



Ricerca di Sistema elettrico

Attività di sperimentazione dinamica su impianto HiL. Predisposizione impianto di prova per accumuli a PCM per lo sbrinamento di PdC

R. Trinchieri, F. D'Annibale, L. Gugliermetti, A. Mariani,
A. Franchi, M. Morlacca, M. Pieve, L. Simonetti, A. Scotini

ATTIVITÀ DI SPERIMENTAZIONE DINAMICA SU IMPIANTO HiL. PREDISPOSIZIONE IMPIANTO DI PROVA PER ACCUMULI A PCM PER LO SBRINAMENTO DI PdC

R. Trinchieri, F. D'Annibale, L. Gugliermetti, A. Mariani, A. Franchi, M. Morlacca, M. Pieve, L. Simonetti, A. Scotini (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Pompe di Calore

Linea di attività: Sistemi complessi di PdC integrate: Attività sperimentale su impianto "HiL". Validazione proposte di sbrinamento e logica di controllo multi-eiettore

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 ATTIVITÀ DI SPERIMENTAZIONE DINAMICA SU IMPIANTO HiL.....	5
2.1.1 <i>Stima dei fabbisogni termici delle utenze e gestione della potenza della PdC nel circuito HiL</i>	5
2.1.2 <i>Strategia di programmazione pompa di calore direttamente su utenza (senza accumulo)</i>	10
2.1.3 <i>Strategia di programmazione pompa di calore sull'accumulo</i>	11
2.1.4 <i>Strategia di programmazione scarico dell'accumulo sull'utenza</i>	12
2.1.5 <i>Software di gestione configurazioni di test</i>	12
2.1.6 <i>Matrice di prova</i>	16
2.1.7 <i>Analisi dei risultati delle simulazioni dinamiche della zona climatica D</i>	18
2.1.7.1 Test della fascia oraria 6-10	18
2.1.7.2 Test della fascia oraria 12-16	37
2.1.7.3 Test della fascia oraria 18-22	46
2.1.7.4 Riepilogo risultati complessivi zona climatica D	56
2.1.8 <i>Analisi dei risultati delle simulazioni dinamiche della zona climatica E</i>	56
2.1.8.1 Test della fascia oraria mattutina	57
2.1.8.2 Test della fascia oraria centrale	66
2.1.8.3 Test della fascia oraria serale.....	73
2.1.8.4 Riepilogo risultati complessivi zona climatica E	77
2.2 PROGETTO E REALIZZAZIONE DEL SERBATOIO DI ACCUMULO TERMICO A PCM	78
2.2.1 <i>Simulazioni preliminari per il dimensionamento del serbatoio</i>	78
2.2.2 <i>Progetto e acquisto dei componenti</i>	81
2.2.2.1 Scambiatori di calore	81
2.2.2.2 PCM	86
2.2.2.3 Contenitore.....	88
2.2.3 <i>Informazioni sui rischi e procedura di riempimento del serbatoio</i>	88
2.2.3.1 Aspetti di sicurezza	88
2.2.3.2 Considerazioni sui rischi nell'utilizzo.....	89
2.2.3.3 Procedura di riempimento del serbatoio.....	89
2.2.4 <i>Simulazione della configurazione scelta</i>	89
2.2.5 <i>Altri componenti per la sperimentazione: regolazione dell'umidità</i>	90
2.2.5.1 Igrometro.....	90
2.2.5.2 Umidificatore	90
2.2.5.3 Misura della portata di aria	90
3 CONCLUSIONI.....	92
4 APPENDICI	94
APPENDICE 1 – ESEMPIO DI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PRELIMINARI.....	94
APPENDICE 2 – DATASHEET DEI CONTENITORI	101
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	103
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	103

Sommario

Il presente report, descrive le attività di ricerca svolte nell'ambito della LA 3.24 "Sistemi complessi di PdC integrate: Attività sperimentale su impianto "HiL". Validazione proposte di sbrinamento e logica di controllo multi-eiettore". Il report si compone di due parti distinte. Nella prima, sono descritte le attività sperimentali condotte sull'impianto "HiL" del C.R. ENEA Casaccia, per i test dinamici su una pompa di calore a CO₂ da 30 kW con gruppo multi-eiettore. Lo scopo della ricerca è stato quello di quantificare le prestazioni effettive di una PdC di questo tipo, in funzionamento dinamico, abbinata ad un'utenza fittizia modellata in precedenti LA e simulata dal circuito idronico secondario dell'impianto stesso. I carichi termici simulati sono quelli caratteristici delle zone climatiche italiane C e D. L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di valutare, in termini energetici, gli effetti delle fasi di transitorio, sempre negativi, sulle prestazioni complessive. Ne sono scaturite alcune proposte di ottimizzazione della logica di controllo della PdC e degli ausiliari operanti sul circuito idronico (es. pompe di circolazione circuito primario e secondario). Sono state inoltre proposte alcune soluzioni impiantistiche e di controllo specifiche per la pompa di calore a CO₂ per limitarne le penalizzazioni di efficienza in certe condizioni d'impiego.

