

# Ricerca di Sistema elettrico



Materiali e componenti avanzati per impianti CSP -  
Caratterizzazione sperimentale di un prototipo di sistema  
micro-PTC innovativo sviluppato da UniFI (LA1.5)

W. Gaggioli, M. De Lucia, F. Rovense, P. Di Ascenzi, V. Russo, M. Montecchi, G. Petroni, G.  
Cara, A. Benedetti, M. Giorgetti, M. Salvestroni, F. Cottone

## Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Caratterizzazione sperimentale di un prototipo di sistema micro-PTC innovativo sviluppato da UniFI (LA1.5)

W. Gaggioli (ENEA), M. De Lucia (UniFi), F. Rovense (ENEA), P. Di Ascenzi (ENEA), V. Russo (ENEA), M. Montecchi (ENEA), G. Petroni (ENEA), G. Cara (ENEA), A. Benedetti (ENEA), M. Giorgetti (ENEA), M. Salvestroni (UniFi), F. Cottone (UniFi)

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: LA1.5

Responsabile del Progetto: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile del Work Package: Antonio Guglielmo, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Walter Gaggioli, ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

## Indice

1	Risultati attesi .....	4
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi .....	8
4	Prodotti sviluppati .....	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte .....	12
7	Dettaglio delle attività svolte.....	13
7.1	Caratterizzazione termica ad alta temperatura del collettore m-PTC. ....	13
7.2	Caratterizzazione ottica del concentratore .....	16
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	18
9	Pubblicazioni scientifiche.....	19
10	Eventi di disseminazione .....	20
11	Bibliografia.....	21

## Indice delle figure

Figura 1 - m-PTC sviluppato da UniFi .....	5
Figura 2 - Collettore m-PTC installato presso circuito sperimentale "ENEA-SHIP" (C.R. ENEA di Casaccia, Roma): (a) piazzola, (b) supporto rotante .....	13
Figura 3 - Efficienza vs Temperatura ridotta $T^* = T_m - T_{amb} DNI \text{ Km}^2 W$ .....	15
Figura 4 - Efficienza vs Temperatura ridotta $T^* = T_m - T_{amb} DNI \text{ Km}^2 W$ .....	16
Figura 5 - Strumentazione impiegata per le prove di profilometria .....	17
Figura 6 - Risultati delle misure per i due collettori scansionati. Legenda: colore bianco cattura completa, rosso al 99%, scala di colori che portano fino al blu che indica 0% e nero che rappresenta il campionamento ottico non riuscito.....	17

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Deviazioni permesse da ISO 9806:2017 .....	14
Tabella 2 - Intervalli di misura che rispettano i requisiti della normativa ISO 9806:2017 .....	15

## 1 Risultati attesi

Il dialogo tra ricerca e industria ha evidenziato, che per decarbonizzare i processi produttivi di alcuni comparti industriali (plastica, chimica bassa entalpia, tessile, trasformazione prodotti alimentari), del terziario (poli direzionali, poli tecno-commerciali, centri socio-sanitari, poli turistici) e del settore civile (aggregazione di utenti finali), la cogenerazione distribuita da fonte rinnovabile rappresenta un valido strumento per contribuire alla riduzione al consumo di combustibili pregiati (oggi metano, nel futuro, ad esempio, idrogeno) [1,2,3,4], del resto la quota di energia finale destinata al riscaldamento ed al raffreddamento rappresenta quasi la metà del consumo totale di energia in Europa, di cui il 30% è utilizzato dal settore industriale [1,5]. In questo ambito lo sviluppo di sistemi di concentrazione di energia solare di piccola scala che siano modulari e standardizzati per un loro impiego in ambienti confinati (tipo tetti di edifici), e che siano facilmente integrabili con sistemi di accumulo dell'energia termica (TES) sembra essere una delle soluzioni più promettenti per rispondere all'esigenza di supportare la diffusione di cogenerazione rinnovabili distribuita al contrario di tradizionali tecnologie CSP che a causa delle loro dimensioni non risultano essere adeguati per questo tipo di applicazioni [5]. Un ulteriore aspetto positivo di queste tipologie di tecnologie solari è la possibilità di essere integrabili con altre fonti energetiche locali, questa caratteristica, infatti, permette la possibilità di produrre energia localmente per l'integrazione diretta in vari tipi di processi senza incidere sulle infrastrutture di trasporto dell'energia in linea con le indicazioni delle strategie europee [6]. Le soluzioni di mini/micro-CSP per essere appetibili per il mercato devono avere un costo ridotto, e consentire una produzione energetica flessibile. Negli incontri nazionali con gli stakeholder industriali nazionali organizzati nell'ambito del Progetto 1.9 "Solare termodinamico" della Ricerca di Sistema, spesso viene evidenziato che in Italia a fronte delle considerazioni sopra riportate e della disponibilità di una buona e diffusa DNI sul territorio nazionale, anche in aree del nord Italia, le applicazioni di CSP connessi a processi produttivi sono quasi del tutto inesistenti, al contrario di quello che si può notare negli altri paesi del nord Europa [7]. Negli approfondimenti seguiti a queste preliminari analisi, due dei maggiori fattori che sembrano abbiano contribuito a determinare questo stato delle cose, sono: la mancanza di casi concreti di applicazione e l'assenza di soluzioni tecnologiche di CSP modulabili che siano adatte ad essere impiegate in spazi limitati e che siano capaci di interfacciarsi agevolmente con processi termici che richiedono calore in un intervallo di temperature compreso tra 150°C e 350°C. In questo ambito il sistema micro-PTC sviluppato dall'Università degli Studi di Firenze (UniFI) in attività di ricerca antecedenti a quelle di Progetto (fig. 1) presenta alcune particolarità che si prestano per superare le barriere tecnologiche sopra evidenziate. Tale sistema, infatti, prevede che il campo solare possa essere suddiviso in strutture modulari, componibili a piacimento. Ogni modulo del sistema micro-PTC di UniFI è costituito da un'intelaiatura di alluminio dove sono inserite delle parabole ottenute da una sottile lamiera di acciaio inox con pellicola riflettente ReflecTech (riflettanza speculare 96%) piegate su 5 centine, due di testa e 3 centrali. Ciascuna parabola ha una lunghezza di 1800 mm, una apertura 420 mm, ed una distanza focale di 80 mm ed un rapporto di concentrazione (definito come rapporto apertura specchio parabolico/diametro tubo assorbitore) pari a 42. Queste particolarità consentono che il sistema possa essere realizzato con un processo di fabbricazione automatizzato. Un altro aspetto positivo di questi sistemi è la particolarità che impiegano un tubo ricevitore caratterizzato da un design innovativo di tipo "one end" che permette al fluido termovettore di entrare e di uscire dallo stesso lato (una soluzione costruttiva che risulta potenzialmente più semplice, robusta, affidabile e particolarmente economica rispetto a quella classica); l'intercapedine sottovuoto tra tubo protettivo esterno in vetro e tubo "assorbitore" interno di metallo (acciaio o rame) dotato di coating solare, è una caratteristica che consente, almeno in

