

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Simulazione di un impianto solare
termodinamico con accumulatore
termico»***

Tutor universitario: Prof. Pierfrancesco Brunello

Laureando: *Davide Andreatta*

Padova, 21/07/2023

Lo sfruttamento della potenza solare per la produzione di energia elettrica è un grande obiettivo dell'industria moderna.

Uno dei metodi più efficienti ed economici per produrre energia elettrica sfruttando la radiazione solare è l'adozione di impianti solari termodinamici; essi permettono l'impiego di tradizionali cicli termodinamici accoppiati ad elementi in grado di ottenere le condizioni termodinamiche necessarie al funzionamento.

La grande ciclicità e variabilità della fonte energetica pone dei freni a questa tecnologia. In questo studio si analizza una soluzione per ridurre queste problematiche.



Figura 1: concentratori solari [4]

In questo studio si analizza un accumulatore termico che utilizza una serie di sfere contenenti un materiale PCM, posto in un impianto solare termodinamico.

La simulazione prevede lo studio del funzionamento dell'impianto e dell'accumulatore mediante un'analisi agli elementi finiti.

Inoltre si propone un breve confronto con un impianto simile, privo di accumulatore termico.

Attraverso il software MATLAB si programma il codice di calcolo della simulazione.

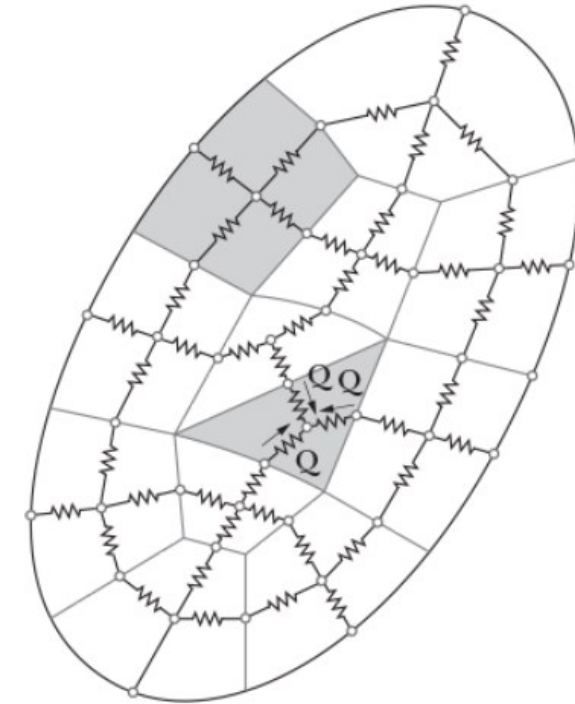
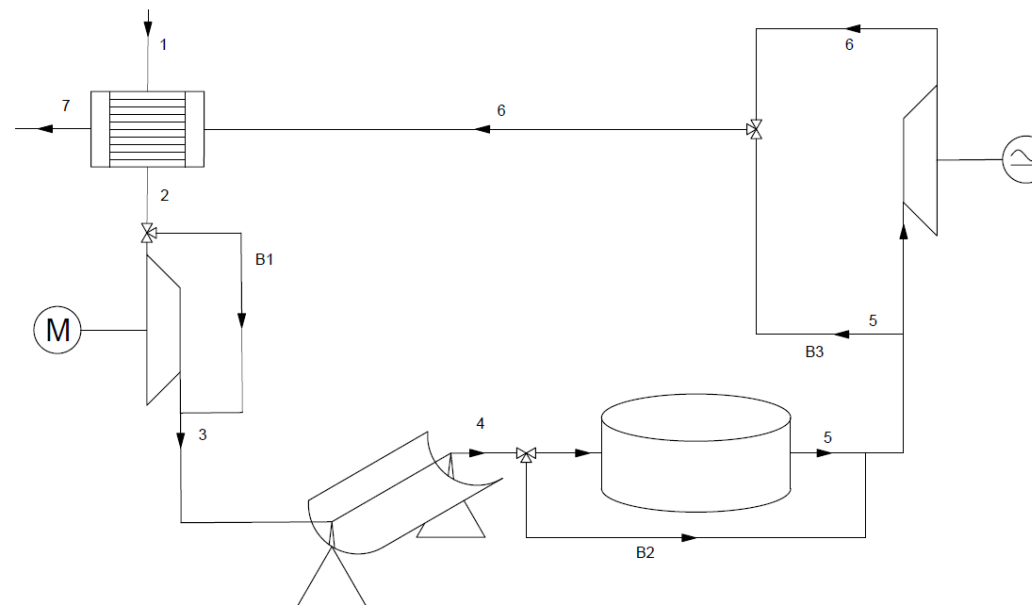
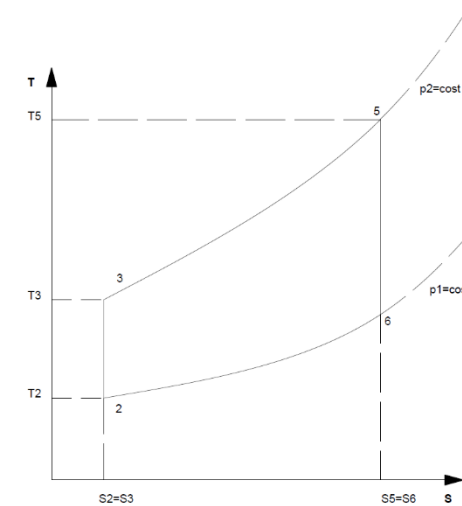


