RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

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

R. Trinchieri, M. Pieve , A. C. Violante, M. Proposito, D. Urbano, S. Attanasi, G. Guidi, Y. De Pra, C. Meloni, L. Saraceno, M. Marrocco, S. Scaccia, C. Stringola, G. Guidarelli

ENEA

RdS_PTR22-24_PR1.7_LA LA4.5_395

Sistemi integrati: Sperimentazione di impianti con sorgente geotermica e solare

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

R. Trinchieri, M. Pieve , A. C. Violante, M. Proposito, D. Urbano, S. Attanasi, G. Guidi, Y. De Pra, C. Meloni, L. Saraceno, M. Marrocco, S. Scaccia, C. Stringola, G. Guidarelli (ENEA)

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

Responsabile Linea di Attività: Raniero Trinchieri

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Indice

1 Risultati attesi 8
2 Risultati ottenuti 9
3 Prodotti attesi 9
4 Prodotti sviluppati 11
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 12
6 Sintesi delle attività svolte 13
7 Dettaglio delle attività svolte 14
7.1 Valutazione della risposta termica del sottosuolo 14
7.2 Test dinamici della Pompa di calore aria-terreno 15
7.2.1 Test zona climatica D con T_{user} 30-35 °C 15
7.2.1.1 Test 1: Pozzo 2 (35m), Qs: 0,807 m3/h. 16
7.2.1.2 Test 2: pozzo 2 (35m), $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 1,45 m3/h. 19
7.2.1.3 Test 3: pozzo 3 (50m), Qs: 0,96 m3/h. 20
7.2.1.4 Test 4: pozzo 4 (85m), Qs: 0,89 m3/h. 23
7.2.1.5 Test 5: pozzo 2 e pozzo 3 (totale lunghezza 85m), Qs: 0,89 m3/h. 25
7.2.1.6 Test 6 con sorgente termica aria 26
7.2.2 Test utente zona climatica D con Tuser 40-45 °C 28
7.2.2.1 Test 7: pozzo 3 (50m), Qs: 0,81 m3/h. 28
7.2.2.2 Test 8: pozzo 4 (85m), Qs: 1,09 m3/h. 29
7.2.3 Test utente zona climatica D con T_{user} superiori a 40-45 °C 30
7.2.3.1 Test 9: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 38-43 °C; Qs: 1,32 m3/h. 30
7.2.3.2 Test 10: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 38-43 °C; Qs: 0,55 m3/h. 30
7.2.3.3 Test 11: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 45-50 °C; Qs: 1,08 m3/h. 30
7.2.3.4 Test 12: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 48-53 °C; Qs: 1,08 m3/h. 30
7.2.3.5 Test 13: pozzo 3 (50m), T_{user} set: 35-40 °C, Qs: 0,94 m3/h. 31
7.2.3.6 Test 14: pozzo 3 (50m), T_{user} set: 45-50 °C; Qs: 0,94 m3/h. 31
7.2.4 Test utente zona climatica E con T_{user} set 30-35 °C 31
7.2.4.1 Test 15: pozzo 3 (50m), Qs: 0,83 m3/h. 31
7.2.4.2 Test 16: pozzo 4 (85m), Qs: 0,875 m3/h. 33
7.2.4.3 Test 17: pozzi 2 e 3 (totale lunghezza 85m), Qs: 0,88 m3/h. 34
7.2.4.4 Test 18: pozzi 2 e 3 (totale lunghezza 85m), Qs: 1,33 m3/h. 34
7.2.5 Test utente zona climatica E con T_{user} 40-45 °C 35
7.2.5.1 Test 19: pozzo 3 (50m), Qs iniziale: 0,83 m3/h. 35

7.2.5.2 Test 20: pozzo 4 (85m), Qs iniziale: 0,83 m3/h. 36
7.3 Test dinamici della Pompa di calore aria-sole 37
7.3.1 Carichi elettrici sperimentabili 37
7.3.2 Analisi dei test dinamici 43
7.3.2.1 Test 1: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G medio= 520,1 W/m^2 43
7.3.2.2 Test 2: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G stimato: 292,6 W/m^2..... 45
7.3.2.3 Test 3: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G = 301,4 W/m^2 47
7.3.2.4 Test 4: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G = 377,7 W/m^2..... 48
7.3.2.5 Test 5: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G stimato= 555,2 W/m^2 50
7.3.2.6 Test 6: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 29,9 °C, G stimato= 300,0 W/m^2 52
7.3.2.7 Test 7: test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 50,2 °C, G = 203,9 W/m^2..... 53
7.3.3 Approfondimenti sull'efficienza di produzione elettrica da PV 54
7.3.4 Comparazione prestazione con sorgente aria o solare 57
8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte 58
9 Pubblicazioni scientifiche..... 59
10 Eventi di disseminazione 60

Indice delle figure

Figura 1: Carichi orari zona climatica D 16

Figura 2: Test pozzo 2, zona climatica D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.81 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 16

Figura 3: Test pozzo 2, zona D $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, Potenza elettrica PdC [kW] 17

Figura 4: Test pozzo 2, zona D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, T_{user}, mandata (rosso), ritorno (nero) [°C] 17

Figura 5: Test pozzo 2, zona D $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, Richiesta e produz. Termica [kWh] 18

Figura 6: Test pozzo 2, zona D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, Potenza termica PdC [kW] 18

Figura 7: Test pozzo 2, zona D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.807 m^3/h, COP_{PdC} [-] 19

Figura 8: Test pozzo 2, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,45 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 20

Figura 9: Test pozzo 2, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,45 m^3/h, COP_{PdC} [-] 20

Figura 10: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 20

Figura 11: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m^3/h, COP PdC [-] 21

Figura 12: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m^3/h, COP fascia oraria del mattino [-] 21

Figura 13: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m^3/h, COP fascia oraria centrale [-] 22

Figura 14: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m^3/h, COP fascia oraria serale [-] .. 22

Figura 15: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 23

Figura 16: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m^3/h, COP PdC [-] 23

Figura 17: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m^3/h, COP fascia oraria del mattino [-] 24

Figura 18: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m^3/h, COP fascia oraria centrale [-] 24

Figura 19: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m^3/h, COP fascia oraria serale [-] .. 25

Figura 20: Test pozzi 2 e 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 26

Figura 21: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m^3/h, $T_{ambiente}$ (blu), T_{water} verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 27

Figura 22: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m^3/h, Potenza elettrica [kW] 27

Figura 23: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m^3/h, COP fascia oraria serale [-] 27

Figura 24: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.81 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 28
Figura 25: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.81 m^3/h, COP PdC fascia oraria del mattino [-] 28
Figura 26: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 1,09 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 29
Figura 27: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 1,09 m^3/h, COP fascia oraria del mattino [-] 29
Figura 28: Carichi orari zona climatica E 31
Figura 29: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 32
Figura 30: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs media: 0.83 m^3/h, Qs [m^3/h] 32
Figura 31: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $P_{richiesta}$ vs $P_{erogata}$, prima fascia oraria [kWth] 33
Figura 32: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.875 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 33
Figura 33: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,33 m^3/h, $T_{ritorno}$ a pozzo 3 (blu) e pozzo 2 (nero) [°C] 34
Figura 34: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 35
Figura 35: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $P_{richiesta}$ vs $P_{erogata}$, [kWth] 35
Figura 36: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C] 36
Figura 37: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m^3/h, COP fascia oraria del mattino [-] 36
Figura 38: Caratteristiche dei test dinamici presi in considerazione 43
Figura 39: Test 1: ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 44
Figura 40: Test 1: COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 44
Figura 41: Test 1: Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 45
Figura 42: Test 2, ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 46
Figura 43: Test 2, COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 46
Figura 44: Test 2 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 47
Figura 45: Test 3 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 47
Figura 46: Test 3 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 48
Figura 47: Test 3 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 48
Figura 48: Test 4 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 49
Figura 49: Test 4 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 49
Figura 50: Test 4 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 50

Figura 51: Test 5 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 50
Figura 52: Test 5 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 51
Figura 53: Test 5 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 51
Figura 54: Test 6 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 52
Figura 55: Test 6 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 52
Figura 56: Test 6 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 53
Figura 57: Test 7 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}] 53
Figura 58: Test 7 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}] 54
Figura 59: Test 7 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni 54
Figura 60: Andamento potenza elettrica prodotta, all'utente e da/alla batteria durante un test di simulazione 55
Figura 61: Test 1 - Andamento della potenza elettrica prodotta durante gli on-off della PdC .. 55
Figura 62: Test 6 - Andamento della potenza elettrica prodotta durante gli on-off della PdC . 56
Figura 63: Confronto efficienza di produzione elettrica con PdC in Off o in On 56
Figura 64: Confronto prestazioni termiche con sorgente aria o sole 57

Indice delle tabelle

Tabella 1. Test effettuati sul pozzo 3 15
Tabella 2. Test effettuati sul pozzo 4 15
Tabella 3: Test zona D su pozzo 2: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,807 m3/h. 19
Tabella 4: Test zona climatica D su pozzo 3: Tuser: 30-35 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 0,96 m3/h. 22
Tabella 5: Test zona D su pozzo 4: Tuser:30-35 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 0,89 m3/h. 25
Tabella 6: Test zona D su pozzi 2 e 3: Tuser 30-35 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 0,89 m3/h. 26
Tabella 7: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m^3/h. 27
Tabella 8: Test zona D su pozzo 3: Tuser: 40-45 °C, Tset PdC: 55 °C, Qs: 0,81 m3/h. 29
Tabella 9: Test zona D, pozzo 4: T_{utente}: 40-45 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 1,09 m3/h. 30
Tabella 10: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 38-43 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 1,32 m3/h. 30
Tabella 11: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 38-43 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,55 m3/h. 30
Tabella 12: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 45-50 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 1,08 m3/h. 30
Tabella 13: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 48-53 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 1,08 m3/h. 30
Tabella 14: Test zona D, pozzo 3: T_{user}: 35-40 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,94 m3/h. 31
Tabella 15: Test zona D, pozzo 3: T_{user} :45-50 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,94 m3/h. 31
Tabella 16: Test utente zona E su pozzo 3: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,83 m3/h. 33

Tabella 17: Test utente zona E su pozzo 4: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,875 m3/h. 34
Tabella 18: Test utente zona E su pozzi 2 e 3: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,88 m3/h. 34
Tabella 19: Test utente zona E su pozzi 2 e 3: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 1,33 m3/h. 34
Tabella 20: Test utente zona E su pozzo 3: T_{user}: 40-45 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,83 m3/h. 36
Tabella 21: Test zona E, pozzo 4: T_{user}: 40-45 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,83 m3/h. 37
Tabella 22: Carichi elettrici previsti per utenze da 1500, 2500 e 4000 kWh annui. 37
Tabella 23: Carichi elettrici simulabili per utenze da 1500, 2500 e 4000 kWh annui. 40
Tabella 24: Riepilogo prestazioni Test dinamico 1, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G= 520,1 W/m2 45
Tabella 25: Riepilogo prestazioni Test dinamico 2, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G stimato: 292,6 W/m^2 ... 47
Tabella 25: Riepilogo prestazioni Test dinamico 3, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G= 301,4 W/m^2 48
Tabella 27: Riepilogo prestazioni Test dinamico 4, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G= 377,7 W/m^2 50
Tabella 28: Riepilogo prestazioni Test dinamico 5, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G= 555,2 W/m^2 51
Tabella 29: Riepilogo prestazioni Test dinamico 6, $T_{water\ in}$= 29,9 °C, G= 300,0 W/m^2 53
Tabella 30: Riepilogo prestazioni Test dinamico 7, $T_{water\ in}$ = 50,2 °C, G= 203,9 W/m^2 54

1 Risultati attesi

La presente linea di attività comprende l'esecuzione dei test sugli impianti messi a punto nelle fasi precedenti del progetto e l'analisi critica dei risultati ottenuti. Le PdC impiegate sono caratterizzate da una potenza termica erogabile comparabile, compresa tra 8 e 12 kWth. Per quanto riguarda i test sulla macchina dual-source aria terreno, dopo aver eseguito i test stazionari, si procederà anche all'esecuzione di test dinamici, in questa configurazione. Dall'altra parte, si eseguiranno test con la sorgente termica terreno. Ove possibile, si procederà all'esecuzione di test stazionari, ma, vista l'impossibilità di controllare le condizioni di lavoro (per es. le temperature) della sorgente geotermica, in maggior misura si intende procedere all'esecuzione di test dinamici, per valutare le prestazioni effettive in interfaccia ai carichi termici di una utenza reale.

Per quanto riguarda l'impianto di prova con PdC a CO2 ed evaporatore solare, i risultati attesi sono i test prestazionali dinamici effettuati assegnando determinati profili di carico, termico ed elettrico in interfaccia alla PdC. Saranno inoltre effettuate misurazioni della produttività elettrica al variare delle condizioni climatiche. L'impianto dovrà gestire carichi elettrici reali, attraverso la carica di accumuli dedicati e la scarica su un componente apposito (resistenza elettrica). Le misurazioni effettuate dovranno supportare la valutazione dell'opportunità di realizzare un sistema di controllo della temperatura delle celle fotovoltaiche per evitare il loro surriscaldamento e mantenere la capacità produttiva a livelli accettabili nell'arco della giornata o addirittura incrementarla. Tutti i dati raccolti potranno infine essere utilizzati, anche in questo caso, per la raffinazione dei modelli predisposti in altre LA, in particolare riguardo l'applicazione di strategie di flessibilità della rete elettrica, declinabili anche in termini di gestioni di tipo Demand Response.

2 Risultati ottenuti

Nel corso della presente LA, sono stati condotti test di caratterizzazione della sorgente geotermica, focalizzandosi in particolare sui pozzi 3 e 4 del campo geosonde situato nel C.R. ENEA-Casaccia. Questi test avevano l'obiettivo di valutare la risposta termica del sottosuolo in diverse configurazioni operative, sollecitato con cicli simmetrici di prelievo e accumulo termico. Durante le prove di accumulo, è stata immessa acqua calda a 35 °C nel circuito sonde-terreno, mentre nelle prove di prelievo è stata utilizzata acqua a una temperatura di 15 °C. L'analisi dei profili di temperatura, ha consentito di identificare le diverse litologie in base alla loro capacità di immagazzinare o cedere calore. I materiali con maggiore conducibilità termica, come le lave e i tufi sabbiosi con inclusioni litiche e scoriacee, hanno mostrato una risposta rapida sia nelle fasi di accumulo che di prelievo, con un rilascio di calore più rapido rispetto ai terreni con minore conducibilità. Al contrario, i tufi sabbiosi argillificati e i limi sabbiosi hanno evidenziato una maggiore inerzia termica, trattenendo il calore più a lungo. Inoltre, è stata analizzata la presenza della falda acquifera e il suo impatto sulla dispersione del calore, in particolare negli strati basali delle lave. I risultati delle prove indicano che, dopo un certo numero di ore di accumulo o prelievo, il sistema tende a raggiungere uno stato di equilibrio termico, oltre il quale non si registrano variazioni significative di temperatura.

L'analisi delle prove di accumulo e prelievo ha evidenziato come gli effetti della distribuzione del calore varino in funzione della litologia e dell'interazione con la falda acquifera.

Per quanto riguarda i test sulla macchina doppia-sorgente sono stati condotti in modalità dinamica sia con sorgente aria che con sorgente terreno. I test in modalità geotermica sono stati condotti con diverse combinazioni di pozzi attivi, variando i carichi termici (testando sia quelli tipici delle zone climatiche D che quelli delle zone climatiche E) e la portata di acqua circolante nelle sonde. I riscontri sperimentali hanno dato interessanti indicazioni riguardo la capacità di un campo geosonde di soddisfare i fabbisogni di utenze tipo a seconda della configurazione testata e possono essere utilizzati per il suo dimensionamento di massima e l'ottimizzazione dei costi di capitale e di esercizio da sostenere per un impianto residenziale. Il dimensionamento del campo geosonde peraltro non può prescindere dalle valutazioni sui limiti termodinamici del refrigerante impiegato, che nel nostro caso è l'R600a.

Per quanto riguarda le attività sulla pompa di calore a CO_2 a doppia sorgente aria-sole sono stati condotti anche in questo caso numerosi test di caratterizzazione del sistema, sia in modalità dinamica che statica (in quest'ultimo caso soprattutto in produzione ACS). I riscontri sperimentali hanno fornito indicazioni importanti relativamente all'ottimizzazione delle logiche di gestione della pompa di calore in funzione delle sue prestazioni orarie. In particolare, si è rilevato che i COP registrati al mattino e alla sera (ossia in assenza di apprezzabile radiazione solare) sono insufficienti quando si impiega l'evaporatore solare e sicuramente inferiori a quelle ottenibili con una batteria alettata e sorgente aria. Invece, i COP sono stati molto elevati nelle ore centrali della giornata, ma, in questa fase, essendo il carico termico richiesto piuttosto limite, se ne può beneficiare solo parzialmente. Dal punto di vista elettrico, sono stati ricavati dati significativi di produttività dei pannelli PV, che può crescere fino al 10% in condizioni invernali, con irraggiamento tra 200 e 500 W/m2, quando la pompa di calore è in ON e i pannelli, operanti da evaporatore, sono raffreddati dal refrigente. Il riscontro fa ritenere opportuno proseguire gli studi su sistemi di raffreddamento di pannelli PV-T anche, naturalmente, nell'esercizio estivo della PdC.

3 Prodotti attesi

Il principale prodotto atteso, indicato nel capitolato di progetto, risiede nella realizzazione dei test sperimentali sui prototipi a doppia sorgente messi in servizio. Le misure effettuate rappresentano la base numerica per l'analisi dei dati prestazionali dei sistemi studiati.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati consistono nei test sperimentali sulle due pompe di calore a doppia sorgente e nei test di caratterizzazione della sorgente termica terreno. Le attività sono state regolarmente condotte e i risultati numerici e l'analisi dei dati sono presentati nel presente report, che insieme all'allegato tecnico di approfondimento sulla caratterizzazione geotermica del campo geosonde (RdS_PTR22-24_PR1.7_LA4.5_395_ALL), costituisce un ulteriore prodotto della presente LA.

Infine, è stato prodotto un report da parte di un consulente esterno (Report RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA4.5_405) riguardante l'ingegnerizzazione di soluzioni di controllo termico e automazione di pompe di calore con pannelli PV-T.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la linea di attività 4.5 relativa ai "Sistemi integrati: sperimentazione di impianti con sorgente geotermica e solare", non si evidenziano criticità e scostamenti su attività svolte e risultati ottenuti rispetto a quanto previsto nel capitolato tecnico.

6 Sintesi delle attività svolte

Sono stati condotti test per lo studio del comportamento termico del terreno in risposta ai cicli operativi di accumulo e prelievo di calore, sia in modalità continua che con cicli ON/OFF.

I profili di temperatura, opportunamente misurati, hanno consentito di analizzare la risposta durante i cicli termici, in funzione di conducibilità termica, porosità e interazione con la falda acquifera.

I test sulla PdC aria-terreno sono stati condotti con diversi carichi termici e combinazioni di pozzi attivi: hanno consentito di quantificare le prestazioni giornaliere del sistema e di definire dei principi di dimensionamento generali. Inoltre, sono state comparate le prestazioni ottenibili con le due sorgenti termiche.

Le attività sulla PdC aria-sole, svolte prevalentemente in modalità dinamica, hanno evidenziato la bontà d'impiego della sorgente solare in alcune fasce orarie, con prestazioni invece limitate in condizioni di basso irraggiamento, laddove è preferibile l'uso della sorgente aria.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Valutazione della risposta termica del sottosuolo

Sono stati effettuati test sui pozzi 3 e 4 per analizzare il comportamento termico del sottosuolo in risposta cicli termici di accumulo e prelievo di calore, sia in modalità continua che con cicli ON/OFF. Nei test di accumulo, l'acqua è stata immessa alle sonde-terreno a 35 °C, mentre durante il prelievo di calore è stata immessa a 15 °C.

I test sul pozzo 3, profondo circa 50 metri dal piano campagna (p.c.), sono utili per definire la risposta termica di strati superficiali di terreno, meno influenzati dalla falda acquifera profonda. Invece, il Pozzo 4 permette di indagare gli strati più profondi, fino a 85 m dal p.c., e di valutare l'influenza diretta della falda acquifera sul comportamento termico del terreno.

Le prove mirano a analizzare la risposta termica dei diversi litotipi lungo la verticale del pozzo, in relazione alle sollecitazioni termiche e alle caratteristiche fisiche, oltre all'interazione con la falda acquifera. I primi 8 metri dal p.c. sono stati esclusi dall'analisi, essendo influenzati da fluttuazioni di temperatura giornaliere, mensili e stagionali.

I test sono stati articolati in fasi distinte: l'impianto è stato attivato in modalità continua per un certo numero di ore, seguito da una pausa di spegnimento, per poi essere riacceso. Le Tabelle 1 (pozzo 3) e 2 (pozzo 4) riportano le date, la durata complessiva e gli intervalli considerati per le modalità di accumulo e prelievo. Le fibre ottiche installate all'interno dei pozzi hanno consentito di monitorare la temperatura lungo il profilo verticale in tutti i test eseguiti. È emerso un comportamento differente dei litotipi in relazione a parametri quali la conducibilità termica, la porosità, il grado di fratturazione (lave) e le condizioni di saturazione: durante i test di accumulo, i terreni più conduttivi (tufi sabbiosi con inclusioni litiche e scoriacee, porzioni basali delle lave, ecc.), si riscaldano rapidamente e cedono altrettanto velocemente il calore durante la fase di prelievo; al contrario, i terreni meno conduttivi (tufo sabbioso argillificato o terroso, parte dei tufi rossi a scorie nere, i tufi varicolori di Sacrofano, ecc.), mostrano una maggiore inerzia termica, mantenendo il calore più a lungo.

In accumulo, dopo 6 ore di sollecitazione termica continua, il campo geosonde raggiunge uno stato di saturazione e non risponde più a ulteriori apporti di calore; tuttavia, già dopo 5 ore, il sistema inizia a cedere calore. Un comportamento simile si osserva anche dopo sei ore di prelievo: il campo geosonde non mostra più una significativa riduzione della temperatura, probabilmente per l'influenza del trasporto di calore da parte della falda acquifera.

A partire da queste evidenze, è stato possibile definire il tetto e il letto della falda acquifera e la sua influenza sulla risposta termica dei litotipi coinvolti. Il letto della falda è posto tra i 79,1 e gli 81,2 m dal p.c., nello strato basale dei tufi varicolori di Sacrofano. Il tetto, invece, si trova a contatto con le lave basali, all'interno del tufo terroso sabbioso, a circa 35 m dal p.c.. A 63 m dal p.c., all'interno dei tufi rossi a scorie nere, è presente un livello impermeabile che condiziona il flusso dell'acqua di falda e cede rapidamente il calore accumulato già dopo 2 ore lo spegnimento dell'impianto.

Per i dettagli sulle evidenze e la discussione dei risultati ottenuti per ciascuna prova, insieme ai relativi grafici, si rimanda all'allegato tecnico.