linea teorica, al tubo ricevitore e a tutto il sistema micro-PTC di lavorare anche a elevate temperature con rendimenti paragonabili ai sistemi CSP di grande taglia.

Obiettivo atteso della ricerca della presente linea di attività LA1.5 è quello di eseguire una serie di prove sperimentali finalizzate a valutare se la tecnologia m-PTC sviluppata da UniFi per operare a temperature medio-basse possa essere impiegata anche per generare energia termica con valori di temperatura compresi nell'intervallo 200-350°C e di individuare possibili soluzioni migliorative utili che possano consentirne il suo impiego in maniera affidabile anche in questo nuovo range termico operativo.

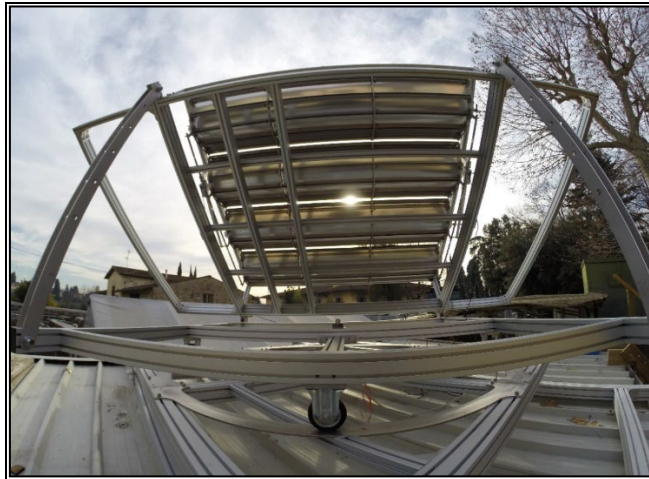


Figura 1 – m-PTC sviluppato da UniFi

## 2 Risultati ottenuti

L'attività sperimentale ha dimostrato che il prototipo m-PTC sviluppato da UniFI è in grado produrre calore di processo fino temperatura di target 300°C e potenzialmente anche fino a 350°C, ma a causa degli elevati valori di emissività del coating dei tubi ricevitori attualmente utilizzati risulta avere prestazioni di efficienza inferiore ai collettori PTC di grande taglia. Per aumentare tale rendimento è, quindi, necessario sviluppare un coating avente valori di emissività minori agli attuali ed analoghi a quelli impiegati nei collettori di grande taglia ( $\epsilon < 10\%$  a 300°C).

Da un punto circuitale è stato verificato che la tecnologia impiegata per la costruzione del circuito fino alla temperatura di 300°C non richiede di utilizzare particolari accortezze tecnologiche se non quelle previste nei normali circuiti termoidraulici, al contrario sopra i 300°C occorre adoperare delle tecnologie quali raccordi o giunzioni tipo Swagelok.

La caratterizzazione ottica del prototipo di micro-PTC ha evidenziato che il sistema è caratterizzato da valori bassi di intercept factor. Tale evidenza sperimentale induce a pensare che ci sono ampi margini di miglioramento. Le possibili cause di questi valori di intercept factor sono, infatti, da ricercarsi, oltre che nell'incertezza delle misure ottiche, anche nel processo costruttivo del concentratore m-PTC e della struttura del modulo di parabola. Il prototipo in esame è stato realizzato con un processo di costruzione di tipo artigianale, dove ciascun modulo di concentratore è costituito da una parabola ottenuta da una sottile lamiera di acciaio inox con pellicola riflettente ReflecTech (riflettanza speculare 96%) piegata su 5 centine, due di testa e 3 centrali, quindi, dalla realizzazione con le centine, è atteso che il profilo sia maggiormente regolare in prossimità delle centine (15-20 cm prima e dopo) e si discosti dall'idealità del profilo parabolico allontanandosi da esse. Questo aspetto è stato rilevato in tutte le analisi profilometriche condotte. Un altro aspetto sono le differenze tra profili dovuti alla posa della pellicola riflettente, effettuata manualmente, i cui effetti possono provocare deviazioni significative dalla riflessione speculare teorica. Sulla base di queste osservazioni è evidente, quindi, che il miglioramento di prestazioni del collettore passi anche da una ottimizzazione costruttiva dello stesso e dalla meccanizzazione della posa del materiale riflettente.

I risultati delle prove indicano che questa tecnologia, all'attuale stadio di sviluppo, può essere proposta in contesti rilevanti (TRL 4-5) per la produzione di calore con temperature comprese tra 120°C e 250°C abbinati a diverse capacità di accumulo.

