

## SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO AD ALTA TEMPERATURA

Mauro Vignolini

Già Responsabile dell'Unità Ricerca e Sviluppo del Progetto Solare Termodinamico dell'ENEA

### Sommario

Storicamente il progetto Archimede ideato dal Nobel Carlo Rubbia e realizzato da ENEA ed ENEL a Priolo in Sicilia ha contribuito a rilanciare a livello mondiale le ricerche sull'immagazzinamento dell'energia solare termica con sali fusi e ad aprire la strada, per la prima volta al mondo, all'uso degli stessi nei ricevitori o caldaie lineari o tubolari.

Un altro importante contributo italiano allo sviluppo del solare termodinamico che ha indotto centri di ricerca e imprese di tutto il mondo a varare innovativi programmi nel campo.

In Italia è impegnata nello sviluppo di impianti a sali fusi la società Archimede Solar Energy del Gruppo Angelantoni .

Questa relazione illustra i sistemi di accumulo ad alta temperatura.

### 1 Accumulo di energia termica

La fornitura di energia elettrica di un impianto solare termico è variabile, in funzione del tempo e delle condizioni meteorologiche. Per mitigare le variazioni legate all'irraggiamento solare e per venire incontro alla domanda di picco, il sistema richiede la presenza di un accumulo di energia (Figura 1).

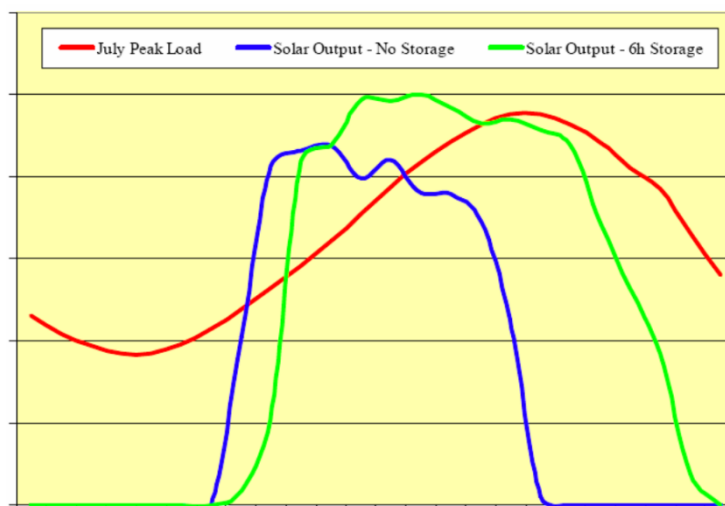


Figura 1 – Carico di picco e output di un sistema solare per una tipica giornata estiva

Il vantaggio di un impianto solare termico è di poter accumulare direttamente il calore. Questa condizione è la più conveniente da un punto di vista termico ed economico. Infatti, la presenza di un accumulo a basso costo è la chiave tecnologica necessaria per il successo futuro delle tecnologie solari.

## 2 Criteri di progetto

Una questione chiave nel progetto di un sistema di accumulo di energia termica è la sua capacità termica, ovvero la sua quantità di energia che può essere accumulata e fornita.

La selezione di un sistema appropriato dipende da diverse considerazioni, in particolare dal rapporto costo-benefici.

Il costo di un sistema TES (Thermal Energy Storage) dipende principalmente dai seguenti elementi:

- Il materiale di accumulo;
- Lo scambiatore di calore;
- Lo spazio e/o il contenimento per l'accumulo.

Da un punto di vista tecnico, gli elementi cruciali sono:

- L'alta densità di energia (per unità di massa o di volume) nel materiale di accumulo;
- La buona capacità di trasferimento di calore tra fluido termovettore (HTF) e mezzo di accumulo;
- La stabilità meccanica e chimica del materiale di accumulo;
- La compatibilità tra fluido termovettore, scambiatore di calore e/o mezzo di accumulo;
- La completa reversibilità del processo per un gran numero di cicli carico/scarico;
- Le ridotte perdite termiche;
- La facilità di controllo.

