

Ricerca di Sistema elettrico



Materiali e componenti avanzati per impianti CSP – Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali (LA1.4)

M. De Lucia, M. Salvestroni



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

MATERIALI E COMPONENTI AVANZATI PER IMPIANTI CSP - ANALISI DEL POTENZIALE APPLICATIVO DELLA TECNOLOGIA MICRO-CSP BASATA SU SISTEMI DI TIPO MICRO-PTC PER LA GENERAZIONE DISTRIBUITA DI CALORE, ELETTRICITÀ ED ENERGIA FRIGORIFERA IN CONTESTI CIVILI E INDUSTRIALI (LA1.4)

M. De Lucia, M. Salvestroni (Università degli Studi di Firenze)

Marzo 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Linea di attività: LA1.4

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Maurizio De Lucia, Università degli Studi di Firenze (Unifi)

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 24

Mese fine effettivo: 27

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione, tra ENEA e Unifi, dal titolo: "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC, per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali, e studio progettuale di up-grade di un prototipo di sistema micro-PTC innovativo, per il suo impiego per la cogenerazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con un ciclo ORC"

Responsabile scientifico ENEA: Walter Gaggioli

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Prof. Maurizio De Lucia

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Inquadramento delle “Potenzialità&Attività”	10
7.2	Modellazione e valutazione delle “Potenzialità” della tecnologia testata&proposta ..	11
7.2.1	CASO C1	11
7.2.2	CASO C2	15
7.2.3	CASO C3- Raffrescamento	17
7.2.4	CASO C3- ORC	22
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	26
9	Pubblicazioni scientifiche	27
10	Eventi di disseminazione	28

Indice delle figure

Figura 1 - Profilo di carico giornaliero richiesto della prima utenza industriale oggetto di modellazione	11
Figura 2 - Modello TRNSYS per analisi calore di processo.....	12
Figura 3 - Andamento temperatura dei collettori PTC (T_{coll}) e temperatura media dello storage (volume TES 10 m ³) per produzione di calore di processo (fino a 160°C).....	12
Figura 4 - Profilo di carico settimanale richiesto della seconda utenza industriale oggetto di modellazione	15
Figura 5 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza industriale per produzione calore di processo (fino a 350°C).....	16
Figura 6 - Modello TRNSYS utenza residenziale.....	18
Figura 7 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza residenziale con macchina ad assorbimento	19
Figura 8 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso), caso campo solare con macchina ORC	23

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 1000 m ² superficie PTC; $U_{TES}=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	13
Tabella 2 Costi dei componenti dell'impianto con collettori m-ptc. I costi sono tratti da [4,5,6,7]. Per l'm-PTC il costo del prototipo ammonta a 400 euro/m ²	14
Tabella 3 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 1000 m ² superficie PTC; $V_{TES}=10 \text{ m}^3$; $U_{TES}=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	14
Tabella 4 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; $U_{TES}=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	16
Tabella 5 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 300 m ² superficie PTC; $V_{TES}=10 \text{ m}^3$; $U_{TES}=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	17
Tabella 6 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 108 m ² superficie PTC; $V_{TES}=30 \text{ m}^3$; $U_{TES}=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	19
Tabella 7 - Confronto LCOH differenti siti	20
Tabella 8 - Efficienza modulo fotovoltaico 21.5%, Azimut 0°, Elevazione 35°, pompa di calore aria -acqua $T_{in}=7^\circ\text{C}$ $T_{out}=12^\circ\text{C}$	21
Tabella 9 - Confronto tra i due sistemi di refrigerazione	21
Tabella 10- Confronto tra i due sistemi di refrigerazione	23

1 Risultati attesi

Nell'ambito della LA1.4 sono previste attività di modellazione numerica sul collettore parabolico lineare sviluppato dall'Università di Firenze (UniFI) denominato micro-PTC (m-PTC). La modellazione ha come obiettivo la precisa valutazione delle potenzialità del collettore per la produzione di calore a media temperatura per applicazioni industriali al fine di soddisfare la domanda di calore di processo ed in seconda battuta per applicazioni residenziali per la generazione di energia frigorifera.

I risultati attesi riguardano la stima della producibilità annua del collettore per differenti temperature di processo e differenti siti di installazione e LCOH (levelized cost of heat) del calore prodotto e cogenerazione di energia termica ed energia elettrica, analizzando il potenziale applicativo di questi sistemi nei contesti civili ed industriali che si possono trovare sul territorio italiano. L'analisi è prevista essere sviluppata a livello di macroaree (Nord, Centro, Sud/Isole). Per ciascuna di esse si prevede l'identificazione delle soluzioni impiantistiche che meglio si adattano allo specifico contesto (calore-Industriale, teleriscaldamento solare - centralizzato vs. decentralizzato, raffrescamento di edifici di notevoli dimensioni, applicazioni in settore industriale privilegiando le configurazioni impiantistiche di piccola scala tipo "mini/micro grid" corredate di accumulo di energia termica). Erano previste indagini di fattibilità tecnico-economica per alcuni casi studio di riferimento. Le valutazioni teoriche e calcoli da eseguire a mezzo di modellazione dinamiche per l'individuazione di campi di corrispondenza tra offerta tecnologica e richiesta di mercato, e all'identificazione di eventuali lacune tecnologiche e/o di barriere tecnico-economiche per consentire la diffusione sul territorio italiano.

2 Risultati ottenuti

Il presente report riporta i risultati della modellazione numerica condotta. Tale modellazione ha permesso di valutare le potenzialità del collettore parabolico lineare sviluppato dall'Università di Firenze per la produzione di calore di processo industriale, per la produzione di calore per la generazione di energia frigorifera tramite macchina ad assorbimento e di generazione di energia elettrica tramite macchina ORC. La producibilità del collettore è stata analizzata per differenti siti lungo il territorio nazionale.

Nell'ambito della presente linea di attività LA1.4 è stata valutato il potenziale applicativo dei sistemi micro-PTC in contesti civili e industriali, con particolare riferimento ad aree urbane situate nelle principali macroaree del territorio italiano (Nord, Centro, Sud/Isole); nella fattispecie, il potenziale applicativo dei sistemi micro-PTC è stato esaminato in caso d'impiego in mini/micro reti per la distribuzione di energia termica di processo/raffrescamento e cogenerazione di energia elettrica. Sono stati sviluppati schemi di processo sufficientemente dettagliati per l'analisi tecnico-economica, corredati con bilanci di energia. Attraverso modellazioni dinamiche sono state determinate le performance annuali degli impianti selezionati (MWh termico e/o elettrico prodotto) e valutato il costo del calore e/o dell'elettricità prodotti nei diversi scenari applicativi considerati.

In sintesi, i risultati della linea di attività LA1.4 sono i seguenti:

- individuazione dei settori applicativi a livello di macroaree di maggiore interesse per l'impiego della tecnologia del micro-PTC in aree fortemente antropizzate;
- verifica dell'adattabilità della tecnologia micro-PTC ad essere impiegata in connessioni con mini/micro-grid;
- stima del potenziale applicativo della tecnologia sul territorio nazionale;
- stima del impatto della tecnologia sulla potenziale riduzione dell'uso di combustibili fossili per i casi studio
- analisi della sostenibilità tecnico-economica in alcuni casi studio

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi della linea di attività LA1.4, come da capitolato vigente del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono costituiti da un report tecnico e da un’analisi (descritta e compresa nel report):

- Report: “Materiali e componenti avanzati per impianti CSP – Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali”.
- Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali del territorio italiano.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti resi disponibili nell'ambito della linea di attività LA1.4 del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" sono costituiti dal presente report e da un'analisi:

- M. De Lucia, M. Salvestroni, "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali (LA1.4)", Marzo 2024, Report RdS_PTR 22-24_PR 1.9_LA1.4.
- Nel suddetto report, come previsto, è compresa e descritta l'analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali del territorio italiano. La modellazione dinamica di impianti micro-PTC a media temperatura è stata sviluppata in ambiente TRNSYS.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la LA1.4 non sono stati riscontrati scostamenti tecnici su attività e risultati rispetto a quanto previsto nel capitolato vigente del Progetto 1.9 "Solare termodinamico".

