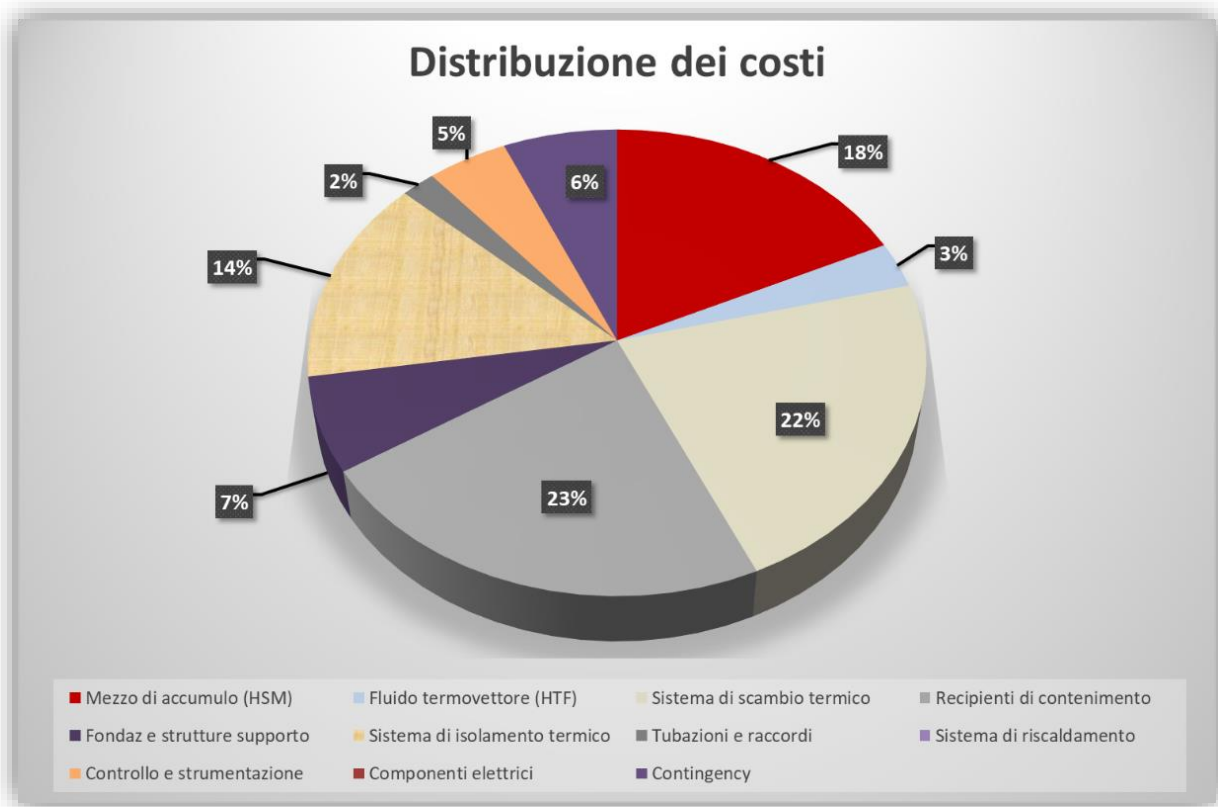


Figura 3-1 Distribuzione delle varie voci di costo per un modulo completo da 500 kWh.

Da questa si evince che il mezzo di accumulo, cuore del modulo di accumulo termico contribuisce al costo complessivo solo per il 18%. Notevole è, invece, il contributo dell'acciaio degli elementi base, circa il 45% del costo totale ripartito tra il sistema di scambio termico a tubi alettati (22%) e il contenitore (23%).

I tubi alettati dello scambiatore costituiscono sicuramente un elemento di costo importante, non solo per la maggiore quantità di materiale delle alette ma anche per la complessità della lavorazione. Se le problematiche relative alla promozione della conducibilità fossero ignorate o compensate in altro modo si potrebbe utilizzare semplicemente uno scambiatore a tubi lisci: ciò ridurrebbe il costo specifico dell'elemento base a 38 €/kWh (59 €/kWh quello del modulo, portandone il contributo ad appena il 15%).

Ulteriori miglioramenti si potrebbero ottenere "ottimizzando" gli spessori del coibente (ammettendo delle perdite leggermente superiori), degli stessi scambiatori e, soprattutto dei contenitori.

