

Ricerca di Sistema elettrico



Materiali e componenti avanzati per impianti CSP – Studio progettuale di up-grade del sistema micro-PTC innovativo di UniFI per il suo impiego per la cogenerazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con un ciclo ORC (LA 1.6)

M. De Lucia, M. Salvestroni



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

MATERIALI E COMPONENTI AVANZATI PER IMPIANTI CSP - STUDIO PROGETTUALE DI UP-GRADE DEL SISTEMA MICRO-PTC INNOVATIVO DI UNIFI PER IL SUO IMPIEGO PER LA COGENERAZIONE DI CALORE DI PROCESSO A MEDIA TEMPERATURA E DI ENERGIA ELETTRICA CON UN CICLO ORC (LA 1.6)

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

Dicembre 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: LA1.6

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: 25

Mese inizio effettivo: 25

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

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	Progetto di up-grade del collettore m-PTC sviluppato da UniFI	10
7.2	Modellazione e valutazione delle “potenzialità” della tecnologia testata&proposta a seguito di up-grade	14
7.2.1	CASO C1	14
7.2.2	CASO C2	17
7.2.3	CASO C3- Raffrescamento	19
7.2.4	CASO C3- ORC	23
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	27
9	Pubblicazioni scientifiche	28
10	Eventi di disseminazione	29

Indice delle figure

Figura 1 Geometria del modello realizzato: 1) vetro ; 2) Kovar; 3) Kovar; 4) Tubo assorbitore esterno; 5) Dominio fluido ; 6) Tubo assorbitore interno; 7) Dominio fluido	10
Figura 2 Domini del modello computazionale e condizioni al contorno applicate	11
Figura 3 Confronto tra i risultati sperimentali (con fluido termovettore acqua) e i risultati delle simulazioni per valori di emissività di 0.05 e 0.15.	12
Figura 4 Prototipo di coating sviluppato da ENEA nella LA1.2.....	13
Figura 5-Modello TRNSYS per analisi calore di processo	15
Figura 6 Andamento temperatura dei collettori PTC (T _{out}) e temperatura media dello storage (volume TES 10 m ³) per produzione di calore di processo (fino a 160°C).....	15
Figura 7 - 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).....	18
Figura 8 - Modello TRNSYS utenza residenziale	20
Figura 9- Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza residenziale con macchina ad assorbimento.....	20
Figura 10 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso), caso campo solare con macchina ORC	24

Indice delle tabelle

Tabella 1- Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 1000 m ² superficie PTC; U _{TES} =0.1 W/(m ² *K)	16
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	16
Tabella 3- Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 1000 m ² superficie PTC; V _{TES} =10 m ³ ; U _{TES} =0.1 W/(m ² *K).....	17
Tabella 4- Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; U _{TES} =0.1 W/(m ² *K).....	18
Tabella 5- Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 300 m ² superficie PTC; V _{TES} =10 m ³ ; U _{TES} =0.1 W/(m ² *K).....	19
Tabella 6- Condizioni al contorno: timestep di simulazione 3'; 108 m ² superficie PTC; V _{TES} =30 m ³ ; U _{TES} =0.1 W/(m ² *K).....	21
Tabella 7- Confronto LCOH differenti siti.....	21
Tabella 8- Efficienza modulo fotovoltaico 21.5%, Azimut 0°, Elevazione 35°, pompa di calore aria -acqua T _{in} =7°C T _{out} =12°C	22
Tabella 9- Confronto tra i due sistemi di refrigerazione	23
Tabella 10- Confronto tra i due sistemi di refrigerazione	24

1 Risultati attesi

I risultati attesi nell'ambito della presente linea di attività LA1.6 sono i seguenti:

Progetto di up-grade del sistema sviluppato dall'Università di Firenze (UniFI) denominato micro-PTC (m-PTC), al fine di integrare il collettore in strutture edilizie, civili e industriali, per impiego cogenerativo. Inoltre sono stati implementati di modelli dinamici per la stima del potenziale impatto della nuova tecnologia sulla riduzione della domanda di energia da riscaldamento/raffrescamento a livello nazionale.

2 Risultati ottenuti

Partendo dai risultati sperimentali dei test condotti in ENEA, nell'ambito della LA1.5, sul prototipo del m-PTC sviluppato da UniFI, nella presente linea di attività LA1.6 è stato possibile evidenziare gli elementi migliorabili, le criticità evidenziate e finalizzare il tutto in una idea di "progetto di up-grade" del sistema sviluppato.

Completano infine la valutazione sulle potenzialità delle ricadute del progetto di up-grade.

L'obiettivo è rendere il sistema micro-PTC di UniFI, originariamente operativo con il vapor d'acqua e quindi temperature moderatamente elevate, idoneo ed efficace per la cogenerazione di calore nel range di temperatura 200-350 °C e di energia elettrica con cicli ORC fino alla temperatura operativa massima di 350 °C.

Per i livelli di temperatura indicati, il fluido termovettore da impiegare nel sistema micro-PTC UniFI è del tipo a olio diatermico. Rimane inteso che il calore "di scarto" a temperatura medio-bassa degli impianti micro-CSP adoperanti il nuovo sistema micro-PTC di UniFI aggiornato può essere adoperato per il raffrescamento da fonte solare (trigenerazione).

Lo studio progettuale è stato condotto al fine di elaborare indagini di fattibilità e schemi dettagliati di processo che potranno successivamente essere utilizzati in futuri progetti dimostrativi (pilota).

Inoltre, sono state valutate applicazioni per l'autoconsumo in una prospettiva di ibridizzazione del solare a concentrazione con altre fonti rinnovabili.

Per quanto riguarda l'eventuale revisione del sistema a livello di design, è stato implementato un modello, termico e strutturale, dell'innovativo tubo ricevitore del sistema micro-PTC di UniFI.

Tale analisi numerica ha consentito l'individuazione e la risoluzione delle possibili problematiche dovute alle maggiori temperature operative di progetto (perdite termiche, stress termici, ecc.) e la quantizzazione connessa alla potenziale ottimizzazione del componente.

Analogamente è stata condotta una ricerca mirata all'individuazione criticità nei materiali utilizzati per la realizzazione delle ottiche riflettenti ed il telaio. L'obiettivo, in questo caso, era quello di alleggerire la struttura complessiva, ridurre i costi ed individuare tecnologie più idonee a garantire la giusta solidità e curvatura delle superfici riflettenti&specchi, in modo che la fase di realizzazione sia il più possibile ripetibile.