Tutti questi fattori debbono essere presi in considerazione quando si decide la tipologia e si progetta un accumulo termico.

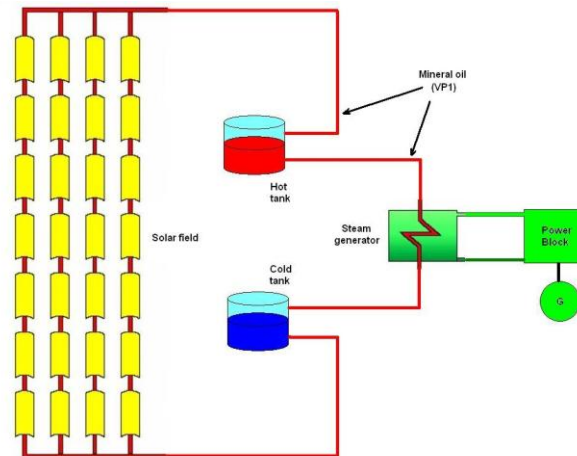
## 3 Evoluzione storica dell'accumulo termico

I primi concetti di impianti CSP consistevano di un campo solare sovradimensionato utilizzando olio minerale o sintetico come HTF e un sistema di accumulo attivo/diretto a due tanche (Figura ).

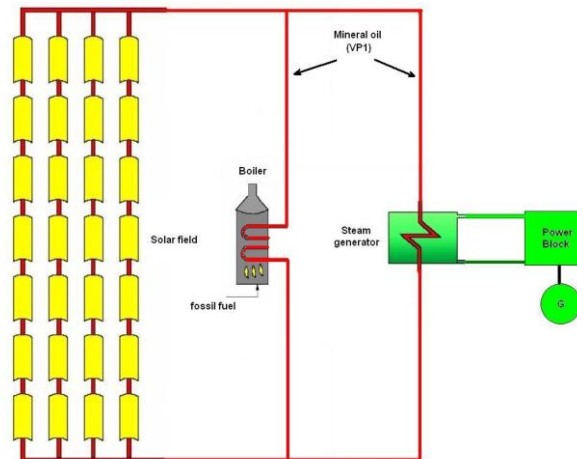
L'olio minerale, VP1, per effettuare l'accumulo è risultato essere poco indicato poiché molto costoso e, inoltre, consentendo un salto di temperatura ridotto (da 200 a 400°C), richiede grandi quantità.

Per eliminare tale problema si è pensato di sostituire il sistema di accumulo con una caldaia a combustibile fossile per integrare in caso di insufficiente insolazione (Figura ).

Questo tipo di concetto ha l'inconveniente di essere inquinante (emissioni di CO<sub>2</sub>) e costoso (combustibile fossile).



*Figura 2 – Impianto con TES diretto a 2 tanche a olio minerale*



*Figura 3 – Impianto senza TES ed integrazione a combustibile fossile*

Una possibile soluzione è stata quella di passare a un TES ad accumulo indiretto che utilizzi un mezzo di accumulo a basso costo, come ad esempio, i sali fusi. In tal caso occorre introdurre uno scambiatore di calore (HX) olio/sali fusi (Figura 3).