Nella seconda parte del report è descritta l'attività di progettazione e realizzazione dell'impianto sperimentale per il test del sistema di ritardo del brinamento e di sbrinamento proposto nelle precedenti annualità. L'impianto è dotato di un accumulo a PCM (Phase Change Material), che dovrà essere caricato termicamente dalla PdC in opportuni momenti della giornata e con opportune logiche di azionamento e dovrà poi scaricarsi per preriscaldare l'aria avviata alla batteria alettata della PdC, nelle fasi in cui le condizioni ambientali potrebbero portare al brinamento della batteria alettata.

1 Introduzione

Il presente report, illustra le attività di ricerca svolte nella terza annualità del PTR 2019-2021, progetto 1.7, WP3 “pompe di Calore”, relative alla sperimentazione su impianto “HiL” e alla progettazione e realizzazione dell’impianto sperimentale per il test del sistema di ritardo del brinamento e di sbrinamento.

Nel paragrafo 2 si descriverà l’esecuzione dei test in funzionamento dinamico e si discuteranno i risultati ottenuti, con particolare riferimento alla valutazione, in termini energetici, degli effetti delle fasi di transitorio e alla proposta di alcuni accorgimenti per l’ottimizzazione della logica di controllo della PdC e degli ausiliari operanti sul circuito idronico (es. pompe di circolazione circuito primario e secondario). Saranno inoltre indicate alcune possibili soluzioni impiantistiche e di controllo specifiche per la pompa di calore a CO₂ per limitarne le penalizzazioni di efficienza in certe condizioni d’impiego.

Nel paragrafo 3 si descriverà invece l’attività di progettazione e realizzazione dell’impianto sperimentale per il test del sistema di ritardo del brinamento e di sbrinamento proposto nelle precedenti annualità, dotato di accumulo a PCM (Phase Change Material).

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Questo paragrafo illustra le attività di sperimentazione dinamica su impianto HiL. In questa annualità, sono state condotte sperimentazioni simulando le utenze tipo delle zone climatiche D ed E. Nelle future attività si prevede di ampliare il numero di sperimentazioni applicando questa logica di ricerca anche ad altre fasce climatiche.

2.1 Attività di sperimentazione dinamica su impianto HiL

Nel report RdS/PTR(2020)/041 [1] è stata descritta la realizzazione dell’impianto di test dinamico di pompe di calore idroniche, progettato e realizzato presso il C.R. ENEA Casaccia. Tale impianto prevede l’implementazione di due loop idronici, primario e secondario, collegati attraverso uno scambiatore di adeguata potenzialità termica. Il loop primario ha il compito di testare le condizioni di lavoro nel tempo del generatore termico, costituito, nel nostro caso, da una pompa di calore aria-acqua a CO₂ da 30 kW_{th}. Il secondario ha il compito di simulare l’utenza. La presenza dello scambiatore separatore consente di separare i due loop idronici in modo da rendere più versatile la sperimentazione, ma può essere considerato anche come elemento costituente un impianto termico reale, perché permette di far operare la pompa di calore su ΔT non necessariamente corrispondenti a quelli richiesti dall’utenza, con possibile vantaggio in termini di efficienza della pompa di calore. Questa opportunità può essere particolarmente vantaggiosa per la macchina a CO₂, che fornisce prestazioni apprezzabili con salti termici abbastanza elevati. Per la simulazione dell’utenza, nel report sopra indicato, è stata impostata la logica di simulazione del fabbisogno orario dell’utenza e l’interfaccia con l’impianto reale (pompa di calore, accumuli, solare). Nel seguito, si detaglierà la procedura di stima dei carichi orari dell’utenza, per ogni zona climatica.

2.1.1 Stima dei fabbisogni termici delle utenze e gestione della potenza della PdC nel circuito HiL

Riprendendo le assunzioni in Report RdS/PTR(2019)/024 [2] e facendo riferimento per esempio alla zona climatica D, a partire da dati di letteratura tecnica, si è stabilito che un dato medio per il fabbisogno stagionale per riscaldamento (senza produzione ACS) di un’abitazione tipo è di 81,5 kWh/m². Per un’abitazione di riferimento, per la quale si assume, per semplicità, una superficie di 100 m², si avrebbe un fabbisogno stagionale per riscaldamento pari a 8150 kWh termici. Da questo dato, è stato calcolato l’andamento del profilo orario di potenza richiesto da un’abitazione standard per il riscaldamento, sviluppando i seguenti passaggi:

1. Si è ipotizzata una firma energetica dell’abitazione di tipo lineare decrescente. La firma energetica dell’abitazione rappresenta l’andamento della potenza necessaria per riscaldarla in funzione della

temperatura esterna. Ovvero indica la potenza istantanea necessaria W al variare della temperatura esterna. Nel caso della zona climatica D, con i calcoli spiegati più sotto, essa ha la forma:

$$W = -0,3034 \cdot T_{\text{ext}} + 4,8541, \quad (1)$$

derivante dall'espressione più generale

$$W = W_{\text{des}} (T_{\text{LR}} - T_{\text{ext}}) / (T_{\text{LR}} - T_{\text{des}}) \quad (2)$$

in cui W e W_{des} sono espresse in kW, T_{LR} , (temperatura limite di riscaldamento, pari a 16 °C) T_{ext} e T_{des} (T di progetto, dipendente dalla località) in °C.