Ad esempio, sono state prese in considerazione ipotesi di uso di materiali nuovi per la realizzazione dei componenti ed ottiche attualmente in metallo (realizzate con processi di carpenteria). Allo stato attuale si tratta di attività ancora alla stadio di studi e valutazioni preliminari mirati a valutare la fattibilità tecnologiche per costruire componenti in resina e/o attraverso stampi preformati. Questo tipo di indagine è stata condotta sia attraverso analisi numeriche che attraverso colloqui con operatori del settore che operano nel mondo dei componenti realizzati a mezzo di iniezione PU.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi della linea di attività LA1.6, 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 - Studio progettuale di up-grade del sistema micro-PTC innovativo di UniFI per il suo impiego per la cogenerazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con un ciclo ORC” contenente:
 - progetto di up-grade del sistema micro-PTC di UniFI;
 - studio di soluzioni tecniche alternative e migliorative per alcuni componenti del sistema micro-PTC UniFI;
 - individuazione dei settori applicativi a livello di macroaree (settori applicativi e range di temperature in aree fortemente antropizzate) di maggiore interesse per l’impiego della tecnologia del nuovo micro-PTC aggiornato;
 - stima del potenziale impatto della nuova tecnologia sulla riduzione della domanda di energia;
 - analisi della sostenibilità tecnico-economica in alcuni casi studio.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti resi disponibili nell'ambito della linea di attività LA1.6 del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" sono costituiti dal presente report riportante l'analisi delle potenzialità, criticità, e potenziali miglioramenti&up-grade del sistema micro-PTC innovativo di UniFI.

Nel suddetto report, congiuntamente con quanto condotto in sede di LA1.4 e LA1.5 (analisi delle performances e criticità dell'attuale sistema m-PTC) sono state quantizzate gli effetti di eventuali azioni migliorative. Le analisi numeriche hanno portato alla stima, per il collettore m-PTC debitamente migliorato, del potenziale applicativo 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.

Più in dettaglio, i prodotti della linea di attività LA1.6, come da capitolato vigente del Progetto 1.9 "Solare termodinamico", consistono in un report tecnico:.

- Report: "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Studio progettuale di up-grade del sistema micro-PTC innovativo di UniFI per il suo impiego per la cogenerazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con un ciclo ORC" contenente:
 - o progetto di up-grade del sistema micro-PTC di UniFI finalizzato all'integrazione in strutture edilizie, civili e industriali, per impiego cogenerativo (generazione di calore di processo e di energia elettrica con cicli ORC con temperatura operativa massima di 350 °C);
 - o studio di soluzioni tecniche alternative e migliorative per alcuni componenti del sistema micro-PTC UniFI finalizzate all'ottimizzazione del processo di costruzione degli stessi;
 - o individuazione dei settori applicativi a livello di macroaree applicative di maggiore interesse per l'impiego della tecnologia del nuovo micro-PTC aggiornato in aree fortemente antropizzate;
 - o stima del potenziale impatto della nuova tecnologia sulla riduzione della domanda di energia complessiva includendo anche il raffrescamento;
 - o analisi della sostenibilità tecnico-economica in alcuni casi studio (LCOE e LCOH).

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la LA1.6 non sono stati riscontrati scostamenti tecnici su attività e risultati rispetto a quanto previsto nel capitolato vigente del Progetto 1.9 "Solare termodinamico".

Per la LA1.6, inoltre, non ci sono stati scostamenti economici significativi.

6 Sintesi delle attività svolte

- È stata condotta una modellazione FEM per valutare le principali criticità relative al collettore m-PTC proposto da UniFI con speciale riguardo al tubo ricevitore.
- È stata condotta una indagine di fattibilità tecnico-economica per alcuni casi studio di riferimento, in analogia a quanto realizzato nell'attività 1.4, per valutare i miglioramenti dal punto di vista energetico ed economico ottenibili tramite il miglioramento del coating del tubo ricevitore del m-PTC. Le varie soluzioni elaborate sono state condotte in ambiente TRNSYS.

Gli scenari oggetto di modellazione sono:

- applicazioni di processo industriale a media temperatura (lavanderia industriale che si sviluppa su tre turni, richiede vapore a 160°C);
- applicazioni di processo industriale ad alta temperatura 700°C;
- produzione raffrescamento in ambito residenziale;
- produzione energia elettrica tramite macchina ORC in ambito residenziale e industriale.
- Sono stati valutati LCOE e LCOH per vari casi (Solar cooling, ORC e CSP).
- Analisi criticità.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Progetto di up-grade del collettore m-PTC sviluppato da UniFI

Il collettore m-PTC presenta rendimenti, alle temperature di interesse, che nella condizione peggiore sono superiori del 40% (si fa riferimento a $T > 270^\circ\text{C}$ – misure riportate nella LA1.5).

Risultato ritenuto non del tutto soddisfacente. Per poter applicare diffusamente tale tecnologia al campo della media temperatura (fino a 350°C) e della contestuale produzione di energia elettrica è opportuno individuare soluzioni migliorative tese a rimuovere le attuali inefficienze, limiti e/o criticità rilevate del collettore testato.

Per questo motivo all'interno della presente linea di ricerca, è stato realizzato un modello FEM termofluidodinamico del tubo ricevitore del collettore m-PTC. Il modello risolve le equazioni di Navier-Stokes (continuità, quantità di moto ed energia) nel dominio fluido e l'equazione dell'energia nel dominio solido. In caso di regime di flusso turbolento, è applicato modello di turbolenza k-ε con funzioni di parete.

Il modello pertanto è in grado di descrivere la dinamica del fluido all'interno del tubo assorbitore e lo scambio termico tra tutti i componenti del ricevitore.

Lo specchio parabolico del collettore m-PTC e i supporti del tubo ricevitore non sono stati modellati.

Le equazioni di Navier-Stokes per un flusso debolmente comprimibile (densità funzione dalla temperatura) in regime laminare prevedono:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) - \frac{2\mu}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \dot{q}$$

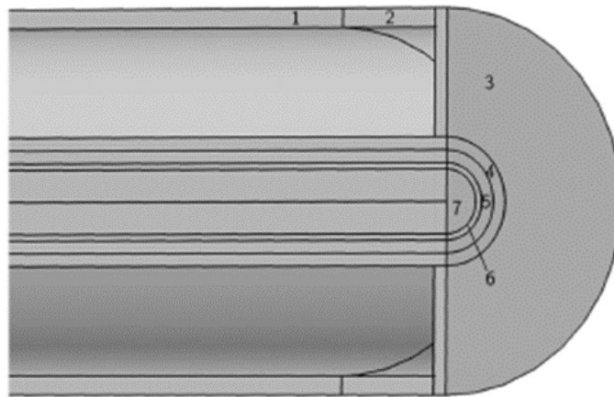


Figura 1 Geometria del modello realizzato: 1) vetro ; 2) Kovar; 3) Kovar; 4) Tubo assorbitore esterno; 5) Dominio fluido ; 6) Tubo assorbitore interno; 7) Dominio fluido

Le principali condizioni al contorno applicate al modello sono:

- velocità fissata all'ingresso, pressione fissata al contorno di uscita;
- è stata ricavata attraverso analisi di ray-tracing la distribuzione della radiazione solare sul tubo assorbitore; tale flusso è applicato come condizione al contorno nel modello FEM;
- l'efficienza ottica considerata è il 74% della radiazione incidente sull'area di apertura;
- nell'intercapedine tra vetro e tubo assorbitore, si è considerato vuoto, pertanto non c'è convezione (Pressione circa 10^{-4} mbar)
- tra la superficie del vetro e l'ambiente esterno, c'è scambio termico convettivo (descritto tramite correlazione) e radiativo applicato alla superficie esterna del tubo in vetro;
- la radiazione solare assorbita dal vetro è imposta sulla superficie del vetro.