POZZO 3						
Data	Orario avvio prova	Orario stop prova	Tipo di prova	T immissione [°C]	Durata accumulo [h]	Intervallo
04.07.2024	11:00	18:00	Accumulo	35,00	6,00	1h ON - 1 h OFF - 5 h ON
05.07.2024	10:30	17:30	Prelievo	15,00	6,00	1h ON - 1 h OFF - 5 h ON
08.07.2024	11:00	19:00	Accumulo	35,00	6,00	2 h ON - 2 h OFF - 4 h ON
09.07.2024	10:20	18:20	Prelievo	15,00	6,00	2 h ON - 2 h OFF - 4 h ON
11.07.2024	10:15	19:15	Accumulo	35,00	6,00	2h ON - 3h OFF - 4h ON
12.07.2024	10:40	19:40	Prelievo	15,00	6,00	2h ON - 3h OFF - 4h ON
16.07.2024	10:00	19:00	Accumulo	35,00	6,00	3hON - 3h OFF - 3h ON
17.07.2024	10:00	19:00	Prelievo	15,00	6,00	3hON - 3h OFF - 3h ON
22.07.2024	11:00	17:00	Accumulo	35,00	6,00	6h ON
23.07.2024	11:00	17:00	Prelievo	15,00	6,00	6h ON

Tabella 1. Test effettuati sul pozzo 3

POZZO 4						
Data	Orario avvio prova	Orario stop prova	Tipo di prova	T immissione [°C]	Durata accumulo [h]	Intervallo
01.07.2024	10:30	16:30	Accumulo	35,00	6,00	6h ON
02.07.2024	09:30	15:30	Prelievo	15,00	6,00	6h ON
04.07.2024	10:00	18:00	Accumulo	35,00	6,00	1h ON - 2 h OFF - 5 h ON
05.07.2024	09:30	17:30	Prelievo	15,00	6,00	1h ON - 2 h OFF - 5 h ON
08.07.2024	10:00	19:00	Accumulo	35,00	6,00	1 h ON - 3 h OFF - 5 h ON
09.07.2024	09:20	18:20	Prelievo	15,00	6,00	1 h ON - 3 h OFF - 5 h ON
11.07.2024	09:15	19:15	Accumulo	35,00	6,00	2h ON - 4h OFF - 4h ON
12.07.2024	09:40	19:40	Prelievo	15,00	6,00	2h ON - 4h OFF - 4h ON
16.07.2024	09:00	19:00	Accumulo	35,00	6,00	3h ON - 4h OFF - 3h ON
17.07.2024	09:00	19:00	Prelievo	15,00	6,00	3h ON - 4h OFF - 3h ON
22.07.2024	09:00	20:00	Accumulo	35,00	6,00	3h ON - 5h OFF - 3h ON
23.07.2024	09:00	20:00	Prelievo	15,00	6,00	3h ON - 5h OFF - 3h ON
18.07.2024	09:20	17:20	Accumulo	35,00	8,00	8h ON
19.07.2024	09:30	17:30	Prelievo	15,00	8,00	8h ON
24.07.2024	09:00	18:00	Accumulo	35,00	8,00	1 h ON - 1h OFF - 7h ON
25.07.2024	08:30	17:30	Prelievo	15,00	8,00	1 h ON - 1h OFF - 7h ON

Tabella 2. Test effettuati sul pozzo 4

7.2 Test dinamici della Pompa di calore aria-terreno

I test sulla PdC a R600a sono stati condotti sia con la sorgente terreno che con la sorgente aria, con diverse combinazioni di pozzi, carichi termici, temperature di erogazione dell'acqua e portate lato sorgente (Qs). Di seguito, si analizzano i più significativi.

7.2.1 Test zona climatica D con T_{user} 30-35 °C

I test sono stati eseguiti secondo i carichi orari di Figura 1 e secondo il metodo descritto in (report RdS/PTR(2021)/345).

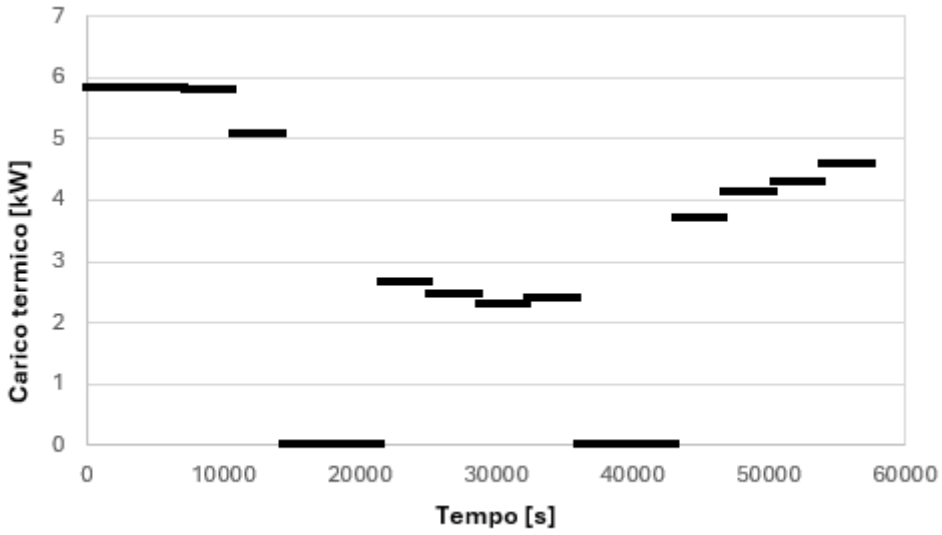

Figura 1: Carichi orari zona climatica D

7.2.1.1 Test 1: Pozzo 2 (35m), Qs: 0,807 m3/h.

Gli andamenti delle principali grandezze misurate sono mostrati dalla Figura 2 alla Figura 7.

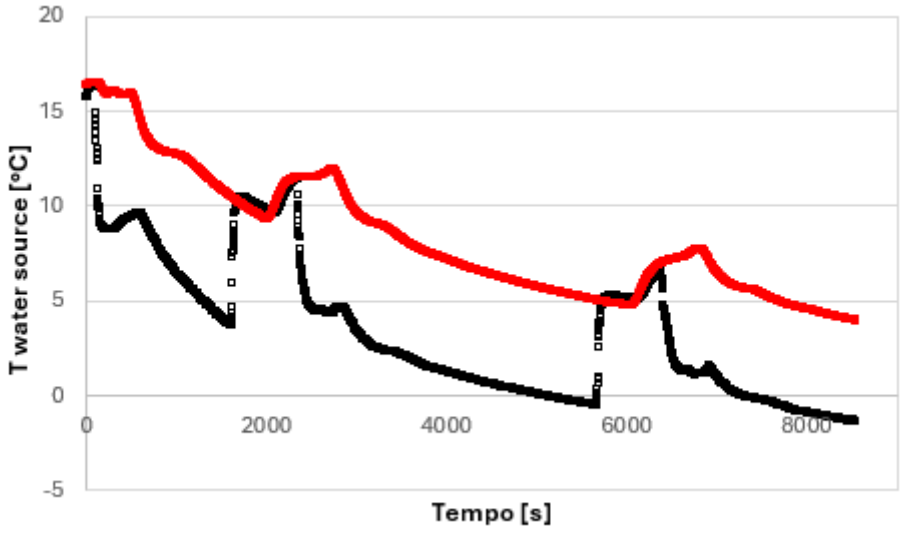

Figura 2: Test pozzo 2, zona climatica D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.81 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

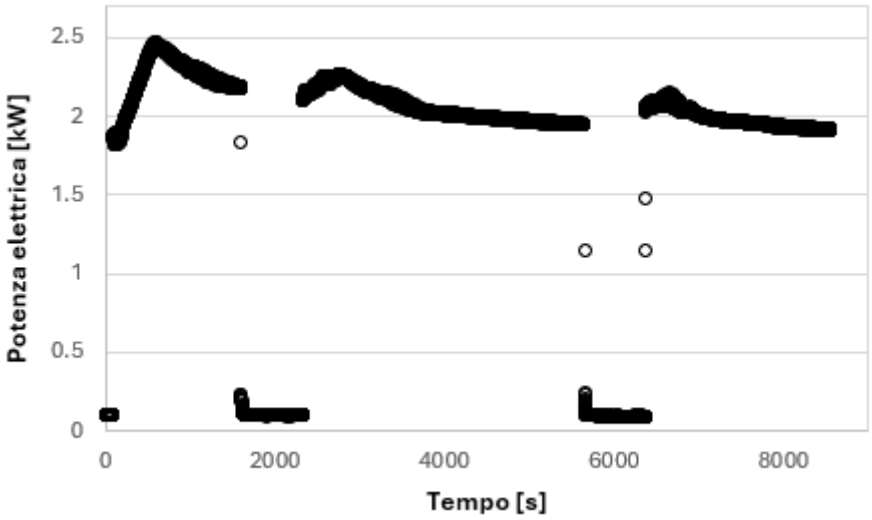

Figura 3: Test pozzo 2, zona D $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, Potenza elettrica PdC [kW]

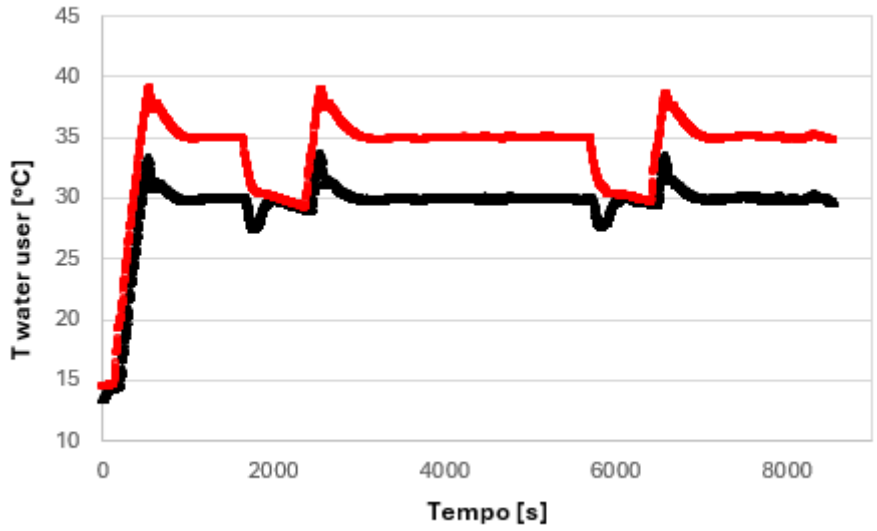

Figura 4: Test pozzo 2, zona D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, T_{user}, mandata (rosso), ritorno (nero) [°C]

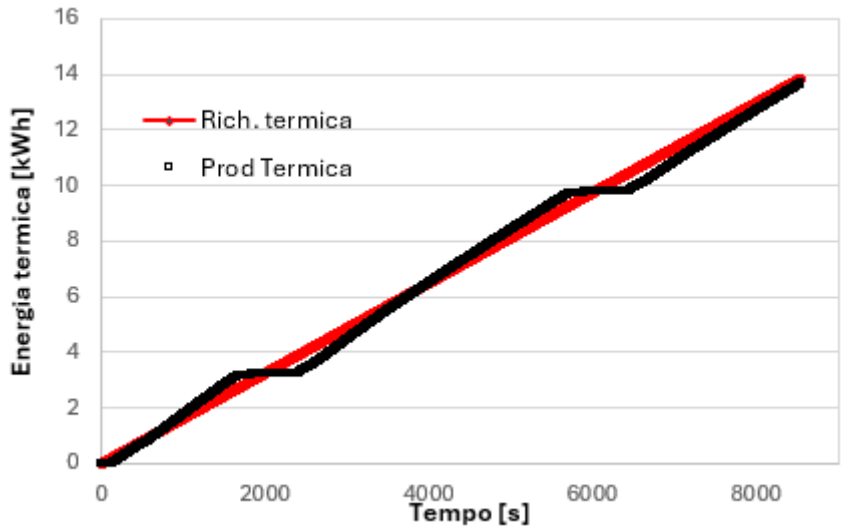

Figura 5: Test pozzo 2, zona D $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, Richiesta e produz. Termica [kWh]

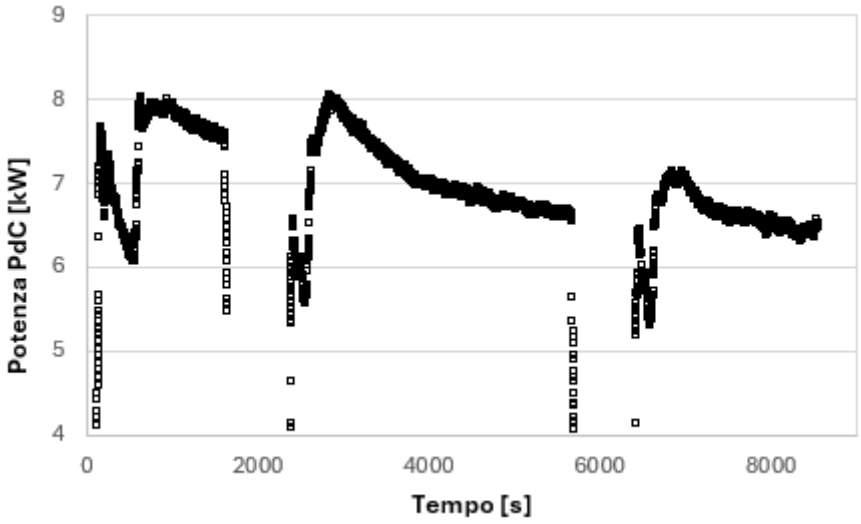

Figura 6: Test pozzo 2, zona D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.81 m^3/h, Potenza termica PdC [kW]

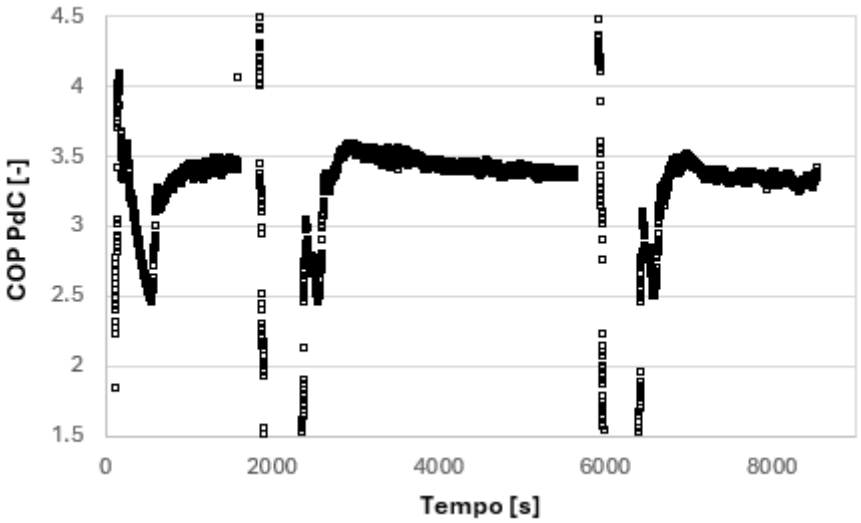

Figura 7: Test pozzo 2, zona D, $T_{pdc\ set}$ 45 °C, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs 0.807 m³/h, COP_{PdC} [-]

Il test è stato interrotto dopo circa 2 ore perché le temperature della miscela acqua/glicole, lato sorgente, sono scese sotto lo zero (il refrigerante impiegato, R600a, ha punto di ebollizione normale di -11,75 °C). La Tabella 3 riepiloga la prestazione energetica in ogni ora di funzionamento e al termine del test.

Tabella 3: Test zona D su pozzo 2: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,807 m3/h.

	Prima ora	Seconda ora	Conclusione test
Energia termica prodotta [kWhth]	5,69	5,51	13,66
Energia elettrica assorbita [kWhel]	1,75	1,64	4,13
ECOP [kWhth/kWhel]	3,24	3,35	3,31

7.2.1.2 Test 2: pozzo 2 (35m), $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 1,45 m3/h.

L'aumento di portata lato sonde non ha consentito di soddisfare i carichi termici, sempre per le basse temperature lato sorgente (Figura 8). Il test è stato quindi interrotto nelle prime ore di funzionamento, con COP finale di 3,28 e andamento di Figura 9. Con il pozzo 2 (di 35 m) non è quindi possibile soddisfare utenze con i carichi termici della zona D.

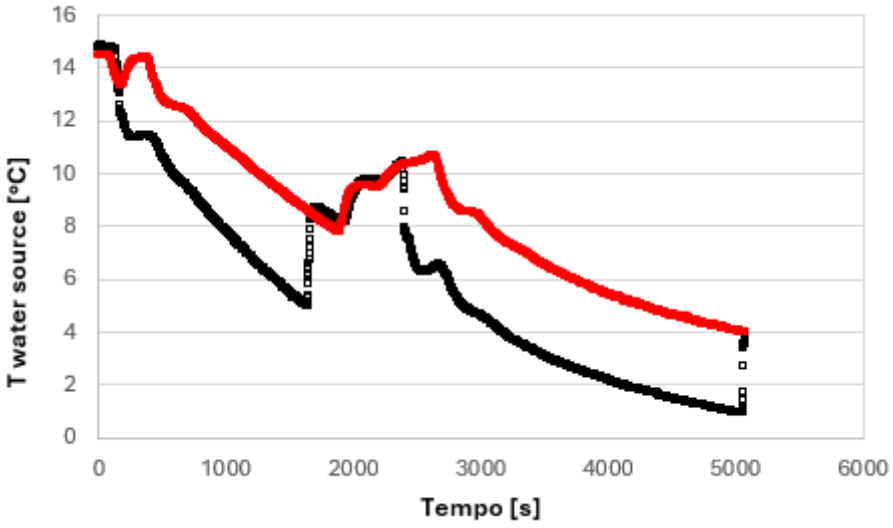

Figura 8: Test pozzo 2, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,45 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

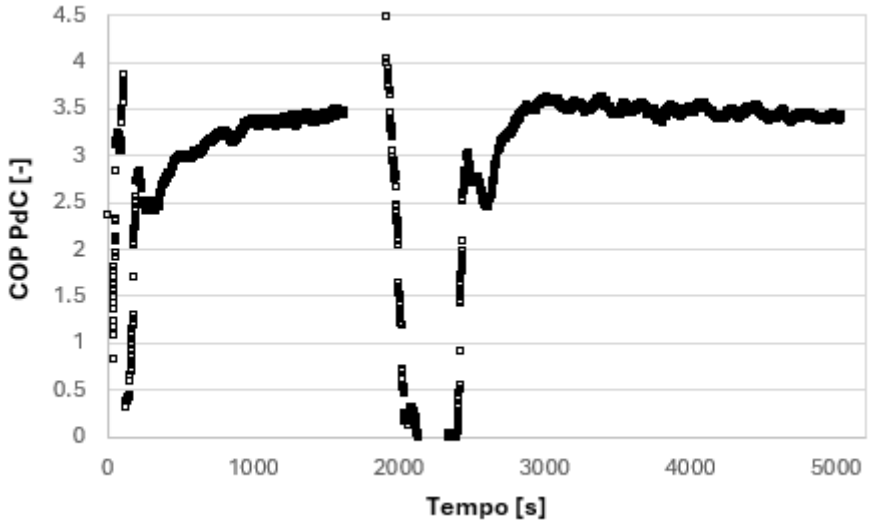

Figura 9: Test pozzo 2, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,45 m³/h, COP_{PdC} [-]

7.2.1.3 Test 3: pozzo 3 (50m), Qs: 0,96 m3/h.

Gli andamenti registrati (Figura 10) mostrano quanto decresce la temperatura del fluido inviato alla sorgente nelle fasi di accensione e il recupero termico del terreno agli spegnimenti. L'andamento del COP (Figura 11) rende conto della variabilità delle prestazioni riassunte in Tabella 4: al mattino (Figura 12) i tempi di accensione necessari a soddisfare l'utenza consentono di raggiungere COP stabili e poco penalizzati dalla riduzione della temperatura della sorgente; nella fascia centrale (Figura 13), a causa di minori carichi termici, la PdC si spegne senza raggiungere il plateau di massimo COP; nella fascia serale (Figura 14) si ha una situazione intermedia, essendo i carichi compresi tra quelli del mattino e della fascia centrale.

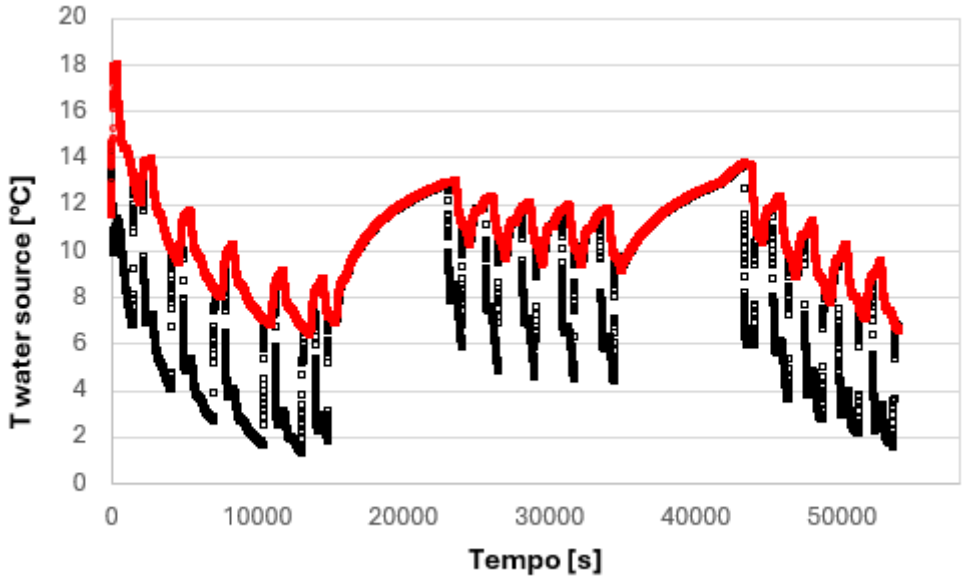

Figura 10: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

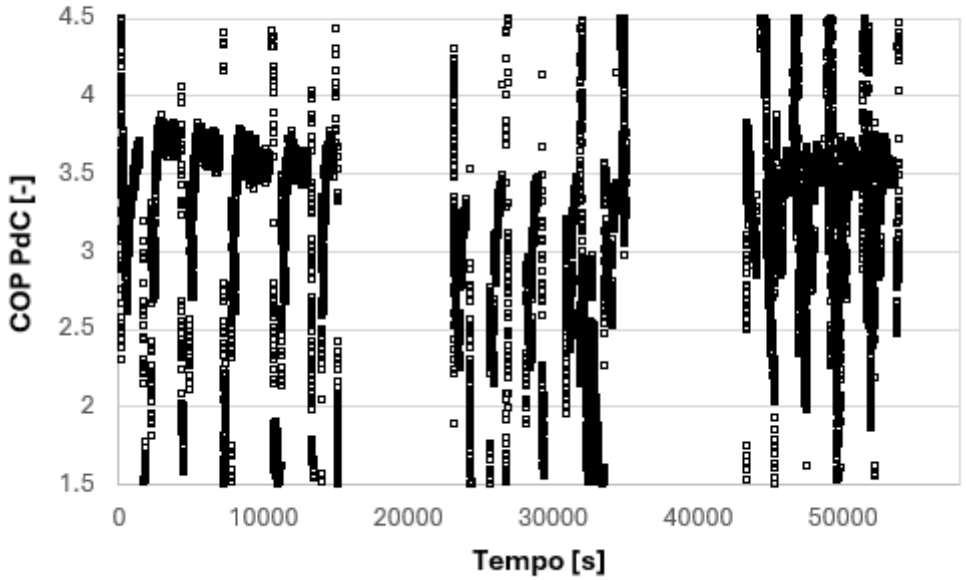

Figura 11: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m³/h, COP PdC [-]

