

# Ricerca di Sistema elettrico



## **LA 4.11: Tecnologie avanzate e sistemi complessi: sistemi ibridi termo-fotovoltaici accoppiati a pompe di calore**

M. Azzolin, R. Conte, S. Bortolin, D. Del Col



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**dii** DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

#### LA 4.11 - TECNOLOGIE AVANZATE E SISTEMI COMPLESSI: SISTEMI IBRIDI TERMO-FOTOVOLTAICI ACCOPPIATI A POMPE DI CALORE

M. Azzolin, R. Conte, S. Bortolin, D. Del Col (Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 4.11

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova,

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: gennaio 2022

Mese fine previsto: giugno 2023

Mese fine effettivo: giugno 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Studio di sistemi ibridi termo-fotovoltaici accoppiati a pompe di calore, nuovi fluidi refrigeranti e materiali PCM per componenti e accumuli termici per pompe di calore*"

Responsabile scientifico ENEA: Raniero Trinchieri

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Stefano Bortolin

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	5
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	6
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....	7
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	18
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	19
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	20

## 1 Risultati attesi

La linea di attività 4.11 prevedeva lo sviluppo di soluzioni in grado di migliorare le prestazioni di collettori solari termo-fotovoltaici (PV-T) accoppiati a pompe di calore, attraverso un approccio basato su modelli numerici e test sperimentali da eseguire su una macchina di piccola taglia disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova.

Le pompe di calore elio-assistite sfruttano l'energia solare come sorgente termica. Esistono due tipi di pompe di calore a compressione di vapore elio-assistite: le pompe di calore elio-assistite di tipo indiretto (nelle quali un fluido secondario viene riscaldato dai collettori solari e poi inviato all'evaporatore della macchina) e le pompe di calore elio-assistite di tipo diretto (in questo caso i collettori solari funzionano anche da evaporatore per la macchina). L'uso di collettori solari ibridi termo-fotovoltaici accoppiati ad una pompa di calore consente di convertire parte della radiazione solare in energia elettrica e parte in calore che viene fornito all'evaporatore della pompa di calore. Questo permette anche di raggiungere una maggiore efficienza di conversione fotovoltaica grazie al raffreddamento delle celle. Tuttavia, un collettore solare, in caso di irraggiamento solare scarso o assente, non è in grado di assorbire tutto il calore necessario al funzionamento della pompa di calore. Una soluzione possibile è quella di utilizzare una pompa di calore a doppia sorgente funzionante sia con fonte solare sia con aria come sorgente esterna in modo da garantirne il funzionamento anche in assenza di irraggiamento solare. Con le nuove restrizioni all'uso di refrigeranti ad alto GWP (Global Warming Potential) introdotte dal nuovo regolamento europeo 2024/573, ci si attende che i fluidi naturali come la CO<sub>2</sub> troveranno sempre maggior impiego anche nel campo delle pompe di calore domestiche. Presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova è disponibile un prototipo di pompa di calore elio-assistita di tipo diretto operante con CO<sub>2</sub>. Il prototipo ha una capacità termica nominale pari a 5 kW e può funzionare con due sorgenti: l'aria esterna o la radiazione solare. L'evaporatore della macchina può quindi essere una batteria alettata o un collettore solare ibrido termo-fotovoltaico.

La linea di attività 4.11 si proponeva di sviluppare due aspetti: da un lato studiare soluzioni per migliorare le prestazioni delle celle fotovoltaiche attraverso il contenimento della loro temperatura e dall'altro il miglioramento delle prestazioni dell'intero sistema (pompa di calore e collettori solari termo-fotovoltaici) utilizzando al meglio le due sorgenti (aria e radiazione solare).

Nello specifico, i risultati attesi, come da capitolato, sono i seguenti:

1. La ricerca di soluzioni per migliorare le prestazioni delle celle fotovoltaiche attraverso il contenimento e l'uniformità della loro temperatura. L'attività prevedeva lo studio sperimentale di una soluzione innovativa per il raffreddamento delle celle fotovoltaiche basata sull'impiego di un evaporatore di tipo allagato alimentato da liquido sotto-raffreddato con portata controllata da una pompa di circolazione a velocità variabile. Si voleva comprendere se questa configurazione fosse in grado di mantenere uniforme la temperatura delle celle fotovoltaiche, eliminando la presenza di zone nel collettore termo-fotovoltaico interessate da deflusso di vapore surriscaldato ed evitando anche problemi di maldistribuzione della miscela liquido-vapore nell'evaporatore.
2. Il miglioramento delle prestazioni dell'intero sistema integrato composto da una pompa di calore e dai moduli termo-fotovoltaici (PV-T), utilizzando al meglio le due sorgenti termiche a disposizione (aria e radiazione solare). Questa attività prevedeva l'utilizzo di modelli numerici validati con dati sperimentali.

La descrizione dell'attività svolta e dei relativi risultati è riportata nel presente rapporto tecnico.

## 2 Risultati ottenuti

Con riferimento al risultato atteso #1 (miglioramento delle prestazioni delle celle fotovoltaiche attraverso il contenimento e l'uniformità della loro temperatura).

- Si è dimostrato sperimentalmente che, facendo funzionare un collettore ibrido termo-fotovoltaico (PV-T) come evaporatore allagato di una pompa di calore (alimentando l'evaporatore con CO<sub>2</sub> in fase liquida attraverso una pompa a velocità variabile ed evitando il surriscaldamento all'uscita) è possibile mantenere una temperatura uniforme su tutto il pannello (con variazioni di  $\pm 2$  °C rispetto al valore medio).
- Con irradianza solare pari a 1040 W m<sup>-2</sup> e temperatura dell'aria 13 °C il sistema di raffreddamento delle celle fotovoltaiche a circolazione forzata di CO<sub>2</sub> permette di aumentare l'efficienza della conversione elettrica di 1.2 punti percentuali rispetto al caso senza raffreddamento delle celle.
- Si è visto che nelle condizioni di irradianza solare pari a 930 W m<sup>-2</sup>, temperatura dell'aria 11.5 °C, temperatura ingresso/uscita acqua 30 - 35 °C, il sistema a circolazione forzata consente di ottenere un incremento del 15% sul COP (coefficiente di effetto utile) della pompa di calore e un aumento del 5% della potenza elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici (rispetto al sistema di riferimento che prevede la circolazione naturale del fluido nei pannelli). Questo porta a due benefici per il sistema elettrico: da un lato aumento della produzione fotovoltaica a parità di condizioni ambientali, dall'altro minor consumo della pompa di calore in termini di potenza elettrica al compressore.