La geometria e i domini del modello computazionale sono mostrati nella figura seguente:

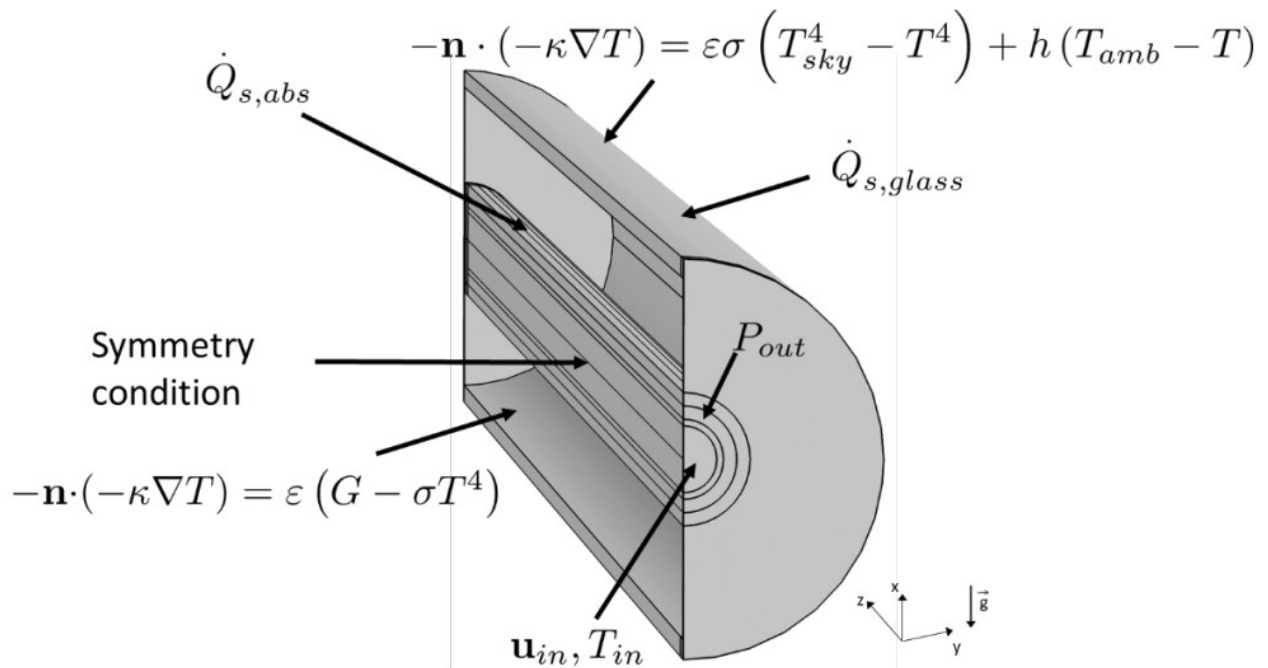


Figura 2 Domini del modello computazionale e condizioni al contorno applicate

Sono state eseguite numerose analisi parametriche al variare dei principali parametri di simulazioni.

In particolare in Figura 3 si riportano i risultati di efficienza termica ottenuti dalle simulazioni, per due valori di emissività del coating del tubo assorbitore ($\varepsilon=0.05$ e 0.15), per diverse temperature di ingresso del fluido al collettore e il valore sperimentale di efficienza termica ottenuto dalle prove a bassa temperatura con acqua.

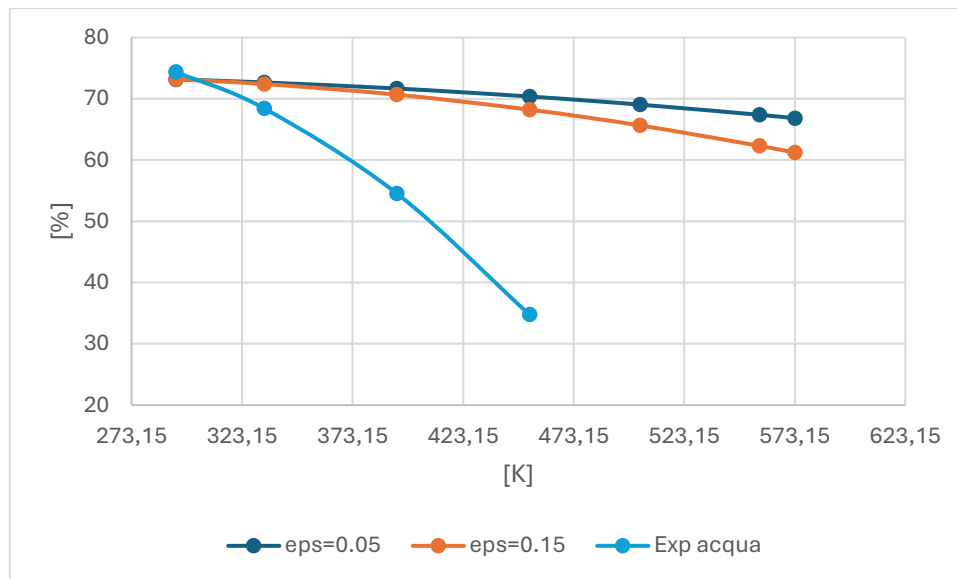


Figura 3 Confronto tra i risultati sperimentali (con fluido termovettore acqua) e i risultati delle simulazioni per valori di emissività di 0.05 e 0.15.

Come si può osservare, le prove sperimentali forniscono valori di efficienza inferiori ai casi con emissività costante 0.05 e 0.15. Il modello indica una chiara strategia per il miglioramento delle prestazioni del collettore, cioè l'ottimizzazione dell'emissività del coating assorbitore.