In merito alle tempistiche di realizzazione, la posticipata conclusione della LA1.4 (conclusa a Marzo 2024 e non a Dicembre 2023) è dovuta al fatto che per l'analisi prevista, sebbene le attività riguardanti la generazione di calore con sistemi micro-PTC per soluzioni residenziali risultavano portate a termine nei tempi attesi, per la parte industriale si sono verificati limitati ritardi fondamentalmente derivanti dalla definizione di casi studio significativi in termini di range di temperature e relativa difficoltà di reperire dati affidabili per condurre valutazioni significative, ripetibili ed estendibili anche ad altri settori operanti nei range di temperature analizzate.

Per la LA1.4, infine, non ci sono stati scostamenti economici significativi.

6 Sintesi delle attività svolte

Attraverso il software TRNSYS 18 sono stati realizzati i modelli numerici degli impianti basati su collettori micro-PTC per la produzione di calore a media temperatura per applicazioni industriali e residenziali.

I modelli dinamici implementati hanno consentito di studiare in dettaglio l'andamento delle prestazioni dei collettori e degli altri componenti dell'impianto (storage, macchina ad assorbimento, ecc.) al variare della temperatura richiesta dal processo, della risorsa solare e del fabbisogno di energia termica.

I modelli hanno permesso di elaborare una stima realistica della producibilità di calore a media temperatura da parte del collettore micro-PTC per impianti caratterizzati da differenti temperature caratteristiche.

E' inoltre stato possibile stimare la potenzialità del collettore per diversi siti di installazione italiani.

La sostenibilità economica è stata condotta utilizzando metodologia LCOE e LCOH.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Inquadramento delle “Potenzialità&Attività”

I collettori parabolici lineari (PTC, parabolic trough collectors) sono la tecnologia più matura e diffusa tra i collettori solari a concentrazione. I PTC sono stati generalmente impiegati per la produzione di calore a medio/alta temperatura in impianti per la produzione di energia elettrica (CSP). Tali installazioni essendo caratterizzate da un numero elevato di collettori necessitano di grandi superfici a disposizione (in genere anche migliaia di ettari).

Tuttavia, i PTC costituiscono una tecnologia interessante per la produzione di calore di processo industriale a media temperatura ($180^{\circ}\text{C} < T < 350^{\circ}\text{C}$). Il calore di processo industriale rappresenta circa il 20% del totale del fabbisogno di energia nella UE [1].

Allo stato attuale infatti sul mercato non è presente una tecnologia a ridotto impatto ambientale capace di coprire le temperature di interesse. Tale intervallo di temperatura risulta essere ben al di fuori del campo di funzionamento dei collettori solari termici commerciali che garantiscono prestazioni accettabili soltanto fino a $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$.

Le pompe di calore a compressione per la generazione di calore a media temperatura potrebbero rappresentare una tecnologia interessante, ma al momento sono al livello di mero sviluppo prototipale.

I collettori a concentrazione, ed in particolare i PTC, pur essendo una tecnologia molto performante ed interessante per lo scopo sono stati applicati in casi limitati, a causa degli elevati ingombri e costi che non li rendono facilmente integrabili in contesti industriali.

L'Università di Firenze (UniFI) ha sviluppato un innovativo collettore parabolico lineare, denominato m-PTC, appositamente concepito per la generazione di calore a media temperatura al servizio di utenze industriali in area densamente abitate. Il collettore m-PTC ha caratteristiche geometriche differenti rispetto ai PTC standard essendo caratterizzato da dimensioni estremamente ridotte (apertura $< 0.5\text{ m}$ vs aperture $> 5\text{ m}$). In virtù degli ingombri limitati, della facile trasportabilità ed installazione nonché il peso l'uso di m-PTC risulta possibile anche sulle coperture degli edifici o in aree dove la superficie disponibile è generalmente scarsa.

Per tali motivi, il collettore micro-PTC potrebbe essere una tecnologia estremamente interessante nel campo della produzione di calore a media temperatura ($180^{\circ}\text{C} < T < 350^{\circ}\text{C}$), che costituisce una frazione rilevante della domanda totale di calore di processo [1].

Inoltre la produzione di calore a media temperatura consente di impiegare tale calore per generare energia frigorifera, attraverso macchine ad assorbimento o, eventualmente per produrre energia elettrica tramite accoppiamento con macchine ORC.

Infine oltre all'uso industriale, il collettore m-PTC può trovare impiego nel settore residenziale per raggiungere gli obiettivi di neutralità CO₂ potendo dare luogo alla produzione di energia frigorifera nonché acqua calda sanitaria (DHW) e/o di riscaldamento (SH).

Il collettore m-PTC presenta al momento prestazioni limitate alle temperature di interesse ($40\text{--}45\%$ di efficienza per $T > 180^{\circ}\text{C}$). I motivi sono diversi tra cui l'attuale coating del tubo assorbitore caratterizzato da emissività elevata nel vicino infrarosso: sono stati rilevati valori anche superiori a 15% a soli 200°C .

7.2 Modellazione e valutazione delle “Potenzialità” della tecnologia testata&proposta

Allo scopo di quantizzare le potenzialità tecnologiche sono state condotte indagini di fattibilità tecnico-economica per alcuni casi studio di riferimento rappresentativi per il panorama italiano. Le varie soluzioni elaborate sono state condotte in ambiente TRNSYS. Si tratta di un modellatore dinamico in grado di simulare impianti anche complessi quantizzando i benefici, transitori, ecc., in termini di Energia piuttosto che Potenze. Lo scopo è quello stato quello di individuare i limiti e/o i campi di corrispondenza tra offerta tecnologica e richiesta di mercato, nonché l'identificazione di eventuali lacune tecnologiche e/o di barriere tecnico-economiche che la tecnologia m-PTC deve superare per consentire una adeguata diffusione sul territorio italiano.

I dati meteo (TMY - Time Meteorological Year) utilizzati nelle simulazioni provengono dal database PV GIS Sarah [3].

Le proprietà fisiche e performances del collettore rilevate nel corso dei test condotte in ENEA (LA1.5) e i risultati dei test effettuati ad UNIFI in precedenza per la misura dell'rendimento ottico di picco; del 72% sono stati usati come dati di input su TRNSYS.

7.2.1 CASO C1

Per quanto riguarda l'applicazione dei micro-PTC per la produzione di calore a media temperatura al servizio di utenze industriali, per stimare e valutare le potenzialità della tecnologia, sono stati sviluppati dei modelli dinamici di due impianti micro-PTC al servizio di due utenze industriali caratterizzate da differenti temperature di processo.

La prima utenza industriale oggetto di modellazione è una lavanderia industriale. L'attività produttiva dell'azienda, che si sviluppa su tre turni, richiede vapore a 160°C.

Il vapore, nel caso specifico, è prodotto da 2 caldaie ad olio diatermico; l'acqua di reintegro è a 80°C.

Il calore richiesto giornalmente ammonta a circa 2.2 MWh/giorno, 785 MWh/anno. Si tratta di un impianto reale localizzato in provincia di Firenze. In figura il profilo di carico richiesto.

