

# Ricerca di Sistema elettrico



Servizio di consulenza per l'ingegnerizzazione di soluzioni di controllo termico e automazione di pompe di calore con pannelli PV-T (LA4.5)

F. Nardecchia, L. Micheli, D. Groppi, M. Sforzini,  
L. Gugliermetti, D. Astiaso Garcia



## Servizio di consulenza per l'ingegnerizzazione di soluzioni di controllo termico e automazione di pompe di calore con pannelli PV-T

LA4.5 Sistemi integrati: Sperimentazione di impianti con sorgente geotermica e solare

F. Nardecchia, L. Micheli, D. Groppi, M. Sforzini, L. Gugliermetti, D. Astiaso Garcia (BIM ENERGY SERVICES)

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: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 4.5

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Raniero Trinchieri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Raniero Trinchieri, ENEA

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno del contratto dal titolo "SERVIZIO DI CONSULENZA PER L'INGEGNERIZZAZIONE DI SOLUZIONI DI CONTROLLO TERMICO E AUTOMAZIONE DI POMPE DI CALORE CON PANNELLI PV-T"

Responsabile ENEA: Raniero, Trinchieri

Responsabile Consulente: Matteo Sforzini

## 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.....	9
6	Sintesi delle attività svolte .....	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Modello per analisi teorica .....	11
7.2	Risultati analisi teorica .....	14
7.2.1	Caso 1 – Modello senza sistema di raffreddamento .....	14
7.2.2	Caso 2/3 – Modello con sistema di raffreddamento e passaggi della tubazione dietro al pannello pari a 19 e temperature entrata CO2 pari a 0.8 °C e -10.23 °C .....	15
7.2.3	Caso 4 – Modello con sistema di raffreddamento e passaggi della tubazione dietro al pannello pari a 10 (50%) e temperature entrata CO2 pari a 0.8 °C .....	16
7.2.4	Confronto sistemi di raffreddamento.....	16
7.2.5	Benefici elettrici dell'impianto di raffreddamento .....	18
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	23
9	Pubblicazioni scientifiche .....	24
10	Eventi di disseminazione .....	25

## Indice delle figure

Figura 1. Schermo PGD1000FW0 PGD .....	7
Figura 2. Attuatori BELIMO .....	8
Figura 3. Pannello fotovoltaico SOLAIR (SOLVIS).....	11
Figura 4. Immagine d'insieme di una parte pannelli installati .....	11
Figura 5. Andamento della T sul pannello PV al variare della T esterna .....	17
Figura 6. Andamento della T sul pannello PV al variare dell'irraggiamento .....	17
Figura 7. Andamento della T sul pannello PV al variare della velocità esterna .....	18
Figura 8. Guadagni elettrici per C2, C3, C4 rispetto a C1 .....	19
Figura 9. Guadagno elettrico rispetto a C1 al variare dell'irradianza .....	20
Figura 10. Guadagno elettrico rispetto a C1 al variare dalla temperatura esterna .....	20
Figura 11. Guadagno elettrico rispetto a C1 al variare dalla velocità del vento .....	21

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Parametri costruttivi e proprietà fisiche del pannello fotovoltaico .....	12
Tabella 2. Matrice delle simulazioni per i casi di validazione del codice CFD.....	13
Tabella 3. Risultati per il caso senza sistema di raffreddamento.....	14
Tabella 4. Risultati per i casi con temperatura di entrata della CO2 pari a 0.8 °C e -10.23 °C ...	15
Tabella 5. Risultati per i casi con temperatura di entrata della CO2 pari a 0.8 °C e 50% tubazione sistema di raffreddamento.....	16

# 1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

1. Studio e analisi delle migliori soluzioni ingegneristiche per l'ottimizzazione dello scambio termico tra le superfici dei pannelli PV-T e il condensatore della Pompa di calore a R744;
2. Valutazioni di soluzioni per il controllo della temperatura delle celle fotovoltaiche ai valori ottimali per la massimizzazione della producibilità elettrica nel periodo estivo. Studio teorico per l'identificazione delle migliori soluzioni innovative per massimizzazione della producibilità elettrica e termica del sistema PV-T durante il periodo estivo;
3. Ingegnerizzazione di soluzioni per la gestione automatica delle configurazioni del circuito frigorifero della pompa di calore a R744. Acquisto e posa in opera del seguente materiale di consumo per il controllo delle valvole di configurazione e di surriscaldamento della PdC:
  - a. 6 raccordi flangiati per attuatori per valvole a 2 vie, tipo Refrigerera serie CUFE2P REFKIT N-A/B F03 o similare;
  - b. 2 raccordi flangiati per attuatori per valvole a 3 vie, tipo Refrigerera serie CUFE2P REFKIT N-A/B F03 o similare;
  - c. 1 attuatore DIN ISO-5211 controllabile continuo 0-10 V SR24A-R o similare;
  - d. 7 attuatori DIN ISO-5211 controllabile on-off 0-10 V o similare.
4. Posa in opera dei cavi di connessione verso il sistema di controllo presente all'interno della macchina;
5. Fornitura di schermo PGD1000FW0 PGD Carel o similare per la gestione dell'unità centrale della pompa di calore e installazione in campo;
6. Materiale di consumo 10m cavo elettrico tripolare 1.5 mm, 10m di cavo per segnali da 0.5mm, ed eventuali canaline.