Con riferimento al risultato atteso #2 (miglioramento delle prestazioni del sistema integrato pompa di calore e moduli PV-T utilizzando al meglio le due sorgenti termiche a disposizione).

- È stato sviluppato un modello numerico di una pompa di calore a doppia sorgente (aria/radiazione solare) accoppiata con collettori ibridi PV-T. In questo caso, la pompa di calore elio-assistita è di tipo indiretto in quanto si usa un fluido secondario (acqua) per trasferire il calore dai pannelli PV-T all'evaporatore della pompa di calore (scambiatore a piastre).
- Sono state considerate due località (Roma e Parigi) con i rispettivi fabbisogni termici. Sono state fatte simulazioni con la pompa di calore che utilizza solo l'aria come sorgente e simulazioni nelle quali la pompa di calore può utilizzare in alternativa l'aria o i pannelli PV-T come sorgente (la selezione della sorgente viene fatta in base al valore di COP stimato). Nel caso di Roma si è calcolato un aumento del COP stagionale (SCOP) del 3.5% utilizzando la modalità ibrida rispetto alla modalità con solo aria. A livello di sistema elettrico, l'utilizzo di una pompa di calore a due sorgenti con una strategia di controllo porta ad una riduzione dei consumi elettrici della macchina.
- È stato inoltre sviluppato un modello dell'evaporatore PV-T e questo modello è stato integrato con un modello dinamico in TRNSYS che comprende una pompa di calore elio-assistita di tipo diretto (la CO<sub>2</sub> evapora direttamente all'interno del pannello PV-T) e un circuito idronico costituito da due serbatoi. Il modello è stato validato con i dati sperimentali misurati con il prototipo disponibile presso l'Università di Padova. Questo modello può essere usato per predire le prestazioni della macchina e quindi per determinare la modalità di funzionamento (aria o solare) che garantisce il COP più elevato.

### 3 Prodotti attesi

Il prodotto atteso è il presente rapporto tecnico: “Tecnologie avanzate e sistemi complessi: sistemi ibridi termo-fotovoltaici accoppiati a pompe di calore”.

## 4 Prodotti sviluppati

Il prodotto sviluppato è il presente rapporto tecnico che descrive le attività di ricerca condotte nell'ambito della linea di attività 4.11.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono stati scostamenti né tecnici né economici sulle attività e risultati da segnalare.

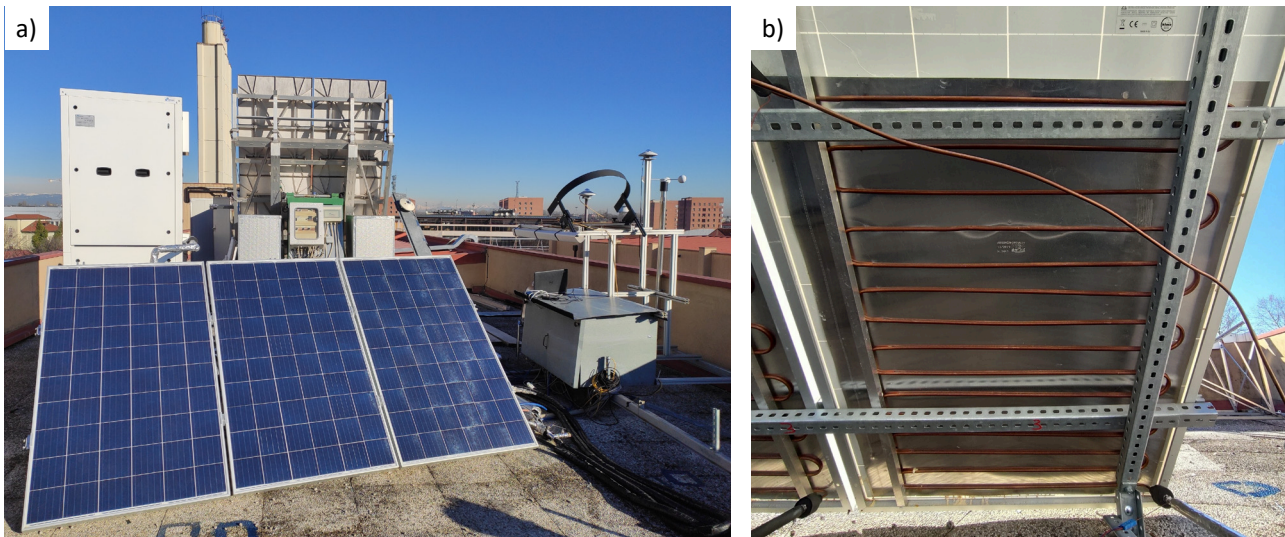
## 6 Sintesi delle attività svolte

La prima parte dello studio ha riguardato il miglioramento delle prestazioni delle celle fotovoltaiche (FV) abbinate a un prototipo di pompa di calore (PdC) a CO<sub>2</sub> elio-assistita disponibile presso l'Università di Padova, attraverso il contenimento e l'uniformità della loro temperatura. La PdC, nella configurazione di partenza, raffreddava le celle FV con un evaporatore a circolazione naturale che causava una temperatura non uniforme sulle celle. È stata poi individuata una soluzione con un evaporatore allagato nel collettore termofotovoltaico (PV-T) e circolazione forzata del fluido. Questo ha permesso di ottenere una temperatura più bassa ed uniforme sulle celle FV, aumentando la potenza elettrica prodotta e il COP. Nella seconda parte sono stati sviluppati modelli numerici per una PdC a doppia sorgente con pannelli ibridi PV-T. I modelli hanno consentito di predire il COP della macchina e di migliorare le prestazioni utilizzando in modo opportuno le due sorgenti termiche.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Ricerca di soluzioni per il miglioramento delle prestazioni delle celle fotovoltaiche attraverso il contenimento e l'uniformità della loro temperatura