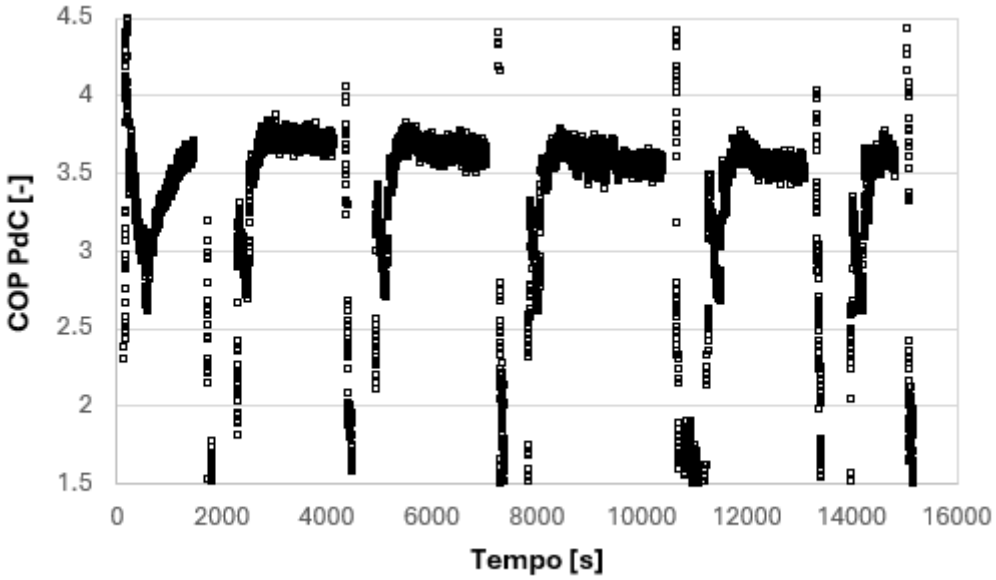

Figura 12: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m³/h, COP fascia oraria del mattino [-]

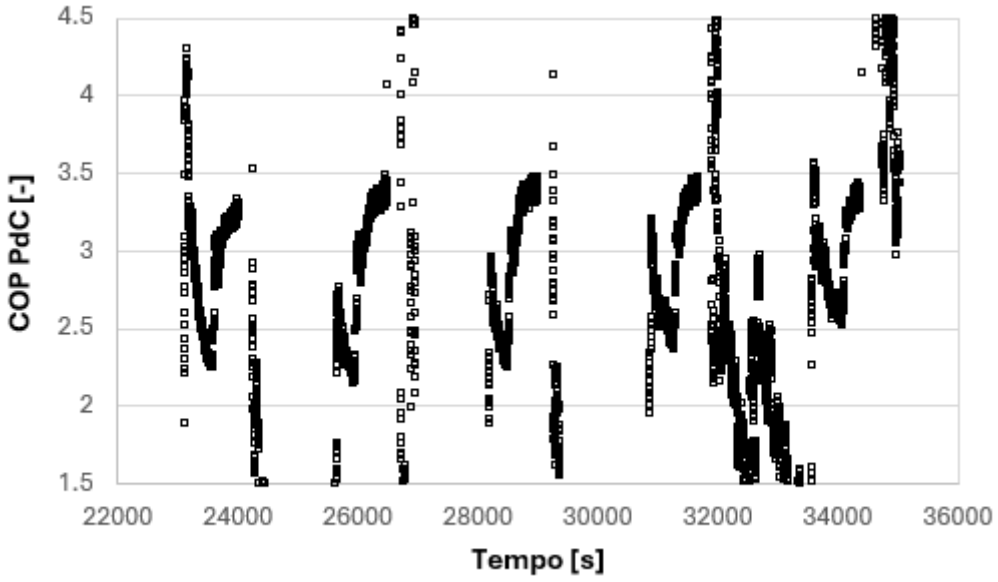

Figura 13: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m³/h, COP fascia oraria centrale [-]

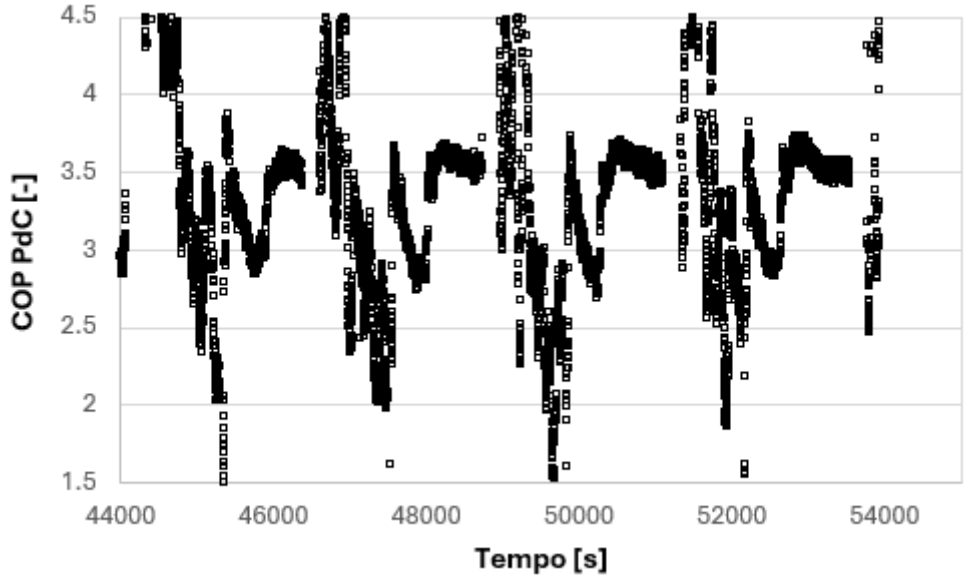

Figura 14: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.96 m³/h, COP fascia oraria serale [-]

La Tabella 4 riepiloga la prestazione energetica in ogni fascia giornaliera di funzionamento.

Tabella 4: Test zona climatica D su pozzo 3: Tuser: 30-35 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 0,96 m3/h

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale**
Energia termica prodotta [kWhth]	22,08	9,91	12,18	44,17
Energia elettrica assorbita [kWhel]	6,33	3,51	3,68	13,5
ECOP [kWhth/kWhel]	3,49	2,82	3.31	3,27

*: ultima ora serale non effettuata; **: inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.1.4 Test 4: pozzo 4 (85m), Qs: 0,89 m3/h.

Il degrado di temperatura della sorgente è risultato inferiore rispetto al pozzo 3 (Figura 15). L'andamento del COP (Figura 16) mostra un funzionamento più efficiente nella fascia mattutina (Figura 17) rispetto alle altre (Figura 18 e Figura 19).

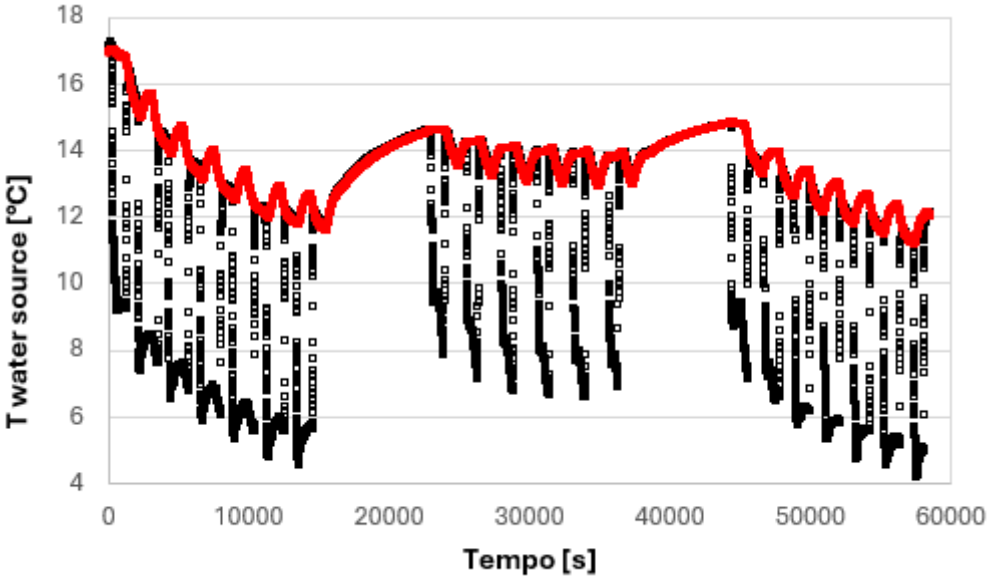

Figura 15: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

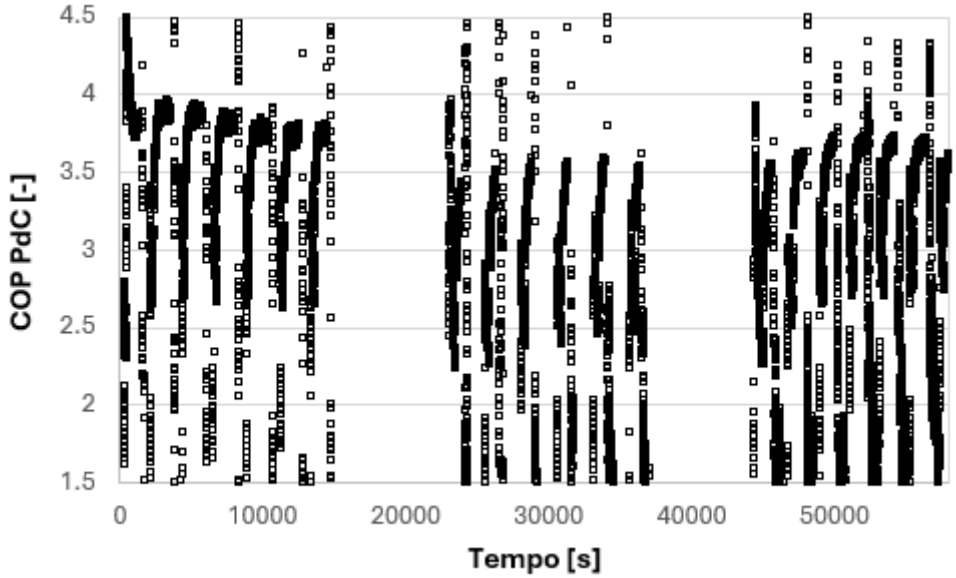

Figura 16: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m³/h, COP PdC [-]

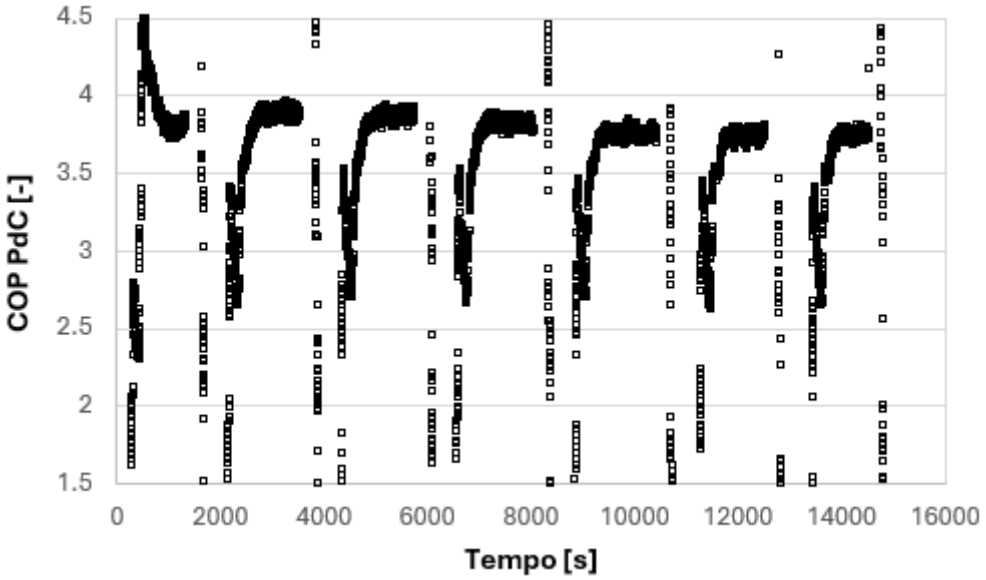

Figura 17: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m³/h, COP fascia oraria del mattino [-]

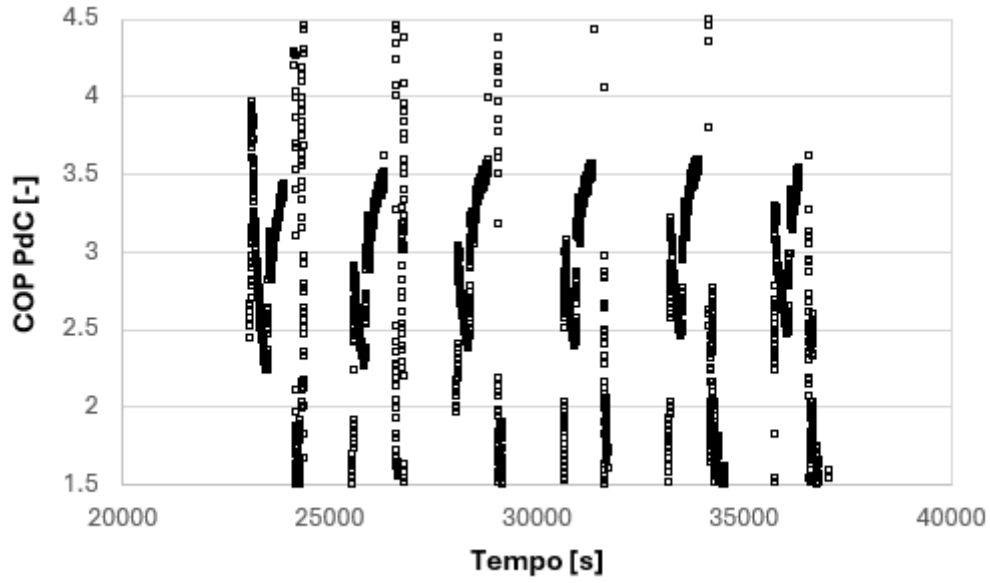

Figura 18: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m³/h, COP fascia oraria centrale [-]

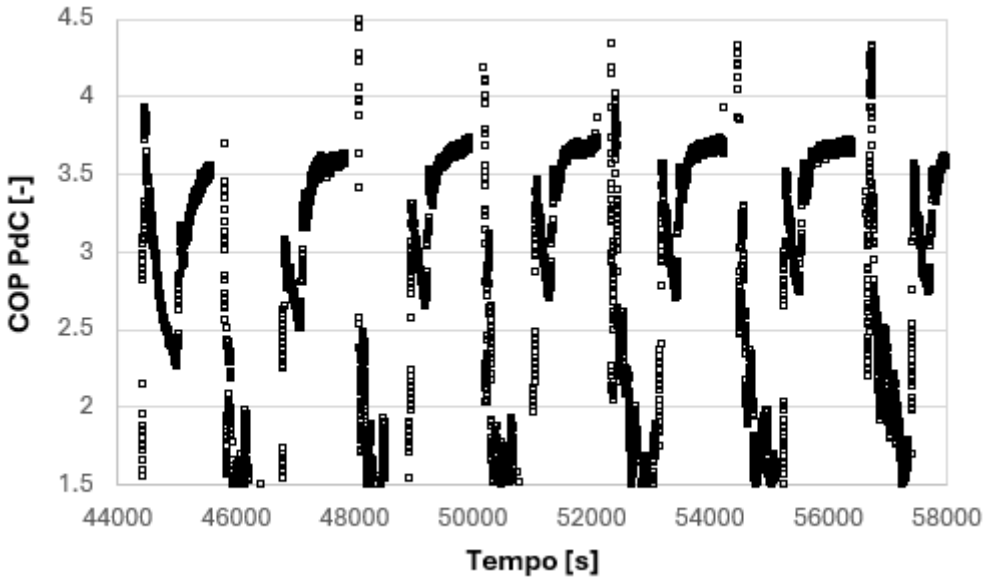

Figura 19: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m³/h, COP fascia oraria serale [-]

La Tabella 5 riepiloga la prestazione energetica in ogni fascia giornaliera di funzionamento. La prestazione giornaliera (ECOP) mostra un modesto incremento (1,8%) rispetto al pozzo 3.

Tabella 5: Test zona D su pozzo 4: Tuser:30-35 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 0,89 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,72	9,45	17,59	49,76
Energia elettrica assorbita [kWhel]	6,24	3,37	5,34	14,96
ECOP [kWhth/kWhel]	3,64	2,80	3,29	3,33

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.1.5 Test 5: pozzo 2 e pozzo 3 (totale lunghezza 85m), Qs: 0,89 m3/h.

Il test con due pozzi attivi (ma pari lunghezza rispetto al test 4), mostra una prestazione (Tabella 6) simile, con una leggera miglior capacità di recupero termico da parte della sorgente termica nelle fasi di spegnimento della PdC (Figura 20).

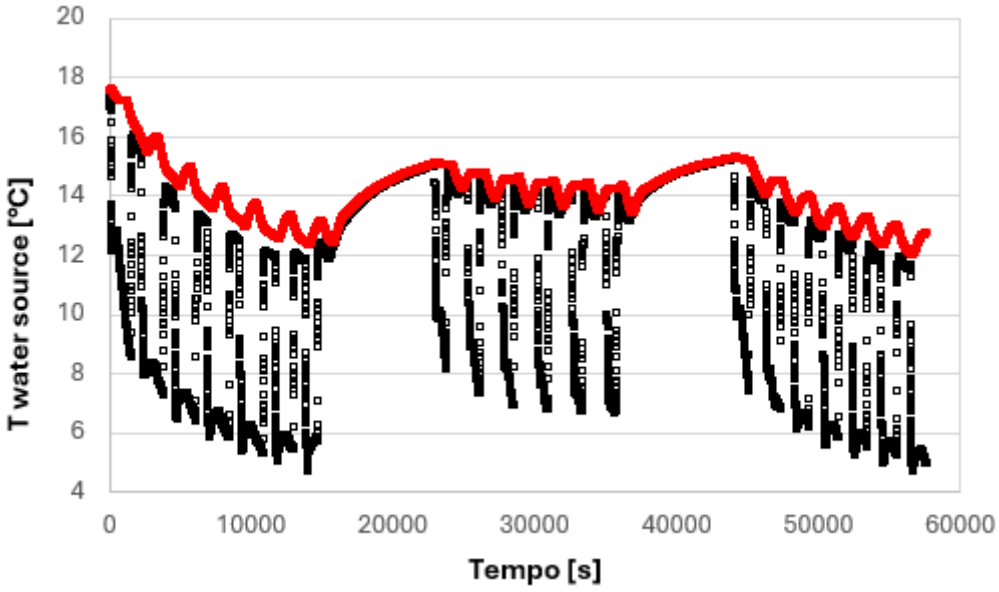

Figura 20: Test pozzi 2 e 3, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.89 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

Tabella 6: Test zona D su pozzi 2 e 3: Tuser 30-35 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 0,89 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,27	10,63	16,74	49,64
Energia elettrica assorbita [kWhel]	6,26	3,54	5,31	15,11
ECOP [kWhth/kWhel]	3,54	3,00	3,15	3,32

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.1.6 Test 6 con sorgente termica aria

Il test completo (Figura 21), ha fatto registrare prestazioni molto basse (Tabella 7), prevalentemente per l'elevato assorbimento elettrico del ventilatore (si confrontino gli assorbimenti di Figura 22 e Figura 3). Il COP assume valori di circa 2,40 (Figura 23).

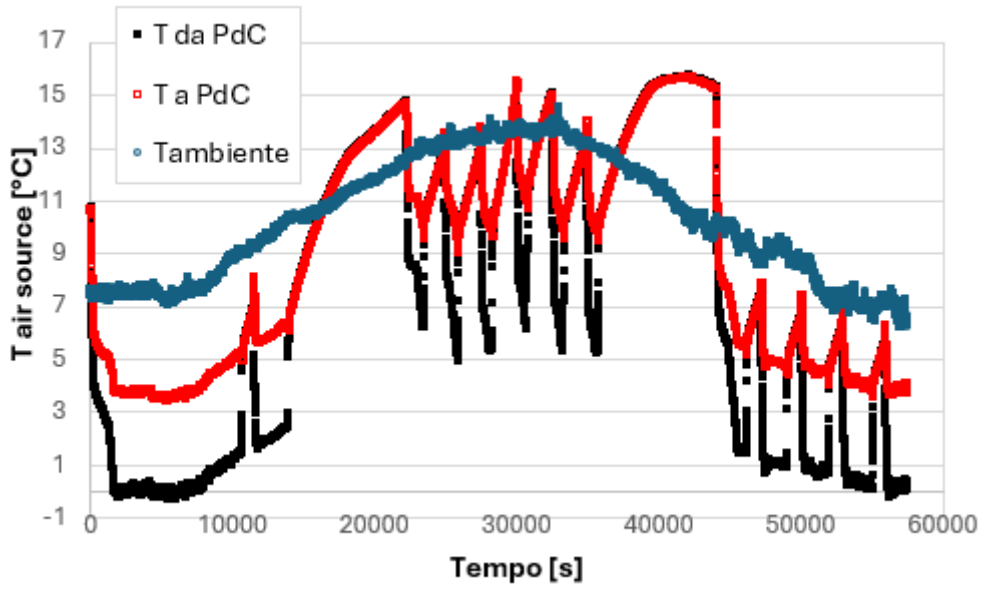

Figura 21: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m³/h, $T_{ambiente}$ (blu), T_{water} verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

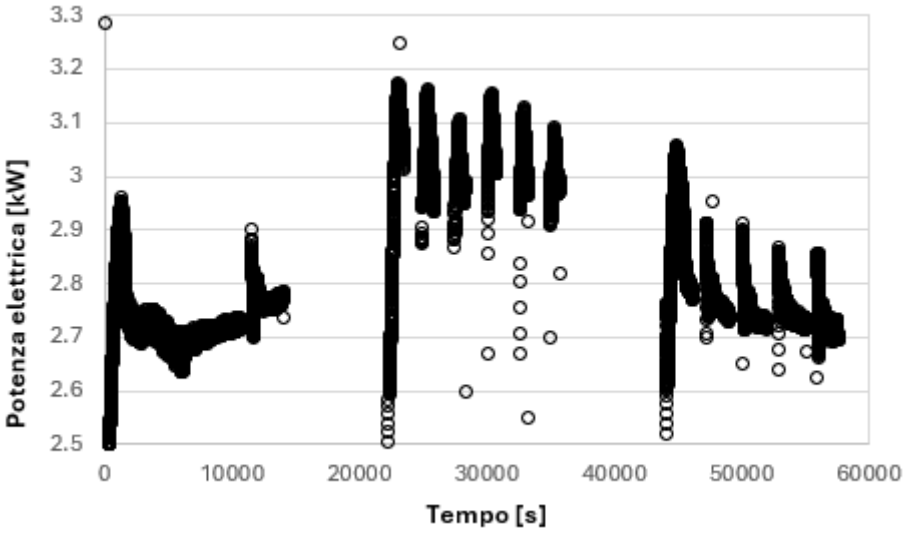

Figura 22: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m³/h, Potenza elettrica [kW]

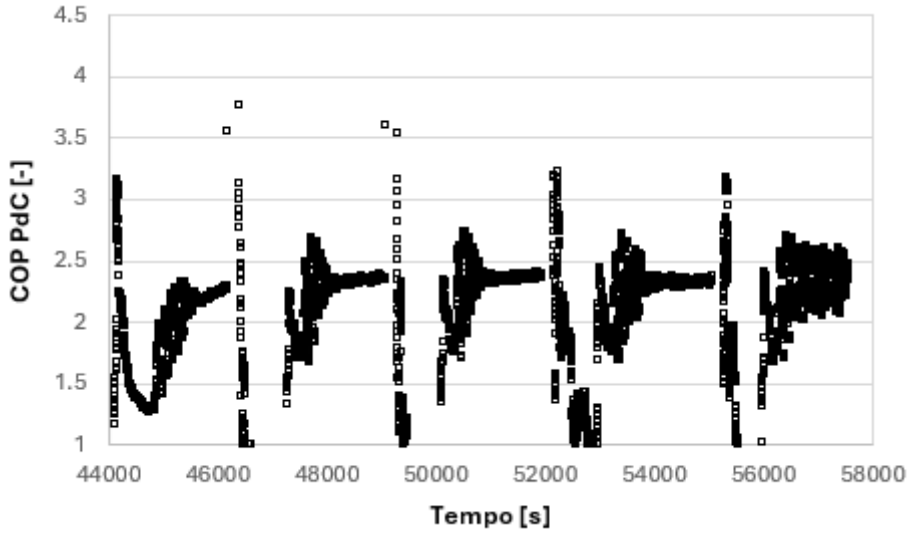

Figura 23: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m³/h, COP fascia oraria serale [-]

La Tabella 7 riepiloga la prestazione energetica di questo test, fortemente penalizzata da un incremento di assorbimento elettrico del 37,4% (1,98 kW medi nei test con sorgente geotermica vs. 2,72 kW con l'aria).