## 2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati:

1. è stato svolto uno studio dello scambio termico tra le superfici dei pannelli PV-T e il condensatore della Pompa di calore a R744 e lo studio di possibili migliorie applicabili;
2. valutazione della producibilità delle celle fotovoltaiche con e senza integrazione con Pompa di calore a R744;
3. Acquisto e posa in opera del seguente materiale di consumo per il controllo delle valvole di configurazione e di surriscaldamento della PdC:
  - raccordo flangiato per attuatore Refrigerera per valvola 2 vie serie CUFE2P art.KAB09F350401(quantità 6)
  - raccordo flangiato per attuatore Refrigerera per valvola 3 vie serie CUFE2P art.KAB09F350401(quantità 2)
  - attuatore DIN ISO-5211 controllabile continuo 0-10V SR24A-R art.EASR24A-MP-R (quantità 1)
  - attuatore DIN ISO-5211 controllabile on/off art.EASR24A-R(quantità 7)
  - adattatore perno quadro Belimo ZSV-09 (quantità 8)
  - schermo PGD1000FW0 PGD (quantità 1);
  - materiale di consumo necessario.

### 3 Prodotti attesi

Come da capitolato per permettere la possibilità di gestire automaticamente le configurazioni del circuito frigorifero della pompa di calore a R744 sono stati installati i seguenti componenti:

- Raccordo flangiato per attuatore Refrigerera per valvola 2 vie serie CUFE2P art.KAB09F350401(quantità 6)
- Raccordo flangiato per attuatore Refrigerera per valvola 3 vie serie CUFE2P art.KAB09F350401(quantità 2)
- Attuatore DIN ISO-5211 controllabile continuo 0-10V SR24A-R art.EASR24A-MP-R (quantità 1)
- Attuatore DIN ISO-5211 controllabile on/off art.EASR24A-R(quantità 7)
- Adattatore perno quadro Belimo ZSV-09(quantità 8)
- schermo PGD1000FW0 PGD(quantità 1)

## 4 Prodotti sviluppati

Per soddisfare le richieste da capitolato, si è proceduto, dopo una accurata selezione dei prodotti adatti a controllare le valvole già presenti sul circuito frigorifero, ad installazione e test dei componenti scelti:

- Raccordo flangiato per attuatore Refrigerera per valvola 2 vie serie CUFE2P art.KAB09F350401(quantità 6)
- Raccordo flangiato per attuatore Refrigerera per valvola 3 vie serie CUFE2P art.KAB09F350401(quantità 2)
- Attuatore DIN ISO-5211 controllabile continuo 0-10V SR24A-R art.EASR24A-MP-R (quantità 1)
- Attuatore DIN ISO-5211 controllabile on/off art.EASR24A-R(quantità 7)
- Adattatore perno quadro Belimo ZSV-09(quantità 8)
- schermo PGD1000FW0 PGD(quantità 1).

Si riportano di seguito immagini dei componenti e dell'impianto.



Figura 1. Schermo PGD1000FW0 PGD



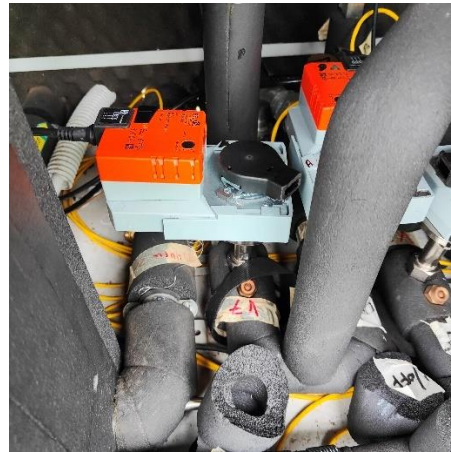
a)



b)



c)



d)

Figura 2. Attuatori BELIMO

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati riscontrati scostamenti su attività e risultati.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Per raggiungere gli obiettivi voluti sono state svolte due tipi di attività:

1. Installazione hardware
2. Analisi teorica

Per quanto riguarda l'installazione di componenti hardware si rimanda alle sezioni precedenti.

Per quanto riguarda l'analisi teorica è stato applicato un approccio di analisi numerica di tipo termofluidodinamica basata sul modello ANSYS Fluent a cui si è integrata un'analisi della generazione elettrica del FV. Dal modello ANSYS è stato possibile analizzare il comportamento termico del sistema, ed in particolare del FV, al variare delle condizioni ambientali rilevanti (irraggiamento, temperatura esterna e velocità del vento) in varie configurazioni del sistema:

- Senza circuito di raffreddamento
- Con sistema di raffreddamento attuale
- Con sistema di raffreddamento dimezzato

Il modello con sistema di raffreddamento attuale è stato validato con i dati disponibili. I risultati ottenuti sono poi stati utilizzati per analizzare la generazione elettrica da FV.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Per quanto riguarda l'installazione dei componenti per l'automatizzazione dell'impianto si rimanda alle sezioni precedenti, si riporta di seguito il dettaglio delle attività teoriche svolte.

### 7.1 Modello per analisi teorica

Il pannello fotovoltaico preso in esame è un pannello della SOLVIS, modello SOLAIR. Sono stati installati 2 serie di 5 pannelli ciascuno SOLAIR, ma il presente lavoro verte sullo studio di un singolo pannello e del suo sistema di raffreddamento SOLAIR. Le dimensioni caratteristiche sono: lunghezza del pannello pari a 164 cm, larghezza pari a 99.5 cm e posto ad un'altezza dal suolo di circa 123.5 cm.



Figura 3. Pannello fotovoltaico SOLAIR (SOLVIS)



Figura 4. Immagine d'insieme di una parte pannelli installati

Un modulo fotovoltaico può essere considerato composto da cinque prevalenti strati:

- **Vetro:** spessore compreso tra 3 e 4 mm e deve assicurare un'alta trasmittanza per massimizzare il passaggio di energia solare.