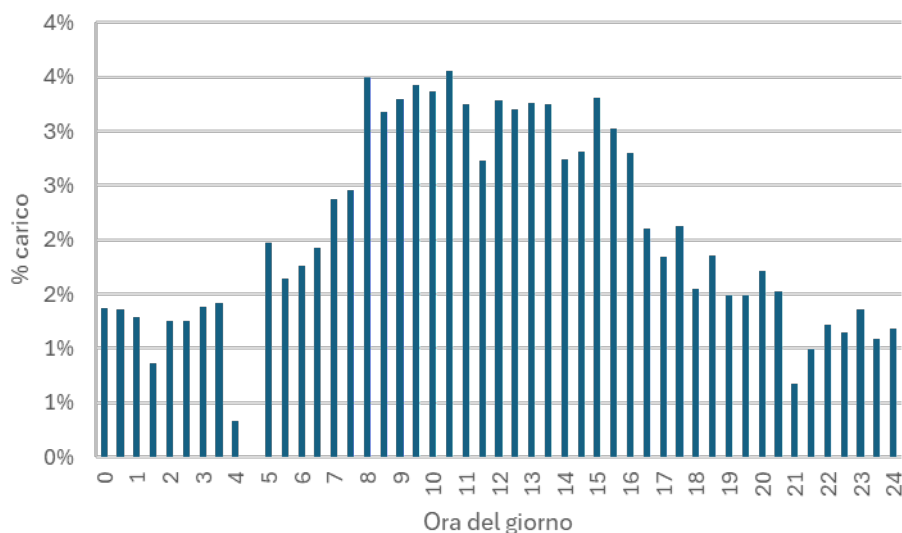


Figura 1 – Profilo di carico giornaliero richiesto della prima utenza industriale oggetto di modellazione

Attraverso un calcolo di pre-dimensionamento basato sulla potenza di picco, si è supposto di installare 1000 m² di area netta di collettori micro-PTC. Si è ipotizzato di affiancare al campo solare uno storage a sali fusi (TES) per immagazzinare il calore per soddisfare parte del fabbisogno anche in assenza di radiazione. Il volume del TES è stato ottimizzato tramite le simulazioni.

Il fluido termovettore circolante negli m-PTC usato è olio sintetico; fluido che solitamente viene impiegato in applicazioni solari sopra i 100°C.

Di seguito lo schema del modello realizzato su TRNSYS.

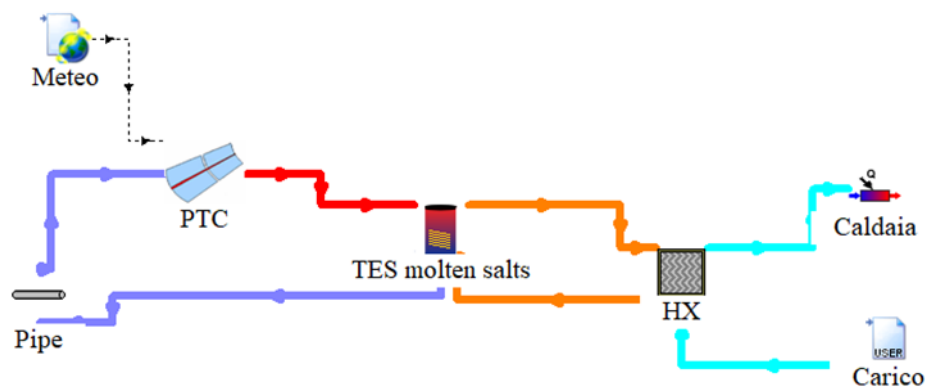


Figura 2 - Modello TRNSYS per analisi calore di processo

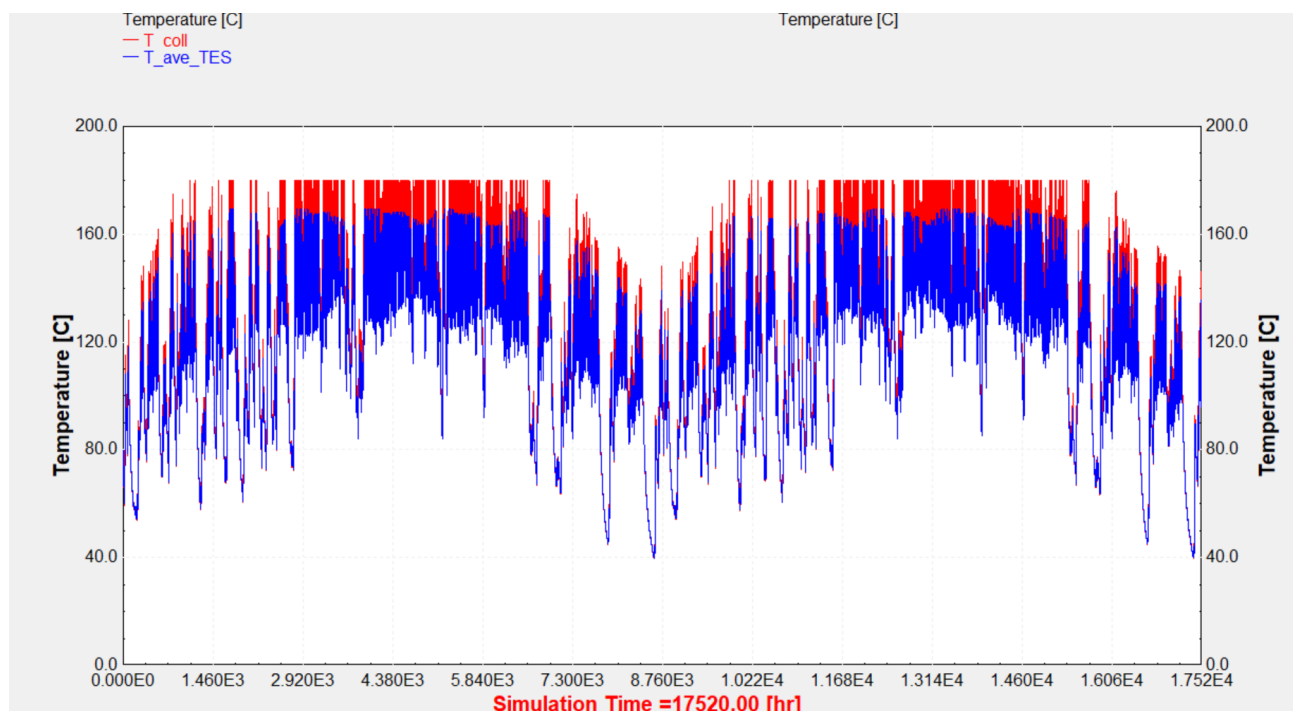


Figura 3 - Andamento temperatura dei collettori PTC (T_{coll}) e temperatura media dello storage (volume TES 10 m³) per produzione di calore di processo (fino a 160°C)

In tabella si riportano i risultati delle simulazioni parametriche variando il volume del TES.

Tabella 1 – Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 1000 m² superficie PTC; U_TES=0.1 W/(m²*K)

Volume TES [m ³]	Prod. PTC [MWh/anno]	Perdite termiche TES [MWh/anno]	Calore fornito all'utenza da solare [MWh/anno]	Calore fornito da caldaia [MWh/anno]	Solar Fraction
1	134	1	133	652	17%
10	349	3	346	439	44%
100	387	10	377	408	48%
1000	425	45	380	405	48%
2000	445	72	373	412	48%

Si può notare, confrontando il caso con V=1 m³ con gli altri, che la presenza del TES risulta necessaria per aumentare sensibilmente il **solar fraction** dell'impianto PTC. Tuttavia, si osserva come al di sopra dei 10 m³, l'incremento del calore prodotto e ceduto all'utenza è marginale. Al contrario è sensibile l'aumento dei costi e complessità impiantistiche che tali volumetrie comportano. Si denota pertanto che anche uno storage di dimensioni ridotte (10 m³ di volume corrispondente ad un tank di 2.3 m di altezza e diametro) consente di coprire circa il 44% del fabbisogno di calore dell'utenza industriale e quindi di ridurre di circa la stessa percentuale il consumo di combustibili fossili.