Figura 6: rappresentazione grafica del metodo degli elementi finiti [2]

L'impianto in analisi adotta un ciclo termodinamico Brayton-Joule aperto ad aria

È costituito da:

- Compressore
- Ricevitore solare
- Accumulatore termico
- Espansore
- Recuperatore termico
- Condotti di bypass

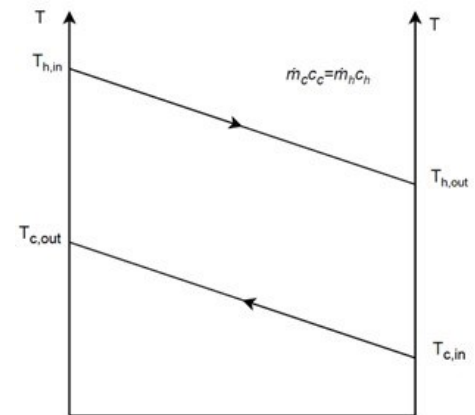


Il recuperatore termico è uno scambiatore aria-aria, a flussi incrociati. La sua funzione è di recuperare parte dell'energia contenuta nei gas all'uscita dell'espansore.

Impiegando il metodo ε -NTU, si ottengono le temperature dell'aria in uscita dallo scambiatore di calore.

Si adottano un turbocompressore e un turboespansore, poiché la massima pressione ipotizzata per l'aria è relativamente bassa.

Si ipotizza l'aria come un gas ideale, con calori specifici costanti. Le trasformazioni termodinamiche corrispondono ad una compressione e ad un'espansione adiabatiche isoentropiche.



$$\varepsilon = \frac{q_{eff}}{q_{max}} = \frac{\dot{m}_c c_c (T_1 - T_2)}{\dot{m}_{max} c_{max} (T_6 - T_1)} \quad (1.1)$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-k}{k}} \quad (1.2) \quad P_c = \dot{m} c_a (T_2 - T_3) \quad (1.3)$$

$$T_6 = T_5 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1-k}{k}} \quad (1.7) \quad P_t = \dot{m} c_a (T_5 - T_6) \quad (1.8)$$

Il ricevitore solare è l'elemento adibito alla ricezione della radiazione solare.

In questo impianto si adottano concentratori solari cilindrici-parabolici, costituiti da specchi cilindrici con sezione parabolica, adibiti alla ricezione della radiazione.