- **EVA:** Due strati di etilene vinil acetato incapsulano le celle fotovoltaiche, in modo da fissarle alla copertura di vetro e al retro del modulo. L'EVA è una materia plastica copolimerica, che fornisce resistenza all'umidità e isolamento elettrico.
- **Celle fotovoltaiche:** Nel presente lavoro si tratta di celle in silicio monocristallino interconnesse in serie a formare una matrice.
- **Tedlar®:** Lo strato posteriore è solitamente composto da un film polimerico, consentendo una protezione addizionale contro gli agenti esterni. Il materiale maggiormente utilizzato è il Tedlar®, una pellicola di polivinilfluoruro caratterizzata oltre che dalle suddette proprietà anche da resistenza ai raggi ultravioletti e agli agenti chimici.

In Tabella 1 sono riportati i parametri rilevanti scelti per il modello.

Tabella 1. Parametri costruttivi e proprietà fisiche del pannello fotovoltaico

<b>Strato</b>	<b>Spessore s [m]</b>	<b>Conduttività termica k [Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]</b>	<b>Densità ρ [kg m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Calore specifico C<sub>p</sub> [J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]</b>
Vetro	0.0032	1	750	3000
EVA	0.0005	0.35	2090	960
Cella fotovoltaica	0.0003	148	677	2330
EVA	0.0005	0.35	2090	960
Tedlar®	0.00015	0.167	1250	1200

In Tabella vengono riportati i parametri ambientali e le temperature della CO<sub>2</sub> (T<sub>in</sub>) utilizzati per la validazione (casi V1, V2, V3).

Tabella 2. Matrice delle simulazioni per i casi di validazione del codice CFD

	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>
<b>Irr [W/m<sup>2</sup>]</b>	436.3	65.44	114.08
<b>T<sub>ext</sub> [°C]</b>	18.9	10.32	11.42
<b>V<sub>vento</sub> [m/s]</b>	0.4	1.5	1.5
<b>T<sub>in CO2</sub> [°C]</b>	0.8	-10.24	-0.66

Il modello è stato sviluppato in ANSYS Fluent sulla base del modello di turbolenza k- $\omega$  Shear Stress Transport (SST) svolgendo un'attenta analisi di mesh sensitivity applicando il Grid Convergence Index (GCI) per analizzare l'indipendenza dei risultati dalla mesh scelta.

Le prestazioni del fotovoltaico, in termini di potenza elettrica è stata calcolata come:

$$P = \frac{E_e}{E_0} * P_{mp0} * (1 + \gamma * (T_{cell} - T_{cell0})) \quad (1)$$

dove

$E_e$  è l'irradianza effettiva, in questo caso ritenuta uguale a  $E$ ,

$P_{mp0}$  è la potenza nominale del pannello (W),

$\gamma$  è il coefficiente di temperatura del pannello in (%/°C),

$T_{cell0}$  è la temperatura di riferimento (25 °C).

Tuttavia, per irradianza  $\leq 125$  W/m<sup>2</sup> si è utilizzata la seguente equazione:

$$P = \frac{0.08 \cdot E_e^2}{E_0} * P_{mp0} * (1 + \gamma * (T_{cell} - T_{cell0})) \quad (2)$$

Il guadagno ottenibile grazie all'adozione del sistema di raffreddamento è stato calcolato come segue:

$$g_{Cx}[\%] = \left( \frac{P_{Cx}}{P_{C1}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

Dove

- $P_{Cx}$  è la potenza fotovoltaica dell'impianto con circuito di raffreddamento, in uno degli scenari C2, C3 o C4.
- $P_{C1}$  è la potenza fotovoltaica dell'impianto privo di circuito di raffreddamento (scenario C1).

Valori positivi di  $g_{Cx}$  indicano un aumento della potenza ottenibile grazie all'integrazione del sistema di raffreddamento.

## 7.2 Risultati analisi teorica

Si riportano di seguito i risultati nei vari scenari analizzati.

### 7.2.1 Caso 1 – Modello senza sistema di raffreddamento

Il primo caso analizzato è quello senza sistema di raffreddamento, ma con il solo pannello e ambiente esterno modellati. Vengono riportati di seguito i valori ottenuti per la temperatura media del pannello fotovoltaico ( $T_{PV}$ ). Per facilità di lettura vengono inseriti anche i valori dei parametri ambientali utilizzati per le singole simulazioni.

Tabella 3. Risultati per il caso senza sistema di raffreddamento

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
<b>Irr</b> [W/m <sup>2</sup> ]	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	100	250	500	750
<b>T<sub>ext</sub></b> [°C]	0	5	9.1	15	20	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
<b>V<sub>vento</sub></b> [m/s]	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	0	1.5	3.4	5	10	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
<b>T<sub>PV</sub></b> [°C] <b>C1</b>	1.4	6.4	10.5	16.4	21.4	31.4	11.2	10.5	10.2	9.8	10.5	14.9	23.1	37.1	52.4

I risultati ottenuti sono in linea con i risultati attesi: la temperatura del pannello cresce all'aumentare della temperatura esterna, e allo stesso modo è il comportamento al crescere

dell'irraggiamento. Al variare della velocità del vento si nota una temperatura più elevata quando la velocità è nulla, per poi decrescere e rimanere pressoché costante raggiunti i 2 m/s.