Tabella 7: Test sorgente aria, zona D, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,24 m³/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,55	10,24	16,33	49,18
Energia elettrica assorbita [kWhel]	9,92	4,85	7,75	22,52
ECOP [kWhth/kWhel]	2,44	2,12	2,11	2,18

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.2 Test utente zona climatica D con Tuser 40-45 °C

Sono stati eseguiti test solo con i pozzi 3 e 4,non potendo soddisfare i carichi col pozzo 2.

7.2.2.1 Test 7: pozzo 3 (50m), Qs: 0,81 m3/h.

Gli andamenti di temperatura, lato sonde (Figura 24), sono simili all'analogo test 3.I COP misurati risultano inferiori per l'aumento della potenza elettrica assorbita e la riduzione di quella termica erogata (Figura 25 vs Figura 12).

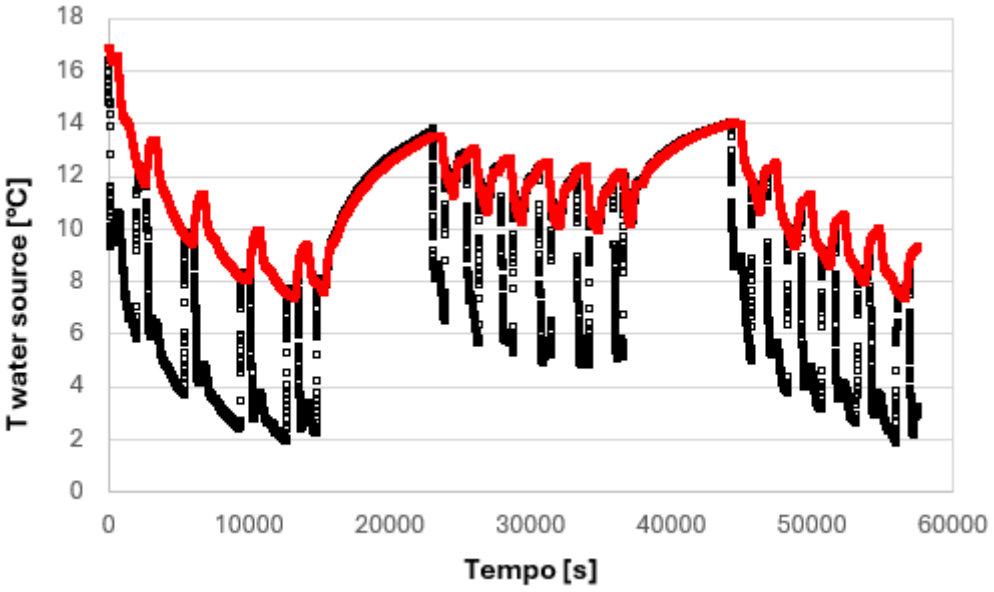

Figura 24: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.81 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

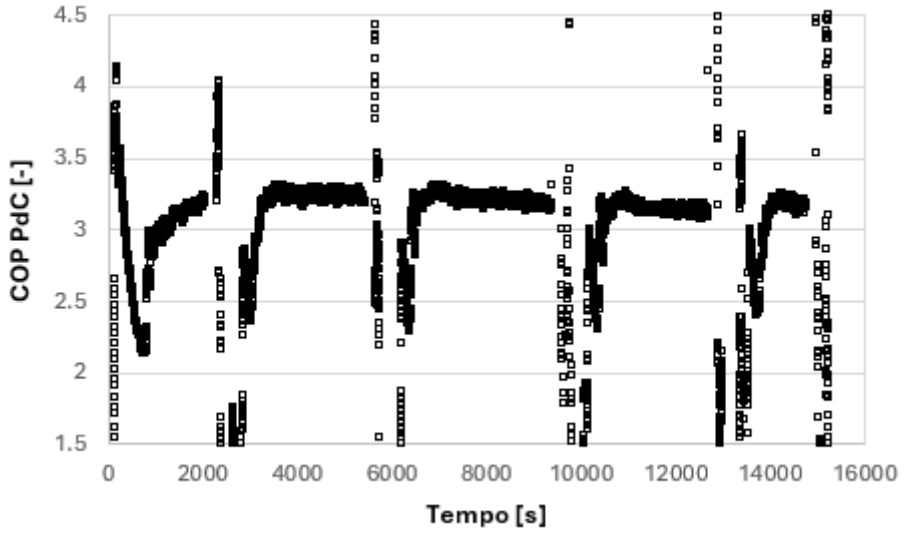

Figura 25: Test pozzo 3, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.81 m³/h, COP PdC fascia oraria del mattino [-]

La Tabella 8 riepiloga la prestazione energetica: rispetto al test 3 si registra una riduzione di ECOP del 10,7%.

Tabella 8: Test zona D su pozzo 3: Tuser: 40-45 °C, Tset PdC: 55 °C, Qs: 0,81 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,31	9,57	17,65	49,53
Energia elettrica assorbita [kWhel]	7,22	3,52	6,18	16,92
ECOP [kWhth/kWhel]	3,09	2,72	2.85	2,92

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.2.2 Test 8: pozzo 4 (85m), Qs: 1,09 m3/h.

La riduzione di temperatura della sorgente è stata inferiore al test 4, in virtù di un maggior Qs, lato sorgente, pur a parità di velocità dei circolatori (Figura 26 vs Figura 15). Le efficienze (Tabella 9) sono state inferiori del 6% rispetto al test 4, sia pur con COP costante (ma inferiore) nei plateau stazionari (Figura 27 vs Figura 17), per la maggior portata.

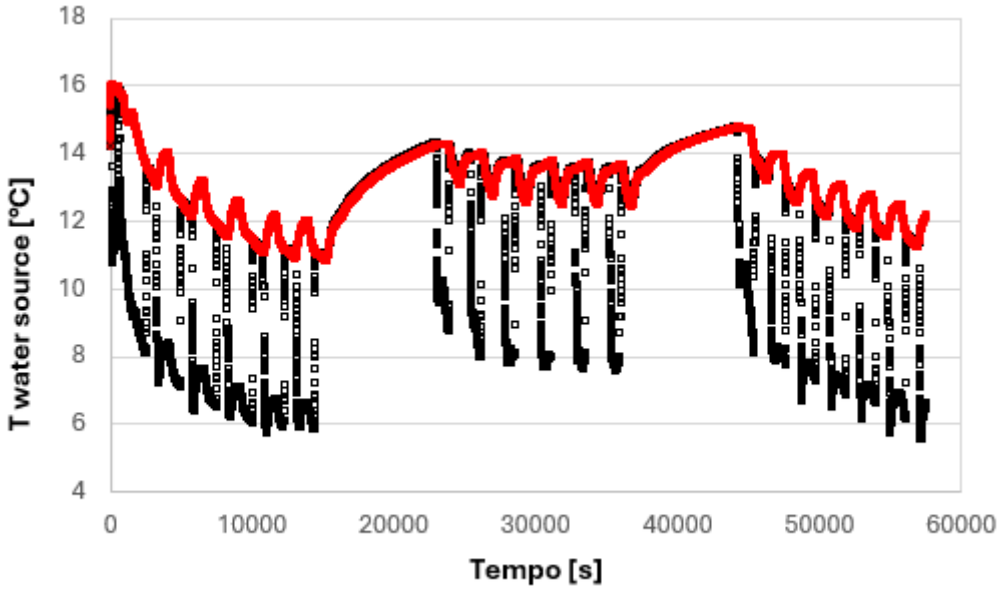

Figura 26: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 1,09 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

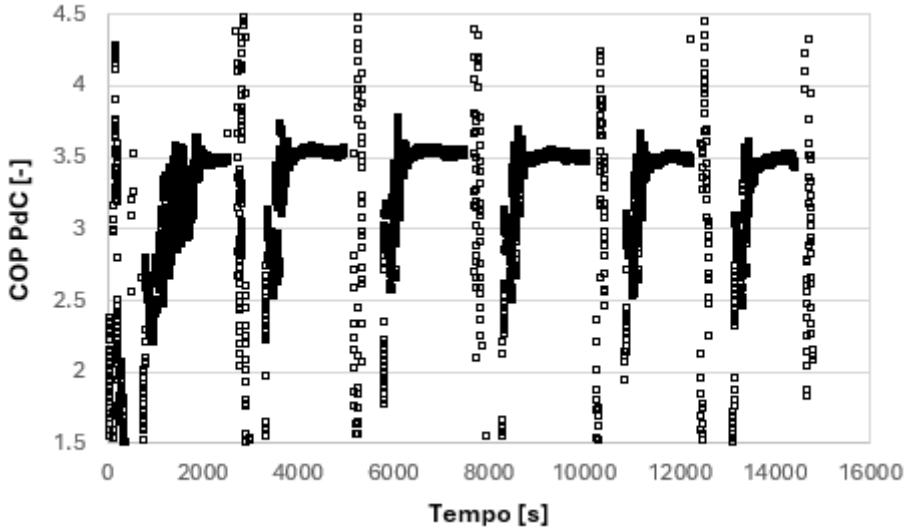

Figura 27: Test pozzo 4, zona D, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 1,09 m³/h, COP fascia oraria del mattino [-]

Tabella 9: Test zona D, pozzo 4: T_{utente}: 40-45 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 1,09 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,89	10.10	16,09	49,05
Energia elettrica assorbita [kWhel]	6,91	3,57	5,19	15,67
ECOP [kWhth/kWhel]	3,31	2,82	3,10	3,13

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.3 Test utente zona climatica D con T_{user} superiori a 40-45 °C

Per valutare l'influenza sull'ECOP della portata, lato sorgente, e della temperatura dell'acqua erogata, sono stati eseguiti altri test sui pozzi 4 e 3, di cui si riportano sinteticamente i risultati.

7.2.3.1 Test 9: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 38-43 °C; Qs: 1,32 m3/h.

Tabella 10: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 38-43 °C, Tset PdC: 45 °C, Qs: 1,32 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,6	9,46	16,73	48,80
Energia elettrica assorbita [kWhel]	6,61	3,30	5,32	15,23
ECOP [kWhth/kWhel]	3,27	2,87	3,14	3,20

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.3.2 Test 10: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 38-43 °C; Qs: 0,55 m3/h.

Tabella 11: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 38-43 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,55 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,74	9,43	17,39	49,56
Energia elettrica assorbita [kWhel]	7,05	3,80	5,92	16,77
ECOP [kWhth/kWhel]	3,22	2,48	2,94	2,95

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.3.3 Test 11: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 45-50 °C; Qs: 1,08 m3/h.

Tabella 12: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 45-50 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 1,08 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,67	9,22	17,93	49,82
Energia elettrica assorbita [kWhel]	7,38	3,63	6,33	17,34
ECOP [kWhth/kWhel]	3,07	2,54	2,83	2,87

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.3.4 Test 12: pozzo 4 (85m), T_{user} set: 48-53 °C; Qs: 1,08 m3/h.

Tabella 13: Test zona D, pozzo 4: T_{user}: 48-53 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 1,08 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,68	9,81	17,35	49,83
Energia elettrica assorbita [kWhel]	7,64	3,96	6,27	17,87
ECOP [kWhth/kWhel]	2,97	2,47	2,77	2,79

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.3.5 Test 13: pozzo 3 (50m), T_{user} set: 35-40 °C, Qs: 0,94 m3/h.

Tabella 14: Test zona D, pozzo 3: T_{user}: 35-40 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,94 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	22,42	9,78	17,59	49,8
Energia elettrica assorbita [kWhel]	6,85	3,57	5,89	16,31
ECOP [kWhth/kWhel]	3,27	2,74	2,99	3,05

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.2.3.6 Test 14: pozzo 3 (50m), T_{user} set: 45-50 °C; Qs: 0,94 m3/h.

Tabella 15: Test zona D, pozzo 3: T_{user} :45-50 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,94 m3/h.

Periodo di accensione	mattino
Energia termica prodotta [kWhth]	22,17
Energia elettrica assorbita [kWhel]	7,91
ECOP [kWhth/kWhel]	2,80

*:test interrotto per raggiungimento temperature negative lato sorgente

7.2.4 Test utente zona climatica E con T_{user} set 30-35 °C

I carichi termici della zona E sono mostrati in Figura 28.

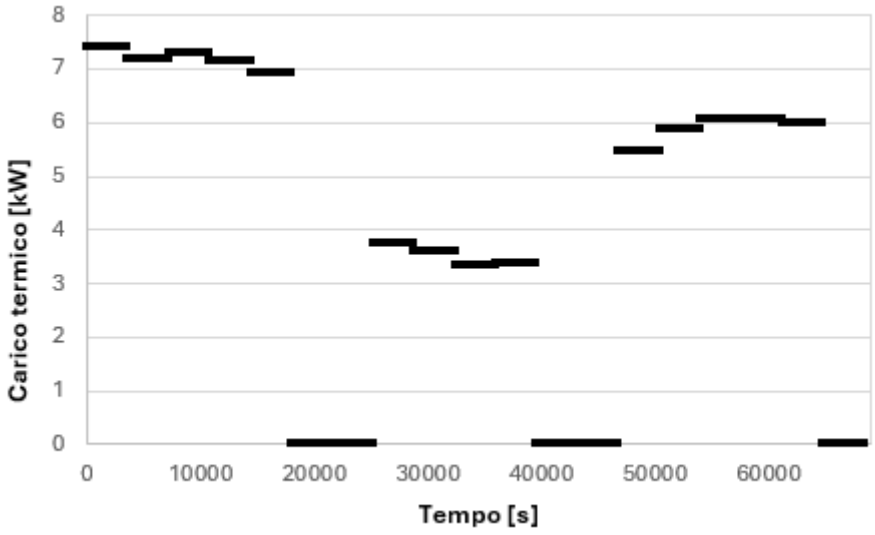

Figura 28: Carichi orari zona climatica E

7.2.4.1 Test 15: pozzo 3 (50m), Qs: 0,83 m3/h.

Il test non è stato concluso per un allarme di bassa temperatura, lato sorgente. La grande riduzione di temperatura (Figura 29) nelle fasi attive determina una forte riduzione di portata (Figura 30) e quindi di potenza termica erogata (Figura 31, prima fascia oraria, laddove la PdC resta sempre accesa): la fase di accensione si prolunga con raggiungimento di temperature limite. La Tabella 16 mostra i riscontri prestazionali.

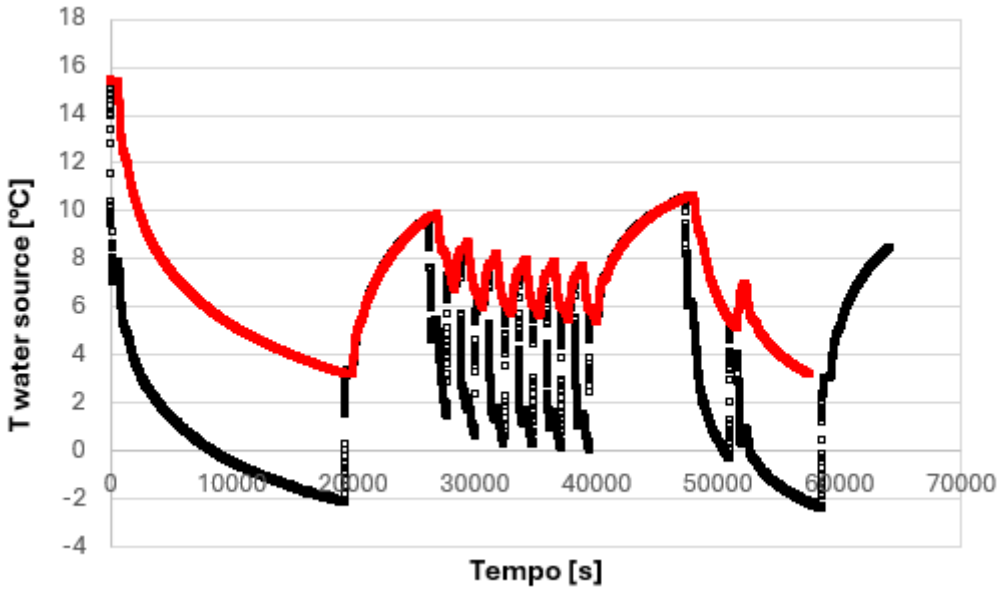

Figura 29: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.83 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

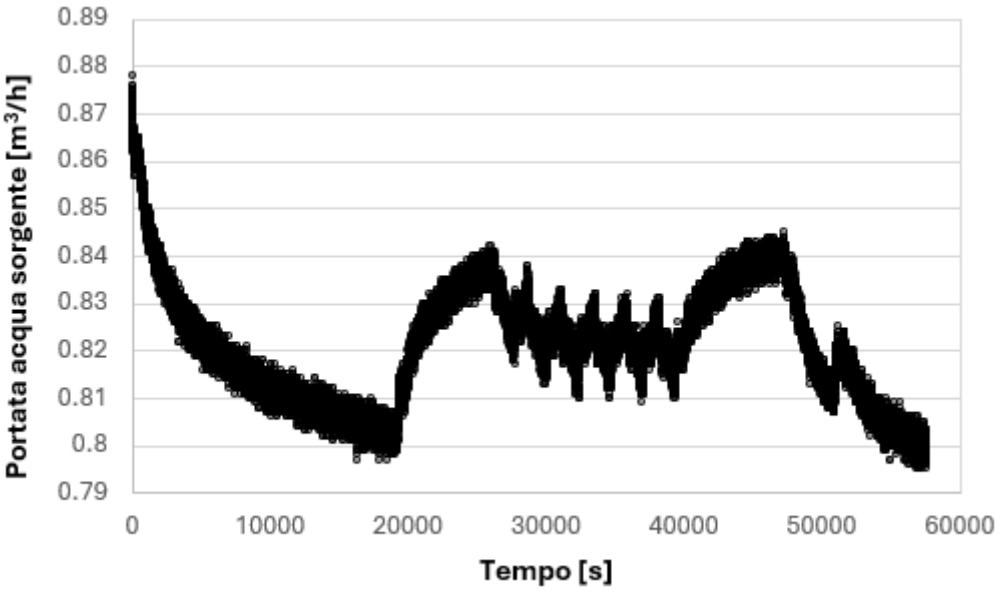

Figura 30: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs media: 0.83 m³/h, Qs [m³/h]

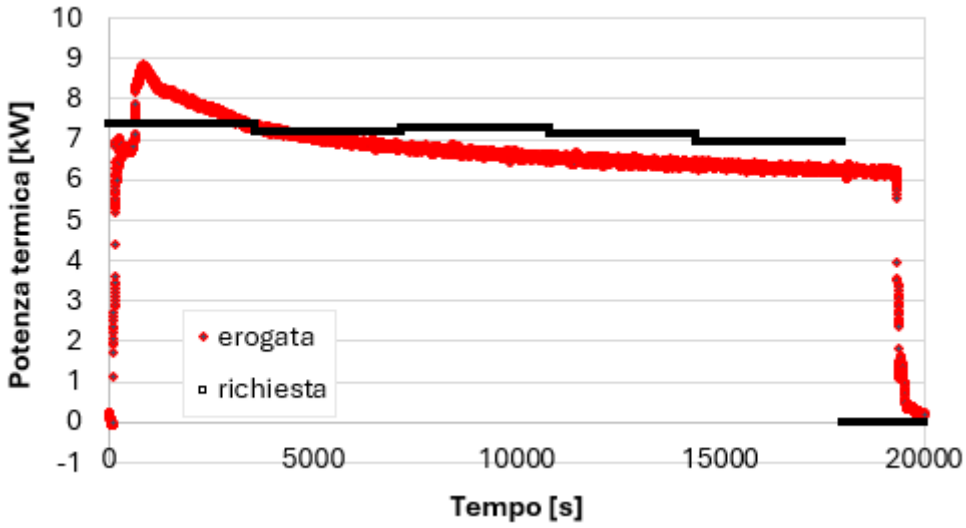

Figura 31: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.83 m³/h, $P_{richiesta}$ vs $P_{erogata}$, prima fascia oraria [kWth]

Tabella 16: Test utente zona E su pozzo 3: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,83 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	33,98	16,28	18,62	68,82
Energia elettrica assorbita [kWhel]	9,85	5,28	5,97	21,11
ECOP [kWhth/kWhel]	3,44	3,08	3,12	3,26

*:inclusi anche i periodi di spegnimento; fase serale non completata per allarme su PdC

7.2.4.2Test 16: pozzo 4 (85m), Qs: 0,875 m3/h.

Il test sul pozzo 4 è più performante del test sull'utenza in zona D (Tabella 17 vs Tabella 5) per la maggior aderenza della potenza erogata al carico richiesto, che riduce i transitori, soprattutto al mattino (Figura 32).

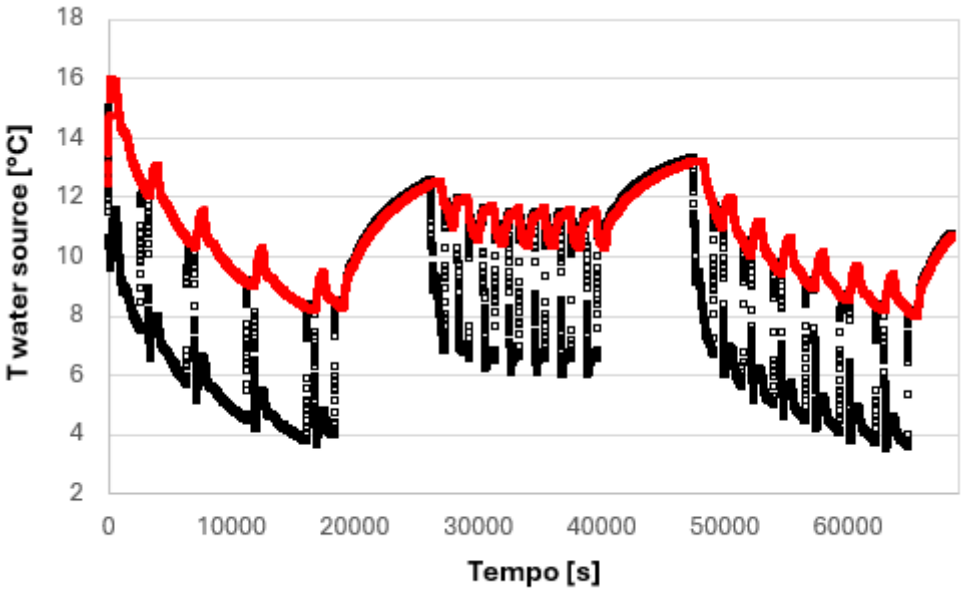

Figura 32: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 0.875 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

Tabella 17: Test utente zona E su pozzo 4: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,875 m3/h

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	35,88	14,02	23,47	73,38
Energia elettrica assorbita [kWhel]	9,96	4,39	6,91	21,26
ECOP [kWhth/kWhel]	3,60	3,19	3,40	3,45

*:inclusi anche i periodi di spegnimento; ultima ora di simulazione non eseguita

7.2.4.3Test 17: pozzi 2 e 3 (totale lunghezza 85m), Qs: 0,88 m3/h.