Il ricevitore è un componente formato da due tubi concentrici, separati da un'intercapedine all'interno della quale viene creato il vuoto pneumatico. Il fluido operatore scorre all'interno del tubo più interno. [3]

$$q_s = S_r * q_r \quad (1.4)$$

$$q_s = \eta_c \dot{m} c_a (T_4 - T_3) \quad (1.5)$$

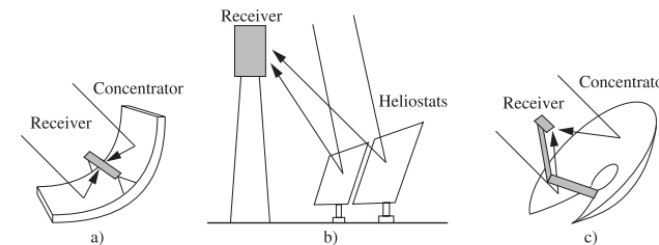


Figura 2: diversi tipi di concentratori solari [3]



Figura 3: concentratore solare cilindrico-parabolico [1]

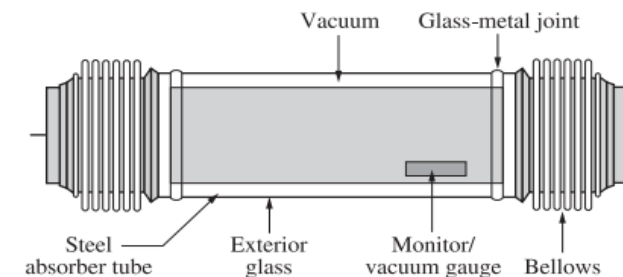


Figura 4: schema del ricevitore solare [3]

L'accumulatore termico è il componente che permette l'accumulo di energia solare sottoforma di calore. È costituito da un serbatoio adiabatico verso l'esterno, all'interno del quale sono accumulate delle sfere in materiale PCM, Phase Change Material.

Data la grande variabilità della radiazione solare durante la giornata, predisporre un accumulatore termico permette di essere indipendenti dall'irraggiamento per diverse ore.

Gli accumulatori termici più tradizionali prevedono l'utilizzo di acqua, oli minerali o al più sali fusi come stoccaggio termico. L'adozione di un gran numero di sfere in materiale PCM, permette di operare ad elevate temperature, con modeste pressioni e un unico fluido termovettore.

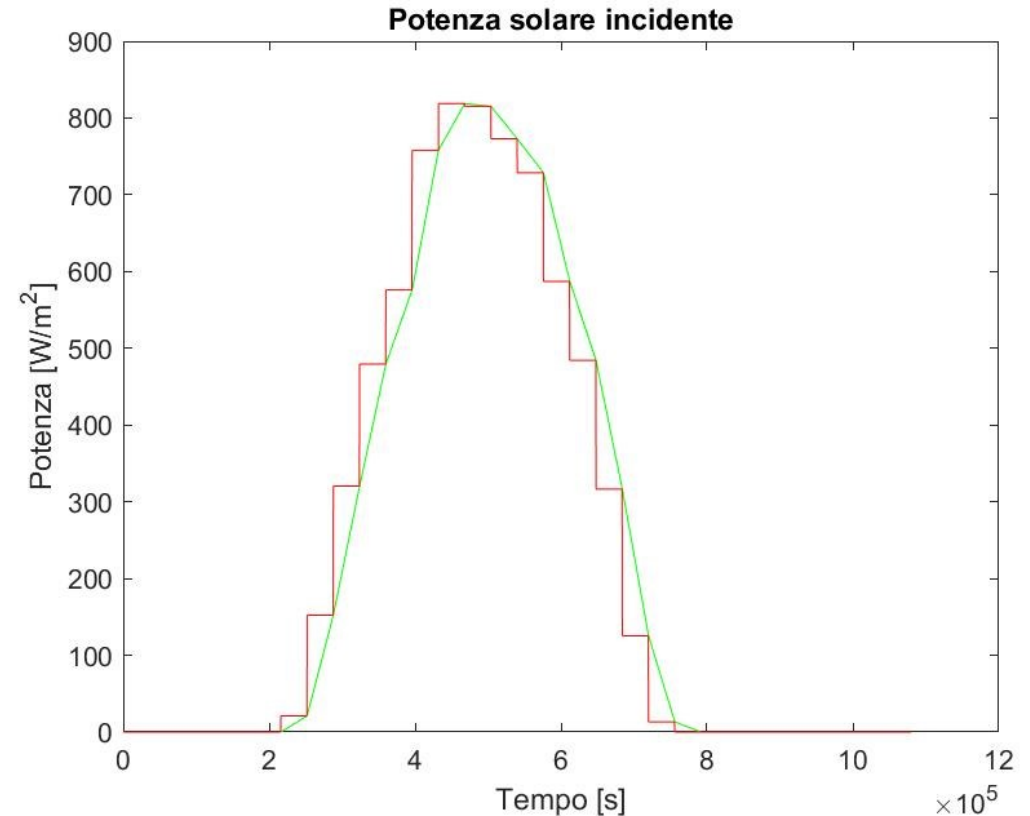
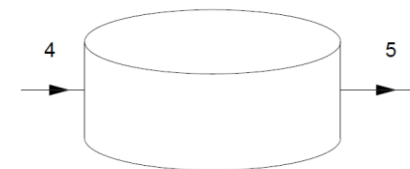