### 7.2.2 Caso 2/3 – Modello con sistema di raffreddamento e passaggi della tubazione dietro al pannello pari a 19 e temperature entrata CO2 pari a 0.8 °C e -10.23 °C

In questa sezione vengono mostrati i risultati ottenuti dalle simulazioni con l'intero sistema di raffreddamento e la temperatura della CO2 in entrata in esso pari a 0.8 °C e a -10.23 °C. In particolare, viene mostrata la temperatura media del pannello fotovoltaico ( $T_{PV}$ ), ottenuta per i due casi C2 e C3 (Tabella 8).

Tabella 4. Risultati per i casi con temperatura di entrata della CO2 pari a 0.8 °C e -10.23 °C

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
<b>Irr</b> [W/m <sup>2</sup> ]	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	100	250	500	750
<b>T<sub>ext</sub></b> [°C]	0	5	9.1	15	20	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
<b>V<sub>vento</sub></b> [m/s]	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	0	1.5	3.4	5	10	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
<b>T<sub>PV</sub></b> [°C] <b>C2</b>	1.5	5.2	8.3	12.7	16.6	5.6	7.7	8.3	8.2	8.5	8.3	12.2	19.9	32.5	45.0
<b>T<sub>PV</sub></b> [°C] <b>C3</b>	-1.4	1.5	5.3	10.1	13.6	-3.0	3.0	5.3	6.1	6.8	5.3	9.4	17.1	29.6	41.7

Anche per questi casi, la temperatura del pannello cresce all'aumentare della temperatura esterna, e all'aumentare dell'irraggiamento. Quando la temperatura esterna è pari a 0 °C, si riscontra una temperatura sotto lo 0 °C nel caso la CO2 nel sistema di raffreddamento sia -10.23 °C, che non è ottimale per il pannello. Al variare della velocità del vento la temperatura cresce e tende a rimanere costante raggiunti i 2 m/s.

### 7.2.3 Caso 4 – Modello con sistema di raffreddamento e passaggi della tubazione dietro al pannello pari a 10 (50%) e temperature entrata CO2 pari a 0.8 °C

In questa sezione vengono mostrati i risultati ottenuti dalle simulazioni con metà sistema di raffreddamento e la temperatura della CO2 in entrata in esso pari a 0.8 °C. In questo caso il sistema di raffreddamento effettua 10 passaggi, invece che 19, dietro al pannello fotovoltaico. In particolare, viene mostrata la temperatura media del pannello fotovoltaico ( $T_{PV}$ ), ottenuta per il caso C4.

Tabella 5. Risultati per i casi con temperatura di entrata della CO2 pari a 0.8 °C e 50% tubazione sistema di raffreddamento

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
<b>Irr</b> [W/m <sup>2</sup> ]	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	100	250	500	750
<b>T<sub>ext</sub></b> [°C]	0	5	9.1	15	20	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
<b>V<sub>vento</sub></b> [m/s]	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	0	1.5	3.4	5	10	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
<b>T<sub>PV</sub></b> [°C] <b>C4</b>	1.4	5.8	9.4	14.6	19.0	7.00	9.1	9.4	9.4	9.3	9.4	13.4	21.4	34.6	47.8

La temperatura del pannello cresce linearmente all'aumentare della temperatura esterna, e all'aumentare dell'irraggiamento. Al variare della velocità del vento la temperatura cresce e tende a rimanere costante raggiunti i 2 m/s, come riscontrato nei casi precedenti.

### 7.2.4 Confronto sistemi di raffreddamento

Anche in questo caso vengono riportati i grafici di confronto tra i due casi precedenti (C2 e C4), divisi per variazione di temperatura esterna, variazione di irraggiamento e variazione di velocità del vento. Sono stati inoltre inseriti i valori del caso in cui era assente il sistema di raffreddamento (C1).