Test eseguito solo per le prime 4 ore, con ECOP simile al test precedente (Tabella 18).

Tabella 18: Test utente zona E su pozzi 2 e 3: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 0,88 m3/h.

Periodo di accensione	Mattino*
Energia termica prodotta [kWhth]	29,28
Energia elettrica assorbita [kWhel]	8,1
ECOP [kWhth/kWhel]	3,62

*: solo quattro ore di simulazione

7.2.4.4Test 18: pozzi 2 e 3 (totale lunghezza 85m), Qs: 1,33 m3/h.

Test eseguito con temperatura iniziale della sorgente di 6,5 °C e portata aumentata. La Figura 33 quantifica la diversa capacità dei due pozzi di cedere calore all'acqua. La Tabella 19 riassume i riscontri prestazionali, poco inferiori rispetto al test 16 (stessa lunghezza), nonostante la forte penalizzazione iniziale di temperatura.

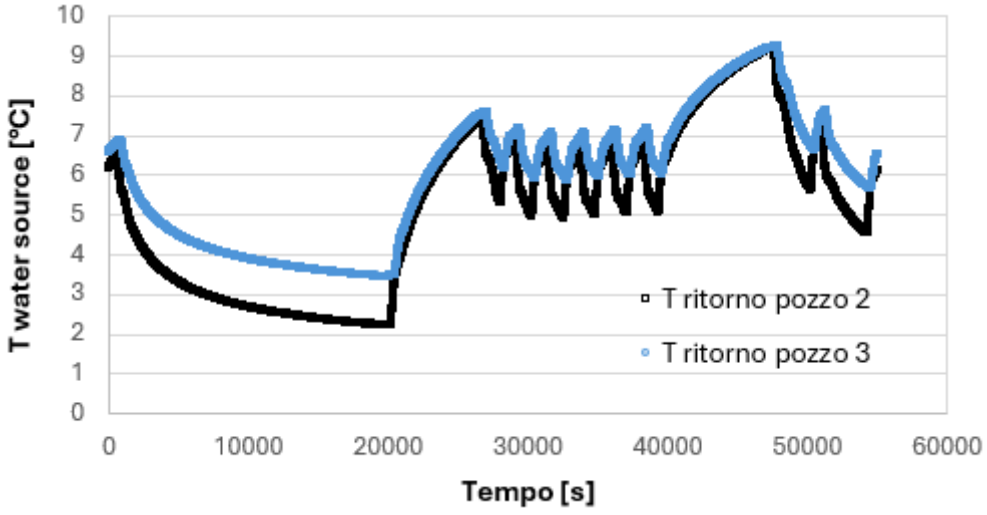

Figura 33: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 30-35 °C, Qs: 1,33 m^3/h, $T_{ritorno}$ a pozzo 3 (blu) e pozzo 2 (nero) [°C]

Tabella 19: Test utente zona E su pozzi 2 e 3: T_{user}: 30-35 °C, $T_{set\ PdC}$: 45 °C, Qs: 1,33 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	33,25	16,66	11,67	61,58
Energia elettrica assorbita [kWhel]	9,80	5,25	3,68	18,73
ECOP [kWhth/kWhel]	3,39	3,18	3,17	3,29

*:inclusi anche i periodi di spegnimento; ultima ora di simulazione non eseguita

7.2.5 Test utente zona climatica E con T_{user} 40-45 °C

7.2.5.1 Test 19: pozzo 3 (50m), Qs iniziale: 0,83 m3/h.

Il test non è stato concluso perché, per la forte riduzione di $T_{sorgente}$ (Figura 34), la potenza erogata è rimasta sempre inferiore alla richiesta (Figura 35). La Tabella 20 mostra i riscontri prestazionali.

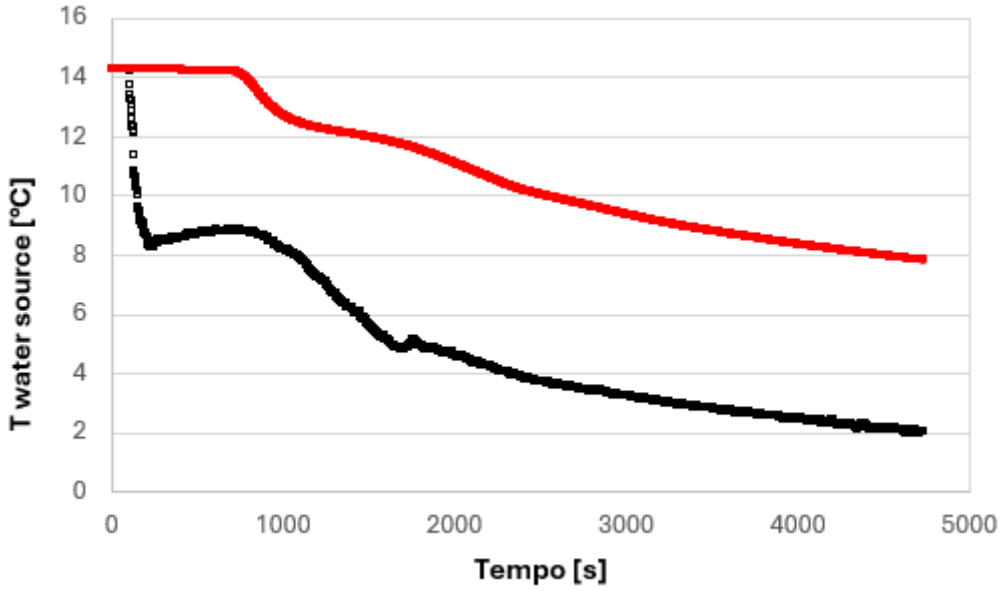

Figura 34: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

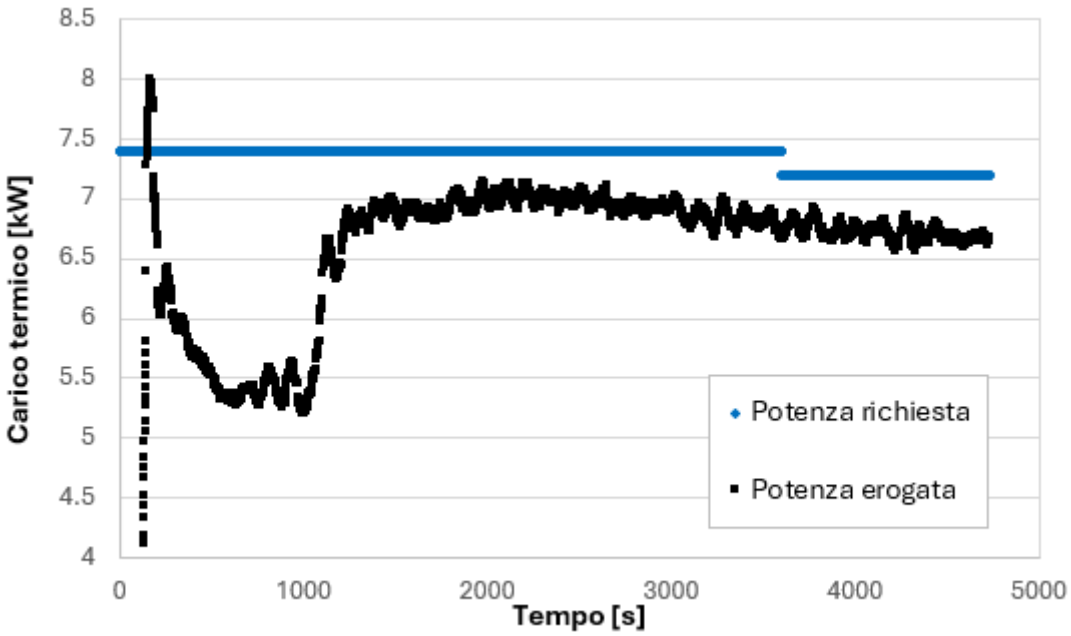

Figura 35: Test pozzo 3, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m^3/h, $P_{richiesta}$ vs $P_{erogata}$, [kWth]

Tabella 20: Test utente zona E su pozzo 3: T_{user}: 40-45 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,83 m3/h.

Periodo di accensione	Mattino*
Energia termica prodotta [kWhth]	8,43
Energia elettrica assorbita [kWhel]	2,91
ECOP [kWhth/kWhel]	2,90

*:durata test:7200 secondi

7.2.5.2 Test 20: pozzo 4 (85m), Qs iniziale: 0,83 m3/h.

La riduzione di temperatura della sorgente è stata prossima a 8 °C al mattino, poi limitata a 4 °C circa nella fascia serale (Figura 36). La riduzione di COP al mattino rimane comunque entro i due decimi (Figura 37). La

Tabella 21 mostra i riscontri prestazionali.

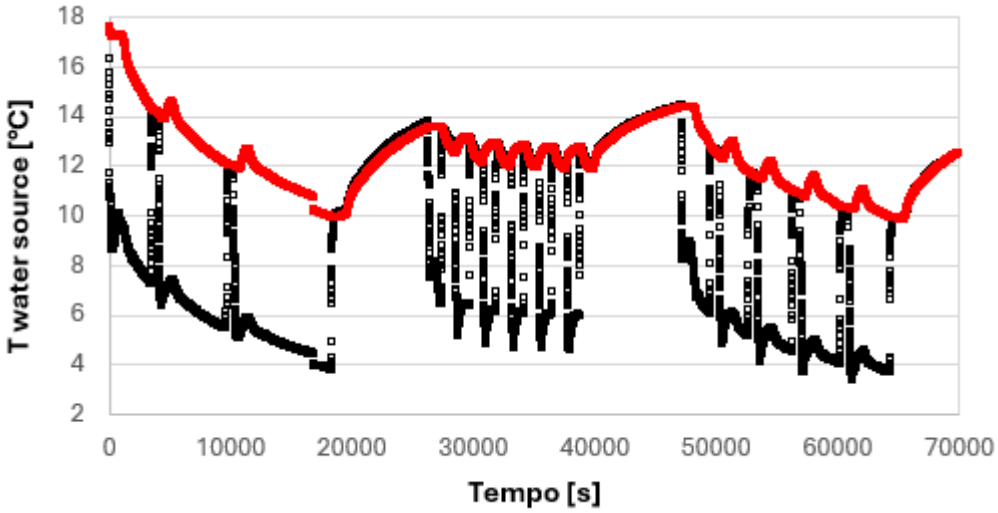

Figura 36: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m³/h, $T_{sorgente}$, verso (rosso) e da PdC (nero) [°C]

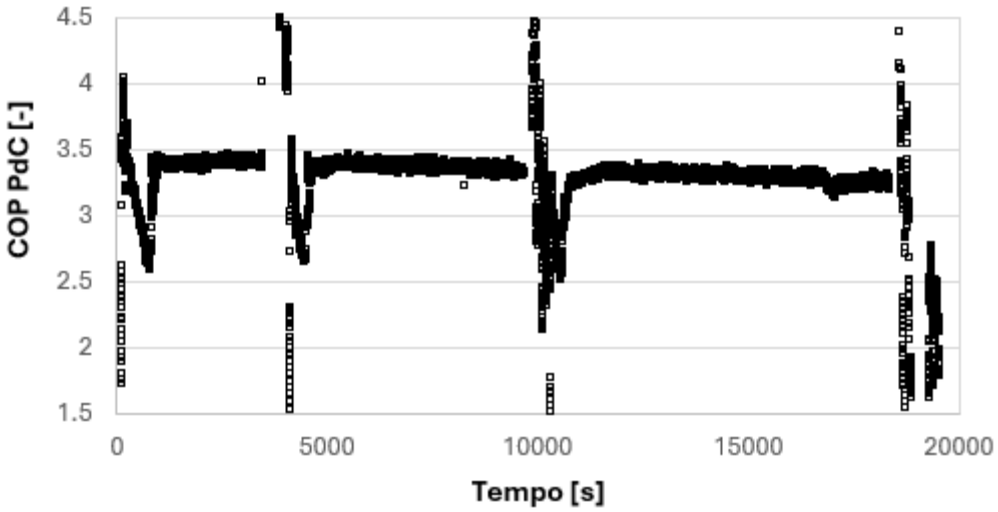

Figura 37: Test pozzo 4, zona E, $T_{user\ set}$ 40-45 °C, Qs: 0.83 m³/h, COP fascia oraria del mattino [-]

Tabella 21: Test zona E, pozzo 4: T_{user}: 40-45 °C, $T_{set\ PdC}$: 55 °C, Qs: 0,83 m3/h.

Periodo di accensione	mattino	Ore centrali	Sera	Totale*
Energia termica prodotta [kWhth]	36,30	14,17	29,48	79,55
Energia elettrica assorbita [kWhel]	10,95	4,65	9,43	25,04
ECOP [kWhth/kWhel]	3,31	3,04	3,13	3,19

*:inclusi anche i periodi di spegnimento

7.3 Test dinamici della Pompa di calore aria-sole

7.3.1 Carichi elettrici sperimentabili

L'impianto SolairHP è stato messo in opera per l'esecuzione di test di simulazione elettrici e termici. Durante il collaudo si è riscontrata l'impossibilità di simulare carichi elettrici inferiori a 100W e superiori a 1700W (veda il Report RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA4.4_030), per l'insorgere di disturbi sui controllori. I dati di richiesta elettrica previsti (Tabella 22) sono stati quindi rimodulati (Tabella 23), a parità di energia elettrica richiesta e senza variazioni sostanziali di prelievo nelle fasi del giorno in cui c'è produzione elettrica.

Tabella 22: Carichi elettrici previsti per utenze da 1500, 2500 e 4000 kWh annui.

Fascia oraria	da	a	UTENZA1	UTENZA2	UTENZA3
1	0.00	0.15	**85.64**	142.73	228.37
2	0.15	0.30	**81.56**	135.93	217.49
3	0.30	0.45	**63.21**	105.35	168.56
4	0.45	1.00	**77.48**	129.14	206.62
5	1.00	1.15	**53.01**	**88.36**	141.37
6	1.15	1.30	**40.78**	**67.97**	108.75
7	1.30	1.45	**26.51**	**44.18**	**70.69**
8	1.45	2.00	**36.70**	**61.17**	**97.87**
9	2.00	2.15	**42.82**	**71.36**	114.18
10	2.15	2.30	**38.74**	**64.57**	103.31
11	2.30	2.45	**28.55**	**47.58**	**76.12**
12	2.45	3.00	**30.58**	**50.97**	**81.56**
13	3.00	3.15	**71.36**	118.94	190.31
14	3.15	3.30	**77.48**	129.14	206.62
15	3.30	3.45	**69.33**	115.54	184.87
16	3.45	4.00	**59.13**	**98.55**	157.68
17	4.00	4.15	**65.25**	108.75	173.99
18	4.15	4.30	**38.74**	**64.57**	103.31
19	4.30	4.45	**38.74**	**64.57**	103.31
20	4.45	5.00	**22.43**	**37.38**	**59.81**

21	5.00	5.15	**36.70**	**61.17**	**97.87**
22	5.15	5.30	**38.74**	**64.57**	103.31
23	5.30	5.45	**36.70**	**61.17**	**97.87**
24	5.45	6.00	**26.51**	**44.18**	**70.69**
25	6.00	6.15	**32.62**	**54.37**	**87.00**
26	6.15	6.30	**75.44**	125.74	201.18
27	6.30	6.45	189.63	316.04	505.67
28	6.45	7.00	**77.48**	129.14	206.62
29	7.00	7.15	228.37	380.61	608.98
30	7.15	7.30	101.95	169.92	271.87
31	7.30	7.45	**40.78**	**67.97**	108.75
32	7.45	8.00	**26.51**	**44.18**	**70.69**
33	8.00	8.15	**81.56**	135.93	217.49
34	8.15	8.30	**42.82**	**71.36**	114.18
35	8.30	8.45	**38.74**	**64.57**	103.31
36	8.45	9.00	**26.51**	**44.18**	**70.69**
37	9.00	9.15	**28.55**	**47.58**	**76.12**
38	9.15	9.30	**42.82**	**71.36**	114.18
39	9.30	9.45	**69.33**	115.54	184.87
40	9.45	10.00	**55.05**	**91.75**	146.81
41	10.00	10.15	**61.17**	101.95	163.12
42	10.15	10.30	**67.29**	112.14	179.43
43	10.30	10.45	**48.94**	**81.56**	130.50
44	10.45	11.00	**99.91**	166.52	266.43
45	11.00	11.15	**67.29**	112.14	179.43
46	11.15	11.30	601.50	1002.50	1604.01
47	11.30	11.45	**71.36**	118.94	190.31
48	11.45	12.00	**77.48**	129.14	206.62
49	12.00	12.15	**73.40**	122.34	195.74
50	12.15	12.30	**73.40**	122.34	195.74
51	12.30	12.45	152.92	254.87	407.80
52	12.45	13.00	106.03	176.71	282.74
53	13.00	13.15	338.47	564.12	902.59
54	13.15	13.30	369.06	615.10	984.15
55	13.30	13.45	385.37	642.28	1027.65
56	13.45	14.00	301.77	502.95	804.72

57	14.00	14.15	297.69	496.15	793.85
58	14.15	14.30	827.83	1379.72	**2207.55**
59	14.30	14.45	144.77	241.28	386.05
60	14.45	15.00	120.30	200.50	320.80
61	15.00	15.15	734.04	1223.40	**1957.43**
62	15.15	15.30	373.14	621.89	995.03
63	15.30	15.45	124.38	207.30	331.68
64	15.45	16.00	120.30	200.50	320.80
65	16.00	16.15	**99.91**	166.52	266.43
66	16.15	16.30	114.18	190.31	304.49
67	16.30	16.45	116.22	193.70	309.93
68	16.45	17.00	**97.87**	163.12	260.99
69	17.00	17.15	**85.64**	142.73	228.37
70	17.15	17.30	101.95	169.92	271.87
71	17.30	17.45	181.47	302.45	483.92
72	17.45	18.00	181.47	302.45	483.92
73	18.00	18.15	173.31	288.86	462.17
74	18.15	18.30	179.43	299.05	478.48
75	18.30	18.45	163.12	271.87	434.99
76	18.45	19.00	685.10	1141.84	**1826.94**
77	19.00	19.15	1127.56	**1879.27**	**3006.83**
78	19.15	19.30	835.99	1393.31	**2229.30**
79	19.30	19.45	444.50	740.83	1185.33
80	19.45	20.00	126.42	210.70	337.11
81	20.00	20.15	148.85	248.08	396.92
82	20.15	20.30	613.74	1022.89	1636.63
83	20.30	20.45	165.16	275.26	440.42
84	20.45	21.00	224.29	373.82	598.10
85	21.00	21.15	1105.13	**1841.89**	**2947.02**
86	21.15	21.30	169.24	282.06	451.30
87	21.30	21.45	185.55	309.25	494.80
88	21.45	22.00	191.67	319.44	511.11
89	22.00	22.15	169.24	282.06	451.30
90	22.15	22.30	152.92	254.87	407.80
91	22.30	22.45	150.89	251.48	402.36
92	22.45	23.00	110.11	183.51	293.61

93	23.00	23.15	103.99	173.31	277.30
94	23.15	23.30	112.14	186.91	299.05
95	23.30	23.45	**79.52**	132.53	212.06
96	23.45	0.00	**59.13**	**98.55**	157.68

*In rosso le fasce non simulabili

Tabella 23: Carichi elettrici simulabili per utenze da 1500, 2500 e 4000 kWh annui.

Fascia oraria	da	a	UTENZA1	UTENZA2	UTENZA3
1	0.00	0.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
2	0.15	0.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
3	0.30	0.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
4	0.45	1.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
5	1.00	1.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
6	1.15	1.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
7	1.30	1.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
8	1.45	2.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
9	2.00	2.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
10	2.15	2.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
11	2.30	2.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
12	2.45	3.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
13	3.00	3.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
14	3.15	3.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
15	3.30	3.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
16	3.45	4.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
17	4.00	4.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
18	4.15	4.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
19	4.30	4.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
20	4.45	5.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
21	5.00	5.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
22	5.15	5.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
23	5.30	5.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
24	5.45	6.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
25	6.00	6.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
26	6.15	6.30	108.07	125.74	201.18
27	6.30	6.45	267.11	316.04	505.67
28	6.45	7.00	**0.00**	129.14	206.62
29	7.00	7.15	228.37	380.61	608.98

30	7.15	7.30	142.73	169.92	271.87
31	7.30	7.45	**0.00**	112.15	179.43
32	7.45	8.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**
33	8.00	8.15	108.07	135.93	217.49
34	8.15	8.30	108.07	**0.00**	114.18
35	8.30	8.45	**0.00**	135.93	103.31
36	8.45	9.00	**0.00**	163.12	146.81
37	9.00	9.15	140.69	**0.00**	**0.00**
38	9.15	9.30	**0.00**	**0.00**	114.18
39	9.30	9.45	**0.00**	115.54	184.87
40	9.45	10.00	116.22	**0.00**	146.81
41	10.00	10.15	**0.00**	**193.70**	163.12
42	10.15	10.30	116.22	**193.70**	179.43
43	10.30	10.45	**0.00**	**0.00**	130.50
44	10.45	11.00	167.20	166.52	266.43
45	11.00	11.15	**0.00**	112.14	179.43
46	11.15	11.30	601.50	1002.50	1604.01
47	11.30	11.45	148.85	118.94	190.31
48	11.45	12.00	**0.00**	129.14	206.62
49	12.00	12.15	146.81	122.34	195.74
50	12.15	12.30	**0.00**	122.34	195.74
51	12.30	12.45	152.92	254.87	407.80
52	12.45	13.00	106.03	176.71	282.74
53	13.00	13.15	338.47	564.12	902.59
54	13.15	13.30	369.06	615.10	984.15
55	13.30	13.45	385.37	642.28	1027.65
56	13.45	14.00	301.77	502.95	804.72
57	14.00	14.15	297.69	496.15	793.85
58	14.15	14.30	827.83	1379.72	**1700.00**
59	14.30	14.45	144.77	241.28	386.05
60	14.45	15.00	120.30	200.50	320.80
61	15.00	15.15	734.04	1223.40	**1700.00**
62	15.15	15.30	373.14	621.89	995.03
63	15.30	15.45	124.38	207.30	331.68
64	15.45	16.00	220.21	200.50	320.80

65	16.00	16.15	**0.00**	166.52	266.43
66	16.15	16.30	114.18	190.31	304.49
67	16.30	16.45	116.22	193.70	309.93
68	16.45	17.00	183.51	163.12	260.99
69	17.00	17.15	**0.00**	142.73	228.37
70	17.15	17.30	101.95	169.92	271.87
71	17.30	17.45	181.47	302.45	483.92
72	17.45	18.00	181.47	302.45	483.92
73	18.00	18.15	173.31	288.86	462.17
74	18.15	18.30	179.43	299.05	478.48
75	18.30	18.45	163.12	271.87	561.92
76	18.45	19.00	685.10	1141.84	**1700.00**
77	19.00	19.15	466.42	777.37	1243.79
78	19.15	19.30	466.42	777.37	1243.79
79	19.30	19.45	466.42	777.37	1243.79
80	19.45	20.00	466.42	777.37	1243.79
81	20.00	20.15	466.42	777.37	1243.79
82	20.15	20.30	466.42	777.37	1243.79
83	20.30	20.45	466.42	777.37	1243.79
84	20.45	21.00	466.42	777.37	1243.79
85	21.00	21.15	466.42	777.37	1243.79
86	21.15	21.30	466.42	777.37	1243.79
87	21.30	21.45	466.42	777.37	1243.79
88	21.45	22.00	466.42	777.37	1243.79
89	22.00	22.15	466.42	777.37	1243.79
90	22.15	22.30	466.42	777.37	1243.79
91	22.30	22.45	466.42	777.37	1243.79
92	22.45	23.00	466.42	777.37	1243.79
93	23.00	23.15	**0.00**	**0.00**	**0.00**
94	23.15	23.30	**0.00**	**0.00**	**0.00**
95	23.30	23.45	**0.00**	**0.00**	**0.00**
96	23.45	0.00	**0.00**	**0.00**	**0.00**

7.3.2 Analisi dei test dinamici

Sono stati condotti numerosi test di simulazione termica ed elettrica simultanei, modificando, sulla PdC, i parametri: CISA (inverter compressore), HR (Heat recovery, che determina la pressione di lavoro superiore), e surriscaldamento. Alcuni test sono stati effettuati in modalità dinamica per simulare le richieste di riscaldamento di utenze della zona climatica D, mentre altri test sono stati eseguiti in modalità ACS. La Figura 38 indica alcune caratteristiche dei test dinamici descritti di seguito, che differiscono anche per il diverso valore di irraggiamento medio G.