E' stato inoltre calcolato il costo del calore prodotto dall'impianto m-PTC. Si sottolinea che in letteratura non vi è unanimità sulla definizione di LCOH. Per lo scopo si è fatto uso di una formulazione semplificata che non tiene conto di alcuni parametri quali ad esempio degli incentivi/sussidi è la seguente [4]:

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

dove **I₀** è l'investimento iniziale, **C_t** rappresenta le spese per O&M dell'impianto (3% delle spese iniziali), **r** è il tasso di sconto per l'attualizzazione dei flussi di cassa (3%), **T** è la vita media dell'impianto (25 anni), **E_t** in questo caso è l'energia prodotta con le rinnovabili e ceduta all'utenza.

Il costo dell'investimento iniziale dato da costi diretti (materiali, componenti) e indiretti (progettazione, costruzione, contingenze varie) è stato calcolato tramite i valori riportati in tabella:

Tabella 2 Costi dei componenti dell'impianto con collettori m-ptc. I costi sono tratti da [4,5,6,7]. Per l'm-PTC il costo del prototipo ammonta a 400 euro/m²

Componente	Valore
m-PTC [€/m ²]	400
Fluidotermovettore [€/kg]	5
Fluido TES [€/kg]	1.5
Costo TES [k€]	$3.6611 \cdot V^{0.5697}$
Costi installazione [%]	24.75
Costi di progettazione [%]	11
Ulteriori costi [%]	7
Costi O&M [%]	3

E' stata estesa l'analisi a diverse latitudini (**Milano lat. 45.46 , Firenze lat. 43.77, Roma 41.90, Palermo 38.11**) per il caso ottimale di volume di 10 m³, si ottiene quanto riportato nella tabella seguente.

Tabella 3 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 1000 m² superficie PTC; V_TES=10 m³; U_TES=0.1 W/(m²*K)

Città	Prod. PTC [MWh/anno]	Perdite termiche Tes [MWh/anno]	Calore fornito all'utenza da solare [MWh/anno]	Calore fornito da caldaia [MWh/anno]	Solar Fraction	LCOH [euro/kWh]
Milano	381	3	378	407	48%	0.146
Firenze	349	3	346	439	44%	0.159
Roma	430	2	428	357	55%	0.129
Palermo	432	2	430	355	55%	0.129

Si può osservare che per tutti i siti investigati, il solar fraction si mantiene intorno al 50%, con una differenza massima dell' 11% tra Palermo e Firenze dovuta al differente valore di DNI annuale. Quindi si può affermare che l'applicazione della tecnologia m-PTC per la produzione di

calore a media temperatura (150/160°C) può non essere limitata all'Italia centro-meridionale, ma può trovare applicazione anche a latitudini più alte come il Nord del paese, ottenendo praticamente vantaggi paragonabili. E inoltre utile rimarcare che bastano soli 10 m³ di storage a sali fusi per ottenere SF maggiori del 40%.

Come si può osservare LCOH è superiore a 0.10/kWh per tutti i siti, avendo un andamento analogo al solar fraction.

7.2.2 CASO C2

Per quanto riguarda le potenzialità del collettore m-PTC per applicazioni di processo industriale a temperature maggiori, è stata un'industria metalmeccanica che richiede temperature fino a 700°C.

Tramite il modello dinamico si è valutato l'impiego di m-PTC per la fase di pre-riscaldamento (fino a 350°C).

In figura la domanda oraria normalizzata richiesta dal processo produttivo per il preriscaldamento (fino a 350°C) per una settimana. Come si può notare il fabbisogno è distribuito non uniformemente durante i giorni della settimana. Questo rende interessante l'uso di TES specificamente ottimizzati.

Il fabbisogno annuale di calore è 234 MWh/anno.

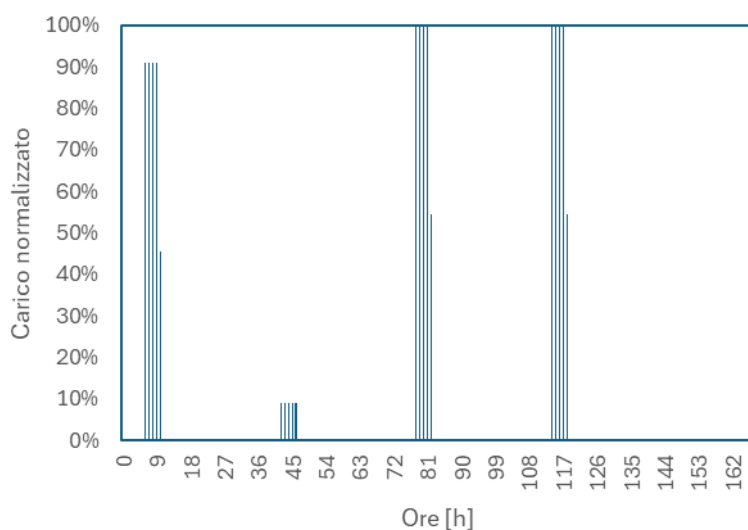


Figura 4 - Profilo di carico settimanale richiesto della seconda utenza industriale oggetto di modellazione

Si è ipotizzato di affiancare al campo solare (T max 350°C) un TES a sali fusi, con temperatura minima 250°C, avente miscela binaria 60% nitrato di sodio e 40% nitrato di potassio, il cui volume è stato ancora ottimizzato tramite le simulazioni numeriche dinamiche. Il fluido termovettore è sempre olio sintetico. Per evitare la solidificazione dei sali, è stata prevista la presenza di riscaldatori elettrici all'interno del TES allo scopo di garantire che la temperatura dei Sali resti sopra di 240°C.

In figura l'andamento annuale della temperatura di uscita dal campo solare e la temperatura media del TES.