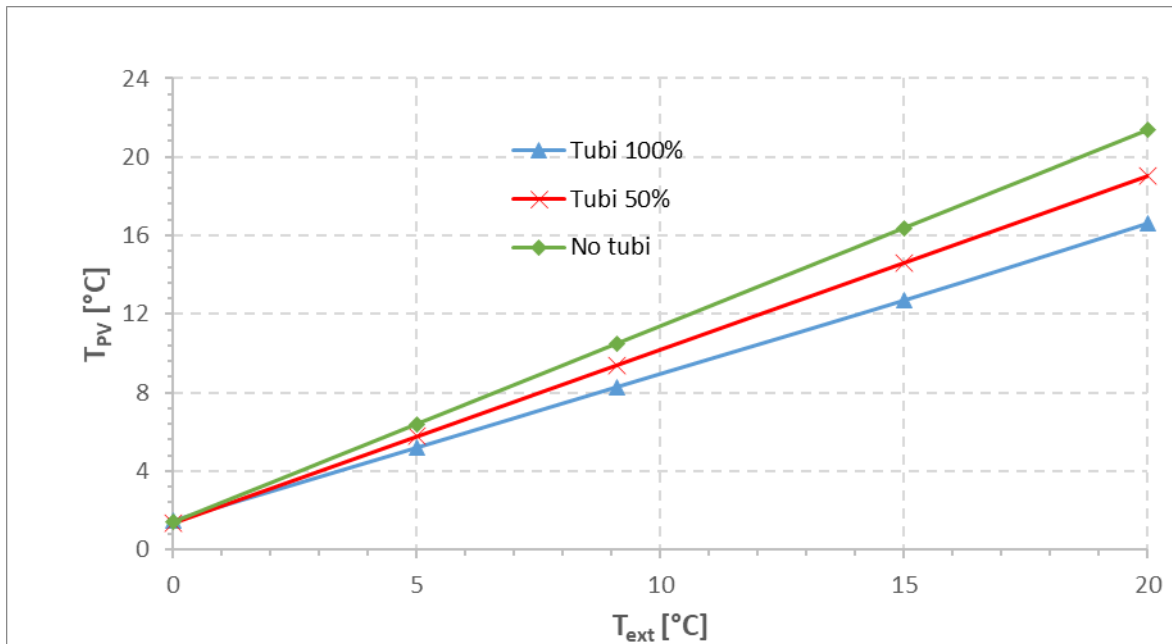


Figura 5. Andamento della T sul pannello PV al variare della T esterna

In questo primo caso le temperature  $T_{PV}$  crescono linearmente con l'aumentare della temperatura esterna, ma gli andamenti non sono paralleli, come nei risultati precedenti. Rispetto alla configurazione senza tubazione, c'è un discostamento della temperatura sul pannello che cresce con la temperatura esterna ed è più marcato per il caso con tubazione completa, dimostrando che si raffredda in modo migliore all'altro caso.

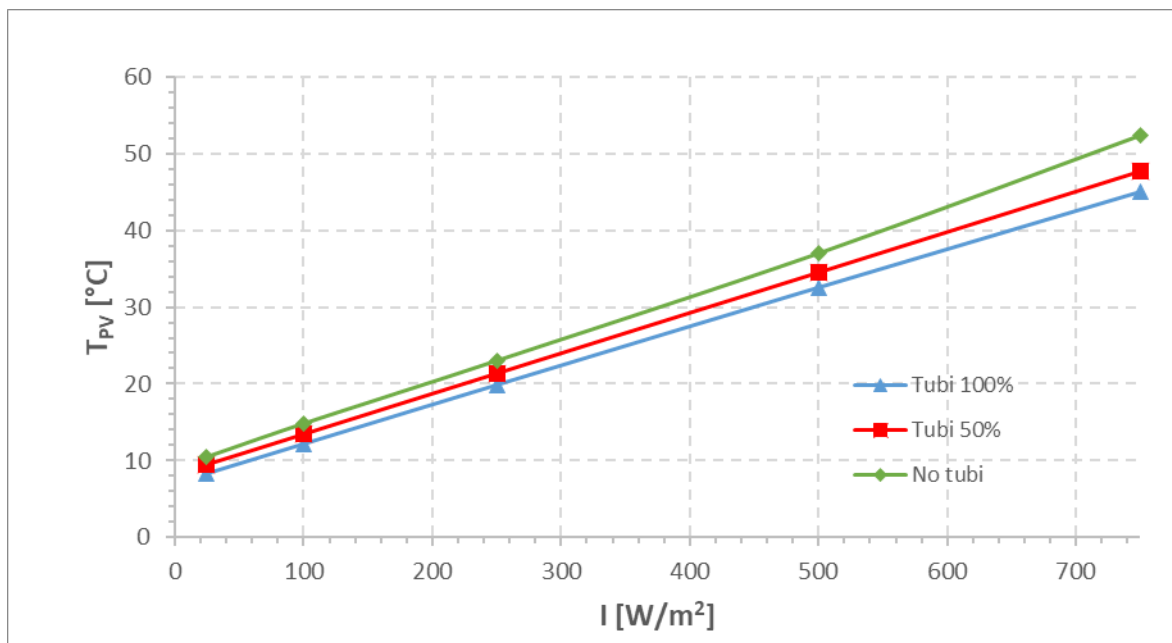


Figura 6. Andamento della T sul pannello PV al variare dell'irraggiamento

Al variare dell'irraggiamento il comportamento delle due configurazioni è molto simile e si possono notare poche differenze. Questo sta ad indicare che l'irraggiamento non è il fattore

principale per il surriscaldamento del pannello, ma come visto nei casi precedenti, risulta essere la temperatura esterna.