E', allora, realistico pensare di raggiungere dei costi specifici per l'elemento base dell'ordine dei 30 €/kWh. Si ricorda che il costo specifico dei sistemi di accumulo attualmente in commercio va dai 60 ai 100 €/kWh.

4 Conclusioni

In questo lavoro si è eseguita, partendo dal progetto di un elemento base denominato LH02 di capacità termica nominale pari a 20 kWh[4], la progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico a calore latente, funzionante ad una temperatura operativa compresa tra i 200°C ed i 280°C.

Il modulo in questione è costituito da un insieme di 25 elementi base di accumulo (5 linee in parallelo ognuna delle quali ha 5 elementi base connessi in serie), di capacità termica nominale complessiva pari a 500 kWh, opportunamente coibentati e connessi ad un piping e a strumentazioni esterne. Tutto ciò è contenuto all'interno di un container da 20' che lo rende facilmente trasportabile ed integrabile con altri moduli a costituire un sistema di accumulo termico di maggiore dimensione.

Tale modulo potrà anche essere utilizzato, come batteria termica, all'interno di un distretto industriale energeticamente flessibile per raccogliere energia nei posti dove è in eccesso e trasportarla laddove è necessaria.

Una prima valutazione dei costi ha previsto un costo dell'elemento base di accumulo termico LH02 di circa 50 €/kWh ed un costo del modulo di accumulo termico LH02 di circa 74 €/kWh.

Tali costi, pur essendo in linea con quelli di sistemi di accumulo termico commerciali, hanno dimostrato la possibilità di una ulteriore riduzione, che li renderebbe maggiormente competitivi, sia da un punto di vista economico (i TES attualmente in commercio costano dai 60 ai 100 €/kWh) che di compattezza (hanno una densità di energia superiore a 110 kWh/m³).

Infatti, agendo sullo scambiatore (tubi alettati e spessori) e ottimizzando lo spessore del contenitore e del coibente, si potrebbe realisticamente raggiungere dei costi specifici dell'ordine dei 30 €/kWh per l'elemento base e 60 €/kWh per l'intero modulo.

Con quanto sopra esposto si chiude il lavoro di sviluppo e sperimentazione in laboratorio di un nuovo sistema di accumulo termico a calore latente (linee di attività LA2.2/2019, LA2.7/2020 e LA2.15/2021) che sia flessibile, compatto ed economico e si sono poste le basi affinché si possa avviare una fase sperimentale dimostrativa con un sistema TES simile al reale su larga scala (composto da uno o più moduli), da validare in un ambiente rilevante (TRL7).

Riferimenti bibliografici

- 1 A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Mazzei, D. Nicolini, Caratterizzazione termica di un prototipo LHTES modulare con l'uso dell'impianto sperimentale Solteca3. Analisi ed interpretazione dei dati sperimentali, Report RdS/PTR2019/122
- 2 D. Nicolini, A. Miliozzi, Sviluppo di un modello numerico semplificato per la valutazione delle prestazioni termiche di LHTES, Report RdS/PTR2019/123
- 3 A- Miliozzi, D. Nicolini, Analisi numerica e analisi tecnico-economica del dispositivo di accumulo termico a calore latente finalizzate alla sua ottimizzazione, Rds_PTR2020_183
- 4 A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore, Dimensionamento e progettazione di un prototipo ottimizzato di accumulo termico modulare a calore latente, Rds_PTR2020_184
- 5 A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore, Realizzazione di un prototipo ottimizzato di accumulo termico modulare a calore latente, Rds/PTR2021/263
- 6 A. Miliozzi, D. Nicolini, R. Liberatore, G. Napoli, G. Giorgi, Caratterizzazione termica del prototipo ottimizzato e analisi dei dati sperimentali. Confronto con il primo prototipo, Report RdS/PTR2021/264
- 7 Rockprice - <https://rockprice-rti.rockwool.com/>
- 8 Rockassist - <https://rockassist.com/>
- 9 Inox Forniture <https://www.inoxforniture.it/tubo-tondo-aisi-304.html>
- 10 G. Glatzmaier, Developing a Cost Model and Methodology to Estimate Capital Costs for Thermal Energy Storage, Technical Report, NREL/TP-5500-53066, December 2011

Abbreviazioni ed acronimi

PAR	Piano Annuale di Ricerca
TES	Thermal Energy Storage
LHTES	Latent Heat TES
PCM	Phase Change Material
HTF	Heat Transfer Fluid
HSM	Heat Storage Medium