Tale ipotesi è verificata anche dalle prove di laboratorio effettuate da Unifi che hanno stimato il coating del tubo assorbitore avere emissività con valori superiori di 0.15 a 100°C, valori che risultano anche al di sopra dell'attuale standard tecnologico.. Oltre alle proposte ENEA un altro coating molto performante ad esempio è quello impiegato dei tubi Schott PTR 70 [2], un tubo ricevitore progettato per collettori parabolici lineari, con diametro del tubo interno di acciaio di 70 mm (mentre quello del m-PTC di UniFi ha diametro 10 mm) ad elevate prestazioni e ridotte perdite termiche a medio/alta temperatura (<250 W/m @400°C).

CRITICITA' - MIGLIORAMENTI - PROGETTO DI UP-GRADE

Gli studi e i test condotti hanno consentito di evidenziare alcuni limiti del sistema m-PTC sviluppato da UniFi ma soprattutto hanno consentito di definire le possibili azioni per l'ottimizzazione del collettore m-PTC. A livello "progettuale" si può agire operando su più fronti partendo da interventi specifici sui componenti del micro-collettore parabolico lineare che comunque ha dato prova di funzionalità e di miglioramenti nonché della loro fattibilità e potenzialità.

Nello specifico sono possibili interventi e lavori almeno su 3 oltre ad una riorganizzazione del collettore con il seguente ordine di priorità:

- 1) Miglioramento del TUBO RICEVITORE
- 2) Miglioramento del sistema di TRACKING
- 3) Miglioramento della Parabola
- 4) Riorganizzazione del collettore a livello di assemblato

1) Miglioramento del TUBO RICEVITORE

L'attuale ricevitore, sviluppato in casa da UniFI, è stato realizzato utilizzando un coating non specificamente sviluppato ma partendo da quelli utilizzato per i collettori piani sottovuoto (tubi per heat-pipe e Sidney). Il materiale di coating utilizzato presenta un'emissività non proprio definibile al "TOP". La difficoltà di trovare a livello nazionale impianti capaci di fare trattamenti "sputter" su tubi di soli 10 mm per lunghezze di almeno 2 metri ha inoltre indotto gli sviluppatori ricorrere ad aziende collocate in quelle aree dove si producono in grandi quantità collettori e tubi sottovuoto per collettori termici piani.

Le Linee di Attività in carico a ENEA (LA 1.1 e LA 1.2) hanno consentito di realizzare coating innovativi per tubi ricevitori evacuati proprio per i range e dimensioni adatti a micro-PTC a media temperatura.

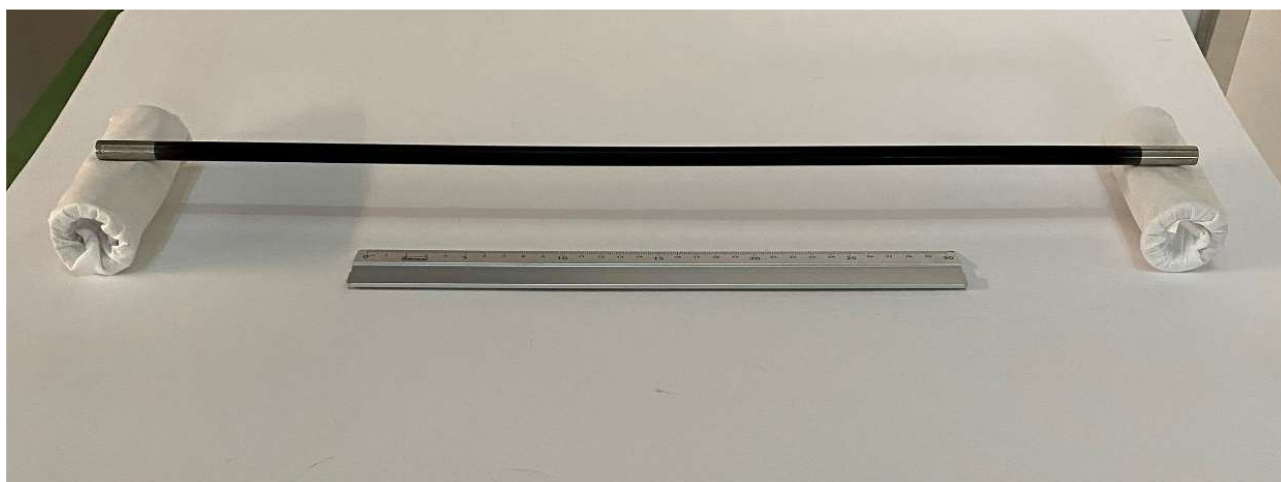


Figura 4 Prototipo di coating sviluppato da ENEA nella LA1.2.

Si rimarca che, al momento, la filiera nazionale esprime eccellenze collocabili all'apice della tecnologia, ma a fronte a questa "punta di diamante" tecnologica si rileva che non sono disponibili impianti per la produzione di tubi ricevitori e deposito dello SPUTTER su scala industriale quale quello sviluppato dall'ENEA.

Anche a livello di incapsulamento dei tubi ricevitori e la messa in esercizio al momento non ci sono impianti né progetti industriali importanti, anche se per fortuna molti produttori di componenti nazionali della filiera, sono ancora operativi.

2) Miglioramento del sistema di TRACKING

I risultati del PTR 2022-24 ha mostrato che anche a livello di sistema tracking ci sono margini di miglioramenti significativi. Infatti, il sistema di tracking e gestione della movimentazione attuale, sviluppato da UniFI, ha mostrato la sua funzionalità ma richiede un aggiornamento non solo a livello di SW ma anche a livello di HW mirato a migliorarne l'accuratezza e l'affidabilità a lungo termine.

3) Miglioramento della Parabola

Il sistema m-PTC attualmente sviluppato utilizza una pellicola riflettente molto performante realizzata con 3 strati nanometrici (argento, rame e supporto polimerico adesivo). UniFI a

messo a punto una procedura per incollarla su un supporto metallico in acciaio inox dello spessore di qualche decimo. E' importante sottolineare che la curvatura della parabola attuale non è ottenibile con curvature a freddo di specchi in vetro neanche facendo ricorso a spessori di qualche decimo.

E inoltre importante sottolineare che nel corso del PTR 22-24 tale pellicola riflettente si è resa non più disponibile in commercio in quanto la SkyFuel (compagnia USA) che deteneva i brevetti e la commercializzava con il marchio ReflecTech è fallita. Al momento non ci sono imprenditori che hanno rilevato gli impianti ed i brevetti, è pertanto probabile che per un tempo non definibile la pellicola riflettente non sia reperibile pertanto si rende necessario ed indispensabile individuare un'alternativa con riflettente ad alta efficienza possibilmente commerciale.

4) Riorganizzazione del collettore a livello di telaio e assemblaggio

Facendo tesoro delle esperienze del presente triennio e soprattutto nell'ottica di un regolare utilizzo in impianti di dimensioni più estese, si dovrà riprogettare la modalità di inserimento e quindi possibile sostituzione dei tubi assorbitori. Si deve sottolineare che il sistema m-PTC sviluppato ha la peculiarità di consentire la sostituzione anche di un solo elemento indispensabile in ragione degli eventi meteorologici che non danno margini di manovra alternative.