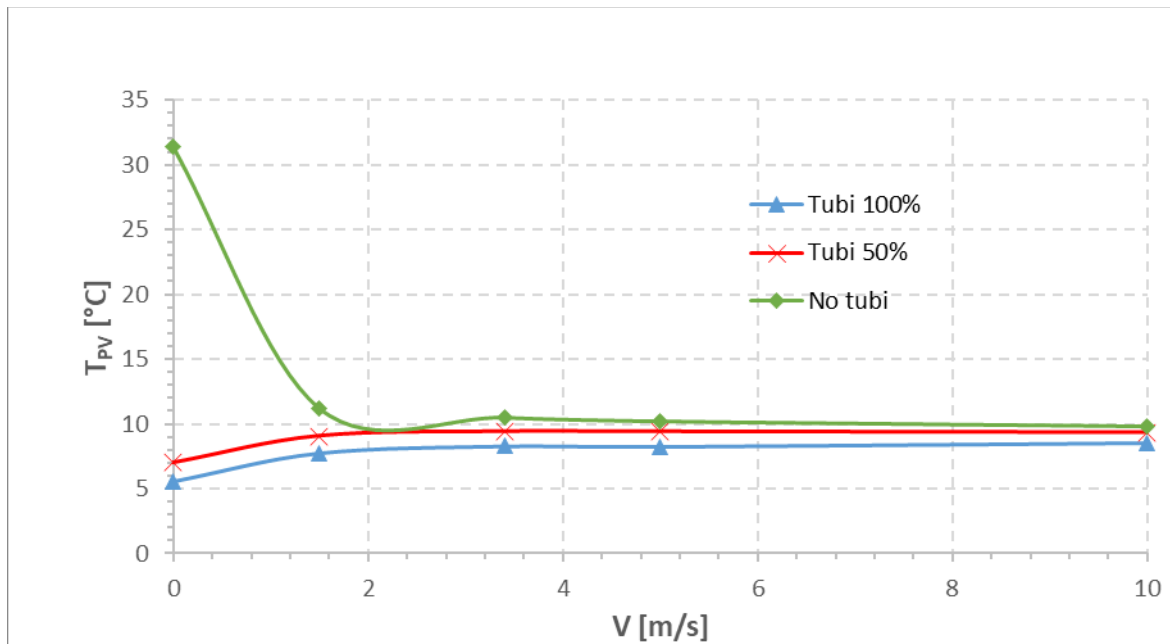


Figura 7. Andamento della T sul pannello PV al variare della velocità esterna

In questo ultimo caso, i risultati sembrano mostrare la non efficacia della configurazione con il 50% del passaggio dei tubi sotto il pannello fotovoltaico. Infatti, la temperatura con questa configurazione e il caso senza tubazione hanno uno scostamento molto piccolo a partire da una velocità del vento di 2 m/s.

### 7.2.5 Benefici elettrici dell'impianto di raffreddamento

I risultati ottenuti grazie all'integrazione di un sistema di raffreddamento sono riportati in Figura. Lo scenario C2 garantisce un guadagno elettrico medio di 1.9%, corrispondente a un incremento di 0.8 W rispetto al caso di riferimento (C1). Lo scenario C3 si distingue per le migliori prestazioni, con un guadagno medio di 3.3%, che equivale a un aumento di 1.3 W, mentre lo scenario C4 registra un incremento medio più contenuto di 1.3%, pari a 0.5 W.

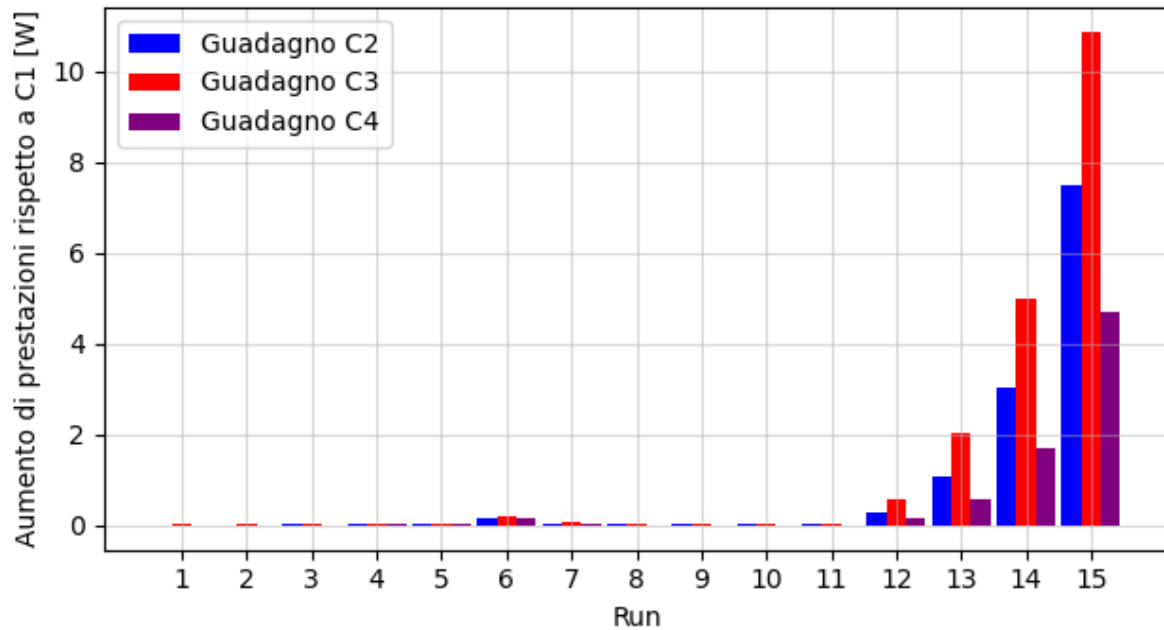


Figura 8. Guadagni elettrici per C2, C3, C4 rispetto a C1

Un aspetto fondamentale da considerare è che l'aumento delle prestazioni diventa significativamente più elevato all'aumentare dell'irradianza solare, a causa della sua dominanza nel determinare le prestazioni del sistema fotovoltaico. Questo effetto è particolarmente evidente nei Run finali (da 13 a 15), dove l'irradianza supera i  $250 \text{ W/m}^2$ .

LA figura seguente mostra l'incremento percentuale delle prestazioni elettriche rispetto al caso base (C1) in funzione dell'irradianza solare. Al crescere dell'irradianza (da  $100$  a  $750 \text{ W/m}^2$ ), si osserva un miglioramento progressivo dei guadagni elettrici, con lo scenario C3 che raggiunge un incremento superiore al 5%, seguito da C2 con il 3.5% e da C4, che si ferma al 2.2%. Questi risultati evidenziano come l'efficacia del sistema di raffreddamento dipenda fortemente dall'irradianza.