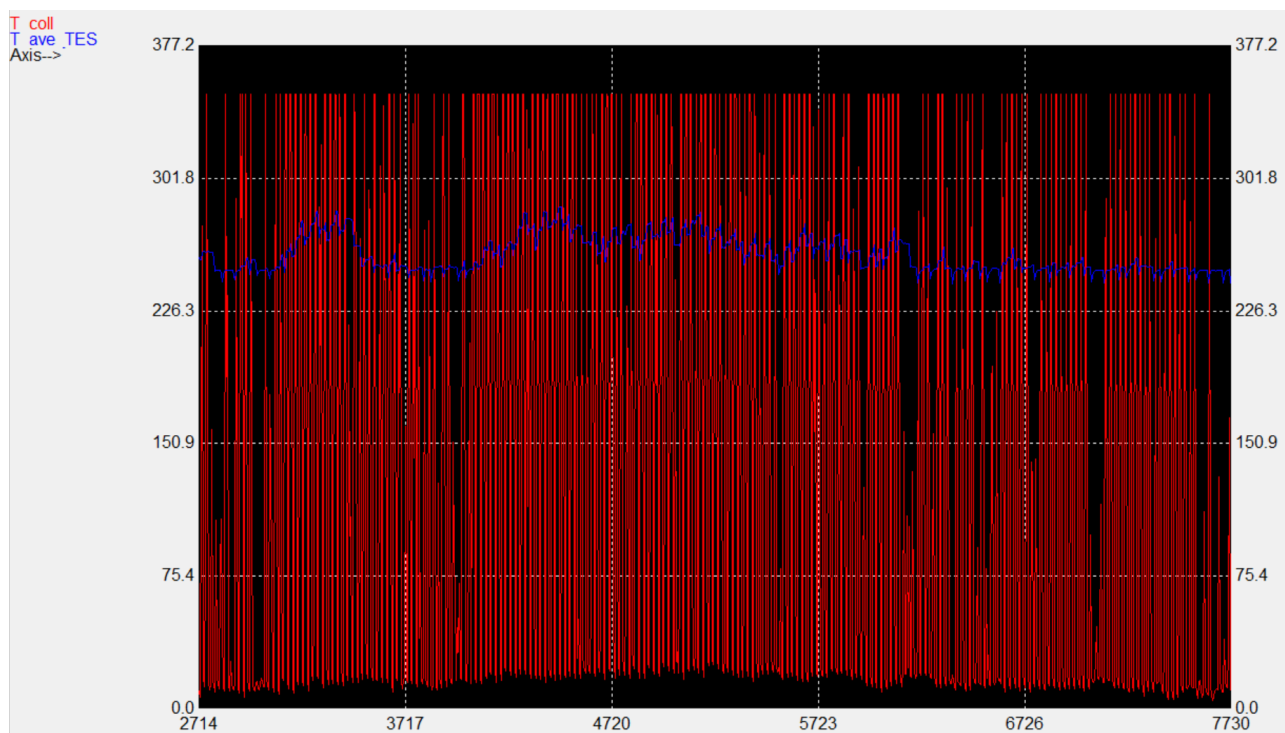


Figura 5 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza industriale per produzione calore di processo (fino a 350°C)

E' stata eseguita un'analisi parametrica variando la superficie del campo solare e il volume dello storage. I risultati riportati in tabella si riferiscono alla latitudine di Roma.

Tabella 4 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; $U_{TES}=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Superfici e PTC [m ²]	Volume [m ³]	Prod. PTC al TES [MWh/a]	Perdite termiche TES [MWh/a]	Riscaldator e ausiliario TES [MWh/a]	Calore da TES all'utenza [MWh/a]	Caldaia [MWh/a]	Solar Fraction
500	1	32	3	156	185	49	13%
500	10	84	6	112	190	44	35%
500	100	109	25	111	195	39	41%
300	10	66	6	128	188	46	27%
190	10	48	6	144	186	48	20%

Se si confronta la tabella precedente con la tabella 3, si può notare come il **solar fraction** è drasticamente diminuito e ciò è dovuto ovviamente al minor rendimento del collettore ad alta temperatura. Comunque, con uno storage di volumetria contenuta (10 m³) e un campo solare avente estensione limitata (300 m²) si può arrivare a coprire un quarto della domanda tramite l'energia captata dai PTC.

Nel calcolo dell'energia finale ceduta all'utenza derivante da energie rinnovabili, si è ovviamente sottratto la quota di calore fornita tramite riscaldamento ausiliario (quota non rinnovabile).

Sono state infine analizzate le prestazioni del collettore e dell'impianto (300 m² superficie di m-PTC, 10 m³ volume TES) al variare della latitudine.

Tabella 5 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 300 m² superficie PTC; V_TES=10 m³; U_TES=0.1 W/(m²*K)

Città	Prod. PTC al TES [MWh/anno]	Perdite termiche Tes [MWh/anno]	Riscaldatore ausiliario TES [MWh/anno]	Calore all'utenza da TES [MWh/anno]	Caldaia all'utenza [MWh/anno]	Solar Fraction	LCOH [euro/kWh]
Milano	76	6	118	188	46	31%	0.274
Firenze	66	6	128	188	46	27%	0.316
Roma	85	6	110	189	45	35%	0.245
Palermo	89	6	106	189	45	37%	0.234

Come si osserva dalla tabella, tutte le località fanno registrare un solar fraction maggiore del 25%, con una differenza massima dell' 10% tra Palermo e Firenze.

Come si può osservare LCOH ha il suo minimo a Palermo dove vale circa 0.23 euro/kWh, e il suo massimo a Firenze (0.32 euro/kWh) avendo un andamento analogo al solar fraction.

7.2.3 CASO C3- Raffrescamento

Per quanto riguarda le potenzialità del collettore m-PTC per ottenere energia frigorifera, si è considerato un caso residenziale dove è prevista l'installazione di un impianto prototipale con collettori m-PTC.

L'utenza residenziale è un complesso di edilizia popolare sito in Firenze (via Torre degli Agli) costituito due edifici per complessivi 90 appartamenti. Gli edifici sono caratterizzati da alta efficienza energetica (classe A4). La climatizzazione estiva/invernale e l'acqua calda sanitaria sono prodotte per mezzo di pompe di calore a compressione aria-acqua. Sul tetto del complesso residenziale è in istallazione un impianto solare a concentrazione costituito da collettori m-PTC (140 mq superficie lorda, 108 mq superficie di apertura netta) che usano acqua pressurizzata come fluido termovettore. L'impianto si completa con uno storage termico di circa 30 m³, non pressurizzato, contenente acqua ma può contenere anche PCM o altro. L'impianto ha il compito di soddisfare una parte rilevante della richiesta di calore per acqua calda sanitaria e riscaldamento. L'impianto è corredato anche di una macchina ORC che ha lo scopo di produrre energia elettrica nei periodi in cui vi è un surplus di calore prodotto da parte del campo solare.

Al fine di stimare le potenzialità dei collettori m-PTC nella generazione di energia frigorifera si è ipotizzato un impianto analogo a quello realizzato (stessa superficie dei collettori solari e

volumetria dello storage) affiancato da una macchina ad assorbimento anziché da una pompa di calore a compressione.

Il modello dinamico dell'impianto è stato realizzato tramite TRNSYS 18. Il modello energetico è in grado di descrivere i principali componenti dell'impianto (collettori a concentrazione, chiller ad assorbimento, piping) consentendo un'analisi di dettaglio con scala temporale sub-oraria della producibilità dell'impianto micro-PTC.

La macchina ad assorbimento considerata è una macchina commerciale a doppio stadio a Bromuro di Litio [8], che impiega acqua calda come fonte di calore per la produzione di energia frigorifera. Il rendimento del chiller vale 1.2 quando l'acqua in mandata ha $T > 130^{\circ}\text{C}$ (T_{in}/T_{out} acqua refrigerata $12/7^{\circ}\text{C}$). La logica di funzionamento del campo solare è di fornire l'energia necessaria per il funzionamento della macchina ad assorbimento durante la stagione in cui si ha la domanda di raffrescamento (15/05-30/09). In quei mesi la temperatura target del campo solare è compresa tra 120°C e 160°C . Dopo il passaggio nella macchina ad assorbimento, il calore refluo viene utilizzato per riscaldare il TES e fornire l'energia termica per l'acqua calda sanitaria all'utenza. Nei mesi in cui il raffrescamento è disabilitato, il campo solare opera a temperature più basse ed alimenta lo storage per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS).