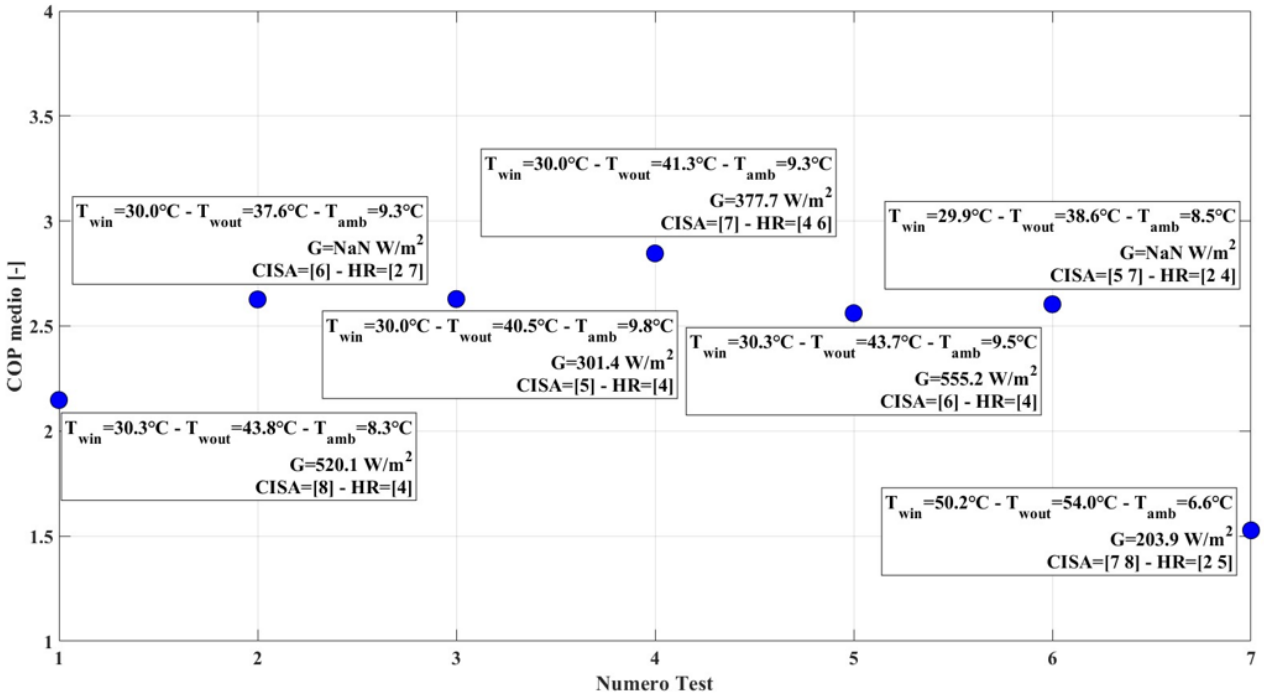

Figura 38: Caratteristiche dei test dinamici presi in considerazione

7.3.2.1 Test 1: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G medio= 520,1 W/m²

La prestazione energetica cumulata di questo test (ECOP, Figura 39, che in ascissa riporta la durata, in ore, del test) si mantiene più o meno costante nell'arco della giornata, senza i picchi che attesi al crescere dell'irraggiamento. Il COP calcolato per fasce orarie (Figura 40), ha infatti valori più elevati negli orari della giornata con irraggiamento maggiore. Peraltro, in questo test, l'irraggiamento al mattino è stato praticamente nullo. Le lunghe fasi di OFF, nelle ore calde (Figura 41, COP istantanei) tendono a controbilanciare gli aumenti del COP, che arriva a valori di 4,5. I COP nelle fasce orarie mattutina e serale sono molto bassi, a dimostrazione che, senza irraggiamento, la capacità di scambio termico tra pannelli e aria è molto limitata. La Tabella 24 riepiloga i riscontri prestazionali, inclusa l'energia elettrica prodotta e l'$ECOP_{el+th}$, calcolato come rapporto tra l'energia termica erogata e la differenza tra l'energia elettrica richiesta dalla PdC e quella prodotta dai pannelli PV.

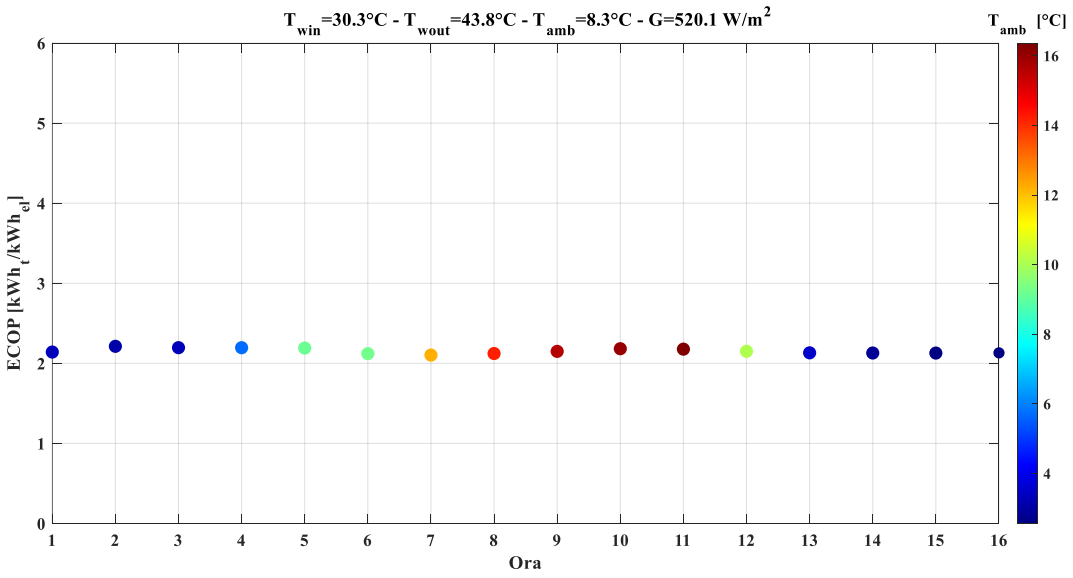

Figura 39: Test 1: ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

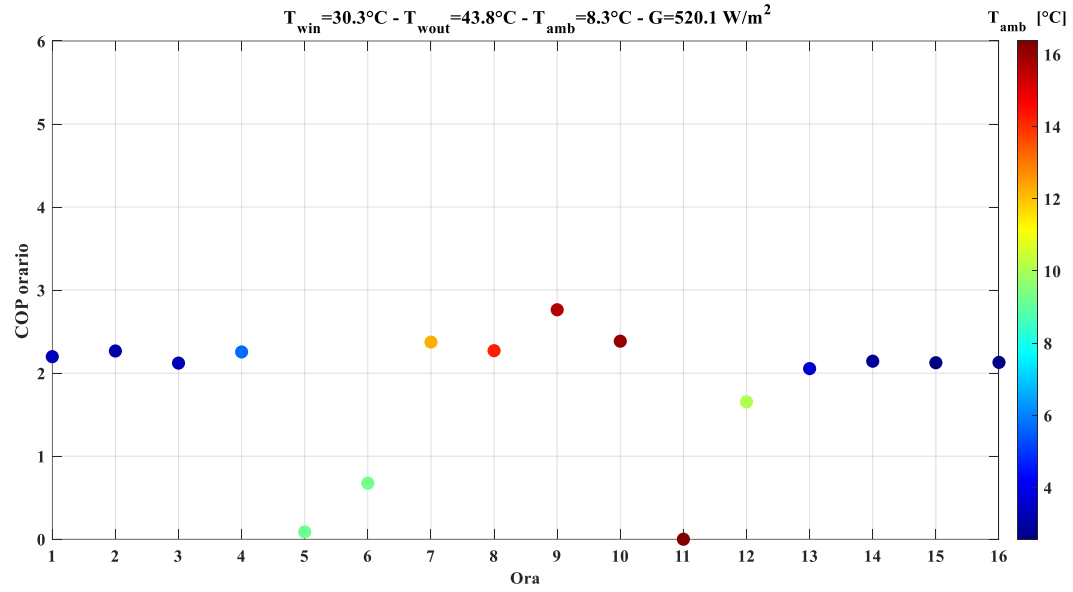

Figura 40: Test 1: COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

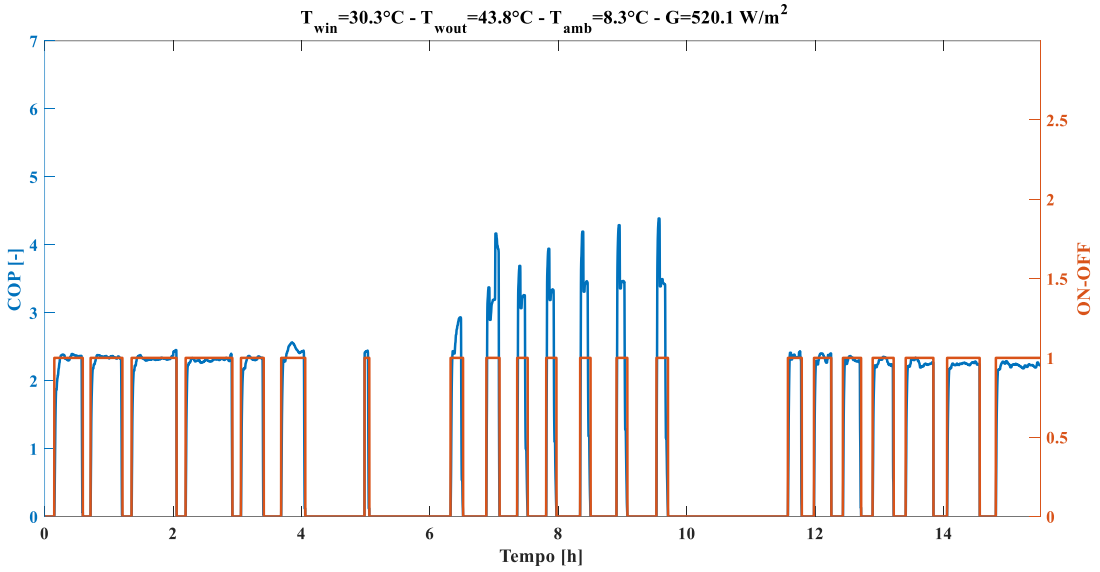

Figura 41: Test 1: Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

Tabella 24: Riepilogo prestazioni Test dinamico 1, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G= 520,1 W/m2

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	22,36	9,27	16,81	48,44
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	10,10	4,33	8,31	22,74
$ECOP_{th}$	2,21	2,14	2,02	2,13
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	0,55	4,86	1,73	7,14
$ECOP_{el+th}$				3,10

7.3.2.2 Test 2: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G stimato: 292,6 W/m^2

Per questo test, il valore di irraggiamento medio non è stato registrato per un inconveniente tecnico, ma può essere stimato in 292,6 W/m^2 considerando un'efficienza media dei pannelli di 8.25% durante tutta la sperimentazione. Il CISA è stato impostato ad un valore inferiore (6) e l'HR a 2 (a parte una breve fase, dove è stato portato a 7). Il minor valore di CISA ha permesso un funzionamento più stabile, con meno spegnimenti. Di conseguenza, l'ECOP cumulato (Figura 42) e i COP orari (Figura 43) sono stati maggiori. I COP (Figura 44) mostrano l'effetto positivo dell'irraggiamento già nelle ore finali della mattina. La Tabella 25 riepiloga i riscontri prestazionali registrati.

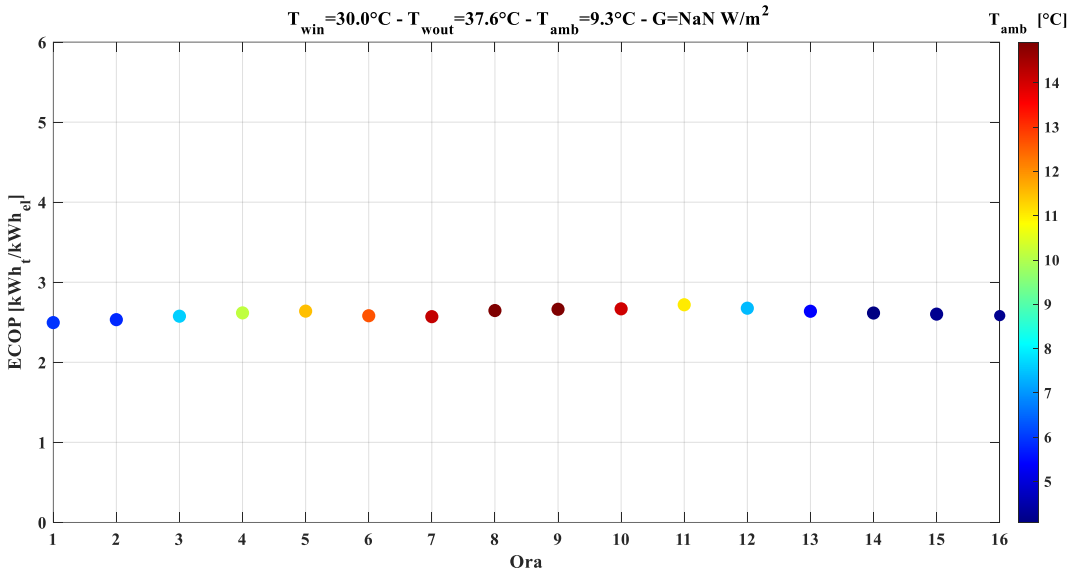

Figura 42: Test 2, ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

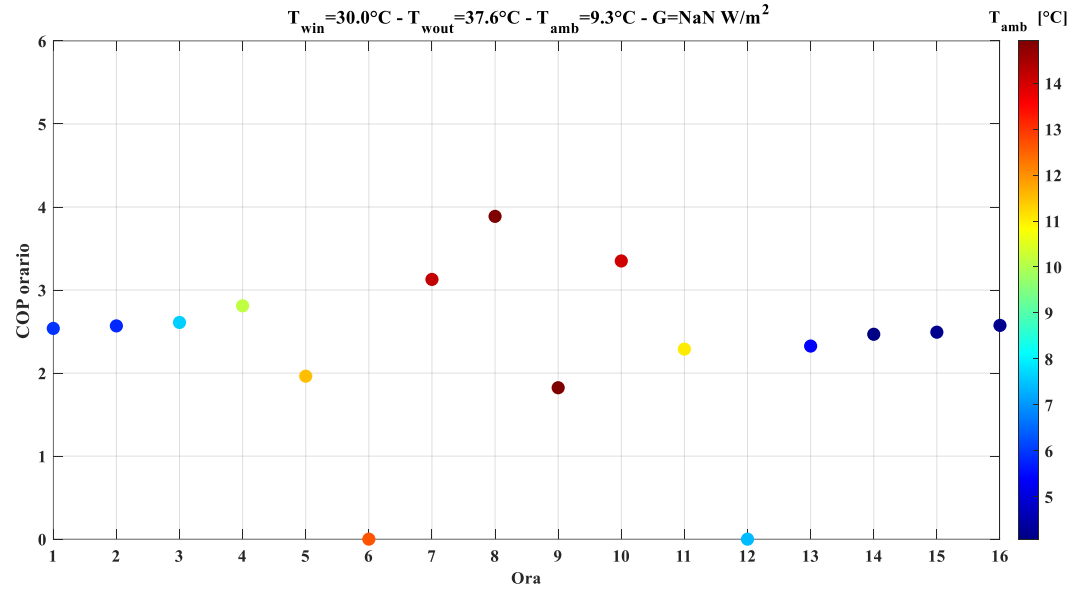

Figura 43: Test 2, COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

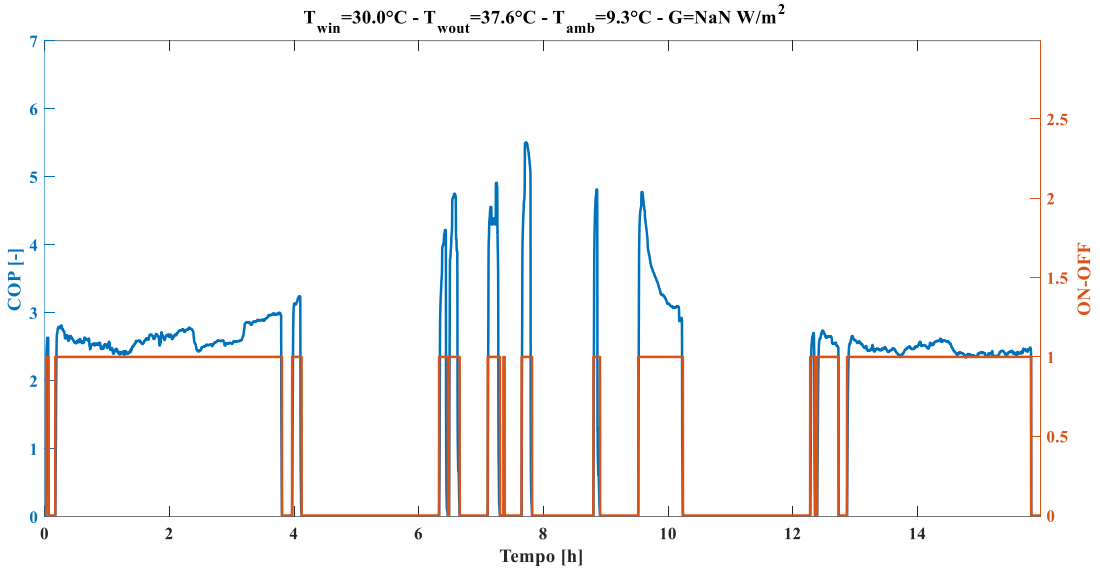

Figura 44: Test 2 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

Tabella 25: Riepilogo prestazioni Test dinamico 2, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G stimato: 292,6 W/m^2

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	22.19	9.33	17.30	48.83
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	8.39	3.19	7.37	18.97
$ECOP_{th}$	2.64	2.92	2.35	2.57
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	1.27	3.92	0.41	5.60
$ECOP_{el+th}$				3,65

7.3.2.3 Test 3: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G = 301,4 W/m^2

Gli andamenti dei principali parametri di questo test, sono riportati da Figura 45 a Figura 47. Si è rilevato un $ECOP_{th}$ superiore grazie alla maggior stabilità di funzionamento, presumibilmente per l'adozione di un valore di CISA più adatto al carico, del quale ha beneficiato anche la produzione elettrica.