L'espressione si azzerava per $T_{\text{ext}} = T_{\text{LR}} = 16$ °C, mentre per $T_{\text{ext}} = T_{\text{des}}$ (minima ipotizzabile per la località di ubicazione) si ha $W = W_{\text{des}}$.

2. È stata poi calcolata la distribuzione delle ore per cui è presente una certa temperatura esterna, tramite il metodo dei bin. In particolare, per la zona climatica D (città di riferimento Pisa) è stata calcolata¹ la distribuzione di Figura 1:

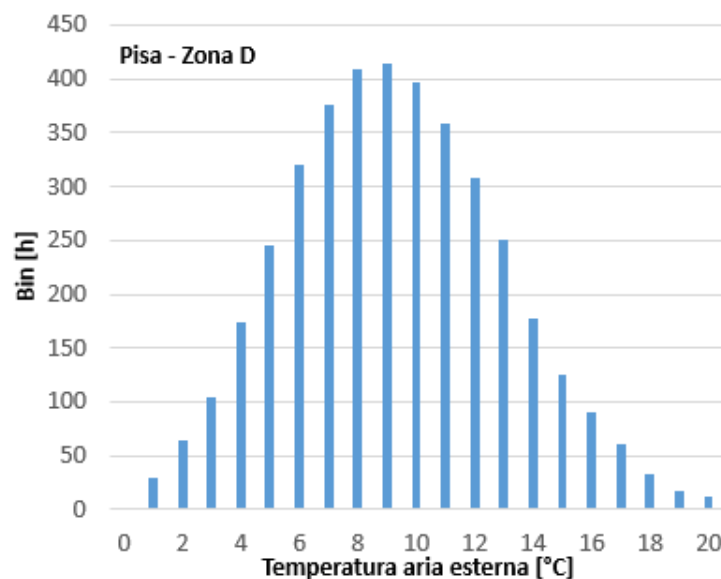


Figura 1: bin: esempio di distribuzione delle ore in cui si registra una certa temperatura esterna (zona climatica D)

3. Dalla distribuzione dei bin, per ogni temperatura T_x si calcola il prodotto delle ore a quella temperatura (cioè i bin) per l'espressione della potenza $W = W_{\text{des}} (T_{\text{LR}} - T_x) / (T_{\text{LR}} - T_{\text{des}})$, in cui sono noti T_{LR} (= 16 °C per la zona climatica D), T_{des} (per esempio uguale a 0°C per la zona climatica D), ottenendo un'energia, ovvero il fabbisogno corrispondente ad ogni temperatura esterna T_x .

¹ La norma UNITS 11300-4 suggerisce un metodo di calcolo basato su una distribuzione normale della temperatura dell'aria esterna, che consente di calcolare il profilo bin di una specifica località. I dati di input per questo metodo sono i valori medi mensili della temperatura media giornaliera (forniti dalla UNI 10349), la temperatura esterna di progetto (secondo la UNI EN 12831) e la radiazione solare giornaliera media mensile sul piano orizzontale, dati forniti dalla UNI 10349)

Sommando tutti i contributi, ovvero per T_x che va da T_{des} a T_{LR} si ottiene un'espressione il cui totale deve essere pari a 8150, e nella quale l'unica incognita è W_{des} , che può quindi essere determinata, per giungere poi al calcolo dell'espressione (1).

4. Sono stati poi fissati i seguenti parametri:
 - a. Il numero complessivo di ore in cui la T_{ext} è compresa tra T_{des} e T_{LR} (pari a 3752 in zona climatica D; In zona climatica E è 4113 ore, in zona F 4599 ore)
 - b. Il numero di giorni di accensione del riscaldamento, che, in zona climatica D, è (DPR 412/93) di 166 giorni (1 novembre – 15 aprile), per un massimo di 12 ore giornaliere (per la sperimentazione si considereranno questi limiti temporali nelle ore di accensione per avere un riferimento normativo, ma la limitazione è valida solo in assenza di sistemi di termoregolazione, mentre, in presenza di sistemi di termoregolazione su più livelli, le ore di accensione dei generatori termici può essere superiore, art. 9 DPR 412/93, c. 6 lett. g)
5. Per definire un "giorno medio" rappresentativo del periodo di riscaldamento, possono essere seguite diverse strategie, che devono comunque essere coerenti con i parametri di input. Nel nostro caso, si è considerato come giorno medio quello per il quale l'abitazione richiede un fabbisogno pari a quello stagionale medio. In questo caso, in zona climatica D si richiederebbe un contributo di energia termica di $8150/166 = 49,1\text{kWh}$. A questo punto si è tenuto conto, che l'energia termica richiesta nei giorni più freddi dell'anno era stata stimata in 68,9 kWh (distribuita nell'arco della giornata come indicato in figura 2, profilo azzurro) [1,2] e si è spalmato il contributo termico medio di 49kWh in maniera proporzionale nell'arco della giornata tipo (Figura 2, profilo arancione).