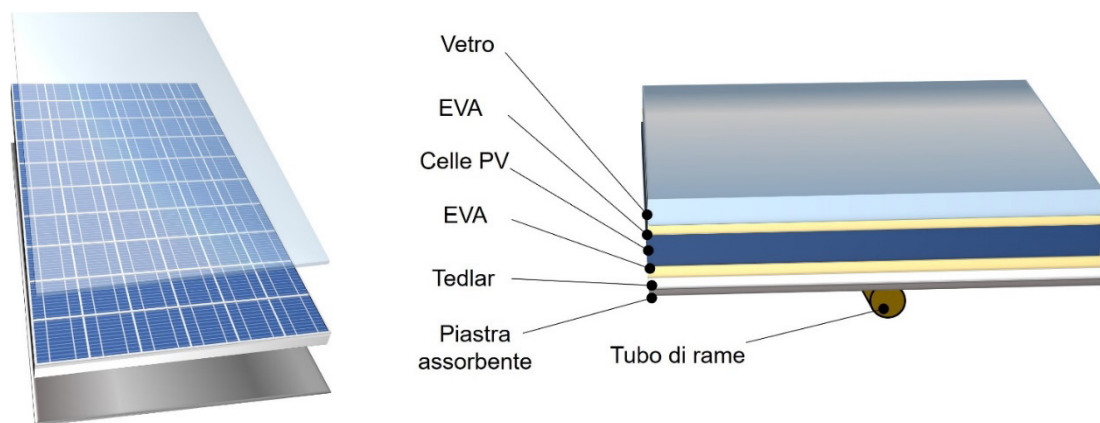
Questa prima parte della LA 4.11 ha avuto come obiettivo la ricerca di soluzioni per abbassare la temperatura delle celle fotovoltaiche e allo stesso tempo migliorare l'uniformità della temperatura sul pannello. Si è partiti con un prototipo di pompa di calore (PdC) a compressione di vapore elio-assistita di tipo diretto disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. La PdC utilizza CO<sub>2</sub> come fluido operativo ed è integrata con 3 collettori solari termo-fotovoltaici (PV-T) che svolgono anche la funzione di evaporatore per la macchina. Inoltre la PdC può utilizzare l'aria ambiente come seconda sorgente. In Figura 1 sono riportate una foto del prototipo della PdC e una foto della parte posteriore dei pannelli fotovoltaici con visibile la serpentina per il raffreddamento delle celle.



**Figura 1 – a) Foto del prototipo della pompa di calore elio-assistita installata presso il Laboratorio di Conversione di Energia Solare (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università di Padova). b) Immagine della parte posteriore del collettore PV-T: si può notare la serpentina in rame dentro la quale evapora la CO<sub>2</sub> per raffreddare le celle fotovoltaiche.**

Ogni collettore PV-T è composto da un modulo fotovoltaico policristallino con potenza nominale di 270 W sul retro del quale è attaccata una lastra di alluminio accoppiata con una serpentina di rame (diametro interno pari a 6 mm), nella quale scorre il fluido refrigerante (CO<sub>2</sub>). Ogni serpentina è composta da 14 tubi con passo di 8 cm e l'intera lastra dell'assorbitore copre il 75% dell'area retrostante del modulo fotovoltaico. La struttura del collettore PV-T è rappresentata in Figura 2.

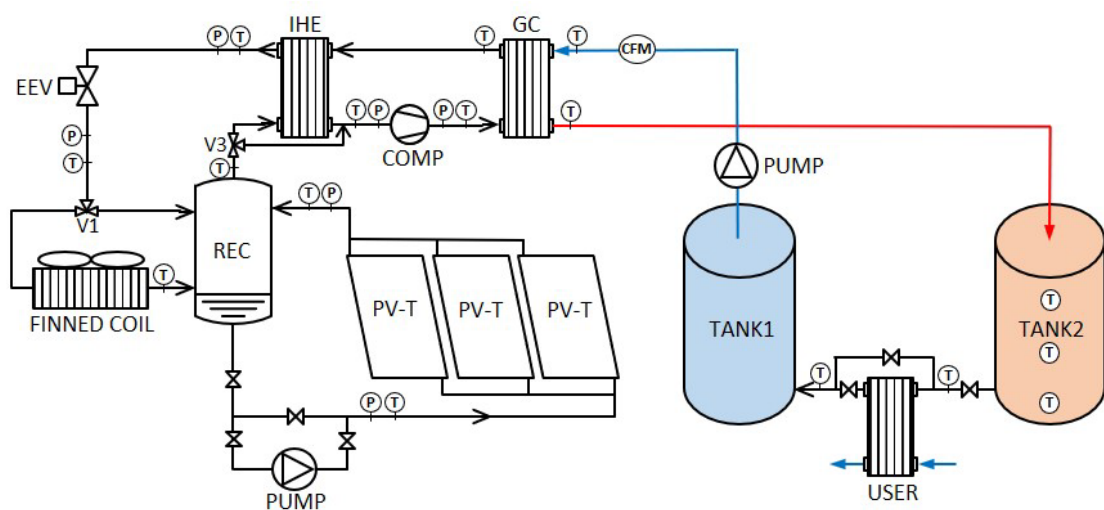
In Figura 3 è riportato lo schema d'impianto della PdC e del circuito idronico utilizzati durante le prove sperimentali. Come si può vedere dallo schema, la PdC è composta da un compressore di tipo rotary (COMP) ad inverter, un gas-cooler (GC), uno scambiatore interno rigenerativo (IHE), una valvola di laminazione elettronica (EEV), un ricevitore di liquido (REC) nella zona di bassa pressione e due evaporatori che lavorano alternativamente: una batteria alettata (FINNED COIL) e i 3 collettori PV-T.