Figura 5: andamento della radiazione solare [5]



La trasmissione del calore all'interno delle sfere avviene per conduzione. Non essendo possibile risolvere algebricamente l'equazione generale della conduzione ed il postulato di Fourier, si opta per la soluzione numerica.

Nel caso in esame si è adottato il metodo del «Control Volume», il quale prevede la suddivisione spaziale del corpo, e la creazione di numerosi nodi sia superficiali che interni. Si analizzano gli scambi di calore che si instaurano tra ciascun nodo.

Per studiare i flussi di calore, si introducono le resistenze termiche: ogni nodo interno è collegato con i propri nodi superficiali, interponendo così una resistenza termica che dipende dal tipo di materiale e dalla distanza tra i nodi.

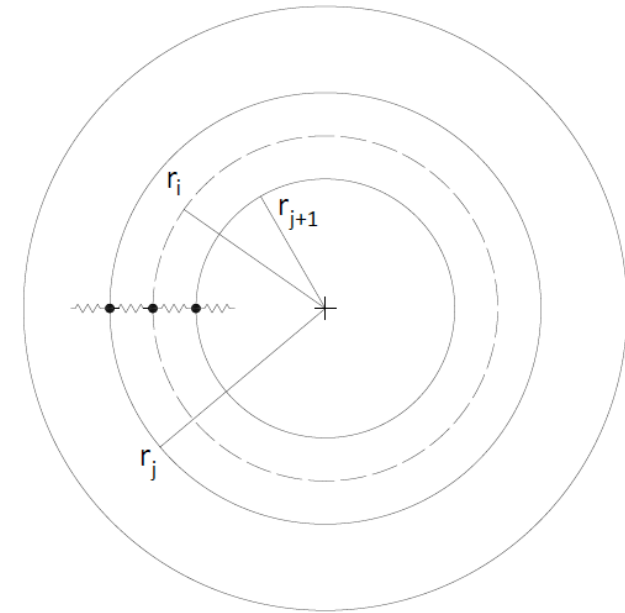


Figura 6: suddivisione spaziale e creazione delle resistenze termiche per l'*i*-esimo elemento

$$R_i = \frac{r_j - r_i}{4\pi\lambda r_i r_j} + \frac{r_i - r_{j+1}}{4\pi\lambda r_{j+1} r_j} \quad (2.8)$$

Si procede eseguendo un bilancio energetico in ciascun elemento: la differenza tra il calore entrante e quello uscente è pari all'energia immagazzinata.

Considerando l'elemento **i-esimo** in due istanti successivi, esso avrà un contenuto energetico diverso.