Al fine di stimare il possibile impatto positivo sul sistema elettrico nazionali che possono avere ricerche di questo tipo è stato sviluppato uno studio [8] per determinare il valore tipico di LCOH prodotto da impianti m-PTC per produzione di energia termica con temperature dell'ordine dei 200°C. Come caso di riferimento è stato ipotizzato di avere a disposizione una superficie di 2000 mq (area che sulla base di un'indagine preliminare eseguita tra gli stakeholder della ricerca e dell'industria che partecipano agli incontri pubblici di Progetto risulta compatibile con la maggior parte dei plessi industriali nazionali) in un sito del Nord Italia tipo "area Bergamo". Nello studio è stato utilizzato come software di simulazione per la stima dell'energia prodotta e del LCOH il programma SAM del NREL e, per questo motivo, non è stato possibile usare i dati del m-PTC sotto investigazione, poiché a causa delle ridotte dimensioni della parabola concentratore non è possibile inserirlo nelle librerie del programma. Al suo posto è stato scelto di usare i dati di un mini-collettore PTC in grado di lavorare fino a 180°-200°C avente caratteristiche tali da poter essere implementati nelle librerie SAM. Nell'analisi economica sono stati considerati sia costi desunti dalla letteratura che costi valutati sulla base dei prezzi

effettivi di acquisto dei componenti [8]. I risultati preliminari dello studio hanno indicato che è possibile ottenere un LCOH inferiore a quello che si può ottenere attualmente attraverso la fornitura di gas metano. L'analisi, pur con tutti i limiti della stessa, conferma il vantaggio della generazione locale di calore a bassa-media temperatura con sistemi mini/micro-PTC sia nelle condizioni attuali che in prospettiva futura; infatti, sebbene se nell'immediato i vantaggi sono dovuti all'aumento strutturale del prezzo del metano, anche nel futuro il prezzo previsto per i nuovi combustibili privi di carbonio non sarà probabilmente inferiore (a titolo di esempio, rapporti di importanti società di consulenza fissano il prezzo dell'idrogeno verde in Europa al 2050 a circa 2,0-2,5 volte in più rispetto al prezzo attuale del metano [9]). È da notare inoltre, che posta la correlazione tra costo del gas metano e quello dell'energia elettrica basata sulla definizione del modello sistema prezzo marginale con cui si calcola il Prezzo Unico Nazionale dell'energia elettrica in Italia, è presumibile ipotizzare che la diffusione di tecnologie di generazione di calore da fonte solare distribuita, in zone fortemente antropizzate e a costi competitivi, potrebbe contribuire anche alla riduzione della volatilità del costo del metano e, quindi, anche alla riduzione dell'energia elettrica per tutti i tipi di utenza finale.

### 3 Prodotti attesi

La ricerca prevede che nell'ambito della linea di attività LA1.5 sia caratterizzato sperimentalmente un sistema prototipale di m-PTC fornito da UniFi ed i risultati dei test siano raccolti in n° 1 report tecnico:

- "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Caratterizzazione sperimentale di un prototipo di sistema micro-PTC innovativo sviluppato da UniFi" (Dicembre 2024).

## 4 Prodotti sviluppati

Il prodotto reso disponibile nell'ambito della linea di attività LA1.5 è costituito dal presente report tecnico:

- W. Gaggioli, M. De Lucia, F. Rovense, P. Di Ascenzi, V. Russo, M. Montecchi, G. Petroni, G. Cara, A. Benedetti, M. Giorgetti, M. Salvestroni, F. Cottone, "Materiali e componenti avanzati per impianti CSP - Caratterizzazione sperimentale di un prototipo di sistema micro-PTC innovativo sviluppato da UniFi", Dicembre 2024, Report RdS\_PTR 22-24\_PR1.9\_LA1.5\_300.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

La campagna sperimentale prevista nella della LA1.5 è stata condotta per numerose giornate in condizioni di clear sky (compatibilmente con quanto ottenibile nel sito del C.R. ENEA di Casaccia). Nelle prove è stata variata la temperatura di ingresso al modulo tra 120°C e 270°C per ottenere un numero di punti sufficienti per studiare le prestazioni del collettore a diverse temperature. Sono stati tentati anche prove a temperature più elevate, tuttavia a causa di alcune limitazioni intrinseche al banco prova è stato possibile raggiungere come massima temperatura di uscita il valore di 305°C. Tali problemi sono stati causati essenzialmente dai limiti in temperatura imposti al buffer della caldaia elettrica del circuito della piattaforma sperimentale "ENEA-SHIP" (causa di problemi di stabilità nel controllo della temperatura di ingresso al modulo) e alla lunghezza del circuito di connessione tra la stessa caldaia ed il sistema m-PTC. La soluzione di avvicinare il sistema m-PTC alla caldaia elettrica (con riduzione del collegamento di interconnessione) è stata scartata in quanto la caldaia è posizionata in una zona ad un livello sottostante la piazzola dove è stata alloggiato il modulo di m-PTC, una zona che per la maggiore parte della giornata è ombreggiata. È stata valutata come ulteriore soluzione quella di collegare il sistema m-PTC in uscita dal campo solare dell'impianto Fresnel della piattaforma "ENEA-SHIP". Questa soluzione non è stata implementata in parte perché le prove con la caldaia elettrica sono terminate nel mese di settembre 2024 e le condizioni di prova, da un punto di vista meteorologiche, non erano più favorevoli, ed in parte perché i test a temperatura più elevata avevo evidenziato che la tecnologia del coating dei tubi ricevitori in dotazione al m-PTC, pur consentendo di operare ad alte temperature, non permetteva di raggiungere efficienze termiche accettabili.

A causa delle proprietà dell'olio sintetico adoperato in qualità di fluido termovettore del circuito "ENEA-SHIP" (elevata viscosità) non è stato possibile investigare nello stesso set-up di prova ad olio il campo di temperature più prossimo alla temperatura ambiente. In questo caso, per determinare l'efficienza di picco del collettore, che si ottiene in condizioni di perdite termiche nulle, è stato impiegato un altro set up che impiega acqua come fluido termovettore.

A fronte delle considerazioni sopra riportate sulle criticità occorse nella sperimentazione del m-PTC di UniFI, è possibile affermare che attività svolte e risultati ottenuti sono sostanzialmente in linea con le attese e che, pertanto, nella LA1.5 non sono stati rilevati scostamenti tecnici significativi.