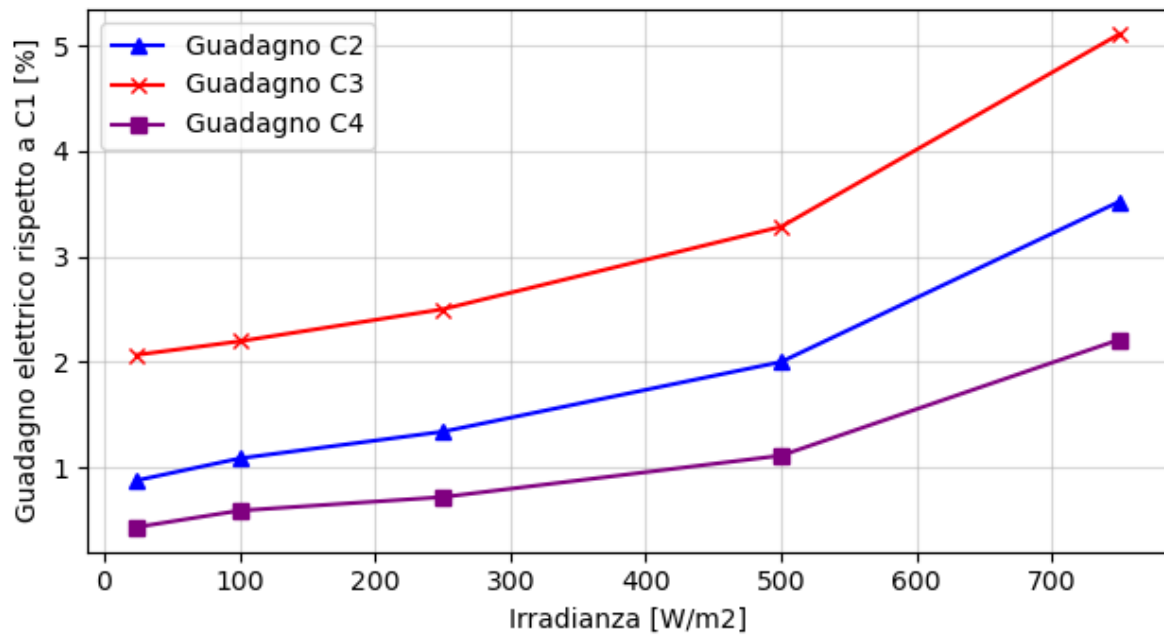


Figura 9. Guadagno elettrico rispetto a C1 al variare dell'irradianza

La Figura seguente illustra l'incremento del guadagno elettrico rispetto al caso base (C1) in funzione della temperatura esterna. Al crescere della temperatura (da 0 °C a 20 °C), si osserva un aumento progressivo, approssimativamente lineare, delle prestazioni elettriche per tutti gli scenari. Lo scenario C3 si conferma il più efficace, con un guadagno di 3.2 % a 20 °C, seguito da C2, che raggiunge circa 2 %, e da C4, che si ferma intorno all'1 %.

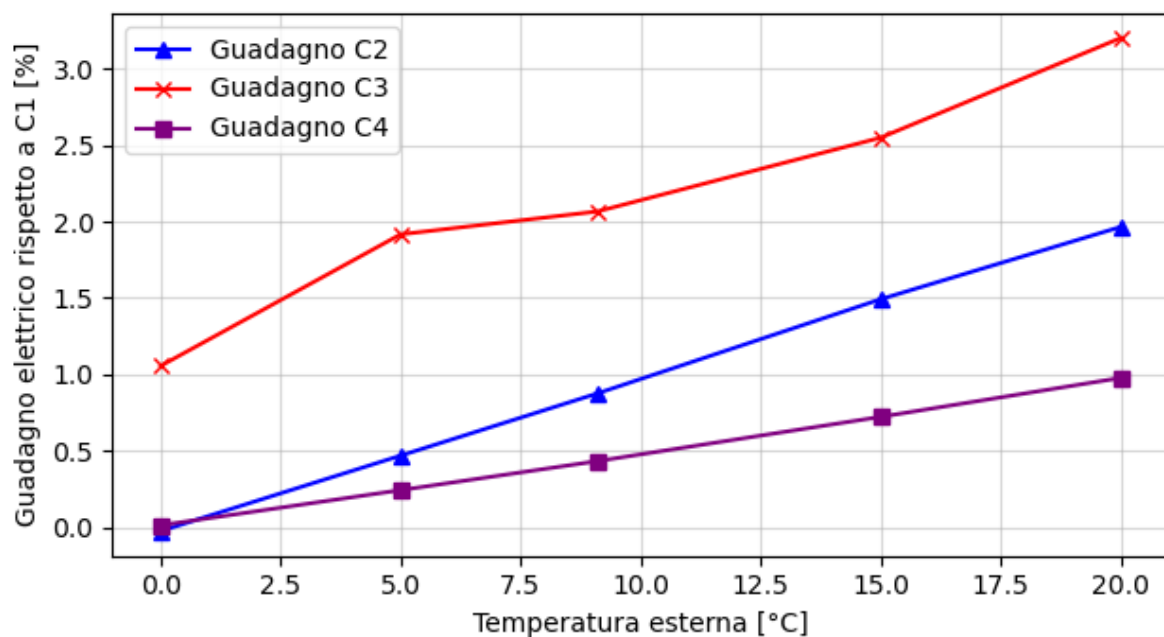


Figura 10. Guadagno elettrico rispetto a C1 al variare dalla temperatura esterna

La seguente Figura rappresenta il guadagno elettrico percentuale rispetto al caso base (C1) in funzione della velocità del vento, espressa in metri al secondo (m/s), per tre scenari di raffreddamento: C2, C3 e C4. Si osserva un trend decrescente per tutti gli scenari: a basse velocità del vento, i guadagni sono significativi, con C3 che raggiunge il massimo guadagno di 14.8% e C2 e C4 che si attestano tra l'11.1% e il 10.5%. All'aumentare della velocità del vento, il beneficio del sistema di raffreddamento si riduce drasticamente, stabilizzandosi su valori inferiori al 2% per velocità di 5 m/s o superiori.