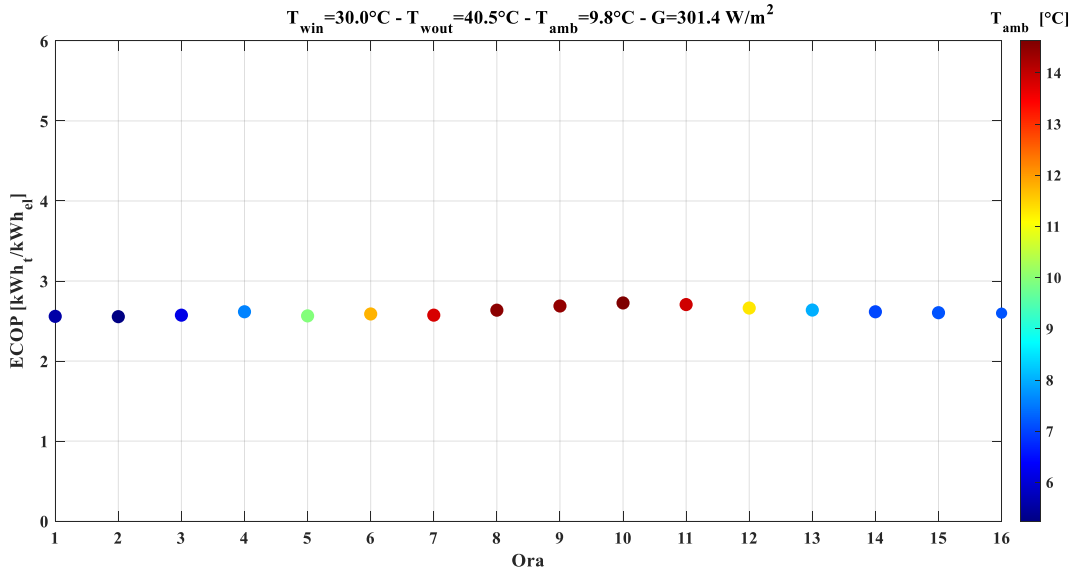

Figura 45: Test 3 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

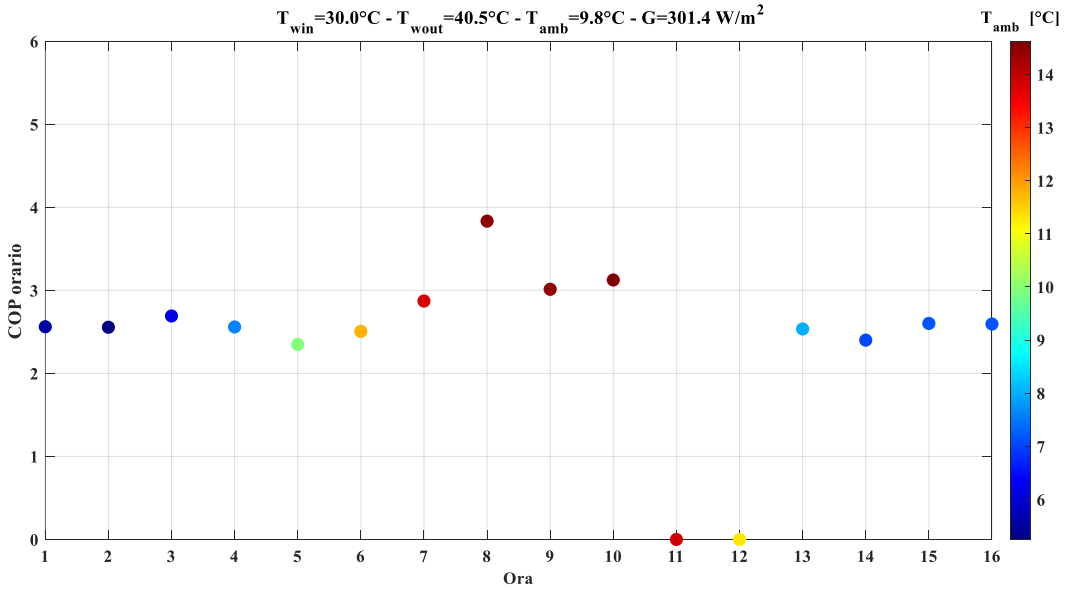

Figura 46: Test 3 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

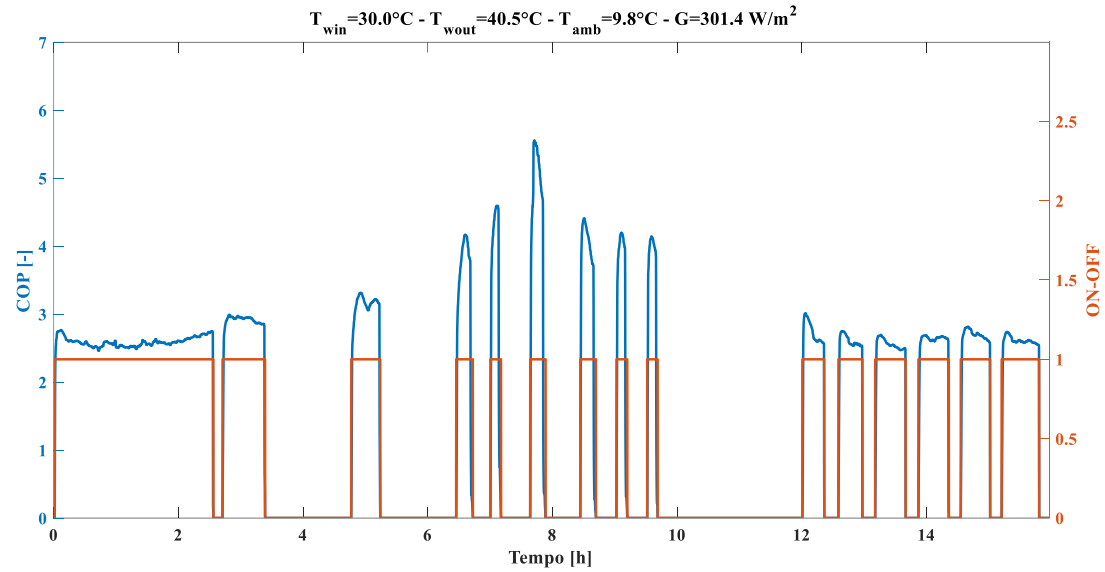

Figura 47: Test 3 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

Tabella 26: Riepilogo prestazioni Test dinamico 3, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G= 301,4 W/m²

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	19.78	12.28	16.70	48.75
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	7.63	4.12	7.05	18.80
$ECOP_{th}$	2.59	2.98	2.34	2.59
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	1.12	4.39	0.54	6.05
$ECOP_{el+th}$				3,82

7.3.2.4 Test 4: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G = 377,7 W/m²

Questo test comprende solo la simulazione delle fasce mattutine e centrali. I trend dei principali parametri prestazionali sono riportati da Figura 48 a Figura 50.

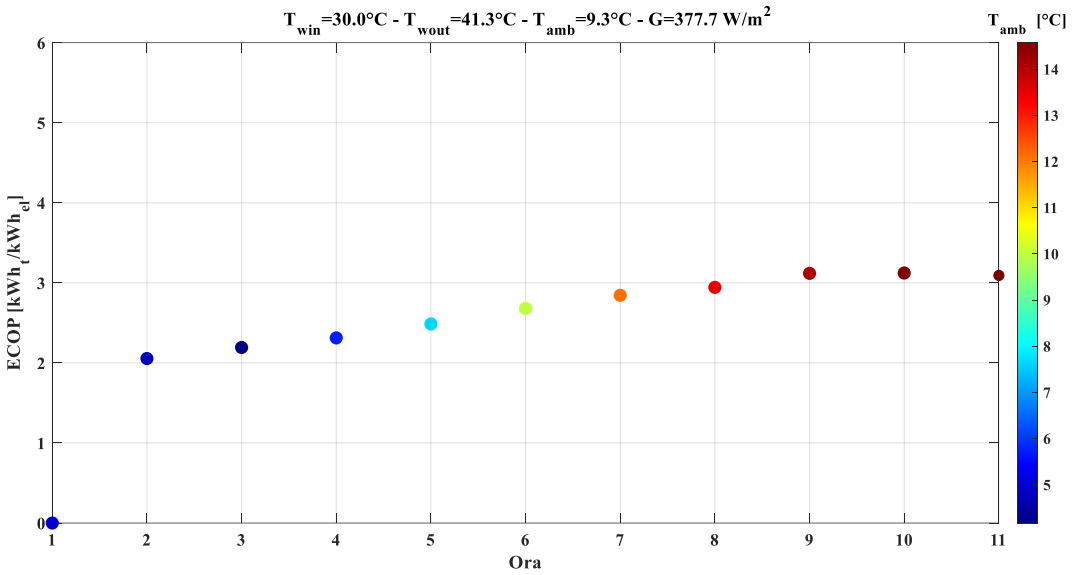

Figura 48: Test 4 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

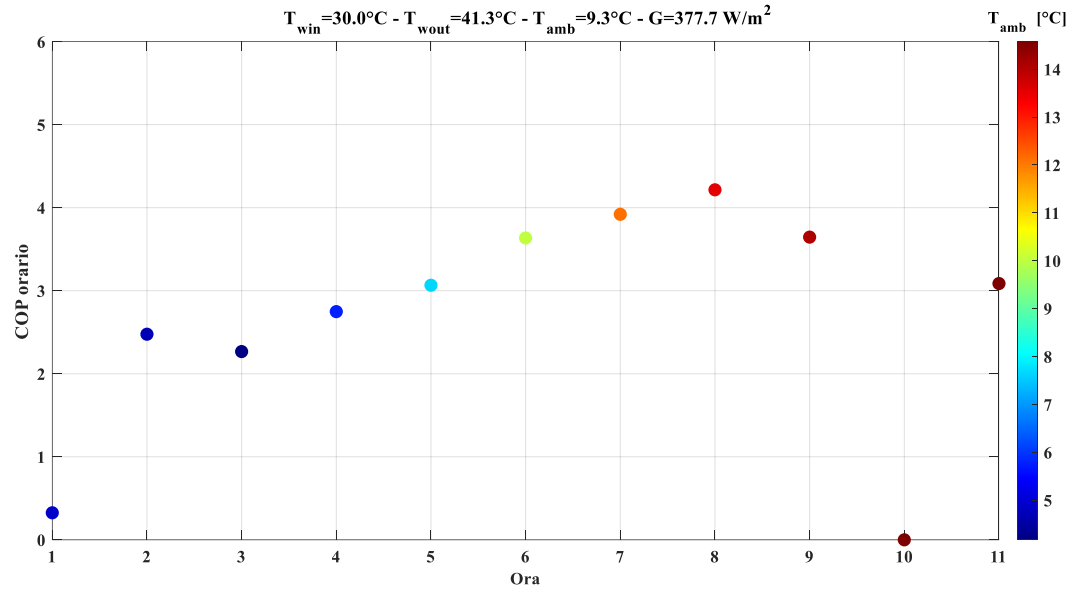

Figura 49: Test 4 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

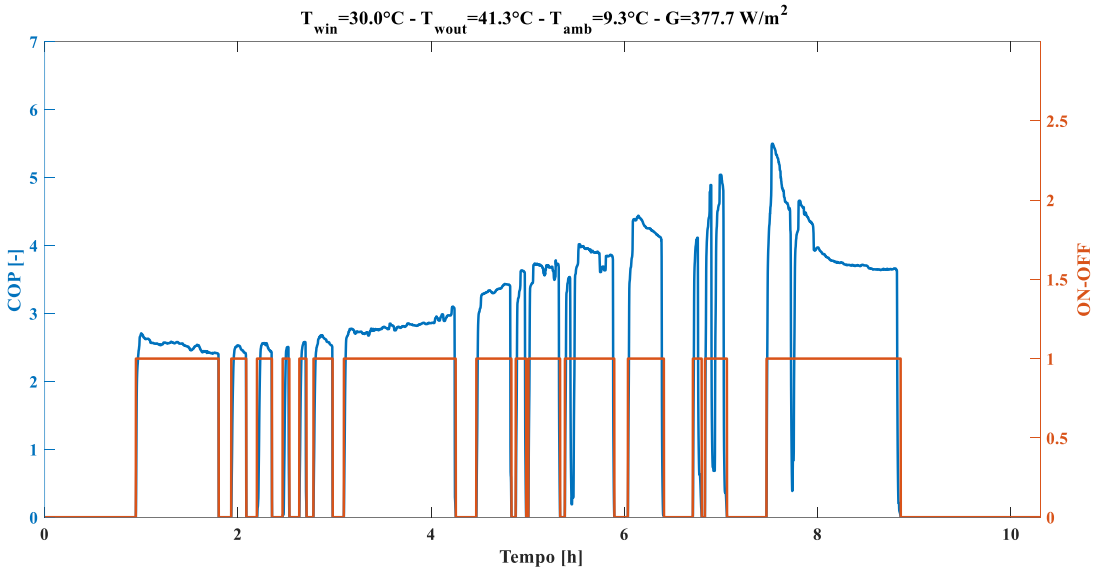

Figura 50: Test 4 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

L' $ECOP_{el+th}$ di 6,06 (Tabella 27) si avvantaggia della mancanza della fascia serale.

Tabella 27: Riepilogo prestazioni Test dinamico 4, $T_{water\ in}$= 30,0 °C, G= 377,7 W/m^2

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	12.35	26.54	0	38.89
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	5.10	7.44	0.055	12.60
$ECOP_{th}$	2.42	3.57	0	3.08
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	0.77	5.26	0.18	6.19
$ECOP_{el+th}$				6,06

7.3.2.5 Test 5: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G stimato= 555,2 W/m^2

La prestazione termica (da Figura 51 a Figura 53 e Tabella 28) è stata di poco inferiore al test 3 perché la PdC, con CISA superiore di un punto, ha avuto numerosi on-off nelle ore centrali, che, hanno penalizzato i COP e non hanno coadiuvato al meglio la produzione elettrica, cresciuta solo per il maggior irraggiamento.

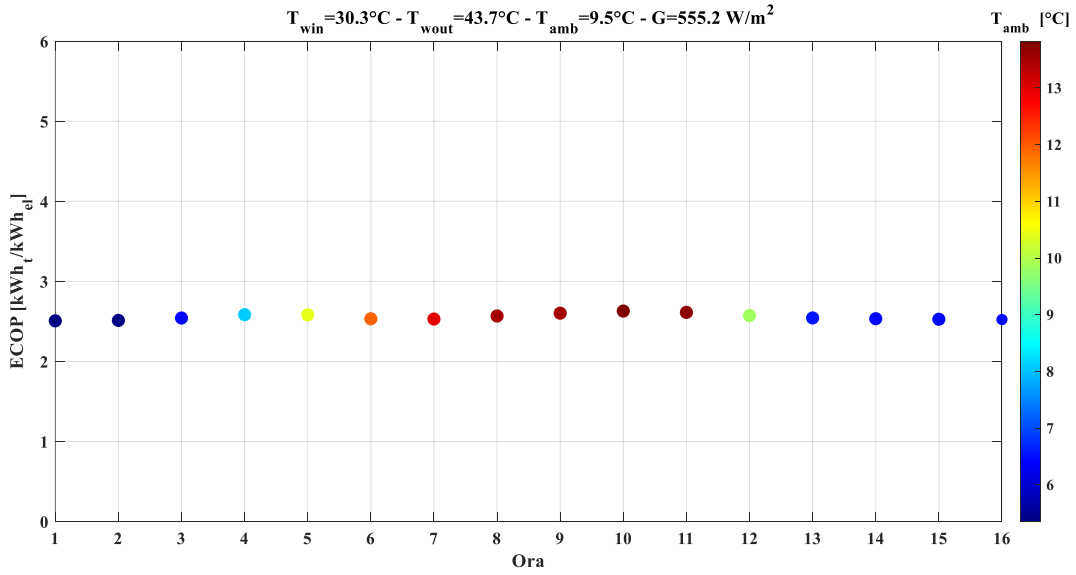

Figura 51: Test 5 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

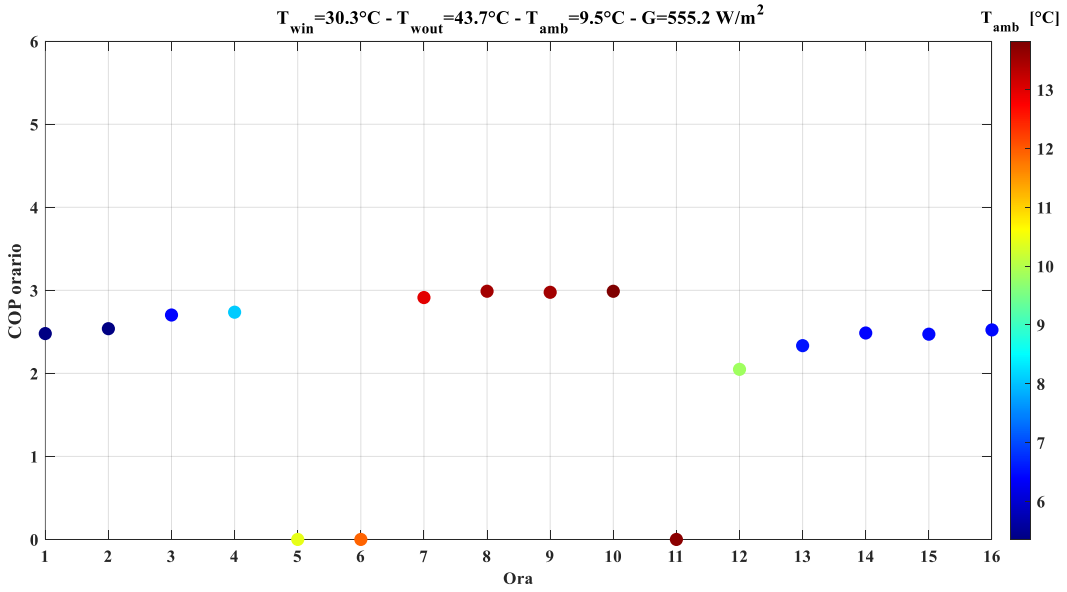

Figura 52: Test 5 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

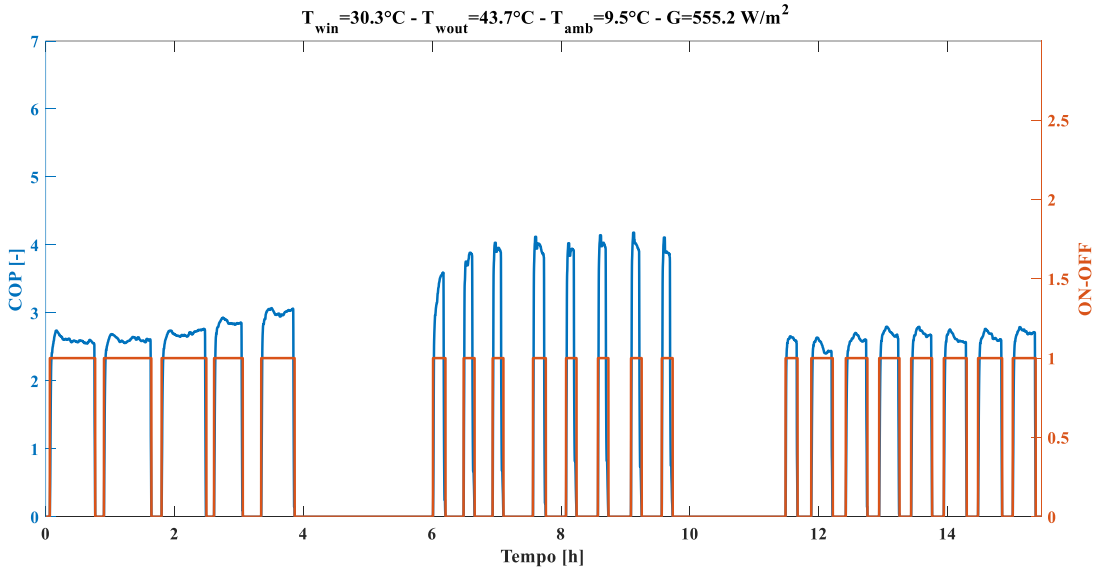

Figura 53: Test 5 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

Tabella 28: Riepilogo prestazioni Test dinamico 5, $T_{water\ in}$= 30,3 °C, G= 555,2 W/m²

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	22,27	9,94	16,61	48,82
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	8,54	3,69	7,12	19,35
$ECOP_{th}$	2,61	2,69	2,33	2,52
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	1,07	4,57	1,09	6,74
$ECOP_{el+th}$				3,87

7.3.2.6 Test 6: Test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 29,9 °C, G stimato= 300,0 W/m²

Le prestazioni (andamenti daFigura 54 Figura 56) sono in linea con quelle dell'analogo test 3.

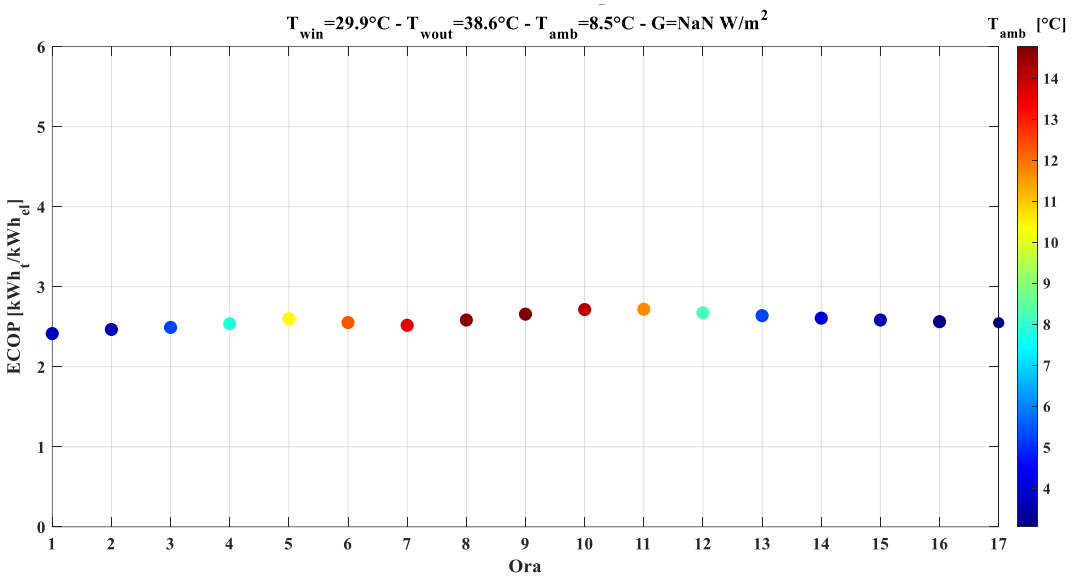

Figura 54: Test 6 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

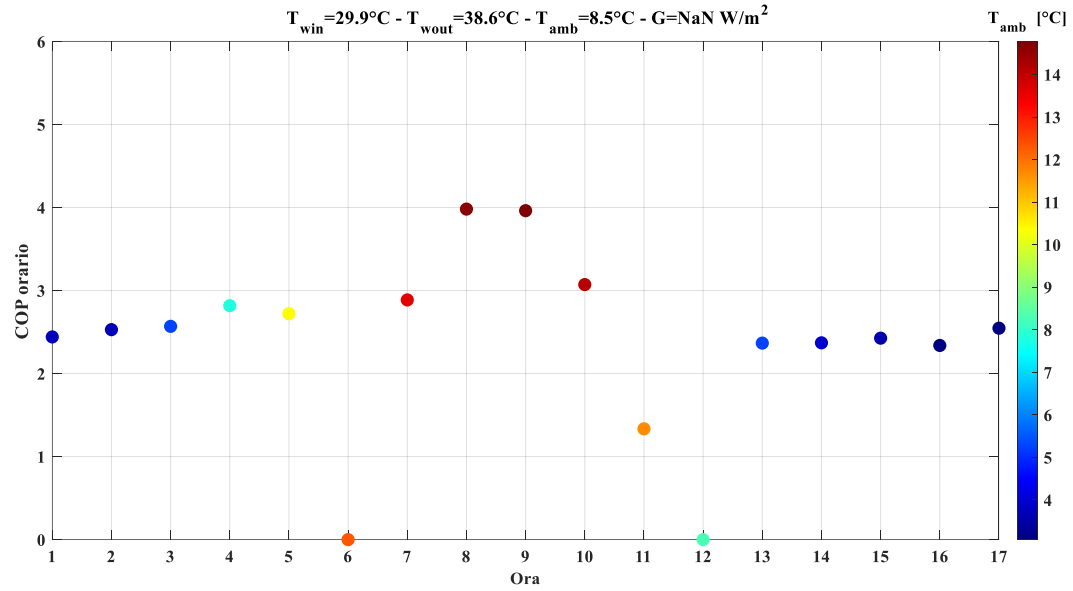

Figura 55: Test 6 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

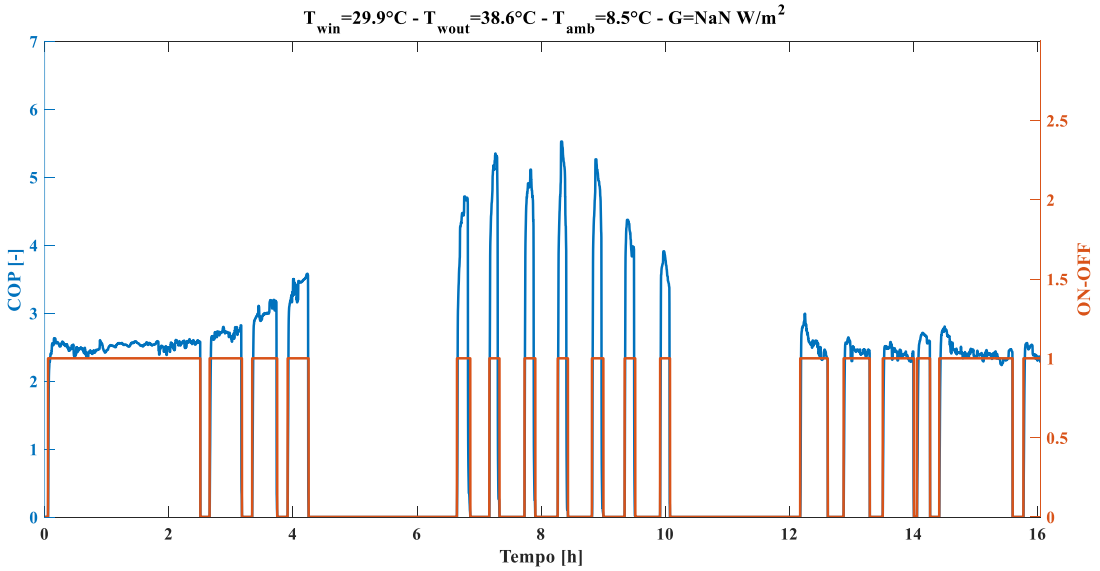

Figura 56: Test 6 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

Tabella 29: Riepilogo prestazioni Test dinamico 6, $T_{water\ in}$= 29,9 °C, G= 300,0 W/m²

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	22,53	10,09	17,23	49,85
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	8,77	3,19	7,62	19,58
$ECOP_{th}$	2,57	3,16	2,26	2,55
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	1,22	4,12	0,42	5,77
$ECOP_{el+th}$				3,61

7.3.2.7 Test 7: test dinamico zona D, $T_{water\ in}$= 50,2 °C, G = 203,9 W/m²

Alle temperature di questa prova la PdC si porta alla massima pressione di lavoro (105 bar), cosicché le prestazioni termiche ne risentono (trend da Figura 57 a Figura 59). Elettricamente, la produzione è stata significativa, anche grazie al boost del rafreddamento determinato dal funzionamento praticamente continuo della PdC (Tabella 30).