In merito agli scostamenti economici, i costi totali (escluse spese generali) sostenuti e rendicontati per l'esecuzione della LA1.5, pari a circa 52,7 k€, sono minori rispetto a quelli a preventivo, pari a circa 65,2 k€. Le principali motivazioni degli scostamenti sono:

- I costi di esercizio (cat. C) a consuntivo, pari a circa 2,1 k€, sono minori del preventivo, pari a 11 k€, in quanto le previste forniture per l'installazione del collettore micro-PTC di UniFI non sono risultate più necessarie (è stata acquisita solo la fornitura di un servizio di trasporto del collettore presso il C.R. ENEA di Casaccia).
- I costi per servizi di consulenza, acquisizione di competenze tecniche, brevetti (cat. D) a consuntivo, pari a circa 16,5 k€, sono minori del preventivo, pari a 20 k€, principalmente per economie in fase di esecuzione dell'appalto.

Si ritiene, infine, di evidenziare quanto di seguito. I costi di personale (cat. A) sostenuti e rendicontati per la LA1.5, pari a circa 31,9 k€, sono allineati al preventivo. Tuttavia, oltre a detti costi di personale sostenuti e rendicontati per la LA1.5, ENEA ha sostenuto ma non ha potuto esporre a consuntivo, causa superamento del contributo totale massimo ammesso dal capitolato vigente di Progetto, ulteriori circa 2,7 k€ di costi di personale. Il totale dei costi di personale sostenuti da ENEA per la LA1.5 (costi sostenuti e rendicontati + costi sostenuti ma

non esposti a consuntivo), pari a circa 34,6 k€, risulterebbe maggiore rispetto al preventivo a causa del nuovo inquadramento giuridico-economico, a far data dal 1/1/2023, con passaggio da ricercatore (costo std. Liv. Medio) a primo ricercatore (costo std. Liv. Alto), di n° 2 unità di personale rendicontata nella LA1.5. Tali maggiori costi di personale andrebbero a compensare parzialmente i minori costi di esercizio e per servizi di consulenza acquisizione di competenze tecniche, brevetti sostenuti per la LA1.5.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Le attività sperimentali per la caratterizzazione del sistema prototipale m-PTC di UniFI sono state eseguite presso la piattaforma di caratterizzazione componenti solari a media e bassa temperatura "ENEA-SHIP" (Solar Heat Industrial Process) del C.R. ENEA di Casaccia. Il sistema m-PTC, dopo essere stato trasportato dall'UniFi al C.R. ENEA di Casaccia, è stato installato presso apposita piazzola provvista di un supporto ruotante a 3 assi realizzato ad hoc. Il prototipo è stato collegato al circuito dell'impianto "ENEA-SHIP" ed al relativo apparato di misura ed acquisizione dati. Il prototipo prima dell'esecuzione delle prove è stato sottoposto ad una revisione delle giunzioni del circuito idraulico con l'inserimento di sigillanti ad alta temperatura, all'installazione della sensoristica necessaria per le prove e alla cablatura e potenziamento del sistema di acquisizione dati.

A valle delle operazioni preliminari di preparazione del set up di prova, sono state eseguite le seguenti attività:

- test di caratterizzazione termica ad alta temperatura al fine di determinare l'efficienza termica dei moduli di collettori solari ed evidenziare eventuali problematiche tecnologiche di funzionamento del componente ad alta temperatura e con fluido olio silconico;
- test di caratterizzazione termica a bassa temperatura (50-200°C) con fluido ad acqua, per la misura dell'efficienza ottica di picco;
- test di caratterizzazione ottica per determinare eventuali migliorie che possano essere apportate al prototipo per aumentare l'efficienza termica;
- analisi dati.

Le attività di impostazione della matrice di prova, esecuzione delle prove ed analisi dati sono state eseguite in collaborazione tra ENEA ed UniFI al fine di individuare la migliore metodologia di caratterizzazione del sistema.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

La preparazione del set up di prova del prototipo di m-PTC messo a punto da UniFI, che è stato trasportato da Firenze al Centro Ricerche ENEA di Casaccia, ha richiesto un aggiornamento delle dotazioni della piattaforma "ENEASHIP" ed un potenziamento del suo sistema di rilevamento ed acquisizioni dati sperimentali, una revisione del circuito idraulico esterno del m-PTC prototipale per renderlo idoneo alle condizioni di prova ed una riconfigurazione del sistema Digital Control System con cui viene governato il circuito. In particolare, il circuito idraulico del prototipo UniFI è stato completamente revisionato e, nella fattispecie, le giunzioni esterne dei singoli moduli di collettori sono state sigillate con sigillante siliconico ad alta temperatura, al fine di consentire l'esecuzione delle prove ad alta temperatura. La preparazione del setup sperimentale è stata completata con la realizzazione di una piazzola provvista di tutti i servizi elettrici (figura 2a), e un basamento rotante su cui alloggiare il sistema m-PTC (fig.2b).

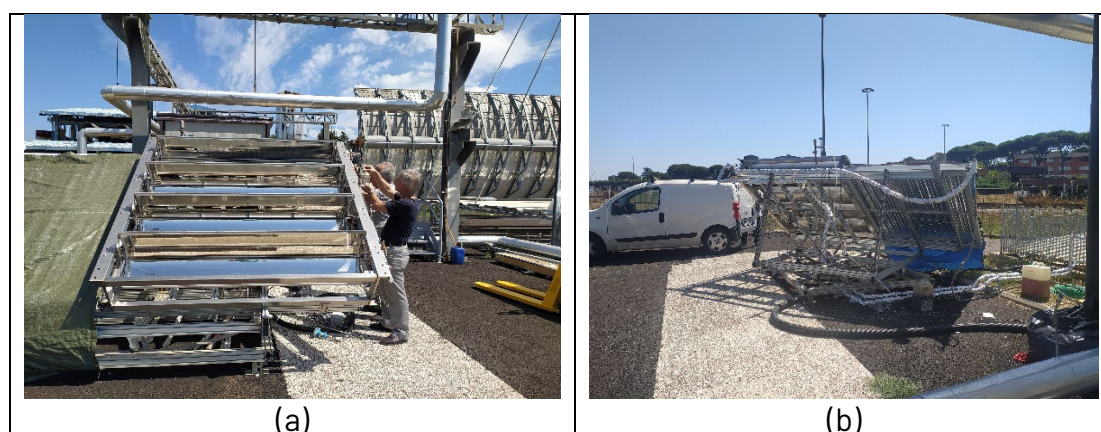


Figura 2 - Collettore m-PTC installato presso circuito sperimentale "ENEASHIP" (C.R. ENEA di Casaccia, Roma): (a) piazzola, (b) supporto rotante