7.2 Modellazione e valutazione delle "potenzialità" della tecnologia testata & proposta a seguito di up-grade

Nell'ipotesi di **miglioramento del coating**, è stata condotta una indagine di fattibilità tecnico-economica per alcuni casi studio di riferimento, in analogia a quanto realizzato nell'attività 1.4, per valutare i miglioramenti dal punto di vista energetico ed economico ottenibili tramite il miglioramento del coating. Le varie soluzioni elaborate sono state condotte in ambiente TRNSYS.

Per stimare la producibilità dei collettori e degli impianti ad esso connessi, nell'ipotesi di sviluppo del coating, si è quindi utilizzato all'interno dei vari modelli le caratteristiche termiche del tubo Schott PTR 70 (considerato in quanto ricevitore di tipo commerciale performante).

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

7.2.1 CASO C1

Per quanto riguarda l'applicazione dei micro-PTC per la produzione di calore a medio/alta temperatura al servizio di utenze industriali, **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 fa riferimento al CARO C1 della LA 1.4. si tratta di una **lavanderia industriale** che si sviluppa su tre turni, richiede vapore a 160°C.

Il calore richiesto giornalmente ammonta a circa 2.2 MWh/giorno, 785 MWh/anno

I soliti 1000 m² di area netta di collettori micro-PTC affiancati ad un TES a sali fusi. Il volume del TES ottimizzato tramite le simulazioni.

Di seguito lo schema del modello realizzato su TRNSYS.

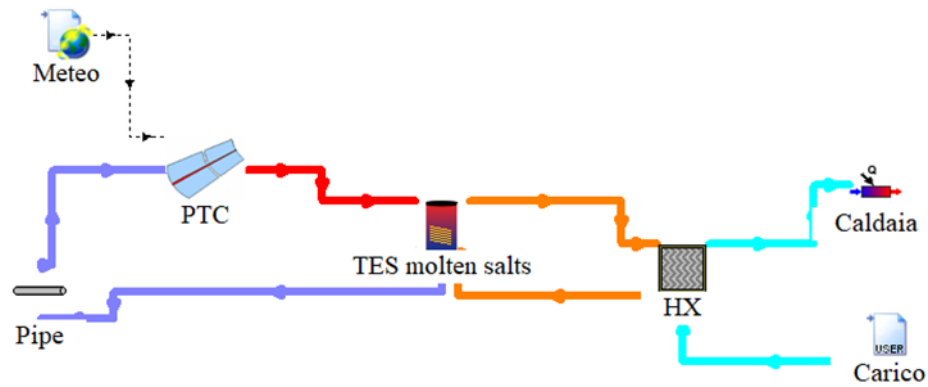


Figura 5-Modello TRNSYS per analisi calore di processo

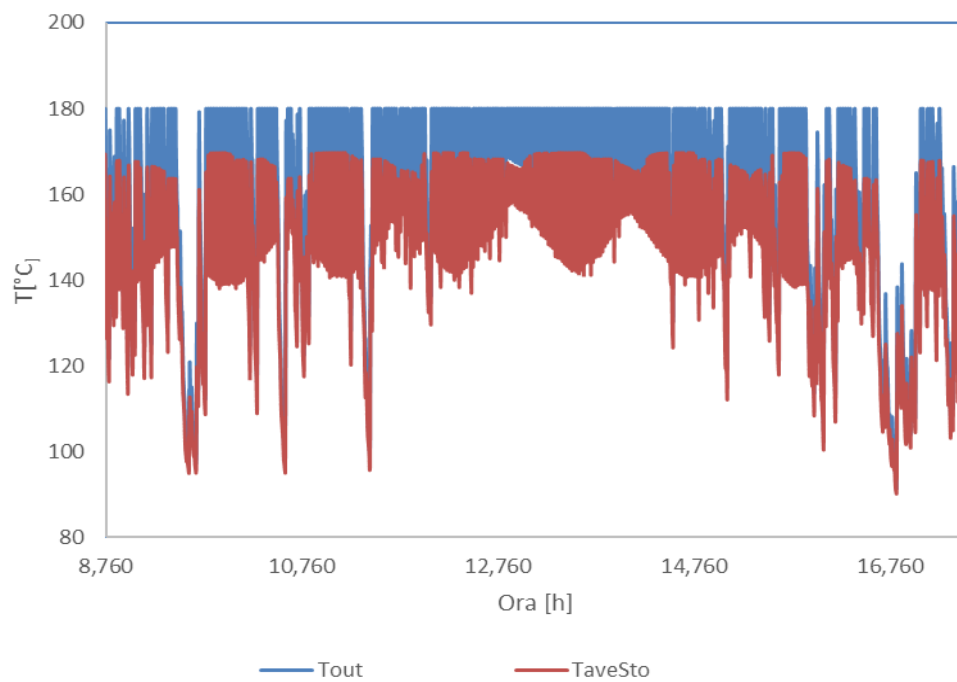


Figura 6 Andamento temperatura dei collettori PTC (T_{out}) e temperatura media dello storage (volume TES 10 m³) per produzione di calore di processo (fino a 160°C)

In 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	258	0.4	240	545	31%
10	581	3	570	215	73%
100	633	13	612	173	78%
1000	696	62	629	156	80%
2000	729	98	626	159	80%

Si osserva come al di sopra dei 10 m³, l'incremento del calore prodotto e ceduto all'utenza diventa via via più marginale rispetto all'aumento dei costi e complessità impiantistiche. Si denota che anche un TES di dimensioni di soli 2.3 m di altezza e diametro consente di coprire circa il 70% del fabbisogno riducendo della stessa percentuale il consumo di fossili.

Analogamente alla LA1.4 è stato calcolato il costo del calore prodotto dall'impianto m-PTC usando i costi considerati sono 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

Estendendo la modellazione 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	599	3	587	198	75%	0.094
Firenze	581	3	570	215	73%	0.089
Roma	641	3	621	164	79%	0.097
Palermo	648	3	630	155	80%	0.088

Si può osservare che per tutti i siti investigati, il solar fraction si mantiene sopra il 70%, con una differenza massima del 6% tra Roma 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 medio-bassa temperatura (150/160°C) può **non essere limitata all'Italia centro-meridionale, ma può trovare applicazione anche a latitudini più alte**, ottenendo vantaggi non troppo dissimili come da usuale luogo comune. E inoltre utile rimarcare che bastano soli 10 m³ di storage a sali fusi per ottenere SF maggiori del 70%.