**Figura 2 – Rappresentazione schematica della struttura del collettore PV-T (EVA strato in etilene vinil acetato).**

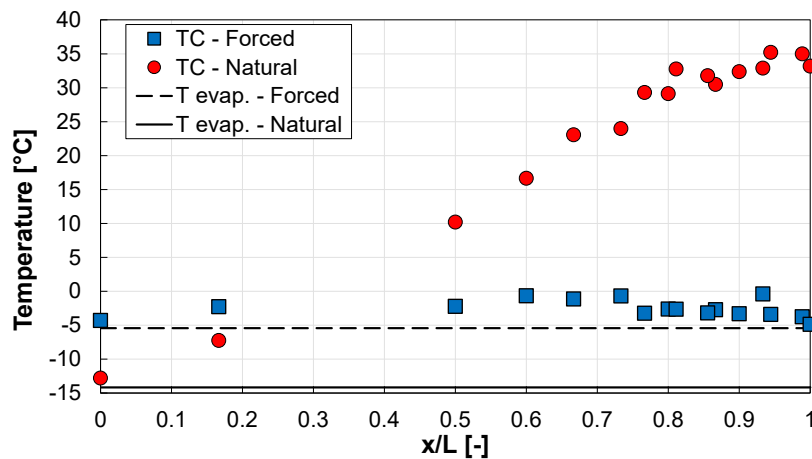
I collettori PV-T funzionano come evaporatori allagati, alimentati con CO<sub>2</sub> in fase liquida e circolazione naturale. Durante il funzionamento in circolazione naturale, la forza motrice che permette di vincere tutte le perdite di carico del circuito dei collettori e che garantisce una certa portata è dovuta alla pressione idrostatica esercitata dalla colonna di liquido compresa tra il pelo libero nel ricevitore e l'ingresso ai collettori. Per permettere la circolazione del fluido, i collettori sono posizionati a 10 cm dal pavimento mentre il ricevitore si trova ad un'altezza di 1.65 m da terra. Per garantire la circolazione ci deve essere una differenza di densità tra la CO<sub>2</sub> all'ingresso (fase liquida) e all'uscita dell'evaporatore. Durante il funzionamento della macchina con circolazione naturale, si è osservata la presenza di vapore surriscaldato all'uscita dell'evaporatore in condizioni di elevato irraggiamento o elevata frequenza del compressore. Ne consegue che le celle fotovoltaiche non sono tutte alla stessa temperatura. Per superare questo problema si è adottata una soluzione che consiste nell'alimentare l'evaporatore con circolazione forzata utilizzando una pompa a velocità variabile come illustrato in Figura 3.

Misuratori di temperatura e pressione sono installati lungo il circuito di refrigerante per monitorare le condizioni termodinamiche all'ingresso e all'uscita di ogni componente. I moduli fotovoltaici sono inoltre collegati a un reostato con resistenza variabile per modificare il carico elettrico e lavorare sempre nel punto di massima potenza (MPPT) durante i test. La potenza elettrica prodotta viene misurata.



**Figura 3 – Schema della pompa di calore elio-assistita e del circuito idronico utilizzati durante i test sperimentali.**

Sono stati effettuati test sperimentali con la PdC operante con l'evaporatore PV-T. In Figura 4 sono riportati i valori di temperatura misurati dalle termocoppie posizionate sul retro di uno dei collettori PV-T in funzione della lunghezza adimensionale del circuito  $x/L$ . Le prove sono state fatte durante il funzionamento in circolazione forzata (*forced*) e in circolazione naturale (*natural*), nelle condizioni operative riportate in Tabella 1. Nella stessa figura, sono riportate due linee orizzontali (continua e tratteggiata) che rappresentano le temperature di saturazione all'uscita dell'evaporatore quando viene utilizzata la circolazione naturale o la circolazione forzata.



**Figura 4 – Misure di temperatura lungo la serpentina di un collettore PV-T nel caso di funzionamento in circolazione forzata (*forced*) e naturale (*natural*). Le due linee orizzontali rappresentano la temperatura di saturazione all'uscita dell'evaporatore.**

**Tabella 1 – Condizioni operative e risultati ottenuti durante le prove sperimentali.**

Modalità	Irradianza solare [W·m <sup>-2</sup> ]	Temperatura aria [°C]	Temperatura acqua in/out GC [°C]	Temperatura evaporazione [°C]	Potenza consumata [W]	Potenza prodotta GC [W]	COP [-]
Circolazione naturale	930	11.5	30 – 35	-14.2	1052	2442	2.32
Circolazione forzata	930	11.5	30 – 35	-5.4	1167	3157	2.71

Se si considera il caso di funzionamento in circolazione naturale, le termocoppie rivelano che la CO<sub>2</sub> nei collettori evapora completamente ancora prima di raggiungere il 20 % della lunghezza totale del circuito del collettore, per poi iniziare ad aumentare la sua temperatura. All'uscita dell'evaporatore, si misura un grado di surriscaldamento pari a 45 K. Al contrario, nel caso di funzionamento in circolazione forzata, la differenza tra la temperatura misurata dalle termocoppie e la temperatura di evaporazione è limitata lungo l'intera lunghezza del circuito, pertanto la CO<sub>2</sub> è in condizioni di vapore saturo durante l'intero processo. Questo evidenzia come la pompa di circolazione a velocità variabile permette di aumentare la portata di refrigerante rispetto al caso a circolazione naturale evitando di avere vapore surriscaldato all'uscita del collettore. Inoltre l'utilizzo della circolazione forzata evita eventuali problemi di maldistribuzione della CO<sub>2</sub> nei collettori. Dalla Figura 4 si può osservare come con la circolazione forzata è possibile far lavorare le celle fotovoltaiche ad una temperatura più uniforme e più bassa rispetto al caso di partenza con circolazione naturale. L'utilizzo della circolazione forzata permette di ottenere un aumento del COP della pompa di calore di circa il 15% (il COP è calcolato come rapporto tra la potenza termica ottenuta al gas-cooler e la potenza elettrica fornita al compressore).

Inoltre, il raffreddamento delle celle fotovoltaiche attraverso CO<sub>2</sub> in circolazione forzata permette di incrementare l'efficienza elettrica delle celle fotovoltaiche del 1.2% rispetto al caso senza raffreddamento (dal 14.8% al 16%), quando l'irraggiamento è pari a 1040 W m<sup>-2</sup> e la temperatura dell'aria esterna è di 13 °C.