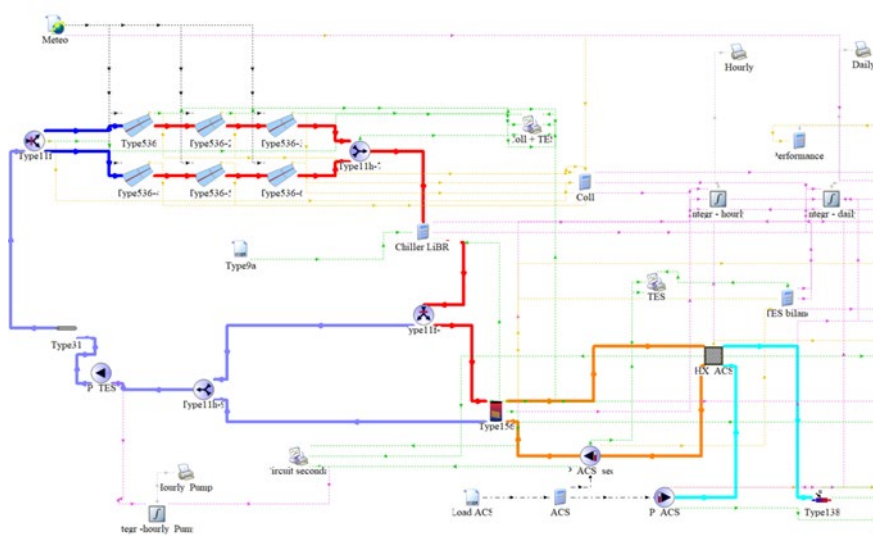


Figura 6 - Modello TRNSYS utenza residenziale

Come si vede in figura seguente, durante la stagione estiva la maggior parte del calore prodotto dai micro-PTC viene utilizzato per alimentare la pompa di calore, ed il TES è scarico in temperatura.

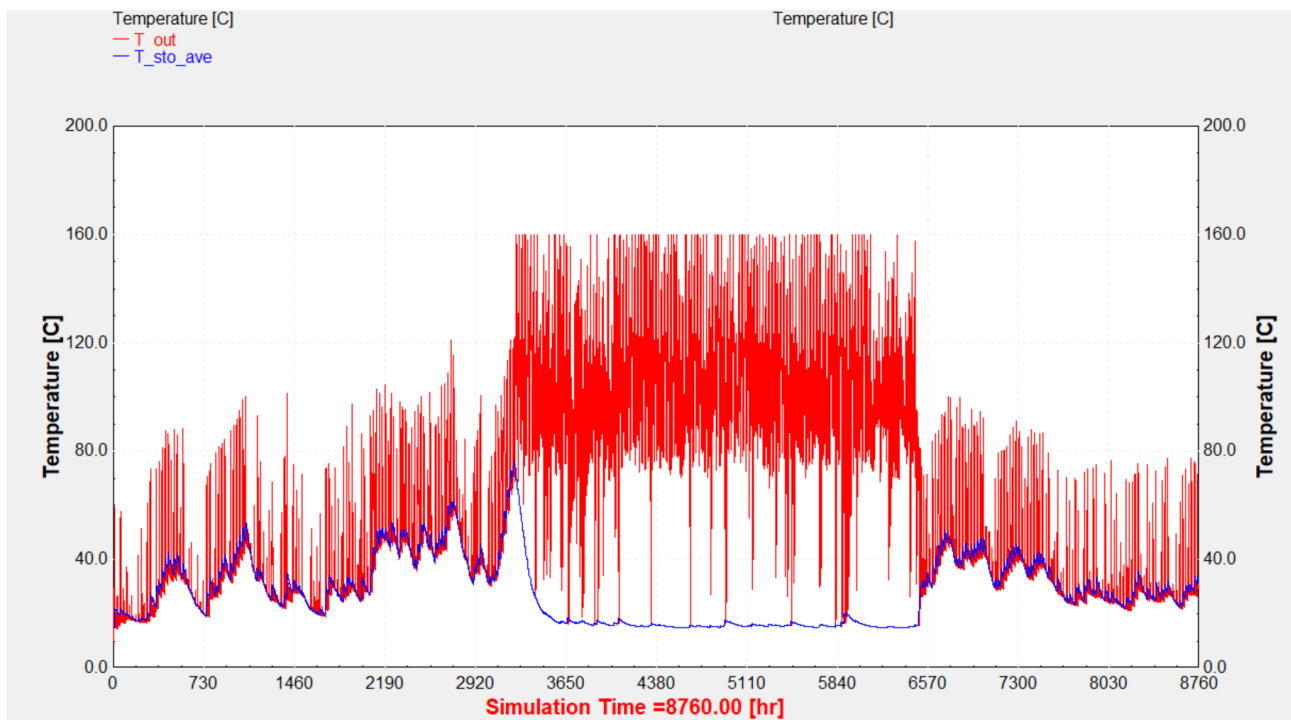


Figura 7 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza residenziale con macchina ad assorbimento

Tramite le simulazioni è stato possibile stimare la producibilità annua del campo solare che ammonta a circa 110 MWh. Di questi 51 MWh sono utilizzati per la produzione di energia frigorifera (58 MWh prodotti, efficienza media di 1.14).

Il calore ceduto dai m-PTC all'utenza per ACS ammonta a 51 MWh sopperendo al 46% del fabbisogno (fabbisogno per ACS dell'utenza pari a 113 MWh).

E' interessante analizzare come cambia la producibilità al variare del sito, in tabella sono riportati i risultati.

Tabella 6 - Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 108 m² superficie PTC; V_TES=30 m³; U_TES=0.1 W/(m²*K)

Città	Prod. PTC [MWh/a]	Calore ceduto a PDC [MWh/a]	Energia Frigorifera prodotta [MWh/a]	Calore all'utenza da TES per ACS [MWh/a]	Caldaia all'utenza [MWh/a]	Solar Fraction ACS	En. Frigorifera prodotta/mq [kWh/mq/anno]
Milano	109	51	58	53	60	47%	416
Firenze	97	44	50	47	66	42%	356
Roma	117	51	58	59	54	52%	411
Palermo	119	56	64	56	57	50%	456

Si osserva che l'energia frigorifera prodotta è circa di 60 MWh/anno per Milano, Roma e Palermo; vi è uno scostamento massimo del 18% tra Firenze e Palermo. Normalizzando la produzione di energia frigorifera ai metri quadrati di superficie lorda occupata dai collettori m-PTC, si ottengono valori compresi circa **tra 350 e 416 kWh/mq/anno**.

Si sottolinea inoltre che si riesce ad assolvere a circa il 40% della richiesta di ACS per tutti i siti.

Di seguito i risultati del LCOH (costo pompa di calore ad assorbimento 520 euro/kW):

Tabella 7 – Confronto LCOH differenti siti

Città	LCOH [euro/kWh]
Milano	0.129
Firenze	0.148
Roma	0.123
Palermo	0.119

Si osserva che LCOH ha il suo minimo a Palermo dove vale circa 0.12 euro/kWh, e il suo massimo a Firenze (0.15 euro/kWh) seguendo un andamento del tutto analogo al solar fraction.

E' stato dunque mostrato un esempio di applicazione residenziale per i collettori m-PTC per la produzione di energia frigorifera. Tuttavia, data la genericità del caso analizzato, tale esempio è valido anche per il settore industriale: la temperatura della macchina ad assorbimento a singolo stadio è infatti fissata a prescindere dall'applicazione; le macchine a doppio stadio presentano rendimenti solo di poco superiori 1.4.

E' interessante confrontare le prestazioni del sistema precedentemente analizzato con quelle ottenibili dai sistemi utilizzando pannelli fotovoltaici e pompe di calore a compressione elettrica.

Il rendimento complessivo solare-elettrico di un impianto fotovoltaico ammonta a circa il 18%: si assume il 22% il rendimento dei pannelli, 84% è l'efficienza del sistema a monte (perdite delle linee, conversione cc/ca tramite inverter, etc.); considerando una pompa di calore a compressione elettrica il cui SEER medio è circa pari a 4 si ottiene una produzione di 700 W di calore/potenza frigorifera per **1000W/m² di irradianza sul pannello**.