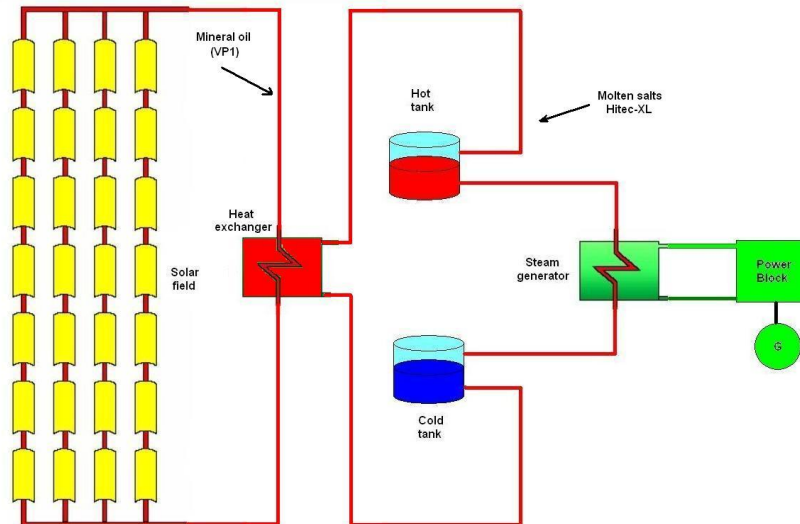


Figura 3 – Impianto con TES indiretto a 2 tanche a olio minerale e sali fusi

Tale concetto presenta due problemi:

1. l'olio non permette di avere temperature superiori a 400-450 °C. Ciò da un lato non consente di ottenere rendimenti elevati (~37%) e dall'altro limita il salto termico a circa 200-250 °C con la conseguenza di richiedere grandi volumi per l'accumulo.
2. lo scambiatore di calore olio/sali fusi è un elemento costoso e va progettato con cura a causa di problemi di sicurezza (il sale nitrato a contatto con i prodotti organici può dar luogo a combustione e/o esplosione).

Per oltrepassare detti problemi è possibile ricorrere ad un sale fuso utilizzandolo sia come HTF che come mezzo di accumulo.

Il sale è:

1. meno caro dell'olio e stabile fino a temperature oltre i 500 °C. Si incrementa il salto termico, riducendo così i volumi del TESS, e il rendimento (~40%).
2. l'accumulo, essendo di tipo diretto non necessita di HX.

Il tracciamento anti-congelamento è un elemento di costo che mitiga i vantaggi economici. Per il sistema di accumulo termico tale problematica è molto meno sentita (Figura ).

La proposta ENEA è quella di usare nitrati di sodio e potassio. Con questi sali, che congelano a 230 °C e restano stabili fino a 600 °C, il problema del congelamento è maggiormente sentito ma presentano altri vantaggi:

- i nitrati sono meno costosi degli Hitec-XL;
- la temperatura massima può essere portata a circa 550 °C incrementando ulteriormente il rendimento del ciclo di Rankine;
- il salto termico è incrementato con riduzione dei volumi di accumulo.

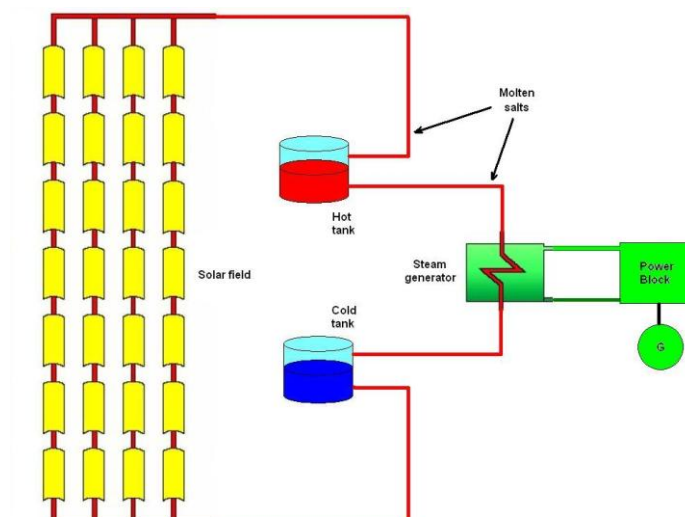


Figura 5 – Impianto con TES diretto a 2 tanche a sali fusi

#### 4 Il concetto ENEA di accumulo termico

L'ENEA ha sviluppato un concetto innovativo di impianto solare termodinamico che utilizzava sia come fluido termovettore che come mezzo di accumulo termico sali fusi (miscela eutettica di nitrati). Di conseguenza, si è puntato su un concetto di accumulo a sali fusi a due tanche di tipo attivo/diretto in cui la tanca fredda opera ad una temperatura di 290 °C e quella calda di 550 °C. Tale concetto di impianto, e quindi di accumulo, è stata la base per lo sviluppo del Progetto "Archimede".