La presenza di surriscaldamento (SH) all'uscita dei collettori, oltre a causare una riduzione dell'efficienza di conversione fotovoltaica, provoca anche una diminuzione dell'efficienza termica dei collettori, come evidenziato dai dati sperimentali della curva di efficienza in Figura 5. La curva di efficienza dei collettori viene definita dalla seguente equazione

$$\eta_{th} = a_1 + T_{rid} \cdot a_2 \quad (1)$$

Dove il termine  $T_{rid}$  corrisponde alla temperatura media ridotta, definita come di seguito:

$$T_{rid} = \frac{T_{evap} - T_{aria}}{G} \quad (2)$$

Il valore sperimentale dell'efficienza termica dei collettori è definito dalla potenza termica di evaporazione ( $Q_{evap}$ ) diviso il prodotto tra la radiazione solare sul piano dei collettori ( $G$ ) e l'area effettiva dei collettori ( $A$ ):

$$\eta_{th} = \frac{Q_{evap}}{G \cdot A} \quad (3)$$

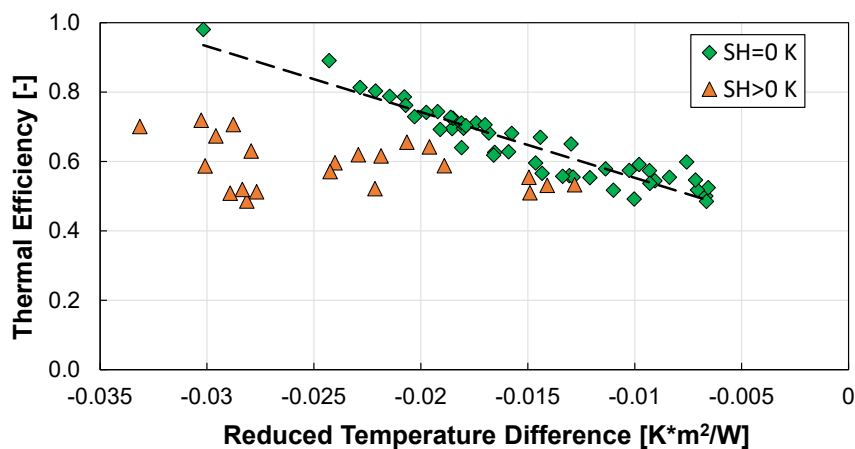


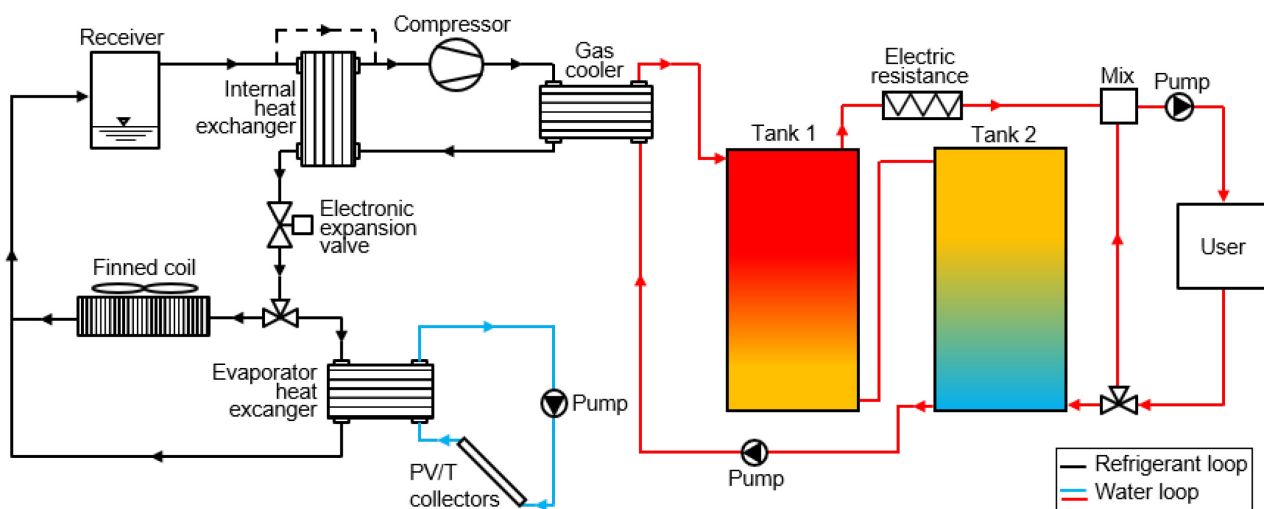
Figura 5 – Efficienza termica dei collettori PV-T in funzione della temperatura media ridotta con o senza surriscaldamento di vapore all'uscita dei collettori (SH).

## 7.2 Miglioramento delle prestazioni dell'intero sistema integrato composto dalla pompa di calore e dal modulo PV-T, utilizzando al meglio le due sorgenti termiche a disposizione (aria e radiazione solare)

La seconda parte della LA 4.11 ha avuto come obiettivo quello di migliorare le prestazioni di una pompa di calore elio-assistita utilizzando al meglio le due sorgenti termiche a disposizione (aria e radiazione solare). Inizialmente è stato sviluppato in Matlab® un modello numerico di una PdC a CO<sub>2</sub> elio-assistita di tipo indiretto (si utilizza acqua come fluido vettore per trasferire il calore dalle celle fotovoltaiche all'evaporatore della macchina) e del suo circuito idronico. Gli scambiatori di calore sono stati modellati con un approccio fisico (sono stati discretizzati e per ogni elemento sono stati calcolati i coefficienti di scambio termico) e i

modelli di ciascun componente sono stati validati con dati sperimentali. In Figura 6 è raffigurato lo schema del sistema. Nel modello, la PdC può sfruttare alternativamente come sorgenti l'aria ambiente o l'acqua. Nello schema d'impianto qui considerato, viene utilizzata una pompa per far circolare l'acqua attraverso i collettori PV-T e poi nell'evaporatore a piastre delle PdC. In questo primo approccio alla modellazione, i collettori PV-T sono quindi accoppiati in modo indiretto alla PdC; il comportamento dei collettori è stato simulato attraverso l'utilizzo di curve per l'efficienza termica ed elettrica.