Si rileva che **LCOH** è circa 0.09/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 media temperatura, di cui al CASO C2 della LA 1.4 il modello in ambiente TRNSYS si riferisce ad una **industria che richiede temperature fino a 700°C. Nello studio si è valutato l'impiego di m-PTC per la fase di pre-riscaldamento (fino a 350°C).**

Nelle stesse ipotesi del CASO C2 della La 1.4 si ipotizza di affiancare al campo solare (T max 350°C) uno storage a sali fusi (60% nitrato di sodio e 40% nitrato di potassio T_{min} 250°C) che prevede la presenza di riscaldatori elettrici per mantenere la temperatura al di sopra di 240°C.

In figura l'andamento annuale della temperatura di uscita dal campo solare e la temperatura media del TES cambia in modo consistente rispetto a quanto rilevato in sede di LA 1.4.

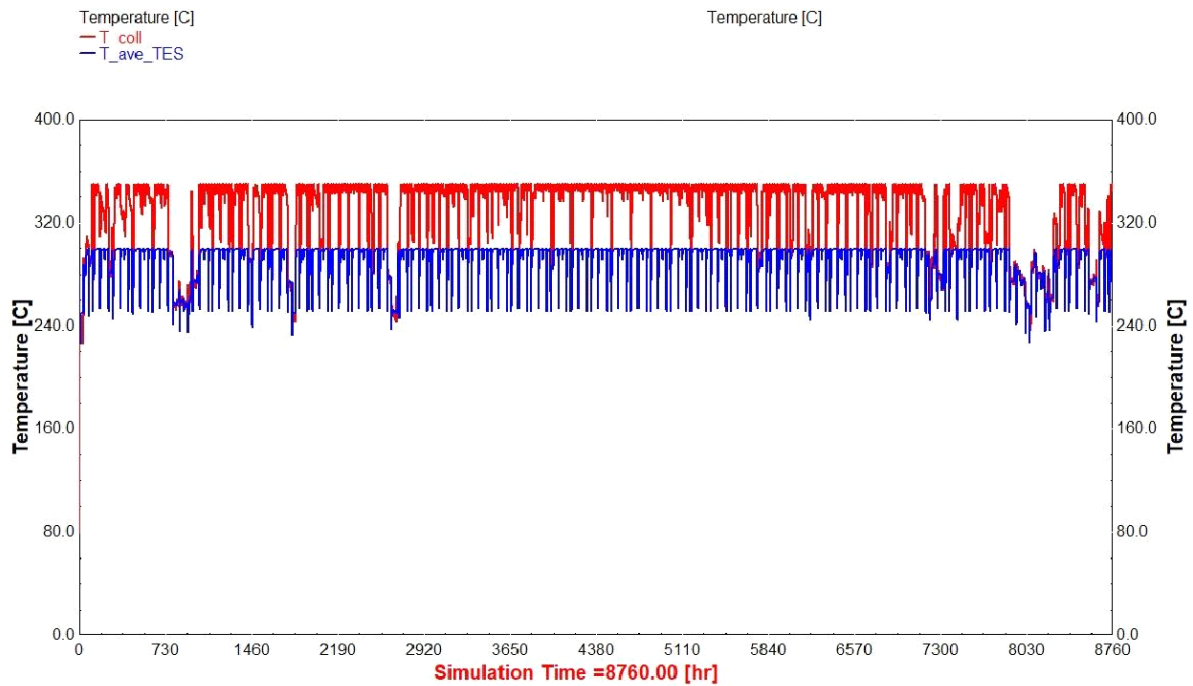


Figura 7 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza industriale per produzione calore di processo (fino a 350°C)

Procedendo sempre con un'analisi parametrica variando la superficie del campo solare e il volume dello storage si è ottenuto.

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]	Riscaldatore e ausiliario TES [MWh/a]	Calore da TES all'utenza [MWh/a]	Caldaia [MWh/a]	Solar Fraction
500	1	141	2	64	203	31	60%
500	10	204	6	10	208	26	85%
500	100	247	33	2	216	18	92%
300	10	190	6	20	204	30	79%
190	10	166	6	40	200	34	69%

Dimensionando correttamente campo solare e TES si ottengono valori di solar fraction >70% più o meno ovunque (anche sottraendo la quota di calore fornita tramite riscaldamento ausiliario "quota non rinnovabile").

Si vede che basta, uno storage di soli 10 m³ e un SF (solar Field) limitato a 300 m² per coprire il 70% della domanda.

A livello di latitudini invece:

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	180	6	29	203	31	75%	0.116
Firenze	171	6	36	201	33	71%	0.122
Roma	190	6	20	204	30	79%	0.109
Palermo	195	6	17	206	28	81%	0.107

Come si osserva dalla tabella, tutte le località fanno registrare un solar fraction maggiore del 70%, con una differenza di 8-9% tra Roma e Firenze.

LCOH ha il suo minimo a Palermo dove vale circa 0.107 euro/kWh, e il suo massimo a Firenze (0.12 euro/kWh).

7.2.3 CASO C3- Raffrescamento

Per quanto riguarda le potenzialità del collettore m-PTC **per la generazione di energia frigorifera**, si è considerato lo stesso caso C3 modellato nella linea 1.4. (utenza residenziale dove è prevista l'installazione di un impianto prototipale basato su collettori m-PTC).

L'utenza è un complesso edile costituito da 90 appartamenti. 140mq di micro-PTC (108 mq superficie di apertura netta e uno storage termico di circa 30 m³, non pressurizzato ad acqua).

La generazione di energia frigorifera viene fornita da una macchina ad assorbimento anziché da una pompa di calore a compressione. La macchina ad assorbimento considerata è una macchina commerciale a doppio stadio a Bromuro di Litio [8]. 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).

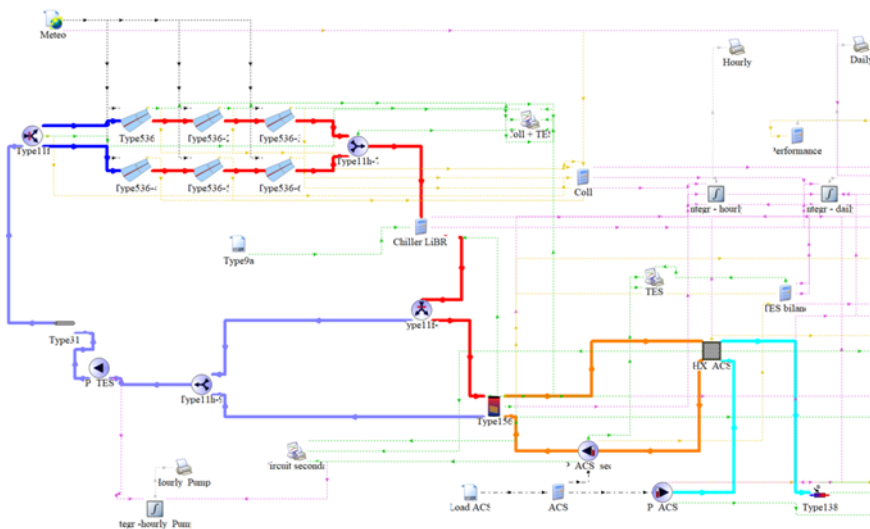


Figura 8 - Modello TRNSYS utenza residenziale

I risultati della modellazione sono riportati di seguito:

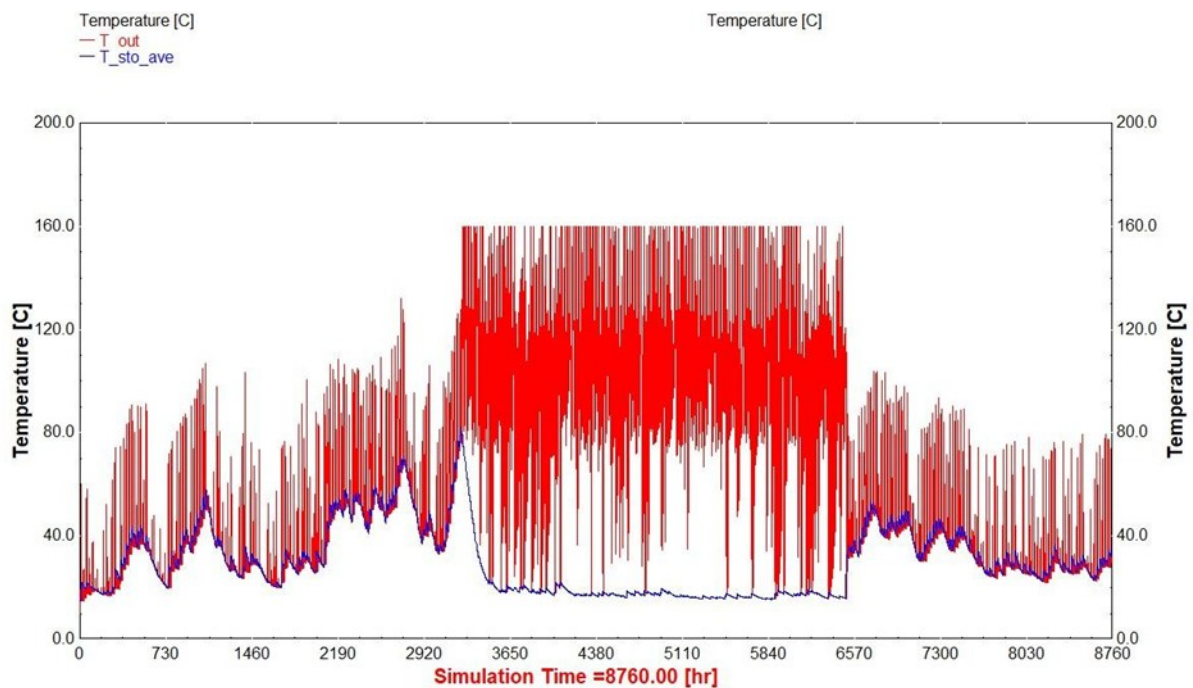


Figura 9- Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso) per utenza residenziale con macchina ad assorbimento

La producibilità annua del campo solare ammonta a 110 MWh. Di questi 52 MWh sono utilizzati per la produzione di energia frigorifera (60 MWh prodotti, efficienza media di 1.14).

Il calore ceduto dai micro-PTC all'utenza per ACS ammonta a 51 MWh sopperendo al 46% del fabbisogno. A livello di latitudine si rileva:

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	124	61	70	58	55	51%	497
Firenze	110	52	60	52	61	46%	427
Roma	132	61	70	63	50	56%	500
Palermo	133	65	75	60	53	53%	533

L'energia frigorifera prodotta è circa di 70 MWh/anno per Milano, Roma e Palermo; con uno scostamento 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 **430 e 520 kWh/mq/anno**.

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

Tabella 7- Confronto LCOH differenti siti

Città	LCOH [euro/kWh]
Milano	0.113
Firenze	0.128
Roma	0.108
Palermo	0.107

Si osserva che LCOH ha il suo minimo a Roma dove vale circa 0.11euro/kWh, e il suo massimo a Firenze/Milano (0.13 euro/kWh) seguendo un andamento del tutto analogo al solar fraction.

E' stato dunque dimostrato l'interesse potenziale di questa tecnologia ottimizzata anche per il settore residenziale per la refrigerazione. Data la genericità del caso analizzato, i risultati sono estendibili anche al 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 leggermente più alti, entro il 10% di scostamento per 3 siti (Milano, Roma, Palermo), e uno scostamento del 20% per Firenze. Il motivo è da ricercarsi nella percentuale diversa di DNI rispetto alla radiazione globale per i siti oggetto di investigazione.

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	497	509	2%
Firenze	427	531	20%
Roma	500	547	8%
Palermo	519	549	5%

Si osserva, quindi, dalla tabella precedente che i due sistemi hanno una producibilità molto simile. Per i sistemi micro-PTC e macchine ad assorbimento, il minore rendimento della macchina frigorifera è compensato dal maggior rendimento di conversione dell'energia, da radiativa a termica.

Anche se i rendimenti dei due sistemi siano vicini, la maturità tecnologica dei due sistemi è completamente diversa. (I moduli fotovoltaici e pompe di calore a compressione hanno un raggiunto un alto di livello di maturità, sono i sistemi standard per la contemporanea produzione di energia elettrica e raffrescamento. Il m-PTC è al momento un prototipo; inoltre le macchine ad assorbimento, pur essendo una tecnologia sviluppata da molti anni, presentano ancora notevoli problemi di affidabilità e durabilità nonché costi specifici elevati).

Anche a livello impiantistico i sistemi m-PTC&assorbimento denotano una maggior complessità impiantistica.

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 la stesa utilizzata nella LA 1.4 ($\eta = 5,2\%$ per $T_{hot\ in} = 146 \div 150^{\circ}C$, $T_{cold\ in} = 25^{\circ}C$, $P_{el} = 2,6\ kW$, $P_{th} = 50\ kW$) [10]). Mantenendo la stesa logica di funzionamento della LA 1.4 si vede che il calore assorbito dalla macchina ORC ammonta a 94 MWh, e l'energia elettrica prodotta è 5 MWh equivalente ad un rendimento medio pari al 5.3%. Il calore refluo utilizzabile per la produzione di ACS è pari 7 MWh soddisfacendo il 6% della domanda.