E' stata eseguita un'analisi di dettaglio sulla producibilità di condizionamento estivo per 4 siti a diverse latitudini (Milano, Firenze, Roma, Palermo). Si è ipotizzata di utilizzare come pompa di calore la macchina commerciale LG THERMA V [9].

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 8 - Efficienza modulo fotovoltaico 21.5%, Azimut 0°, Elevazione 35°, pompa di calore aria -acqua T_{in}=7°C
T_{out}=12°C

	Milano	Firenze	Roma	Palermo
Radiazione globale 15 mag-30 sett [kWh/mq]	870	874	918	920
Produzione elettrica 15 mag - 30 sett [kWh/mq]	142	144	151	152
SEER 15 mag - 30 sett	3.6	3.7	3.6	3.6
Energia termica prodotta [kWh/mq/anno]	509	531	547	541
Eff en. sol. - en. Frigorifera	58%	61%	60%	59%

L'energia frigorifera prodotta per metro quadrato di superficie occupata presenta un valore massimo di circa **550 kWh/mq** come valore massimo a Roma e un valore minimo di circa 510 kWh/mq a Milano, con uno scostamento dell'7% a causa del diverso valore di radiazione disponibile.

Il rendimento del sistema nella conversione da solare ad energia frigorifera è circa il 60%.

Confrontando l'energia frigorifera prodotta per metro quadrato di superficie utilizzata per i due sistemi (PTC e macchina ad assorbimento vs fotovoltaico e pdc a compressione), si può notare come il fotovoltaico+pdc presenta valori più alti. La differenza di energia frigorifera prodotta varia in base alla causa del diverso ammontare di DNI rispetto alla radiazione globale.

Tabella 9 - Confronto tra i due sistemi di refrigerazione

	m-PTC e assorbimento	FV e PDC	
Città	En. Frigorifera prodotta /mq occupato [kWh/mq/anno]	En. Frigorifera /mq occupato [kWh/mq/anno]	Scostamento %
Milano	416	509	18%
Firenze	356	531	33%
Roma	411	547	25%
Palermo	456	549	16%

Si osserva, quindi, dalla tabella precedente che le producibilità dei due sistemi hanno uno scostamento compreso tra il 16% e il 33%. Per i sistemi micro-PTC e macchine ad assorbimento, il minore rendimento della macchina frigorifera rispetto alle macchine a compressione di vapore è compensato dal maggior rendimento di conversione dell'energia, da radiativa a termica.

Nonostante i rendimenti dei due sistemi non siano così lontani, la maturità tecnologica dei due sistemi è completamente diversa. Moduli fotovoltaici e pompe di calore a compressione hanno raggiunto un alto livello di maturità, sono i sistemi standard per la contemporanea produzione di energia elettrica e raffrescamento. La soluzione m-PTC è al momento a livello un prototipo non ottimizzato; le macchine ad assorbimento, pur essendo una tecnologia sviluppata da molti anni, presentano ancora notevoli problemi di affidabilità e durabilità ed elevati costi.

Un evidente svantaggio dei sistemi m-PTC&assorbimento riguarda la maggior complessità impiantistica del sistema date le parti meccaniche in movimento e la conseguente maggior manutenzione necessaria.

D'altro canto, un vantaggio dei sistemi m-PTC è sicuramente la possibilità di realizzare accumuli a calore sensibile a calore latente per immagazzinare energia termica (calde&freddo). Nonostante la diminuzione dei prezzi delle batterie agli ioni di litio per l'accumulo fotovoltaico, gli storage a calore sensibile risultano ancora nettamente più economici, duraturi e funzionali: al momento il costo degli accumuli elettrici per il residenziale ad esempio si aggira intorno ai 300 euro/kWh contro i 40 euro/kWh per un TES ad acqua che lavora tra 90°C e 45°C.

Data la differente maturità tecnologica dei due sistemi, è tuttavia evidente che non è possibile operare un vero confronto economico. Si può inoltre osservare che, dato l'abbassamento dei prezzi negli ultimi 5 anni per i componenti fotovoltaici e le pompe di calore a compressione, sarebbe necessario una elevata economia di scala per rendere competitivi i sistemi m-PTC&assorbimento. **Pertanto risulta difficilmente prevedibile una penetrazione di tali sistemi nel breve/medio periodo all'interno del mercato italiano.**

7.2.4 CASO C3- ORC

Per la medesima applicazione residenziale, è stato valutato la producibilità di una macchina ORC.

La macchina ORC ipotizzata è una macchina commerciale (unica trovata disponibile) di piccola taglia ($\eta = 5,2\%$ per $T_{hot\ in} = 146 \div 150^\circ\text{C}$, $T_{cold\ in} = 25^\circ\text{C}$, $P_{el} = 2,6\text{ kW}$, $P_{th} = 50\text{ kW}$) [10]. La logica di funzionamento del campo solare prevede la priorità della produzione di calore con $T > 140^\circ\text{C}$ per la generazione elettrica, in qualunque stagione, il calore in uscita può essere impiegato per il soddisfacimento della domanda di ACS tramite il passaggio nello storage a calore sensibile (30 m³, fluido acqua). Si può vedere dalla figura seguente quanto detto in precedenza: la temperatura di uscita del campo solare arriva fino a 180°C, il TES lavora marginalmente.

Il calore assorbito dalla macchina ORC ammonta a 62 MWh, e l'energia elettrica prodotta è 3.2 MWh equivalente ad un rendimento medio pari al 5.1%. Il calore refluo utilizzabile per la produzione di ACS è pari 2 MWh soddisfacendo il 2% della domanda.

L'energia elettrica prodotta al metro quadrato di superficie occupata dal sistema PTC+macchina ORC è **pari 22 kWh/m²/anno**. **Si fa notare che un pannello fotovoltaico a Firenze ha una resa di circa 285 kWh/m²/anno.**

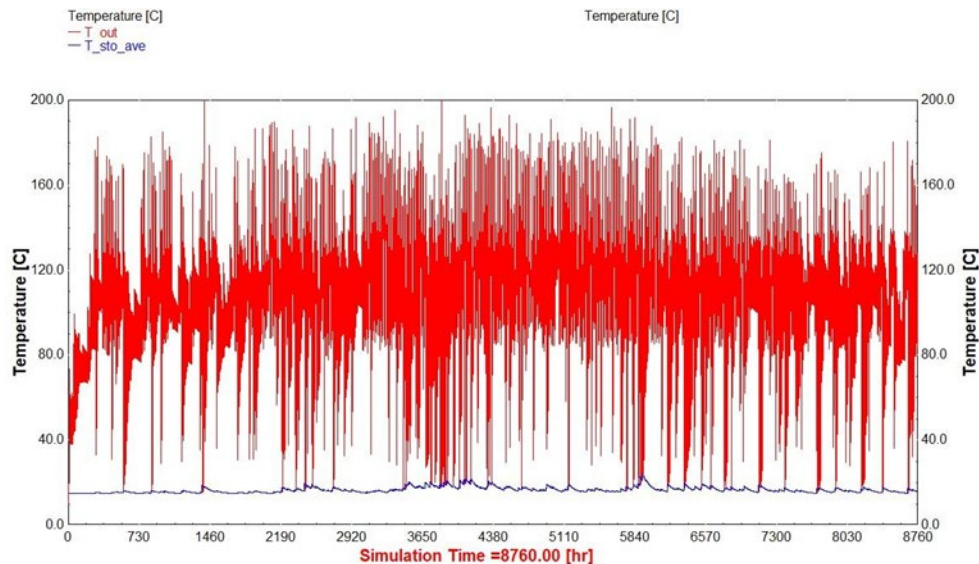


Figura 8 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso), caso campo solare con macchina ORC

E' stata inoltre valutata la producibilità dei collettori m-ptc a servizio di una macchina ORC lavorante a T prossime a quelle di target del collettore (300°C) per il soddisfacimento di un'utenza industriale caratterizzata da valori elevati di potenza elettrica e notevole domanda di energia termica.