La PdC è stata dimensionata per poter produrre 10 kW termici e riscaldare l'acqua da 20 °C a 55 °C quando l'aria esterna è di 7 °C e la radiazione solare di 400 W m<sup>-2</sup>. Roma e Parigi sono state scelte come località per studiare le prestazioni stagionali del sistema in due differenti aree climatiche. I dati principali della geolocalizzazione e dei climi sono riassunti nella Tabella 2.



**Figura 6 – Schema della pompa di calore e del circuito idronico utilizzato per lo sviluppo del modello numerico.**

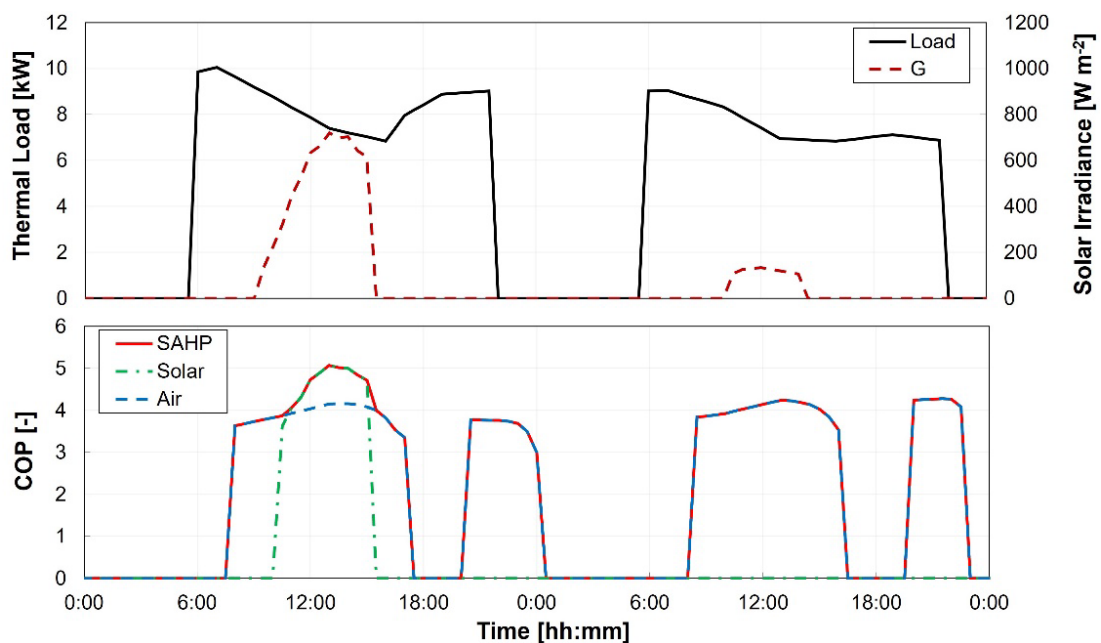
**Tabella 2 Geolocalizzazione e dati climatici di Roma e Parigi.**

Località	Temperatura minima [°C]	Temperatura media [°C]	Latitudine	Longitudine
Roma	-4.00	15.82	41.80 N	12.23 E
Parigi	-6.00	11.15	48.73 N	2.40 E

Sono state eseguite delle simulazioni stagionali facendo riferimento alla sola stagione di riscaldamento, che varia per le due località: per Parigi va dal 15 ottobre al 30 aprile (198 giorni), mentre per Roma si considera 1 novembre - 15 aprile (166 giorni). Il profilo di carico termico dell'edificio simulato è stato ricavato da un'equazione lineare basata sulla temperatura dell'aria esterna. Pertanto, non è stato preso in considerazione un particolare tipo di edificio né una specifica prestazione termica dell'involucro. Inoltre, si è ipotizzato che il carico termico sia richiesto solo durante le ore diurne, dalle 6 alle 22. Il fabbisogno di carico termico stagionale per le utenze di riferimento a Parigi e Roma risulta rispettivamente di 28416 kWh e 20502 kWh. Le simulazioni sono state svolte con il funzionamento della PdC in due modalità: 1) ibrida, con uso alternato delle sorgenti solare ed aria; 2) aria, con uso della sola sorgente aria. Durante il funzionamento

della PdC in modalità ibrida, per selezionare l'evaporatore da utilizzare (batteria alettata per l'aria o scambiatore a piastre per l'acqua) si considera il COP della macchina: ad ogni istante temporale viene calcolato il COP ottenuto con un evaporatore che funziona singolarmente e viene selezionata la configurazione che fornisce il massimo valore di COP.

La logica di funzionamento è illustrata nella Figura 7 che presenta: le prestazioni della pompa di calore quando funziona in modalità solare (solar), aria (air) e nella modalità ibrida (SAHP) che costituisce il risultato della logica di funzionamento; il carico termico (Load) e l'irraggiamento solare (G) durante due giorni consecutivi scegliendo Roma come località. Come si può vedere, quando l'irraggiamento solare G è elevato, la PdC ibrida può realizzare un COP più elevato se utilizza l'evaporatore PV-T (Solar) rispetto all'evaporatore a batteria alettata (Air). In queste condizioni, la PdC ibrida lavora quindi utilizzando lo scambiatore a piastre come evaporatore. Diversamente, quando l'irraggiamento solare G è basso o assente, la PdC ibrida può funzionare solo con l'evaporatore a batteria alettata.

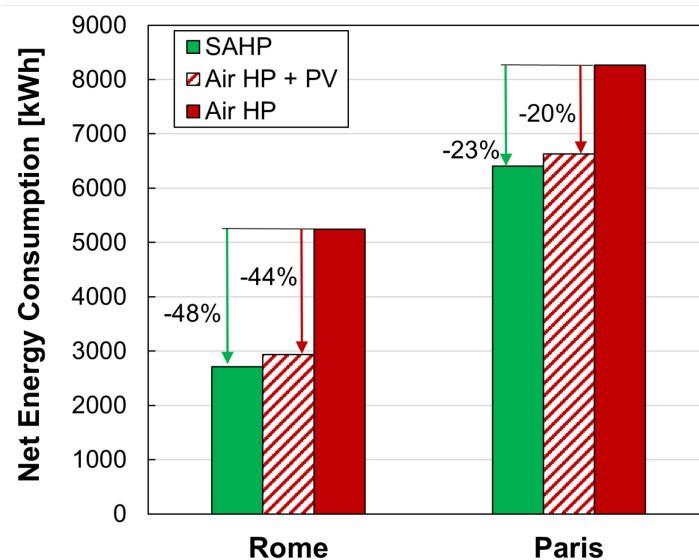


**Figura 7 – Rappresentazione della logica di funzionamento della macchina. Variazione del COP della pompa di calore in modalità solare (Solar), in modalità aria (Air) e funzionamento ibrido (SAHP) durante due giorni consecutivi con carico termico (Load) e irradiazione solare (G). Valori nulli di COP corrispondono a macchina spenta.**