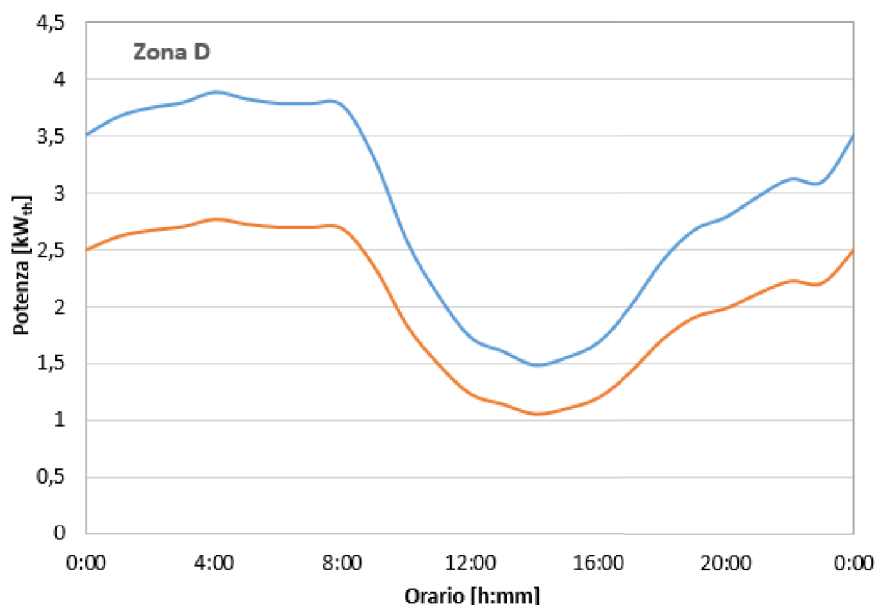


Figura 2: distribuzione della potenza nell'arco della giornata invernale tipo, zona D

6. Ipotizzando, in prima analisi, di immettere l'energia, attraverso l'impianto di riscaldamento, durante le 12 ore giornaliere consentite, preso come riferimento l'andamento della temperatura giornaliera media, ovvero un giorno medio caratteristico della stagione di riscaldamento, dopo aver scelto gli intervalli di accensione dell'impianto (ad es. dalle 6 alle 10, dalle 12 alle 16 e dalle 18 alle 22), è stata distribuita la potenza proporzionalmente alla differenza di temperatura tra il setpoint (20°C) e quella esterna. Naturalmente la scelta degli intervalli di accensione può essere arbitraria e può condurre a

diverse condizioni di input per la sperimentazione, come si vedrà per i test eseguiti in zona climatica E.

7. Con le assunzioni sopra indicate, per la fascia climatica D sono stati individuati i tre intervalli nei quali si deve fornire all'utenza l'energia di circa 49,1 kWh, suddivisa in modo proporzionale alle differenze ($T_{\text{set point}} - T_{\text{ext}}$) (Figura 3).

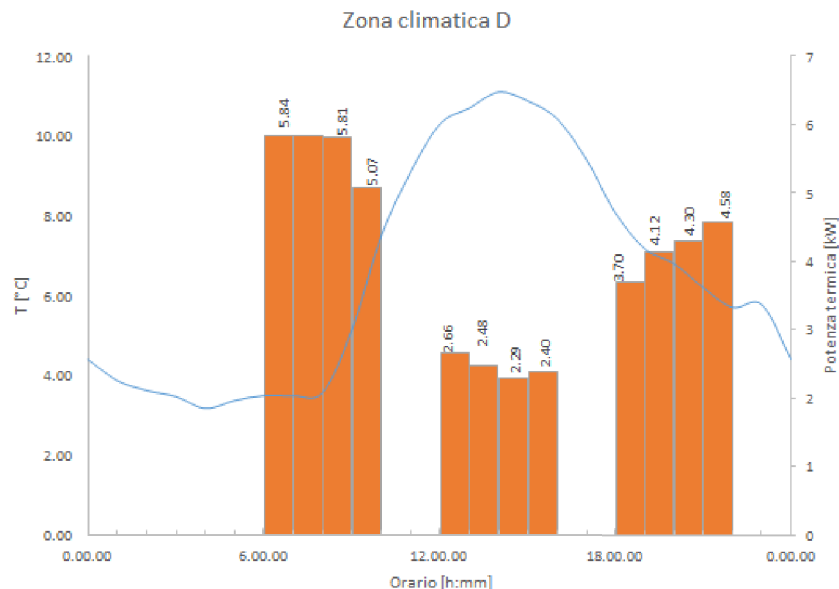


Figura 3- Distribuzione potenza termica richiesta dall'utenza in zona climatica D

Come detto, sono state fatte alcune scelte arbitrarie nella definizione dei carichi termici. In alternativa alla procedura sopra esposta, che sarà adottata nel seguito per la definizione dei carichi termici durante la campagna sperimentale, vi sono altri possibili modi di determinare questi ultimi.