Sul mercato sono presenti poche macchine ORC lavoranti alle temperature di interesse. Siemens produceva un modello ma risulta fuori produzione [11]. L'unica azienda che attualmente produce con regolarità macchine di questo tipo è Turboden ($E_{el}=400\text{ kW}$, $\eta_{el}=24\%$, $T_{hot\ in}=300^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$)[12].

I risultati dell'analisi di producibilità per i 4 siti utilizzati in precedenza sono riportati in tabella (m-PTC 4000; TES= 1000 m^3):

Tabella 10- Confronto tra i due sistemi di refrigerazione

	MWhe	Eff. solare - elettrico	LCOE [euro/kWh]
Milano	385	6%	1.52
Firenze	313	5%	1.87
Roma	450	6%	1.30
Palermo	476	6%	1.23

Per il calcolo dell' LCOE si è fatto uso della stessa formulazione impiegata per l' LCOH e dei parametri della tabella 2. Per l'ORC il costo considerato è di 2000 €/kW , come comunicato dal produttore; tale costo è comprensivo dell'impianto di raffreddamento necessario al funzionamento della macchina.

Come si può notare, l'efficienza complessiva di conversione solare – elettrico si attesta intorno al 6%. Tale modesto valore è dovuto alla bassa efficienza del collettore a $T=300^{\circ}\text{C}$. E' possibile aumentare l'efficienza del sistema e il relativo solar fraction sfruttando il calore ceduto al condensatore della macchina ORC per scopi civili/industriali.

Il valore di LCOE è maggiore di 1 €/kWh per tutte le località, raggiungendo 1.87 €/kWh a Firenze, e avendo il minimo a Palermo 1.23€/kWh. Tale valore di LCOE risulta rispetto a quello un impianto fotovoltaico di taglia analoga.

Tuttavia, è evidente che è del tutto improprio operare un confronto di LCOE tra queste due tecnologie vista la differente maturità tecnologica: il sistema m-ptc è un sistema prototipale, così come le macchine ORC non hanno raggiunto una maturità tecnologica confrontabile con gli impianti fotovoltaici che da numerosi anni sono installati su larga scala. Inoltre il collettore m-PTC è caratterizzato da basse prestazioni a $T=300^{\circ}\text{C}$.

Di seguito le conclusioni dell'analisi condotta.

Le simulazioni hanno consentito di mostrare le potenzialità della tecnologia m-PTC e gli elementi di criticità per la produzione di calore di processo industriale, per la produzione di calore per refrigerazione e per la produzione di calore per la generazione di energia elettrica tramite macchina ORC.

Per quanto concerne la produzione di calore industriale, è stata mostrata la significativa potenzialità su scala nazionale del collettore m-PTC. Si è visto infatti che il collettore può soddisfare una parte rilevante del fabbisogno di utenze industriali. Tale fatto risulta estremamente importante dato che al momento non è presente sul mercato un'alternativa ai combustibili fossili per la produzione di calore a media temperatura. L'm-PTC inoltre risulta integrabile in aree fortemente industrialmente e antropizzate dato che è facilmente installabile sulle coperture di edifici.

Per quanto riguarda la **refrigerazione** effettuata per mezzo di collettori m-PTC e macchine ad assorbimento, si è verificato che le prestazioni di tali tecnologie sono vicine a quelle ottenibili con tecnologie ben più mature quali pannelli fotovoltaici e pompe di calore a compressione. La maggior complessità del sistema e i costi conseguenti rispetto alla relativa semplicità di installazione dei moduli fotovoltaici è un punto a svantaggio dell'applicazione dei collettori m-PTC per la realizzazione di sistemi di condizionamento. Tuttavia, se fosse condotta una economia di scala, o una spinta industrializzazione, tali tecnologie potranno diventare concorrenziali rispetto al fotovoltaico in virtù di alcuni innegabili vantaggi come ad esempio la possibilità di produrre contestualmente calore di processo e calore per scopi di refrigerazione.

Relativamente alle potenzialità del collettore m-PTC accoppiato ad una macchina ORC, si è notato che a causa dei bassi rendimenti della macchina ORC, della scarsa efficienza del collettore m-PTC alla temperatura di interesse, della complessità impiantistica, tale sistema, **al momento, non risulta competitivo rispetto ai pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.** Visto l'attuale scenario energetico (elettrificazione della produzione di calore tramite pompe di calore) la tecnologia m-PTC può comunque portare eventuali benefici al sistema elettrico nazionale seppur in maniera indiretta. L'm-PTC infatti consente una riduzione della domanda elettrica richiesta alle pompe di calore. Inoltre, accoppiando uno storage termico, è possibile aumentare notevolmente il rendimento delle pompe di calore acqua-acqua : l'evaporatore di tali macchine può infatti essere collegato allo storage consentendo una generazione di calore estremamente efficiente ($\text{COP}>5$).

Riferimenti:

- [1] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en
- [2] Schott Solar CSP GmbH: Schott PTR 70 Receiver Setting the benchmark: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45633.pdf>
- [3] PV GIS https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [4] Widyolar B, Jiang L, Bhusal Y, Brinkley J, Winston R. Solar thermal process heating with the external compound parabolic concentrator (XCPC) – 45 m² experimental array performance, annual generation (kWh/m²-year), and economics. Sol Energy 2021;230:131–50. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.10.027>
- [5] Matches' Tank cost – API, horizontal, vertical, cone roof, bottom, flat bottom, round end. n.d. <https://www.matche.com/equipcost/Tank.html> (accessed August 30, 2024).
- [6] Cost Indices – Towering Skills n.d. <https://toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/> (accessed September 4, 2024).
- [7] Immonen J, Mohammadi K, Powell KM. Simulating a solar parabolic trough collector plant used for industrial process heat using an optimized operating scheme that utilizes flexible heat integration. Sol Energy 2022;236:756–71. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2022.03.044>
- [8] Manuale tecnico Systema spa, <https://www.systema.it/prodotti/assorbimento-ed-ecoenergia/assorbitori.html>
- [9] LG THERMA V DATASHEET <https://www.lg.com>
- [10] ORC Morgana, datasheet <https://www.kaymacor.com/it>
- [11] Siemens Organic Rankine Cycle Technology Brochure www.siemens.com
- [12] Turboden www.turboden.com

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza è stata utilizzata nell'ambito della linea di attività LA1.4.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state realizzate pubblicazioni scientifiche risultanti dalle attività svolte nell'ambito della LA1.4; nel caso sono previste pubblicazioni integranti i risultati della LA1.4, LA1.5 e LA1.6.

10 Eventi di disseminazione

Con riferimento al periodo da Gennaio 2023 a Marzo 2024, gli eventi di disseminazione a cui si è partecipato nell'ambito della LA1.4 del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" sono:

- Workshop "Solare termico a concentrazione: Opportunità, sfide e ruolo degli stakeholder" nell'ambito di "K.EY - The Energy Transition Expo", Rimini, Italia, 24 Marzo 2023.
- Evento "Stati Generali del Solare Termico a Concentrazione", Roma, Italia, 29 Gennaio 2024.