Durante il cambiamento di fase, l'energia assorbita sarà misurata attraverso la variazione del titolo di liquido (2.11), viceversa con una variazione di temperatura (2.9).

$$\Delta Q = Q_i - Q_o \quad (2.4)$$

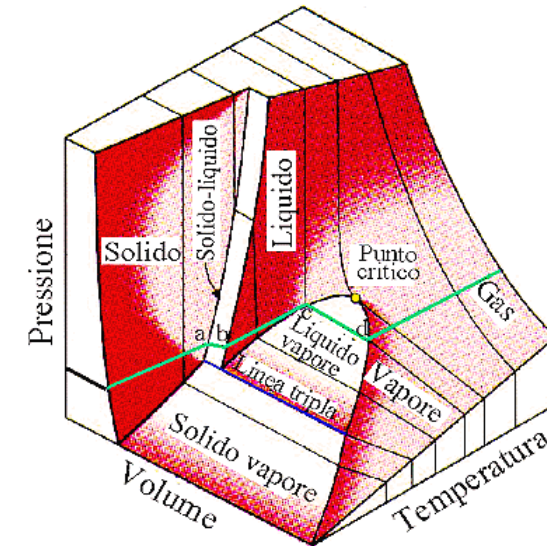


Figura 7: diagramma pVT [7]

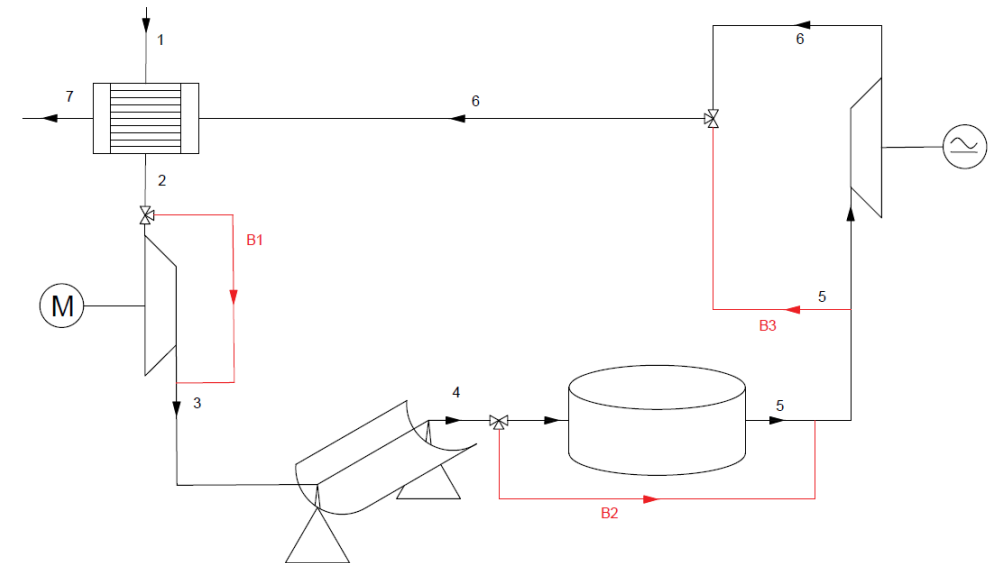
$$R_i(T_{i-1,(\tau-1)} - T_{i,(\tau-1)})t + R_i(T_{i+1,(\tau-1)} - T_{i,(\tau-1)})t = mc_p(T_{i(\tau)} - T_{i,(\tau-1)}) \quad (2.9)$$

$$R_i(T_{i-1,(\tau-1)} - T_{i,(\tau-1)})t + R_i(T_{i+1,(\tau-1)} - T_{i,(\tau-1)})t = LH * V_i(X_{i(\tau)} - X_{i(\tau-1)}) \quad (2.11)$$

La variabilità della radiazione solare e i limiti operativi del materiale all'interno dell'accumulatore termico, obbligano a imporre delle strategie di gestione.

Sono stati introdotti dei condotti di bypass, B1, B2 e B3, per deviare il flusso di aria nei diversi momenti di attività.