Considerando un COP stagionale (SCOP) come il rapporto tra l'energia termica prodotta e l'energia elettrica consumata dalla PdC, questo risulta sempre più elevato nella modalità ibrida rispetto alla modalità aria, indipendentemente dalla località. I valori SCOP per la modalità ibrida e la modalità aria sono rispettivamente 4.07 e 3.94 a Roma e 3.77 e 3.70 a Parigi. L'aumento percentuale di SCOP è del 3.4% a Roma e dell'1.7% a Parigi. Questo aumento è più significativo a Roma rispetto che a Parigi in seguito al maggior numero di giorni caratterizzati da elevato irraggiamento. Questo consente alla PdC di funzionare maggiormente in modalità solare a temperature di evaporazione più elevate, migliorando così le prestazioni.

Oltre all'SCOP, risulta interessante confrontare il consumo netto di energia, ossia la differenza tra il consumo totale di energia elettrica dell'impianto e la produzione di energia fotovoltaica, quando la PdC funziona in queste tre modalità: ibrida (SAHP); aria con moduli fotovoltaici non raffreddati (Air HP+PV); aria (Air HP). Come si può vedere dal grafico in Figura 8, il consumo energetico netto si riduce notevolmente quando la PdC è supportata dall'impianto fotovoltaico durante il periodo di riscaldamento. La riduzione percentuale tra

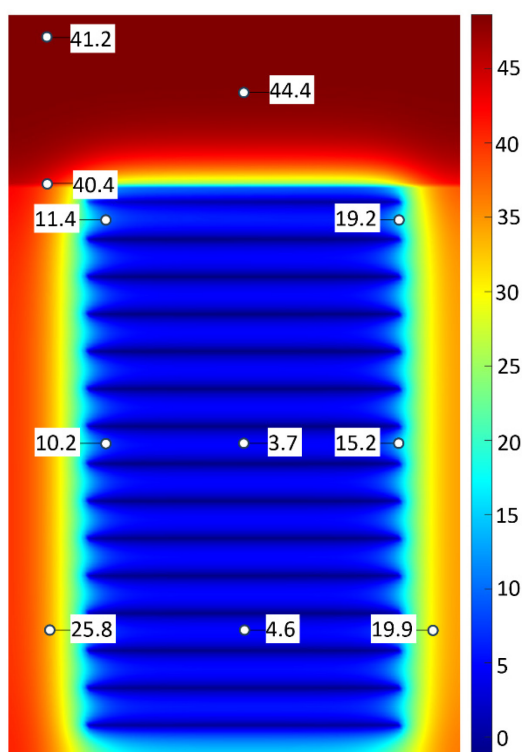
la configurazione Air HP+PV e la configurazione Air HP è del 44% a Roma e del 20% a Parigi. Questi valori aumentano se i moduli fotovoltaici vengono utilizzati anche come evaporatori nella SAHP (48% a Roma e 22% a Parigi). Questo perché l'evaporatore PV-T migliora sia le prestazioni della PdC (si aumenta la temperatura di evaporazione che può quindi superare anche la temperatura dell'aria esterna) sia l'efficienza di conversione dell'energia fotovoltaica grazie al raffreddamento delle celle.



**Figura 8 – Consumo netto di energia durante il periodo di riscaldamento quando la PdC lavora in modalità ibrida (SAHP) con raffreddamento delle celle, aria con fotovoltaico (Air + PV) senza raffreddamento delle celle e utilizzo della sola aria senza pannelli FV (Air).**

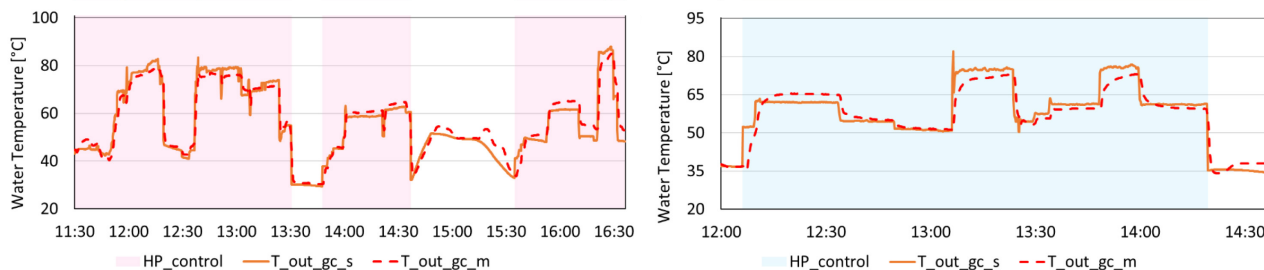
I risultati fanno vedere che l'uso di una PdC a doppia sorgente sole-aria accoppiata con pannelli PV-T permette di ottenere migliori prestazioni stagionali durante la stagione di riscaldamento rispetto a una PdC a sola aria abbinata a pannelli PV. Questo vantaggio potrebbe essere ancora più pronunciato se si considerasse anche la produzione di acqua calda sanitaria durante la stagione estiva: le giornate con più alti livelli di irraggiamento permetterebbero ai collettori PV-T di produrre direttamente acqua calda per uso sanitario, escludendo il sistema a PdC, e raffreddando allo stesso tempo le celle fotovoltaiche.