Il prototipo è stato equipaggiato con numerosi sensori, ognuno dei quali è stato connesso con il sistema di controllo della piattaforma "ENEASHIP" per monitorare e misurare le principali variabili di interesse (temperatura di ingresso e di uscita del fluido per ogni tubo ricevitore; temperatura ambiente; portata massica; radiazione diretta):

- 12 RTD 1/10 din, calibrate, aventi accuratezza 0.1 °C tra 0°- 300°C;
- misuratore di portata massica ad effetto Coriolis, Rheonik Accuratezza 0,5% tra 10 - 0.2 kg/min;
- acquisitore Agilent 34970, accuratezza 0.006 %;
- stazione meteo, Solys 2 equipaggiata di pireliometro di prima classe con accuratezza <1% per la misura della DNI, piranometro per la misura della radiazione globale e piranometro con sfera ombreggiante per la misura della radiazione diffusa.

Durante le prove i segnali sono stati acquisiti con un tempo di campionamento di 2.5 s ed elaborati per mezzo di un programma scritto in LabView.

### 7.1 Caratterizzazione termica ad alta temperatura del collettore m-PTC.

Ai fini di valutare correttamente il rendimento termico del sistema m-PTC, costituito da 4 moduli di collettori di concentratori, quest'ultimo è stato alloggiato su una piattaforma, che messa in rotazione attraverso un motore elettrico, consente di effettuare l'inseguimento azimutale del moto apparente del sole nella volta celeste. Tale tracking, insieme all'inseguimento operato dai singoli concentratori, permette di annullare, istante per istante,

l'angolo di incidenza della radiazione sul collettore; l'angolo di incidenza, infatti, risulta parallelo alla normale al piano del collettore. L'inseguimento a doppio asse annulla il contributo delle perdite legate all'angolo di incidenza e alla geometria (Incidence angle modifier, perdite di fine collettore, ecc.). I concentratori sono stati connessi ad un opportuno sistema di tracking che ha permesso di inseguire le variazioni della posizione del sole sulla linea dell'orizzonte. Il sistema di inseguimento utilizzato dal prototipo è composto dalla combinazione di un algoritmo, che calcola istante per istante la posizione del sole in caso di cielo coperto, e da un sensore di tracking. Il sensore di tracking è formato da due fotodiodi calibrati separati da una lastra opaca allineata con la normale al collettore e che ha priorità, in caso di cielo sereno, sull'apparato tracking basato sugli output dell'algoritmo. Il sistema di fotodiodi è stato congeniato in maniera tale che quando i raggi del sole sono paralleli alla normale relativa all'apertura del collettore i fotodiodi forniscono la stessa tensione in uscita, mentre quando la lastra ombreggia uno dei due fotodiodi, viene generata una tensione di sbilanciamento nelle tensioni. Il segnale dei fotodiodi è acquisito da un software sviluppato in Arduino e Python, e il movimento dei concentratori viene opportunamente corretto per ridurre l'errore di inseguimento, realizzando un controllo di tipo closed-loop. L'accuratezza del sensore di tracking dei singoli concentratori è di 0.1°. Le prove sperimentali ad alta temperatura sono state finalizzate a misurare l'efficienza termica del collettore m-PTC. Tale misura è stata ottenuta applicando la seguente relazione:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{out}-T_{in})}{DNI A};$$

dove:

$\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$  è la portata massica,

$T_{out}$  [K] è la temperatura di uscita dal collettore,

$T_{in}$  [K] è la temperatura di ingresso al collettore,

$C_p \left[ \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \right]$  è il calore specifico a pressione costante del fluido termovettore,

$DNI \left[ \left( \frac{W}{m^2} \right) \right]$  è la radiazione diretta sul collettore,

$A [m^2]$  è l'apertura del collettore.

Per condurre i test ed elaborare i risultati, è stata seguita la normativa ISO 9806:2017, selezionando la modalità steady state, che richiede che le variabili di interesse siano stabili durante la misura come riportato nella successiva tabella 1. La ISO 9806:2017 prescrive di effettuare almeno 4-5 giorni di test e selezionare un certo numero di punti di lavoro equamente spazati lungo la temperatura di funzionamento del collettore. Applicando ai dati un algoritmo di regressione multipla lineare (MLR) ai minimi quadrati è possibile ricavare la curva di efficienza del collettore:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_m - T_{amb})}{DNI} - a_2 \frac{(T_m - T_{amb})^2}{DNI};$$

dove  $T_m = \frac{T_{out} + T_{in}}{2}$ ;  $\eta_0, a_1, a_2$  sono i parametri da determinare.

Variabile	$\Delta$ rispetto al valore medio	Valore minimo ammesso
Radiazione Globale	$\pm 50 W/m^2$	$650 W/m^2$
Temperatura ambiente	$\pm 1.5 K$	
Portata	$\pm 1 \%$	
Temperatura di ingresso	$\pm 0.1 K$	
Temperatura di uscita	$\pm 0.1 K$	

Tabella 1 - Deviazioni permesse da ISO 9806:2017

Dalle prove eseguite, è stato selezionato un insieme di intervalli, aventi periodo minimo  $t \geq 10'$ , che soddisfano i requisiti richiesti dalla normativa sulle variabili da monitorare per i test quasi stazionari. In tabella 2 sono riportati i valori registrati per le grandezze di interesse.