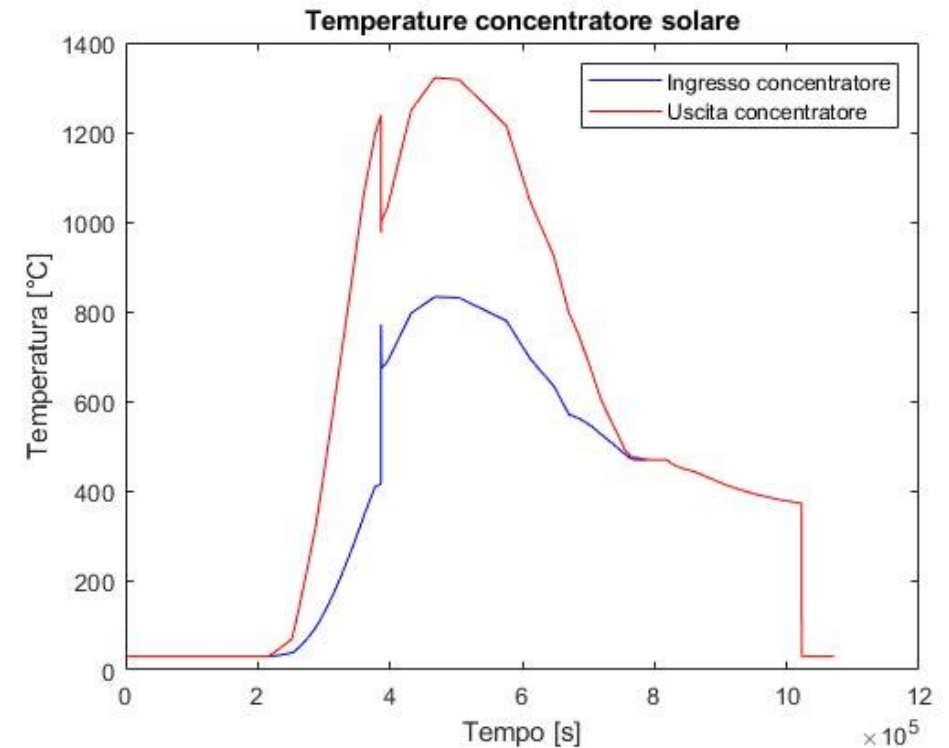
Inizialmente la radiazione non sarà intensa, quindi i bypass B1 e B3 rimangono aperti in modo che la portata d'aria non fluisca attraverso il compressore e la turbina, mentre il bypass B2 resterà chiuso. La portata d'aria è elaborata da un ventilatore per vincere le perdite di carico del circuito e sarà minore della portata nominale dell'impianto, per far raggiungere la temperatura massima all'accumulatore nel minor tempo possibile.



Nel momento in cui si raggiunge la temperatura massima operativa delle sfere, limite fissato dal costruttore, i bypass B1 e B3 vengono chiusi, compressore e turbina entrano in funzione e si apre il bypass B2.

Quando la radiazione cala di intensità e la temperatura T4 all'uscita dal concentratore solare sarà inferiore alla temperatura delle sfere, il bypass B2 sarà commutato, e l'aria passerà attraverso l'accumulatore, assorbendone il calore.

L'impianto raggiungerà una condizione di equilibrio a temperatura costante, imposta dalla temperatura di fine compressione dell'aria; successivamente, la radiazione aumenterà di intensità ed il ciclo ricomincia.