Ad esempio, potrebbe essere considerata una distribuzione di bin riscalata in modo da avere un totale di 24 ore, rappresentativa del distribuirsi delle varie temperature esterne in una singola giornata di riferimento per il riscaldamento. Questa ipotesi, tuttavia, deve fare i conti con la difficoltà di attribuire, nell'arco delle 24 ore, la temperatura ad ogni ora (Figura 4).

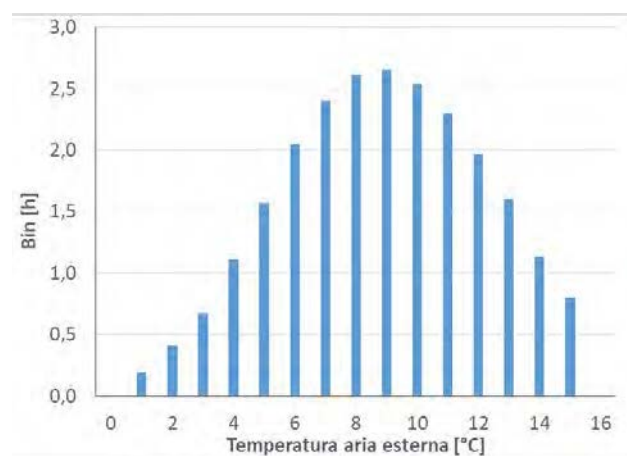


Figura 4: Distribuzione di bin riscalata per possibile calcolo potenza termica da erogare

Un'altra possibile strada (simile in parte alla seconda) può prevedere la scalatura del profilo di potenza oraria istantanea calcolato in [2] fino ad avere come integrale sotto la curva della potenza esattamente il valore di 49,1 kWh giornalieri.

Riguardo il punto 7, se invece del Tset point = 20 °C, come temperatura con cui misurare la differenza si usasse TLR = 16 °C, allora anche la curva delle potenze "a gradini" cambierebbe: infatti verrebbe richiesta più potenza in alcune fasce e meno in altre. In particolare, sarebbe richiesta più potenza per la fascia in cui già ne è richiesta di più (6-10) e di meno per quella in cui già ne veniva richiesta di meno (12-16). In altri termini aumenterebbe la dispersione intorno al valore medio.

Si evidenzia infine che, con la fornitura di potenza in intervalli specifici, la punta di potenza è maggiore di quella di progetto, com'è logico prevedere, dato che si deve immettere la stessa energia in un intervallo di tempo inferiore.

Seguendo la procedura dettagliata nei punti 1-7 per le zone climatiche E ed F, sono stati ottenuti i seguenti risultati (su utenza di riferimento di superficie 100m²):

➤ ZONA E (Figura 5)

- Fabbisogno stagionale per riscaldamento: 14540 kWh;
- Potenza in funzione della temperatura esterna: $W = -0,3545 \cdot T_{\text{ext}} + 5,6715$;
- Numero di giorni di riscaldamento: 183;
- Energia fornita nel "giorno medio" ad una singola utenza: $14540/183 = 79,45$ kWh;
- Ore giornaliere di accensione di primo tentativo: 14;
- Distribuzione di primo tentativo: dalle 5 alle 10, dalle 12 alle 16 e dalle 18 alle 23, con gli stessi criteri seguiti per la zona climatica D;

➤ ZONA F (Figura 6)

- Fabbisogno stagionale per riscaldamento: 22420 kWh;
- Potenza in funzione della temperatura esterna: $W = -0,4464 \cdot T_{\text{ext}} + 7,143$;
- Numero di giorni di riscaldamento: 200 (indicativamente 5 ottobre-22 aprile; DPR 412/93, solo ai fini del calcolo);
- Energia fornita nel "giorno medio" ad una singola utenza: $22420/200 = 112,1$ kWh;
- Ore giornaliere di accensione massime di primo tentativo: 16;
- Distribuzione di primo tentativo su 16 ore: dalle 5 alle 11, dalle 12 alle 16 e dalle 17 alle 23, con gli stessi criteri seguiti per la zona climatica D;

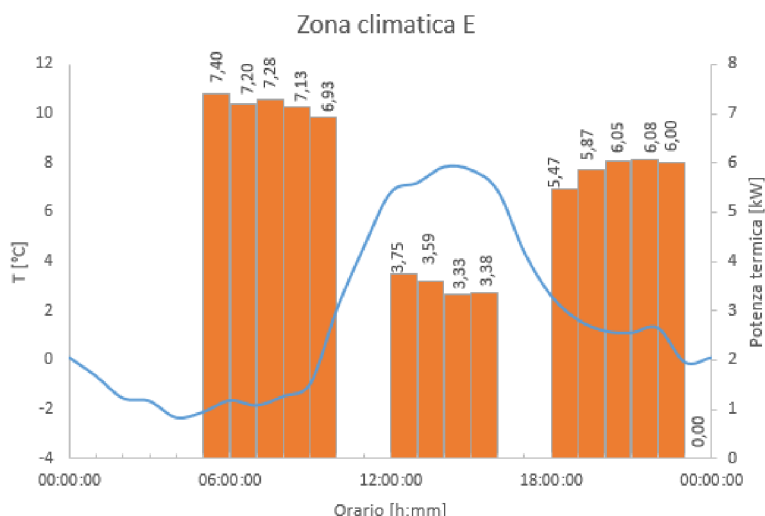


Figura 5- Distribuzione potenza termica richiesta dall'utenza in zona climatica E