Gli alti valori percentuali ottenuti per velocità del vento limitate non devono trarre in inganno perché sono spinti da valori molto bassi di potenza. Come si evince, infatti, l'aumento di potenza FV in W al variare della velocità del vento sono molto minori rispetto a quelli ottenibili all'aumentare dell'irradianza.

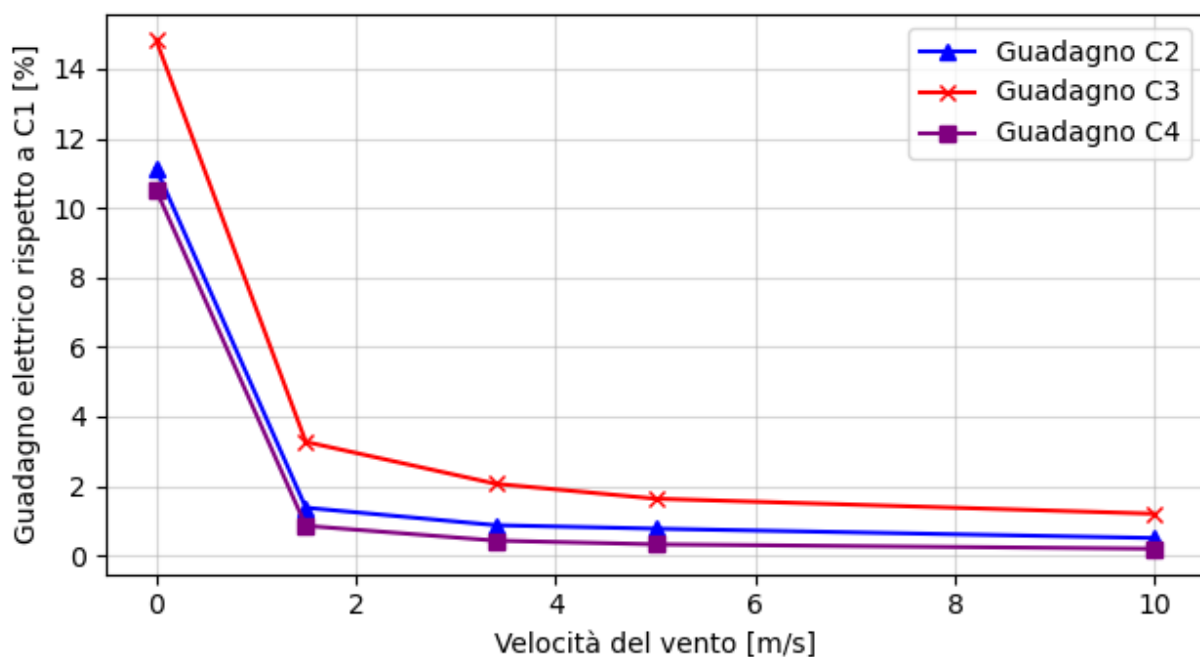


Figura 11. Guadagno elettrico rispetto a C1 al variare della velocità del vento

Lo studio svolto come si era prefissato ha portato interessanti risultati che permettono di conoscere in maniera più approfondita lo scambio termico tra il sistema di raffreddamento, quindi la PdC, e il FV. Si nota come lo scambio termico, seppur ridotto, sia però rilevante e abbia un effetto sulla generazione elettrica del FV. Questi risultati possono essere utili sia in fase di progettazione sia in fase di operazione del sistema. Infatti, sarebbe possibile pensare ad un sistema di monitoraggio delle condizioni ambientali che gestisca il controllo del sistema in modo da attivare/disattivare il sistema di raffreddamento al FV nelle condizioni di alta ventosità così da massimizzare la generazione elettrica. Al contempo il fluido sarebbe dirottato su altri sistemi di raffreddamento ad aria già esistenti e funzionanti.

Inoltre, lo studio ha anche analizzato un'altra possibile soluzione con un minor numero di tubazioni per investigare le variazioni in termini di scambio termico ottenuto e generazione elettrica da parte del FV. In questo caso si nota come sia lo scambio termico che la generazione elettrica non abbiano una variazione lineare con il numero delle tubazioni, suggerendo quindi la possibilità di identificare un valore ottimale dal punto di vista tecnico-economico.

Dai dati analizzati e dalle simulazioni si nota inoltre la presenza di fluido in condizioni di saturazione all'uscita dai pannelli, elemento che necessita di un'ottimizzazione del sistema. Infatti, il fenomeno di saturazione in uscita comporta il lavoro della pompa di calore in condizioni non ottimali in quanto la macchina necessita di uno spillamento di fluido surriscaldato in uscita dal condensatore al fine di garantire l'assenza di fase liquida in ingresso al compressore stesso. La pompa di calore, quindi, potrebbe attualmente lavorare a condizioni non ottimali, con un'efficienza ridotta e con rischio d'instabilità dovuto al riempimento del serbatoio separatore di fasi sul lungo periodo. Queste condizioni potrebbero inoltre aggravarsi in condizioni climatiche severe con temperature ambientali inferiori. Questo problema necessita di ulteriori studi dedicati all'ottimizzazione del sistema al fine di determinare le condizioni operative migliori sia per i pannelli che per la pompa di calore, la cui stabilità e rendimento dipendono dall'incremento della temperatura del fluido.

Si propone anche di realizzare un futuro studio dedicato all'utilizzo combinato della batteria alettata a basso regime di ventilazione per fornire l'incremento entalpico necessario a garantire il surriscaldamento del fluido prima dell'ingresso al separatore e al compressore.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna ulteriore consulenza.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono presenti, al momento, pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta.

## 10 Eventi di disseminazione

Non sono stati svolti e non si è partecipato a eventi di disseminazione connessi all'attività svolta.