Data	t [min.]	$T_{in}$ [°C]	$\sigma_{T_{in}}^2$ [°C <sup>2</sup> ]	$T_{out}$ [°C]	$\sigma_{T_{out}}^2$ [°C <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [°C]	$\sigma_{T_{amb}}^2$ [°C <sup>2</sup> ]	$\dot{m}$ [ $\frac{kg}{hr}$ ]	$\sigma_{\dot{m}}^2$ [ $\frac{kg}{hr}$ ]	DNI [ $\frac{W}{m^2}$ ]	$\sigma_{DNI}^2$ [ $\frac{W}{m^2}$ ] <sup>2</sup>
23/7/24 13.43	10:00	125.40	0.05	134.32	0.07	8.92	0.07	37.2	0.7	38.94	0.14
23/7/24 13.53	11:14	125.78	0.07	134.50	0.09	8.71	0.06	38.4	0.5	38.22	0.21
23/7/24 14.14	08:57	159.2	0.5	167.2	0.4	8.06	0.15	37.7	0.6	34.9	0.4
23/7/24 14.23	10:06	160.4	0.2	168.6	0.8	8.3	0.7	37.6	0.5	32.74	1.0
24/7/24 12.01	14:55	181.6	0.4	204.2	1.7	22.7	1.5	36.1	0.7	11.8	0.3
24/7/24 13.35	10:44	216.2	0.2	250.5	0.6	34.3	0.4	36.4	0.4	7.03	0.13
29/7/24 9.49	11:01	133.71	0.10	148.1	0.6	14.4	0.7	34.6	0.5	8.92	0.13
29/7/24 10.04	15:43	132.5	0.4	148.5	0.8	16.0	0.7	35.3	0.6	8.47	0.12
29/7/24 10.55	10:59	153.38	0.12	171.2	0.3	17.8	0.3	36.2	0.4	7.45	0.07
29/7/24 11.07	09:55	152.3	0.2	170.92	0.13	18.6	0.2	36.8	0.5	7.44	0.03
29/7/24 12.16	09:42	180.1	0.4	199.9	0.3	19.8	0.3	38.4	0.4	6.48	0.10
30/7/24 11.04	10:28	200.9	0.7	221.0	0.6	20.1	0.2	35.3	0.9	5.54	0.06
30/7/24 11.09	10:52	200.6	0.4	220.7	0.4	20.14	0.10	35.8	1.2	5.49	0.11
30/7/24 11.16	16:59	201.4	0.6	222.0	0.7	20.5	0.3	36.6	0.5	5.28	0.10
10/9/24 10.44	16:22	265.8	0.2	273.6	0.3	7.8	0.3	28.2	0.2	13.87	0.05
10/9/24 11.08	13:22	262.7	0.2	270.7	0.2	8.05	0.07	29.1	0.3	13.94	0.12
10/9/24 11.20	11:17	263.08	0.09	271.20	0.11	8.13	0.07	29.6	0.3	13.65	0.24
10/9/24 11.32	18:35	263.8	0.2	272.0	0.2	8.27	0.10	29.8	0.3	13.65	0.07

Tabella 2 - Intervalli di misura che rispettano i requisiti della normativa ISO 9806:2017

Come si può notare dai valori della tabella 2, tutte le variabili monitorate sono comprese nei limiti imposti dalla normativa ad eccezione di  $T_{in}$ . Su tale variabile è stato necessario attenuare il vincolo imposto dalla normativa perché esso risulta eccessivamente stringente da perseguire nella specifica condizione sperimentale (lunghezza del percorso, dispersioni termiche, ecc.). I risultati sperimentali sono riportati nel grafico figura 3, insieme alle relative bande di errore:

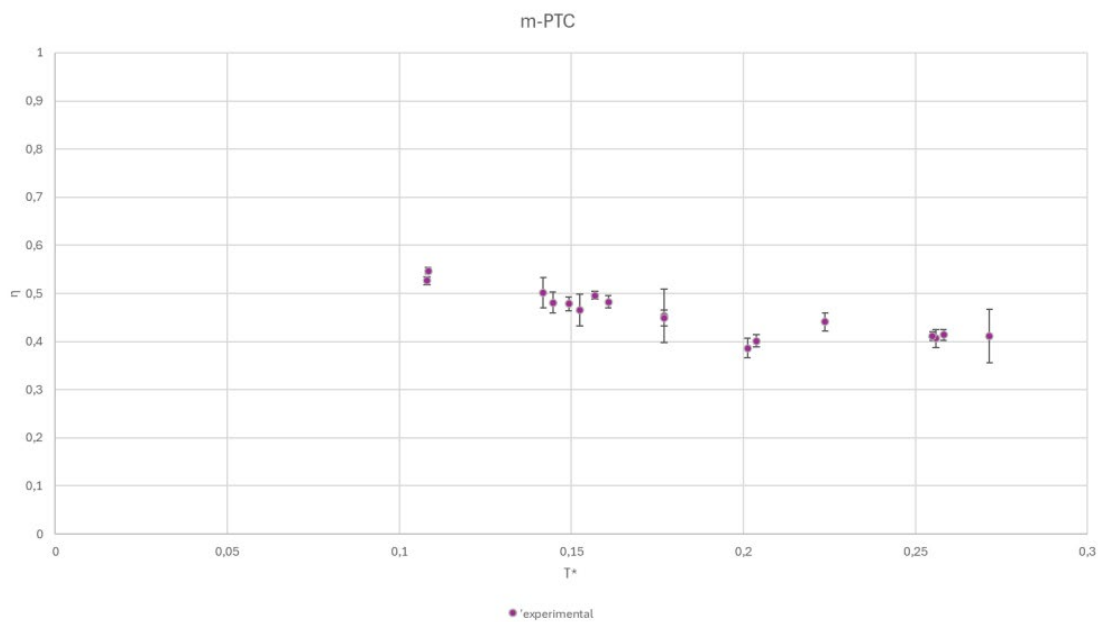


Figura 3 - Efficienza vs Temperatura ridotta  $T^* = \frac{T_m - T_{amb}}{DNI} \left[ \frac{Km^2}{W} \right]$