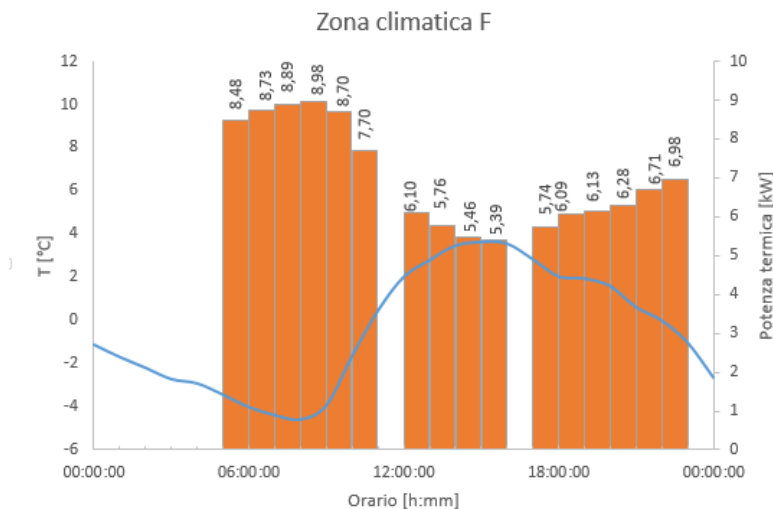


Figura 6- Distribuzione potenza termica richiesta dall'utenza in zona climatica F

2.1.2 Strategia di programmazione pompa di calore direttamente su utenza (senza accumulo)

Per la simulazione delle condizioni di esercizio dell'impianto reale bisogna considerare che si potrebbe procedere a simulazioni di sistemi con diversi terminali d'impianto, caratterizzati, quindi, da differenti temperature di lavoro. La sperimentazione deve quindi essere condotta in modo da poter fissare le temperature di mandata e di ritorno al generatore termico (costituito, nel nostro caso, da una pompa di calore a CO₂). In particolare, la temperatura di mandata potrà essere regolata attraverso il software di gestione della pompa di calore, che la controllerà attraverso la modulazione della pompa di circolazione a bordo macchina. La temperatura di ritorno alla pompa di calore costituisce invece un parametro che dovrà essere controllato dalle modalità d'operazione del secondario dell'HiL. Riferendosi allo schema di Figura 7, il secondario dovrà operare in modo da mantenere la temperatura di uscita dal primario al valore desiderato. In sostanza, il sistema di controllo opererà sulla pompa di circolazione del secondario, agendo sull'inverter della stessa, in modo da stabilizzare la temperatura di uscita dal primario al valore di set-point desiderato. Tale temperatura dovrà essere quindi impostabile come parametro dall'operatore.