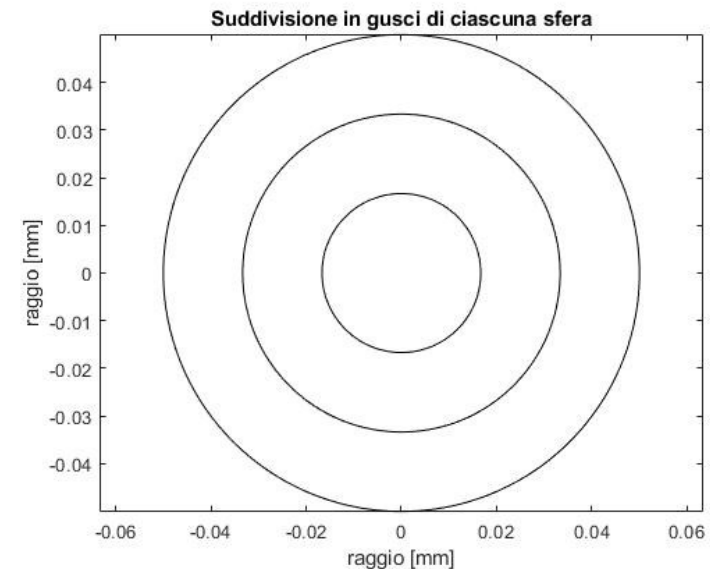
La sostanza all'interno delle sfere dell'accumulatore ha le seguenti caratteristiche fisiche [6]:

Materiale	Temperatura cambiamento di fase [°C]	Densità [kg/m ³]	Calore latente [kJ/kg]	Calore specifico [kJ/kgK]	Conduttività termica [W/mK]	Temperatura operativa massima [°C]
H640	640	2380	338	1,58	0,56	800

L'impianto ha le seguenti caratteristiche:

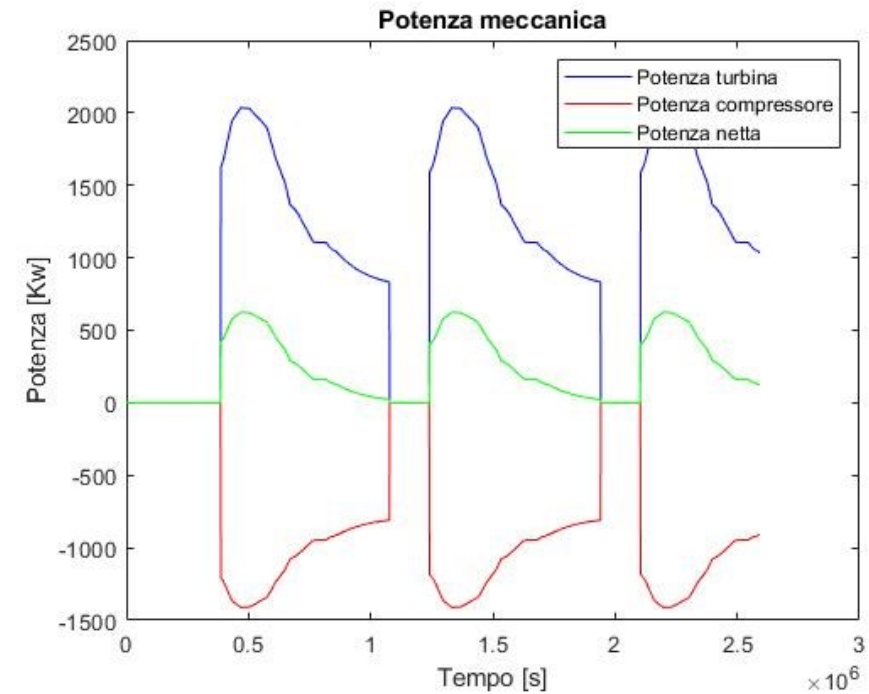
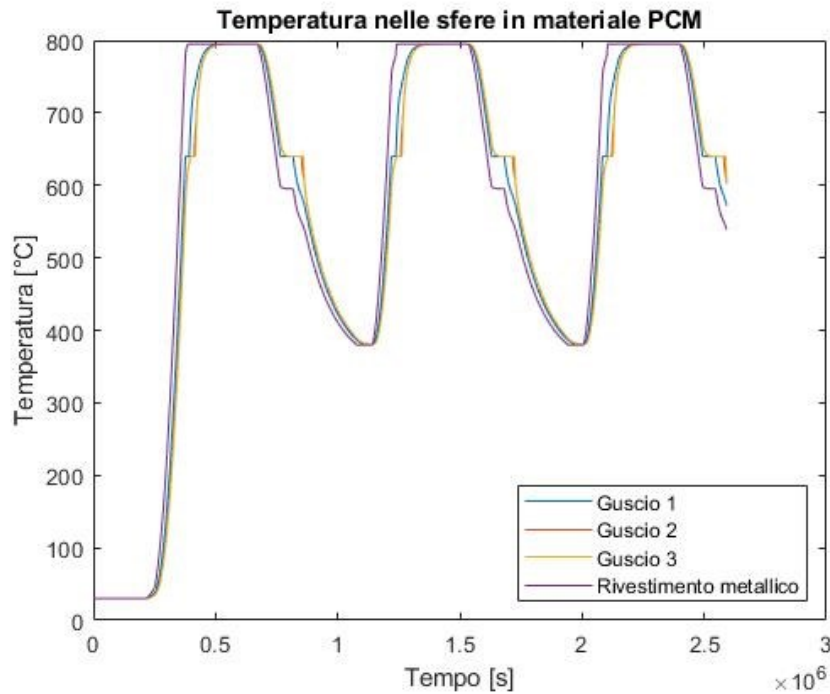
- Pressione minima: **p1=1bar**
- Pressione massima: **p2=12bar**
- Superficie del concentratore: **Sr=1500m²**
- Efficienza dello scambiatore: **ε=50%**
- Numero e diametro delle sfere: **n=5000, Da=0,102m**