Figura 6 – Ricostruzione fotografica dell'impianto Archimede

Di seguito sono riassunte e focalizzate le specifiche tecniche poste alla base della progettazione del sistema di accumulo termico a sali fusi studiato in questo ambito.

In particolare le specifiche progettuali sono:

1. il sistema di accumulo deve essere composto da due serbatoi distinti. Il primo deve svolgere la funzione di raccogliere, nelle normali condizioni di esercizio dell'impianto solare, i sali fusi in uscita dal campo specchi; nel secondo invece si riversano i sali fusi freddi una volta usciti dal generatore di vapore (GVS);
2. la temperatura dei sali fusi all'uscita dal campo specchi è pari a 550°C;
3. in condizioni nominali di esercizio, la temperatura dei sali fusi in uscita dal GVS è pari a 290°C;
4. la capacità termica del sistema di accumulo deve essere pari a circa 8 ore;
5. il sistema di accumulo deve possedere una vita utile pari a 25 anni.

## 5 Serbatoio ad alta temperatura

Nel serbatoio ad alta temperatura vengono accumulati i sali a 550°C in uscita dal campo solare che sono poi avviati successivamente al GVS.

Nel dimensionamento del serbatoio si è puntato ad una minimizzazione del costo complessivo nel rispetto di alcuni vincoli tecnologici. Tale costo comprende la realizzazione del serbatoio, l'acquisto dei relativi materiali e le dispersioni termiche nell'ambiente a causa dell'imperfetto isolamento termico.

Dopo la valutazione comparativa di alcune soluzioni alternative, la configurazione costruttiva scelta per il serbatoio è risultata la seguente (muovendosi dall'interno verso l'esterno orizzontalmente):

- camicia in acciaio inossidabile AISI 321H corrugata trasversalmente e longitudinalmente;
- un rivestimento in mattoni refrattari isolanti montati tramite opportuna malta refrattaria su opportune mensole di scarico solidali alla parete interna del serbatoio;
- il mantello composto di lamiere in acciaio al carbonio SA-516 Gr-70;
- coibentazione con materassini in fibra ceramica con relativo lamierino protettivo in alluminio.

La configurazione appena descritta consente al contempo (i) di mantenere sotto controllo la temperatura del mantello del serbatoio, (ii) di limitare le dispersioni termiche nell'ambiente e (iii) di evitare il degrado delle caratteristiche funzionali dello strato di mattoni refrattari isolanti.

Lo schema di massima del serbatoio è riportato in Figura .

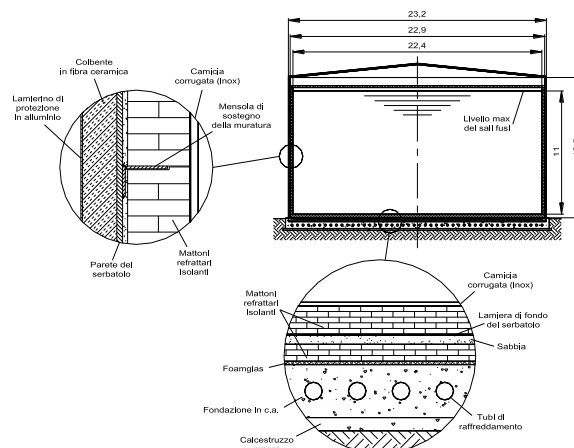


Figura 7: Schema di massima di un serbatoio di accumulo.

Grazie al procedimento di ottimizzazione della configurazione costruttiva del serbatoio si è evidenziato, come primo risultato, che, per altezze del serbatoio inferiori a 12 m, il costo complessivo del serbatoio, quello relativo ai soli materiali e alla loro messa in opera diminuisce al crescere dell'altezza del serbatoio. Tenendo conto del vincolo legato alla lunghezza massima dell'albero della pompa e alla necessità di montare la carcassa della pompa stessa all'esterno del serbatoio si è scelto un'altezza massima del battente di sale all'interno del serbatoio pari a circa 10 m.