Si è poi proseguito con una seconda fase dell'attività di modellazione considerando una pompa di calore a CO<sub>2</sub> elio-assistita di tipo diretto (la CO<sub>2</sub> evapora all'interno dei pannelli PV-T), con lo stesso schema di funzionamento di quella installata presso l'Università di Padova (Figura 3). È stato sviluppato un modello numerico dell'evaporatore PV-T che utilizza un approccio a parametri distribuiti, risolvendo le equazioni di bilancio di massa, momento ed energia per un certo numero di elementi discreti identificati sulla superficie del collettore. La Figura 9 riporta la distribuzione della temperatura sul collettore PV-T durante il funzionamento con CO<sub>2</sub> in circolazione forzata ottenuta con il modello numerico. Le etichette bianche riportano il valore misurato dalle termocoppie installate sulla parte posteriore di uno dei collettori PV-T installati presso l'Università di Padova e utilizzate per la validazione. Si osserva come la distribuzione della temperatura prevista è in accordo con i valori misurati. Si può notare come le basse temperature di evaporazione del refrigerante e l'assenza di surriscaldamento all'interno dei collettori, favoriscono un raffreddamento omogeneo delle celle fotovoltaiche.



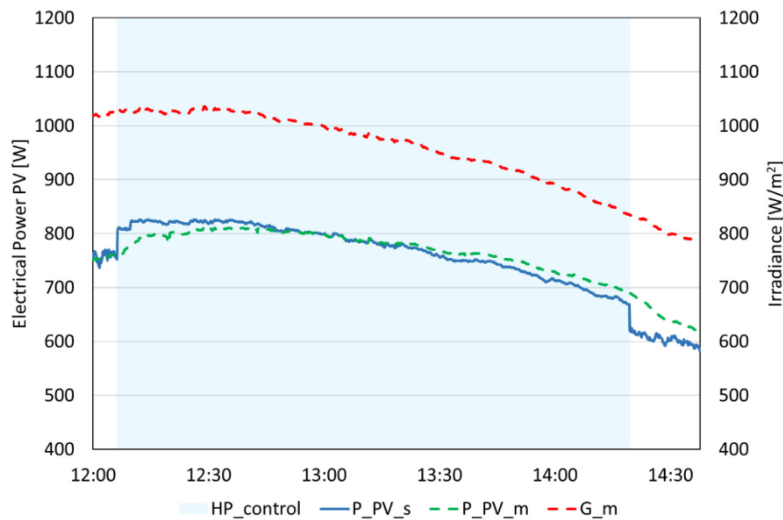
**Figura 9 – Distribuzione della temperatura sulla faccia posteriore dell'evaporatore PV-T calcolata con il modello. Le etichette bianche indicano i valori misurati dalle termocoppie installate sul retro di un collettore PV-T installato presso l'Università di Padova.**

Una volta validato con i dati sperimentali, il modello dell'evaporatore PV-T è stato integrato in un modello sviluppato con il software TRNSYS comprendente la PdC e il circuito idronico. L'utilizzo di TRNSYS ha permesso predire la risposta dinamica del sistema idronico. Il sistema idronico considerato corrisponde a quello del circuito sperimentale rappresentato in Figura 3. È costituito da due serbatoi da 200 L separati da uno scambiatore di calore a piastre (USER) che simula il carico termico di un'utenza. Dal serbatoio freddo (TANK1) l'acqua viene prelevata da una pompa e inviata al gas-cooler, dove viene riscaldata, per poi entrare nel serbatoio caldo (TANK2). Dal TANK2 l'acqua calda fluisce all'interno dello scambiatore a piastre USER dove scambia calore con un ulteriore circuito secondario di acqua fredda che rappresenta l'utenza. Il modello è stato validato con i dati sperimentali raccolti durante il funzionamento dinamico della PdC operante sia in modalità ad aria, sia in modalità solare. In Figura 10 sono riportati i valori della temperatura dell'acqua in uscita dal gas cooler simulati (s) e misurati (m). Il modello è in grado di predire in modo accurato l'evoluzione della temperatura dell'acqua.



**Figura 10 – Confronto tra la temperatura dell'acqua calda misurata (m) all'uscita dal gas-cooler e la temperatura ottenuta dalle simulazioni numeriche (s), quando la PdC usa la batteria alettata (figura di sinistra) o i collettori PV-T (figura di destra) come evaporatore.**

Il modello consente anche di stimare la potenza elettrica prodotta dai collettori PV-T. In Figura 11 è riportato l'andamento temporale della potenza elettrica prodotta (valori misurati (m) e valori ottenuti dalle simulazioni numeriche (s)) assieme all'irraggiamento globale sul piano inclinato. I risultati del modello sono in accordo con i dati sperimentali sia quando la PdC è attiva (con CO<sub>2</sub> che evapora nei pannelli PV-T, sia quando la PdC è spenta quindi senza raffreddamento delle celle fotovoltaiche). Lo sviluppo di un modello validato per l'intero sistema (PdC, pannelli PV-T e circuito idronico) consente di predire le prestazioni della macchina durante l'arco della giornata, in condizioni variabili di radiazione solare e di carichi termici, permettendo quindi di scegliere tra la sorgente (aria o radiazione solare) più conveniente da utilizzare.



**Figura 11 – Potenza elettrica ottenuta dalle celle fotovoltaiche: confronto tra valori misurati (m) e valori ottenuti con le simulazioni dinamiche del sistema (s) al variare della radiazione solare (G) durante alcune ore della giornata.**

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Azzolin M., Zanetti E., Conte R., Del Col D., Control of CO<sub>2</sub> evaporation in an integrated photovoltaic module: experiments and modelling, 40th International Heat Transfer Conference (IHTC), Assisi, IT, 26-28 giugno 2023.

Publicazione accettata per 26th International Congress of Refrigeration, Parigi, FR, 21-25 agosto 2023:  
Conte R., Zanetti E., Azzolin M., De Gioia Carabellese C., Calabrese L., Del Col D., Seasonal performance of a CO<sub>2</sub> dual source heat pump for residential applications, paper 0664,

## 10 Eventi di disseminazione

Relazione tenuta il 10 ottobre 2022 dal dott. M. Azzolin durante l'evento fieristico internazionale Chillventa, presso Exhibition Centre Nuremberg, Germania. Titolo della relazione: Use of R744 in a solar assisted heat pump for residential heating applications.

Prevista partecipazione al 26th International Congress of Refrigeration, Parigi, FR, 21-25 agosto 2023 con la pubblicazione riportata nel paragrafo precedente.