Ciascuna sfera è stata suddivisa in **j=3** gusci e l'intervallo di campionamento scelto **Δτ=0,1s**.



La simulazione è stata eseguita in un periodo di tre giorni. Eseguendo un confronto con un impianto simile, che differisce per l'assenza dell'accumulatore termico, si ottengono i seguenti risultati:

Tempo di attività [h]	Periodo di produzione [h]	Potenza massima [kW]	Potenza media [kW]	Energia accumulata [kJ]
72	52,2	624	314	$7,53 \cdot 10^6$
72	48	624	332	0



La variazione della temperatura della cera risente del cambiamento di fase: nei tratti in cui almeno un elemento sta cambiando di fase, la velocità di variazione delle temperature varia in tutti gli elementi.

L'accumulatore termico ha prolungato il tempo di attività dell'impianto di oltre 4 ore. La cessione di calore da parte dell'accumulatore rende l'andamento della curva di potenza più lineare rispetto all'intervallo precedente, quando il calore veniva fornito dal sole.

Le strategie di gestione applicabili sono numerose. L'allungamento del tempo di attività può essere incrementato a discapito della potenza erogata.

1. **CLP project S.r.l.** Società CLP project. *Sito Web società CLP project*. [Online] 21 Luglio 2023. <http://www.clp-project.com/sonne/>.
2. **Brunello, Pierfrancesco.** *Lezioni di Fisica Tecnica*. Napoli : EdiSES, 2017.
3. **Sabonnadiere, Jean Claude.** Solar Thermodynamic Power Stations. *Renewables Energies*. Londra : ISTE Ltd., 2009, p. 63-102.
4. **ENEL.** Ufficio Stampa ENEL. *ENEL*. [Online] 14 Luglio 2010. <https://www.enel.com/it/media/esplora/ricerca-comunicati-stampa/press/2010/07/enel-a-priolo-inaugura-la-centrale-archimede->.
5. **JRC.** Photovoltaic Geographical Information System. *Photovoltaic Geographical Information System*. [Online] 21 Luglio 2023. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
6. **PCM Products Ltd.** Società PCM Products. *Sito Web Società PCM Products*. [Online] 21 Luglio 2023. <https://www.pcmproducts.net/>.
7. **Università di Trento.** Unitn Science. *Unitn Science*. [Online] 21 Luglio 2023. http://www.science.unitn.it/~fisica1/fisica1/appunti/termo/cap_2/cap_2_6.htm.