L'energia elettrica prodotta al metro quadrato di superficie occupata dal sistema PTC+macchina ORC è pari **36 kWh/m²/anno**. **Si fa notare che un pannello fotovoltaico a Firenze ha una resa di circa 285 kWh/m²/anno.**

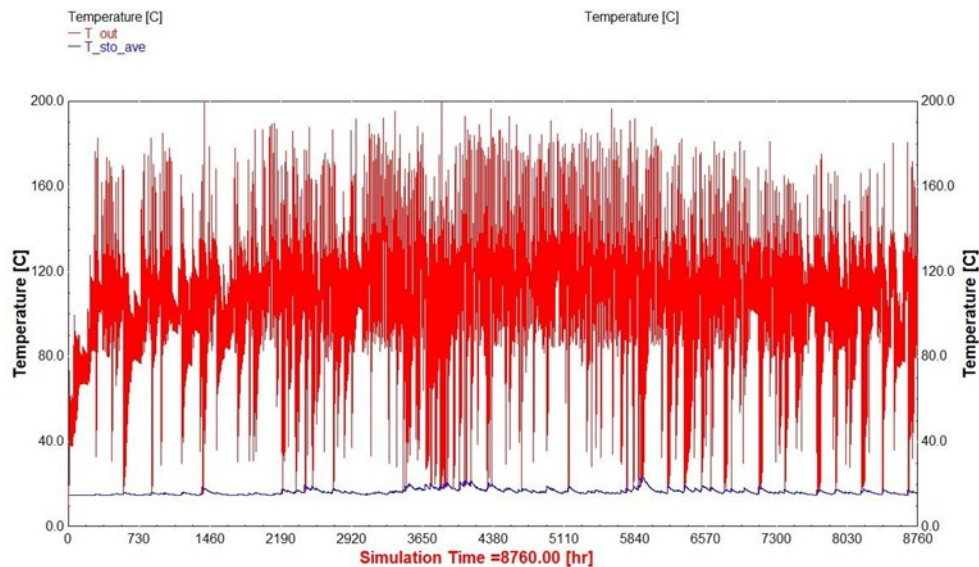


Figura 10 - Andamento temperatura media del TES (blu) e temperatura in uscita dal campo solare (rosso), caso campo solare con macchina ORC

E' stata inoltre valutata la producibilità dei collettori m-PTC a servizio di una macchina ORC operante 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.

Si sottolinea che sul mercato sono presenti pochissime macchine ORC lavoranti alle temperature di interesse. Escludendo quanto reperibili nel mercato Cinese si trovano dati di un ORC-Siemens che sembra che sia anche un modello messo fuori produzione [11]. L'unica azienda che attualmente produce con regolarità macchine di questo tipo è Turboden ($W_{el}=400$ kW, $\eta_{el}=24\%$, $T_{hot\ in}=300^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$) [12].

Osando questa ultima i risultati dell'analisi per i 4 siti utilizzati in precedenza sono riportati in tabella (m-PTC 4000m²; TES= 1000 m³):

Tabella 10- Confronto tra i due sistemi di refrigerazione

	MWhe	Eff. solare - elettrico	LCOE [euro/kWh]
Milano	1124	16%	0.52
Firenze	1000	16%	0.59
Roma	1241	16%	0.47
Palermo	1283	16%	0.46

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 **16%**. In teoria è 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 si attesta intorno a 0.50 €/kWh con piccole variazioni per le varie località in base alla disponibilità di DNI. Si fa notare che tale valore di LCOE risulta significativamente maggiore di quello caratterizzante la produzione elettrica di 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.

Se si considera nell'analisi economica anche la parte di generazione di calore, la tecnologia m-PTC + ORC risulta maggiormente competitiva. Tuttavia, per i motivi sopradetti, i valori di LCOE e LCOH non sono al momento comparabili con quelli di tecnologie più mature per la produzione combinata di elettricità e calore quali sistemi fotovoltaici e pompe di calore a compressione.

CONCLUSIONE: Le attività condotte integranti anche i risultati della LA1.4 e La 1.5 hanno consentito di mostrare le potenzialità della tecnologia m-PTC, hanno evidenziato l'inefficienza per certe applicazioni e mostrato i limiti tecnologici attuali. Gli ambiti investigati sono riguardano la produzione di calore di processo industriale, per la refrigerazione e 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, in ragione del fatto che prima o poi si dovrà raggiungere il traguardo della Neutralità CO2 anche nelle zone fortemente urbanizzate. 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 industrializzate 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 netto svantaggio e penalizzante. Tuttavia, se verrà sviluppata una economia di scala, o una spinta industrializzazione e/o Incentivazione, 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 e della complessità impiantistica, tale sistema, al momento, non risulta vantaggioso 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 in virtù del suo alto rendimento consente una riduzione della domanda elettrica richiesta alle pompe di calore. Inoltre, accoppiando storage termici, porta ad aumentare notevolmente il rendimento delle pompe di calore acqua-acqua evitando le meno efficienze aria-acqua: l'evaporatore di tali macchine può infatti essere collegato allo storage consentendo una generazione di calore estremamente efficiente (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 LA1.6.

9 Pubblicazioni scientifiche

1. Maurizio De Lucia, Giacomo Pierucci, Maria Manieri, Gianmarco Agostini, Emanuele Giusti , Michele Salvestroni, Francesco Taddei, Filippo Cottone and Federico Fagioli, 2024, Experimental Characterization of Commercial Scroll Expander for Micro-Scale Solar ORC Application: Part 1, Journal ENERGIES, Energies 2024, 17, 2205. <https://doi.org/10.3390/en17092205>
2. F. Rovense, W. Gaggioli, F. Grisoni, M. Rottoli, M. De Lucia, L. Nibbi, "Assessment of Small-Scale Parabolic Trough Collectors for Integration in Industrial Process Heat", submitted to SolarPACES Conference Proceedings (2024), under review.

10 Eventi di disseminazione

Con riferimento al periodo da Gennaio 2024 a Dicembre 2024, gli eventi di disseminazione a cui si è partecipato nell'ambito della LA1.6 del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" sono:

- Workshop "Il solare termico a concentrazione a supporto della decarbonizzazione del sistema energetico italiano: opportunità, sfide, criticità, ruolo degli stakeholder" nell'ambito di "K.EY - The Energy Transition Expo", Rimini, Italia, 1 Marzo 2024, partecipazione con presentazioni orali.
- Conferenza "30th SolarPACES Conference", Roma, Italia, 8-11 Ottobre 2024.
- Workshop "Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CST per la generazione distribuita in ambienti antropizzati" nell'ambito di "ZeroEmission Mediterranean 2024 - International Conference and Exhibition", 17 ottobre 2024, Roma, Italia.
- "Evento di disseminazione finale del Progetto 1.9 «Solare termodinamico» PTR 2022-2024 della Ricerca di Sistema", Roma, Italia, 16 Dicembre 2024.