## 6 Riscaldamento elettrico serbatoi

Ciascuno dei serbatoi di accumulo è fornito di riscaldatori elettrici ad immersione per prevenire il congelamento dei sali dovuto alle dispersioni termiche per conduzione, irraggiamento e convezione dalle superfici del serbatoio con l'ambiente esterno durante quei periodi in mancanza di apporto di energia termica solare.

Inoltre i riscaldatori devono assicurare che la temperatura del sale all'interno del sistema di accumulo possa raggiungere temperature di 350°C per il serbatoio freddo e 550 °C per quello caldo. La rampa di salita delle temperature dovrà essere determinata in funzione dei risultati di un'analisi di stress termico delle strutture di contenimento del serbatoio.

## 7 Conclusioni

Sono stati presentati i concetti dei sistemi di accumulo termico sino a oggi sviluppati, sulla base delle loro caratteristiche tecniche.

I risultati più evidenti di questa analisi sono stati i seguenti:

- la presenza dell'accumulo termico, ovvero l'estensione del fattore di utilizzo e la maggiore remuneratività dell'energia prodotta, è un elemento essenziale per rendere competitiva l'energia elettrica prodotta da fonte solare;
- per poter minimizzare i costi relativi al sistema di accumulo termico, occorre, da un lato, realizzare un concetto di tipo attivo diretto, ovvero eliminare lo scambiatore di calore dalle voci di costo, e, dall'altro, innalzare il salto termico, ovvero minimizzare le dimensioni dell'accumulo;
- la tipologia di sistema a doppia tanca, tanca fredda e tanca calda, è quello oggi maggiormente studiato e provato e, quindi, pronto per un uso commerciale. Quello a tanca unica è in proiezione più economico ma ancora ad uno stadio primitivo. In alcuni casi particolari, quando le dimensioni delle tanche sono eccessive, è possibile prendere in considerazione sistemi multi-tanca, sebbene sia consigliato non superare le 3 tanche a causa del maggiore costo d'impianto;
- il mezzo di accumulo più indicato per poter essere sia fluido termovettore che mezzo di accumulo sono i sali fusi;
- i "sali fusi" da un lato consentono di ottenere un salto termico dell'ordine dei 270°C (tipicamente tra 290 e 560 °C) ma dall'altro implicano la risoluzione di eventuali problematiche di congelamento, soprattutto lato campo solare, in conseguenza dell'elevato punto di congelamento (circa 220°C);

- numerosi studi effettuati hanno mostrato che il costo di un sistema di accumulo è funzione della durata del rilascio della energia accumulata: i sistemi più economici dovrebbero avere capacità comprese tra le 9 e le 12 ore;
- gli attuali concetti di accumulo, di tipo indiretto, mostrano costi variabili tra i 30 ed i 40 \$/kWh. Per sistemi di tipo indiretto ma utilizzando sali fusi di tipo Hitec o Hitec XL mostrano costi che si aggirano intorno ai 25-30 \$/kWh. La soluzione studiata da ENEA/ENEL, di tipo indiretto ma con “nitrati di sodio e potassio”, potrebbe attestarsi su di un costo di circa 21 \$/kWh. Questo ultimo dato può essere preso come costo di riferimento per nuovi e competitivi concetti di accumulo termico;
- l’elemento di maggior costo delle tanche, soprattutto di quella calda, risulta essere il liner interno: una soluzione innovativa, in grado di ridurre il costo del componente a parità di prestazioni, costituisce uno degli obiettivi futuri per tali sistemi.

Il maggiore vantaggio di accumulare energia a più alta temperatura è il minore volume richiesto a parità di energia accumulata da cui si hanno i minori costi. Di seguito si riportano i volumi necessari per accumulare 1 MWh termico con sali fusi a due diverse temperature.

Temperatura	Volume
550 °C	5,2 m <sup>3</sup>
400 °C	11,76 m <sup>3</sup>