Dagli andamenti di figura 3 è possibile dedurre come la perdita di efficienza del collettore nel range di temperatura testato (125 °C -264°C), sia notevolmente ridotta, pari al 13%. Inoltre, si evince che per valori di  $T^* = \frac{T_m - T_{amb}}{DNI}$  superiori a  $0.25 \frac{Km^2}{W}$  l'efficienza del collettore m-PTC risulta essere superiore al 40%. Tale valore, seppur non trascurabile, risulta inferiore alle prestazioni dei collettori PTC di grande taglia. Il motivo è da ricercarsi nell'elevato valore dell'emissività del coating impiegato nel prototipo dell'm-PTC: da prove sperimentali realizzate precedentemente in laboratorio ad Unifi, il valore dell'emissività è >10% a 200°C. Per aumentare il rendimento del collettore alle temperature di interesse (300°C) è necessario quindi sviluppare un coating avente valori di emissività minori agli attuali ed analoghi a quelli impiegati nei collettori di grande taglia ( $\epsilon < 10\%$  a 300°C). I punti sperimentali del grafico di figura 3 sono caratterizzati da incertezze differenti tra loro. Il contributo maggiore all'errore sull'efficienza è dovuto alla DNI a causa della sua intrinseca variabilità (errore statistico).

L'elevata viscosità dell'olio diatermico Therminol-66 [10] a temperatura ambiente non ha permesso di svolgere test a bassa temperatura e quindi non è stato possibile applicare la regressione multipla lineare ai risultati sperimentali ottenuti perché il parametro  $\eta_0$ , l'efficienza ottica di picco, sarebbe stata ricavata per estrapolazione (valore fuori dal campo di misura) e conseguentemente non sarebbe stata affidabile. Per ovviare a questa problematica la misura dell'efficienza ottica di picco del collettore è stata eseguita impiegando un circuito sperimentale distinto dal precedente che utilizza come fluido termovettore l'acqua. Questa seconda tipologia di prove è stata condotta partendo da una temperatura di fluido più bassa della temperatura ambiente ed usando una portata che consenta di avere un valore  $\Delta T$ , come definita in precedenza, praticamente nullo. I risultati ottenuti con questo tipo di prove sono stati riportati in figura 4

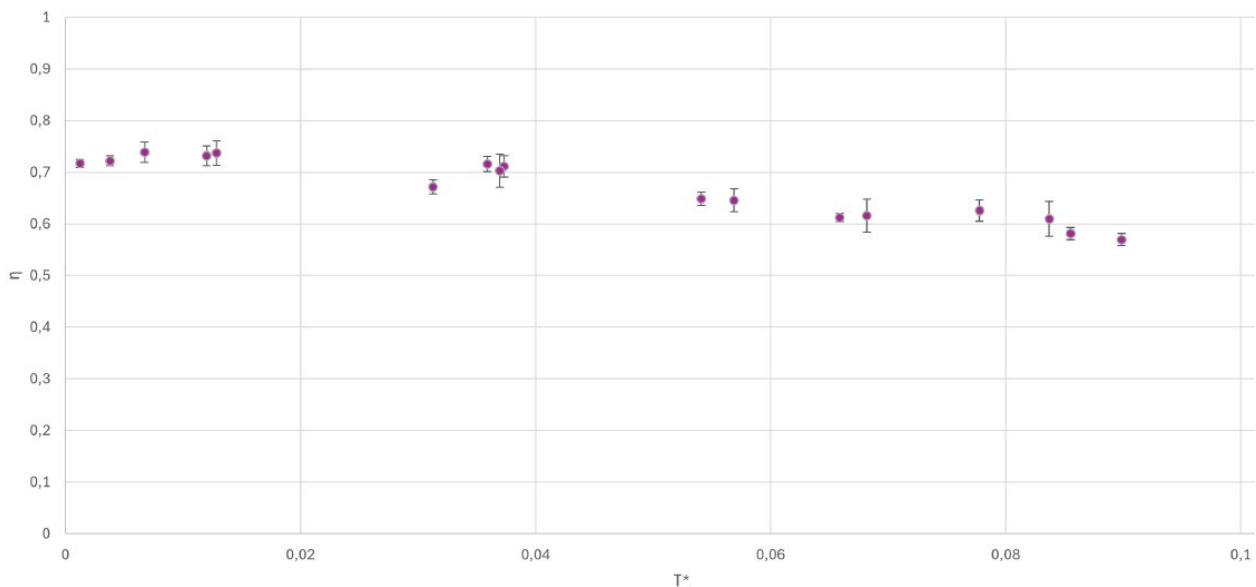


Figura 4 - Efficienza vs Temperatura ridotta  $T^* = \frac{T_m - T_{amb}}{DNI} \left[ \frac{Km^2}{W} \right]$

Come si può osservare dal grafico di figura 4, l'efficienza ottica di picco del collettore si è attestata intorno al 72-75%.

## 7.2 Caratterizzazione ottica del concentratore

Nelle prove di caratterizzazione ottica sono state eseguite due procedure diverse, Una con una camera in assetto "da-VICINO" ed una con assetto "da-LONTANO" (vedi figura 5). In un caso la

stima dell'intercept factor della parabola è stata effettuata con un carrello di misura VISfield. Il fattore di intercettazione è desunto dalla sovrapposizione tra l'immagine del tubo ricevitore e la zona attesa dello spot solare. Nel secondo caso la camera è stata posta ad una distanza sufficiente (diverse centinaia di metri) a rendere solida l'assunzione di raggi solari perfettamente paralleli in rapporto alle dimensioni della corda e apertura della parabola. È stata eseguita la scansione della parte centrale di due collettori costituenti il modulo m-PTC. La fascia centrale scansionata è larga 55 cm; tale valore è vincolato alla distanza di osservazione massima e dall'obiettivo della telecamera.



Figura 5 - Strumentazione impiegata per le prove di profilometria

L'area investigata con l'analisi profilometrica ha riguardato prevalentemente lo spazio tra le centine (larghezza scansionata 55 cm, pari a meno del valore dell'interasse tra le centine). In figura 6 sono stati riportati i risultati opportunamente elaborati ottenuti dalla scansione ottica.