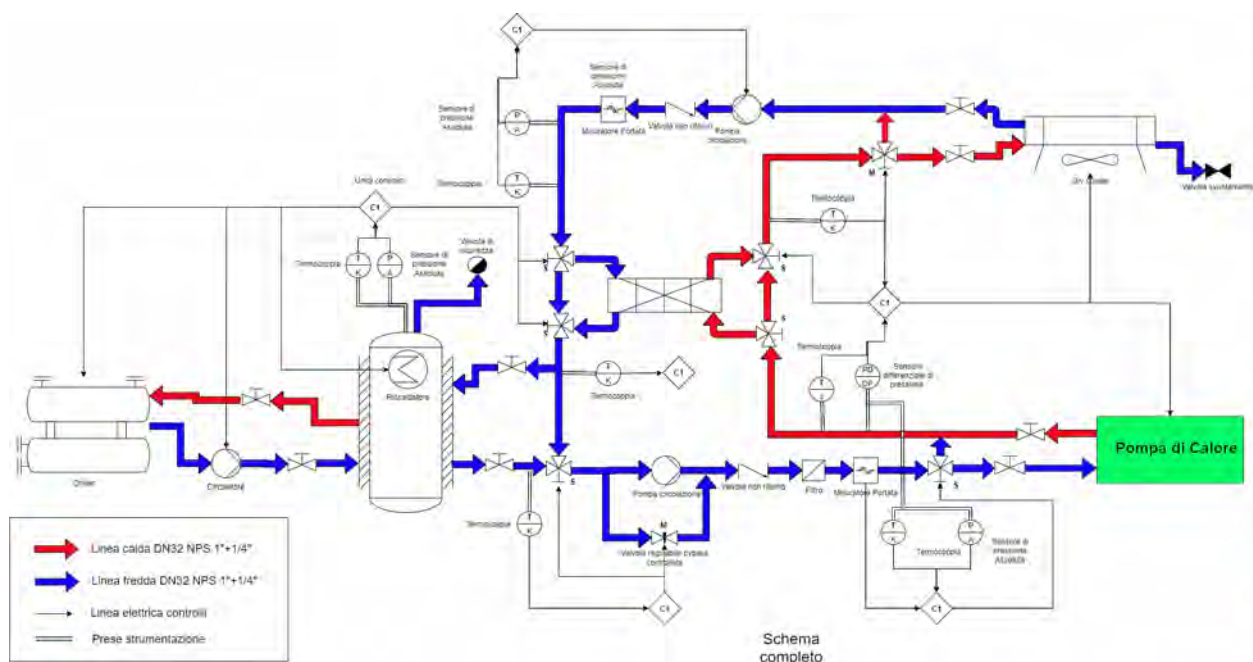


Figura 7- Impianto di prova di PdC idroniche – schema circuito idraulico

Per quanto riguarda la potenza da dissipare al dry-cooler, con la regolazione sopra ipotizzata, varierà in funzione della portata elaborata. In generale, data l'elevata capacità termica dello scambiatore installato tra primario e secondario, si può assumere che, in condizioni stazionarie, la potenza dissipata dal dry-cooler corrisponderà sempre a quella prodotta dalla pompa di calore. Nella maggior parte dei casi, come avviene negli impianti termici reali, l'energia erogata dal generatore termico in un certo intervallo di tempo sarà diversa (ossia maggiore) da quella richiesta, con l'effetto di accrescere la temperatura interna dell'abitazione oltre il valore di set-point, fino allo spegnimento del generatore e al suo successivo riavvio nel momento in cui la temperatura degli ambienti scende nuovamente sotto il set-point.

Il sistema di controllo dovrà invece ricercare il pareggio tra l'energia termica prodotta dalla pompa di calore e l'energia termica richiesta dall'utenza nell'arco dell'intera giornata.

In termini di energia, quella termica prodotta dalla pompa di calore nei suoi periodi di accensione, $E_{prodotta}$, dovrà uguagliare il fabbisogno dell'utente, E_{utenza} , calcolabile dalle tabelle della potenza termica oraria come prodotto tra potenza e tempo. Durante l'esecuzione di un test di simulazione dinamica, si dovrà confrontare l'energia effettivamente prodotta dalla pompa di calore con l'energia termica richiesta dall'utenza. Si potrà avere una delle seguenti condizioni:

1. $E_{prodotta} > E_{utenza} + x \text{ kWh}$ (cioè l'energia prodotta è maggiore rispetto all'energia richiesta di una quantità x , fissata dallo sperimentatore e dalle valutazioni modellistiche sulla variazione di temperatura interna nel tempo in funzione delle condizioni ambientali esterne e dell'immissione termica; il parametro x può essere impostato come parametro nel software di gestione): il sistema deve spegnere la PdC, facendola riavviare quando $E_{utenza} > E_{prodotta} + x \text{ kWh}$ (infatti, E_{utenza} continuerà ad aumentare nel tempo, essendo data dal prodotto di P_{utenza} per t^*).
2. $E_{prodotta} < E_{utenza} + x \text{ kWh}$: il s/w segnala che la produzione termica è insufficiente. L'operatore verifica preliminarmente se la PdC ha operato in modalità *defrost* nel periodo in questione, nel qual caso potrebbe continuare il test. Altrimenti, l'operatore potrebbe decidere di fermare la prova, ridurre il numero di utenze servite e ripetere la prova.

La modalità di test "pompa di calore su utenza" è stata quella principalmente testata perché i test hanno riguardato le due zone climatiche C e D, laddove l'accumulo termico, ad esempio per finalità di sbrinamento, è apparso meno pregnante per l'ottimizzazione delle prestazioni della PdC in test. Quest'ultima infatti, ha mostrato una buona stabilità di erogazione della potenza al variare delle temperature di una giornata tipica delle zone climatiche D ed E, risultando quindi sostanzialmente sovradimensionata per il numero di utenze considerato. Tale sovradimensionamento induce numerose fasi di spegnimento della PdC, che sostanzialmente consentono una automatica mitigazione all'insorgere del brinamento.