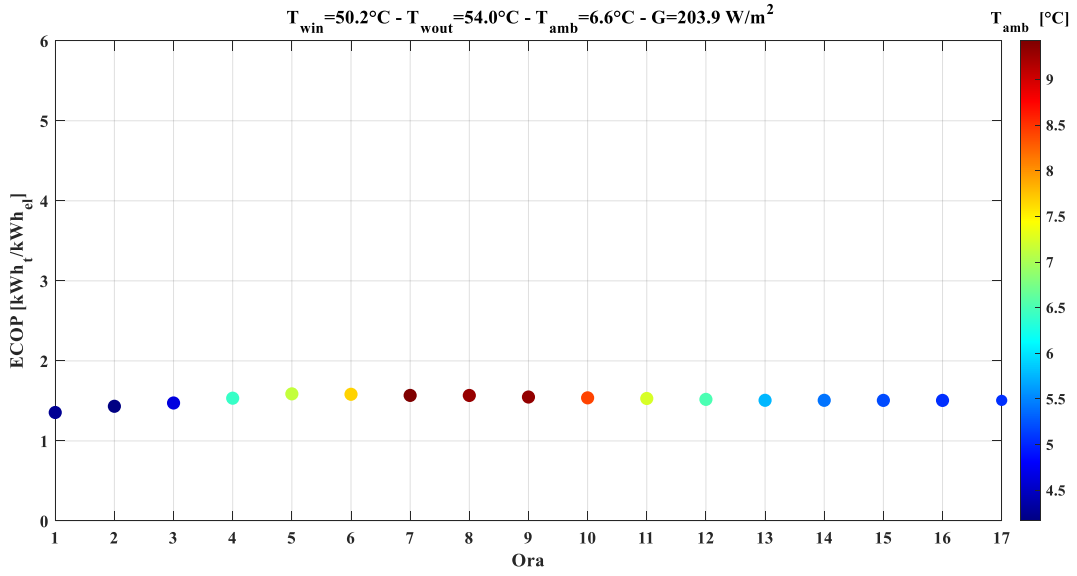

Figura 57: Test 7 -ECOP [kWh_{th}/kWh_{elPdC}]

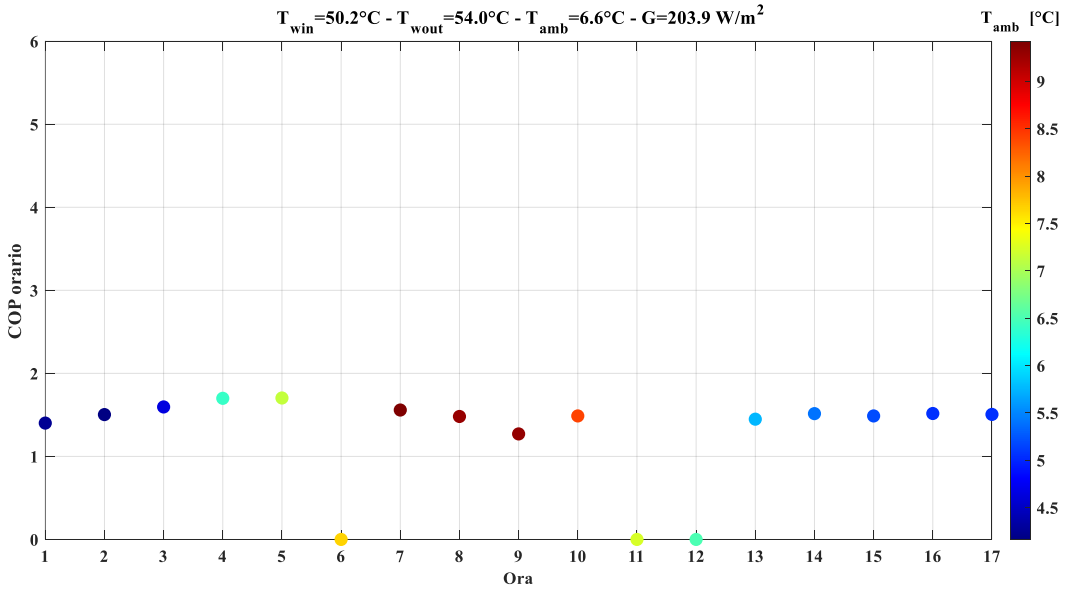

Figura 58: Test 7 - COP orari [kW_{th}/kW_{elPdC}]

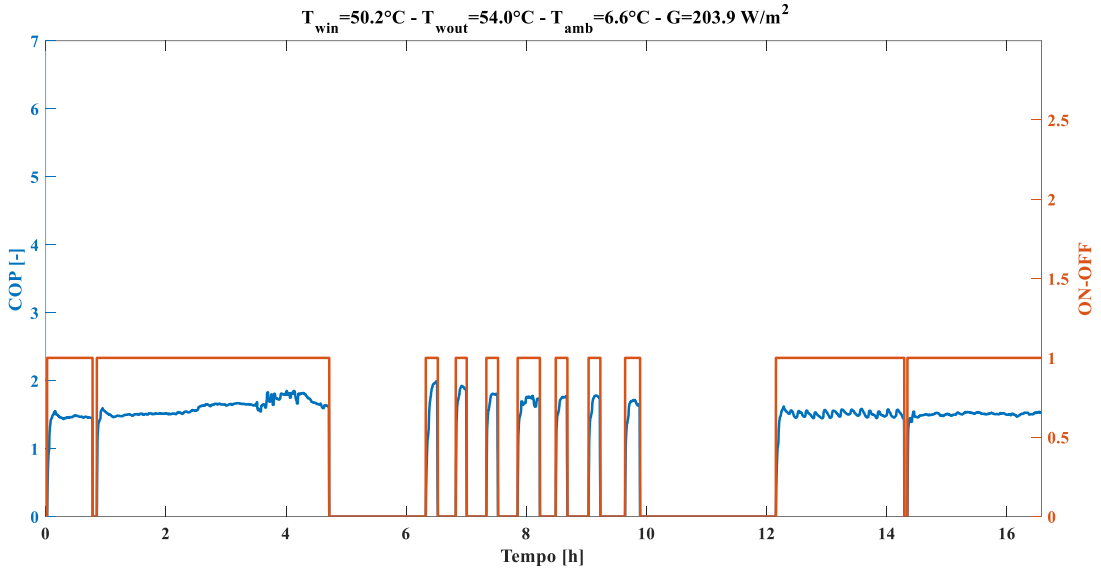

Figura 59: Test 7 - Andamento COP [kW_{th}/kW_{elPdC}] e durata accensioni

Tabella 30: Riepilogo prestazioni Test dinamico 7, $T_{water\ in}$ = 50,2 °C, G= 203,9 W/m²

Periodo di accensione	Mattina	Ore centrali	Sera	Totale
Energia termica prodotta [kWh_{th}]	17.87	14.72	16.88	49.46
Energia elettrica assorbita [kWh_{el}]	11.44	9.77	11.64	32.86
$ECOP_{th}$	1.56	1.51	1.45	1.51
Energia elettrica da PV [kWh_{el}]	1.28	2.72	0.70	4.70
$ECOP_{el+th}$				1,76

7.3.3 Approfondimenti sull'efficienza di produzione elettrica da PV

La Figura 60 mostra la potenza elettrica prodotta dai pannelli PV, quella trasferita all'utente e scambiata con la batteria durante un test di simulazione elettrica, simultaneo ad uno di simulazione termica.

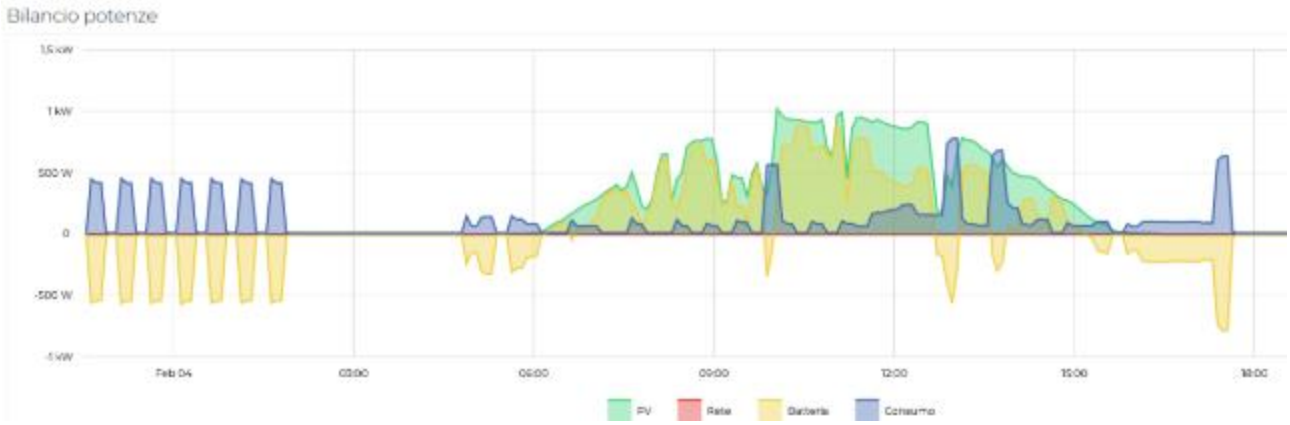

Figura 60: Andamento potenza elettrica prodotta, all'utente e da/alla batteria durante un test di simulazione

Il beneficio del raffreddamento dei pannelli sulla produzione elettrica è mostrato da Figura 61 e Figura 62 (ore centrali dei test 1 e 6): pur con variazione debole dell'irraggiamento, la produzione elettrica cresce significativamente con la PdC in ON. Per quantificare l'effetto del raffreddamento dei pannelli sulla produzione elettrica sono stati eseguiti dei test comparativi con la PdC in on o in off (Figura 63).

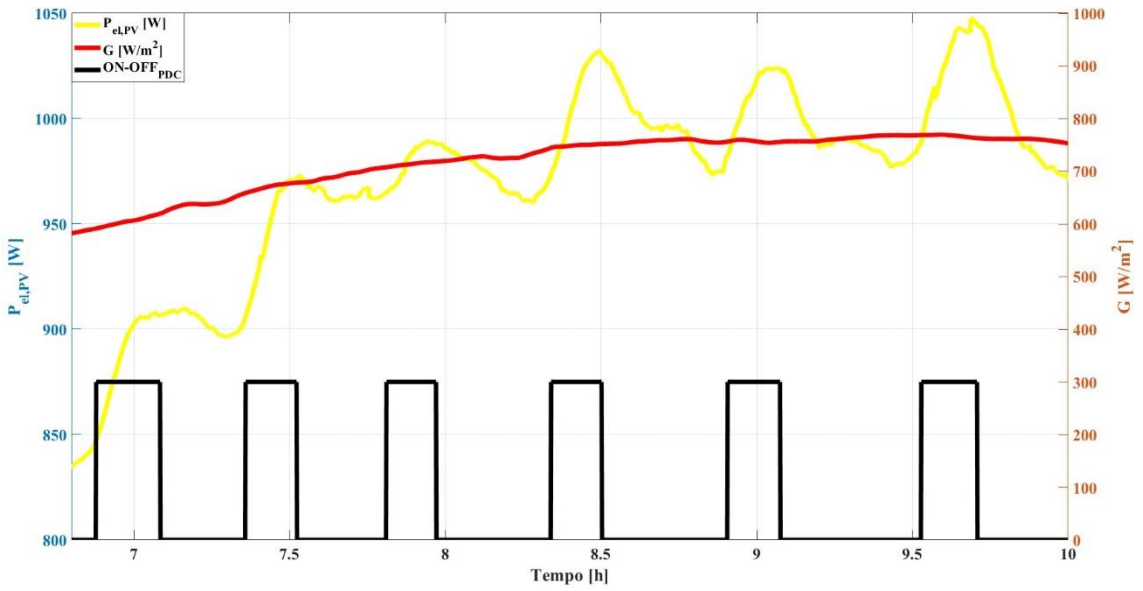

Figura 61: Test 1 - Andamento della potenza elettrica prodotta durante gli on-off della PdC

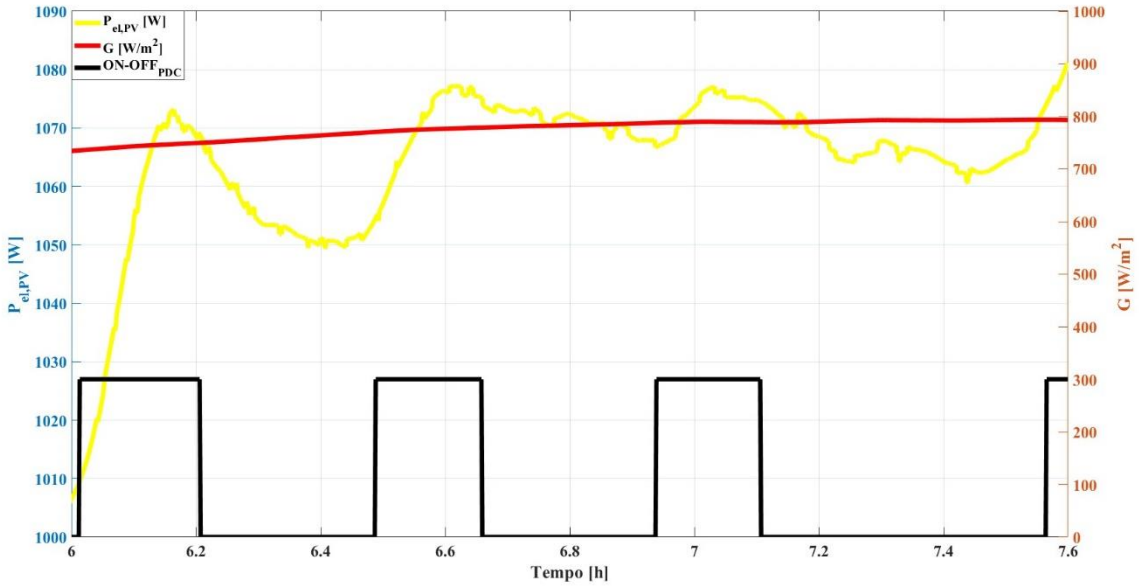

Figura 62: Test 6 - Andamento della potenza elettrica prodotta durante gli on-off della PdC

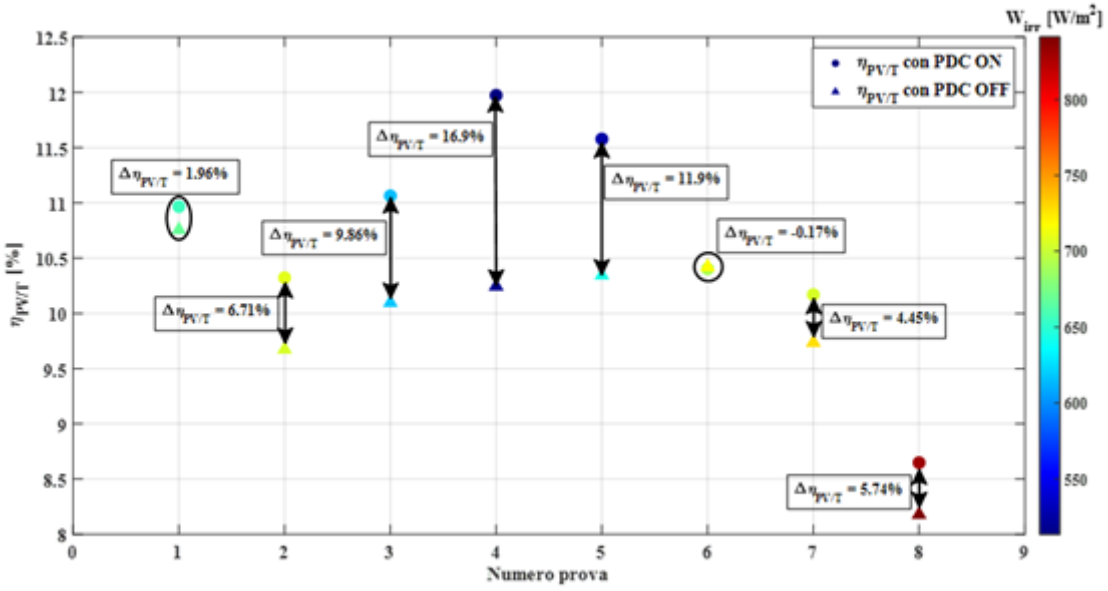

Figura 63: Confronto efficienza di produzione elettrica con PdC in Off o in On

Il rendimento fotovoltaico dei pannelli PVT (Figura 63), calcolato come:

$$\eta_{PV/T} = \frac{P_{PV/T}}{GA}$$

(G è l'irraggiamento e A l'area totale di pannelli) per tutti i test (esclusi l'1 e il 6) svolti con irraggiamento >500 W/m^2, è cresciuto del 9.21%. Il test 8 è stato eseguito in una giornata con forte ventosità, che potrebbe aver influito sul minor incremento di $\eta_{PV/T}$.

Le prove 1 e 6, svolte in maniera inversa alle altre (prima PdC accesa e poi spenta), hanno un incremento di $\eta_{PV/T}$ molto basso, perché il pannello ha continuato a beneficiare dell'effetto "preventivo" del raffreddamento.

7.3.4 Comparazione prestazione con sorgente aria o solare

La Figura 64 mostra i risultati dei test con le due sorgenti aria o sole.

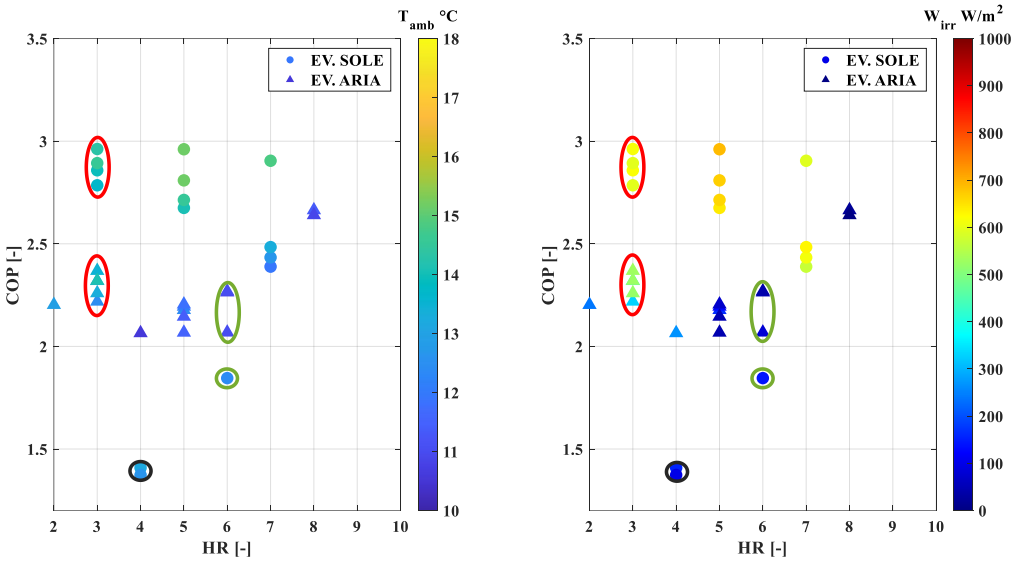

Figura 64: Confronto prestazioni termiche con sorgente aria o sole

In figura sono stati evidenziati alcuni punti simili per condizioni climatiche e di lavoro della PdC: in condizioni di irraggiamento medio-alto (W_{irr} >500 W/m^2) si ottiene, con la sorgente sole, un incremento del COP di circa il 20% rispetto all'aria, mentre, l'uso della sorgente solare, a parità di T_{amb} e ΔT_{water} risulta penalizzante con basso irraggiamento.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

La complessità della macchina a CO_2 e le numerose configurazioni testabili hanno reso necessario adottare sistemi automatici di gestione e controllo sia delle valvole deviatrici che di quelli modulanti per ottimizzare le condizioni termodinamiche di esercizio. In particolare, si è reso necessario installare una valvola automatica remotizzata per il controllo del surriscaldamento in ingresso compressore. Inoltre, come sopra descritto, l'uso dei pannelli PV come evaporatori della pompa di calore, con conseguente controllo della loro temperatura può consentire un cospicuo incremento della loro produttività elettrica. D'altra parte, il sistema nella sua configurazione attuale non appare ottimizzato dal punto di vista tecnologico, tanto che lo scambio termico attraverso l'evaporatore a serpentina integrato con i pannelli non è efficiente, soprattutto nelle ore mattutine e serali. Per studiare e proporre delle soluzioni per risolvere le problematiche suindicate è stata svolta una consulenza riguardante l'ingegnerizzazione di soluzioni di controllo termico e automazione di pompe di calore con pannelli PV-T. I risultati del servizio di consulenza sono descritti nel report emesso dal consulente (Report RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA4.5_405), al quale si rimanda per il dettaglio dei risultati conseguiti.

9 Pubblicazioni scientifiche

Violante A. C., Proposito M., Trinchieri R (2024), Realizzazione dei piezometri nel campo geotermico sperimentale del C.R. Enea - Casaccia e misure di conducibilità termica. RT/2024/20/ENEA

Violante A. C., Proposito M., Guidi G., Trinchieri R (2024), Impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia presso il C.R. Enea – Casaccia - Caratterizzazione termica stagionale, assemblaggio del circuito di prova, risultati del monitoraggio. RT/2024/4/ENEA

Violante A. C., Proposito M., Guidi G., Trinchieri R (2023), Realizzazione dell'impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia presso il C.R. Enea – Casaccia (Roma) RT/2023/23/ENEA

Violante A. C., Guidi G., Trinchieri R., Proposito M. (2023), Studio preliminare di fattibilità e dimensionamento di massima di un impianto geotermico sperimentale a bassa entalpia integrato con pompa di calore. RT/2023/2/ENEA

Violante A.C., Guidi G., Proposito M., Mataloni S., Spaziani F. (2024), Use of distributed temperature sensing (DTS) coupled to ground source heat exchangers for geological thermo-stratigraphic correlation. Renewable Energy 225 (2024) 120242. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120242

Colacino L., Violante A. C., Trinchieri R., Habib E. (2024), Thermal field in Monti Sabatini volcanic lithostratigraphic successions. 10th World Conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. ExHFT - 10 Greece

10 Eventi di disseminazione

Da questa linea di attività non sono scaturiti eventi di disseminazione.