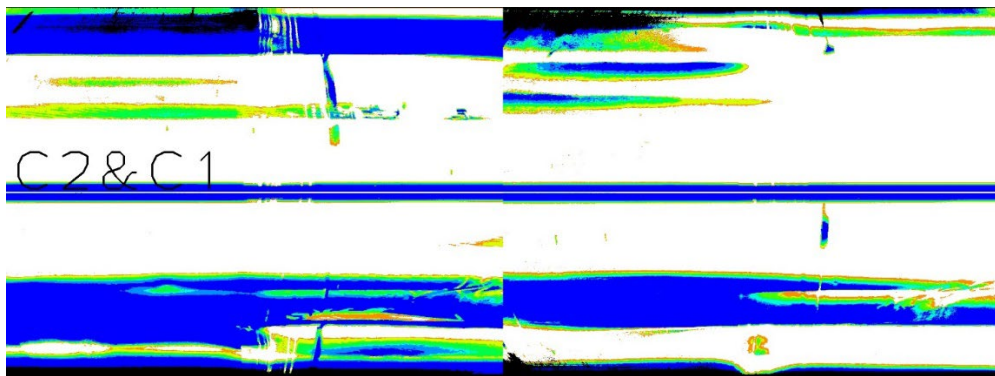


Figura 6 - Risultati delle misure per i due collettori scansionati. Legenda: colore bianco cattura completa, rosso al 99%, scala di colori che portano fino al blu che indica 0% e nero che rappresenta il campionamento ottico non riuscito.

Il fattore di intercettazione medio assume valori puntuali diversi punto per punto del concentratore e restituisce valori medi che variano dal 66% fino al 77%, rispettivamente per il collettore di sinistra e di destra. Si rileva che tale valore dà luogo a valutazioni molto cautelative e pessimistiche facendo intravedere ampi spazi per importanti margini di miglioramento. Infatti le misure ottiche danno luogo a valori inferiori a quanto ottenuto dalle misure sperimentali condotte per  $\eta_0$ . Il valore ottenuto di efficienza ottica di picco, misurato nelle prove sperimentali effettuate, infatti hanno fornito  $\eta_0 = 71-72\%$ . Si tratta valori estratti da giorni e giorni di prove e frutto di migliaia di misure effettuate secondo norma. Partendo da queste, date le proprietà ottiche dei materiali ( $\rho=96\%$ ,  $\alpha=93\%$ ,  $\tau=95\%$ ), il valore di intercept factor dovrebbe essere pari almeno a valori maggiori di 0.84. Anche precedenti misure effettuate con tecniche (<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5671>) diverse, realizzate dall'Istituto Nazionale di Ottica del CNR su un campione dello stesso collettore, hanno dato luogo a valori più elevati (<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5293>).

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Le lavorazioni di installazione del prototipo presso il CR ENEA Casaccia, collegamenti idraulici ed aggiornamento del sistema di misura ed acquisizione dati (installazione sensori, stesura collegamenti elettrici e dati, implementazione schede dati, collegamenti con sistema acquisizione dati piattaforma "ENEA-SHIP") sono stati realizzati mediante attivazione di un contratto per "Servizi di assistenza tecnica specialistica" con una società esterna opportunamente selezionata da ENEA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Nell'ambito della LA1.5 è stato sottomesso e accettato per la pubblicazione come atti della Conferenza SolarPACES 2024 ("30th SolarPACES Conference") su rivista internazionale il seguente articolo scientifico (attualmente in fase di revisione):

- 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

Dalle attività svolte nella LA1.5 è scaturita la partecipazione ai seguenti eventi:

- "30th SolarPACES Conference", Roma, Italia, 8-11 Ottobre 2024 - Presentazione poster "Assessment of Small-Scale Parabolic Trough Collectors for Integration in Industrial Process Heat", a cura di Francesco Rovense (ENEA).
- "ZeroEmission Mediterranean 2024 - International Conference and Exhibition", 17 ottobre 2024, Roma, Italia - Workshop "Analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CST per la generazione distribuita in ambienti antropizzati", a cura di: Walter Gaggioli (ENEA), Prof. Maurizio De Lucia (UniFI).

## 11 Bibliografia

- [1] Renewables 2023 – Analysis – IEA n.d. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (accessed September 5, 2024);
- [2] Union PO of the E. Renewable heating and cooling pathways: towards full decarbonisation by 2050 : final report. 2023. <https://doi.org/10.2833/036342:333>
- [3] Distributed energy resources and benefits to the environment - Renewable and Sustainable Energy Reviews 14(2):724-734, February 2010, M. F. Akorede, H. Hizam, E. Poursmaeil.
- [4] Cogeneration transition for energy system decarbonization: From basic to flexible and complementary multi-energy sources Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 187, 113709, November 2023, H. Ma, Q. Sun, L. Chen , Q. Chen, T. Zhao, K. He, F. Xu, Y. Min, S. Wang, G. Zhou
- [5] IRNEA. IRENA (2022), Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-452-3. Int Renew Energy Agency 2022:160;
- [6] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY Directorate C. 2-New energy technologies, innovation and clean coal n.d
- [7] EUROSUN 2024 Rapporto Solorico Bärbel Epp, [www.solrico.com](http://www.solrico.com), [www.solarthermalworld.org](http://www.solarthermalworld.org)
- [8] Assessment of Small-Scale Parabolic Trough Collectors for Integration in Industrial Process Heat F. Rovense, W. Gaggioli, F. Grisoni, M. Rottoli, M. De Lucia, L. Nibbi, M. Salvestroni, F. Cottone
- [9] Analysing the future cost of green hydrogen | PwC n.d. <https://www.pwc.com/gx/en/issues/esg/the-energy-transition/analysing-future-cost-of-green-hydrogen.html> (accessed September 18, 2024);
- [10] [https://www.therminol.com/sites/therminol/files/documents/TF-8695\\_Therminol-66\\_Technical\\_Bulletin.pdf](https://www.therminol.com/sites/therminol/files/documents/TF-8695_Therminol-66_Technical_Bulletin.pdf) Accesso 15/01/2025;