2.1.3 Strategia di programmazione pompa di calore sull'accumulo

Nelle fasi in cui la PdC è spenta perché le esigenze dell'utenza sono soddisfatte, l'operatore ha la possibilità di farla ripartire per caricare l'accumulo. Se l'operatore sceglie di caricare l'accumulo con la PdC (la scelta può essere effettuata anche in modo automatico, in base al COP stimato in quel momento attraverso un algoritmo che sfrutta la matrice a tre ingressi illustrata in [2]), la fase di accumulo proseguirà fino a raggiungimento della temperatura di set point dell'accumulo (parametro da settare a quadro), oppure fino al momento in cui l'utenza torna a chiedere energia termica. In questo secondo caso, il sistema dovrà tornare alla configurazione PdC-Utenza (paragrafo precedente) e servirà l'utenza solo con la PdC. L'accumulo può anche essere caricato tramite le resistenze elettriche del serbatoio stesso. Queste infatti, nell'ottica di simulazione con logica HiL di un impianto integrato reale, possono simulare un sistema di collettori solari. A questo scopo, si può procedere ad attivare le resistenze elettriche in modo che forniscano, la potenza che può erogare un campo solare di dimensioni stabili.

Il caricamento di un accumulo convenzionale con pompa di calore a CO₂ è sempre inefficiente perché le sue prestazioni decrescono pesantemente all'aumentare della temperatura di ritorno in PdC. Occorre quindi senz'altro prevedere l'adozione di uno o più accumuli ad elevata stratificazione oppure valutare

soluzioni di accumulo con PCM, che potrebbero però essere penalizzate dal volume utile ridotto dalla presenza del PCM stesso.

2.1.4 Strategia di programmazione scarico dell'accumulo sull'utenza

Se l'accumulo è carico (cioè ha raggiunto la temperatura di set point) alla successiva richiesta termica da parte dell'utenza l'operatore potrà scegliere (ancora utilizzando l'algoritmo del paragrafo 5.1.4.4 di [2] per il calcolo predittivo del COP atteso per la PdC in quel momento da confrontare con quello medio della fase di carica dell'accumulo) se alimentarla con la PdC o con l'accumulo. In questo secondo caso, il funzionamento con l'accumulo avverrà finché la sua temperatura non scenderà al di sotto di una certa temperatura (che potrà essere fissata come parametro dal pannello di controllo).

2.1.5 Software di gestione configurazioni di test

La gestione dell'apparato sperimentale è demandata, per quanto riguarda la gestione del secondario e la modifica di configurazione di prova (PdC su utenza, PdC su accumulo e Accumulo su utenza) al software Ultrasite® di EMERSON Climate Technologies. Il software consente anche l'acquisizione dei dati di esercizio del primario e del secondario dell'HiL (temperature e portate).

La figura seguente mostra la schermata iniziale del software:

- Il pulsante "System control" permette l'accensione delle pompe di circolazione primario e secondario e degli ausiliari;
- La scelta della configurazione può essere effettuata attraverso i pulsanti virtuali predisposti per il "Mode Selector";
- I pulsanti "Heaters Ctrl" consentono la simulazione dell'apporto solare;
- I pulsanti "MHEX Control" consentono di escludere o no dal circuito di Figura 7 lo scambiatore a piastre che separa primario e secondario (in modo da tornare alla configurazione d'impianto per test stazionari di PdC);
- Il gruppo di pulsanti "Mod PMP utente", "Port. PMP utente" e "Reg. PMP utente" consentono di automatizzare in maniera diversa, secondo il test che si vuole effettuare, le modalità di attivazione della pompa di circolazione del secondario dell'HiL, che simula l'utenza;
- Le condizioni di esercizio dell'impianto di riscaldamento reali sono simulate impostando le temperature di esercizio e il salto termico atteso dei terminali d'impianto considerati. In particolare il sistema controlla la temperatura ingresso secondario (TEMP.ING.SEC.) che corrisponde alla temperatura di ritorno al generatore termico dai terminali d'impianto, il ΔT sul secondario (Delta-T SEC) che corrisponde al salto termico sui terminali: tale parametro è fissato a 5°C nella simulazione di terminali d'impianto a pavimento e di tipo ventilconvettore. Dal punto di vista hardware, i componenti che controllano questi parametri sono la modulazione della velocità del ventilatore del dry-cooler (MOD FAN DRYCOOLER), la modulazione della portata elaborata dalla pompa di circolazione del secondario e la modulazione della percentuale di apertura della valvola di by-pass del dry-cooler (MOD. VLV. DRYCOOLER).

La Figura 8, catturata durante l'esecuzione di un test di simulazione di una prova con salto termico lato utenza di 5°C, evidenzia che, in condizioni stazionarie, la potenza erogata dalla pompa di calore (POTENZA PRI) eguaglia con buona approssimazione la potenza del secondario (POTENZA SEC) e che il salto termico impostato è ben mantenuto dal controllore attraverso la gestione della portata sul secondario. Si deve peraltro rilevare che in alcune fasi del test, in particolare all'avviamento della pompa di calore il sistema di regolazione, per l'iniziale inerzia termica dell'impianto poi seguita da una fase più rapida di incremento delle temperature, può "tardare" ad operare per raggiungere le condizioni stazionarie ed evitare un eccessivo incremento della temperatura ingresso secondario. A questo proposito, si rileva che l'impostazione dei parametri PID è stata effettuata come soluzione di compromesso per un funzionamento soddisfacente in tutte le modalità di esercizio, ma, soprattutto nella fase di accensione della pompa di calore, che prevede condizioni di erogazione termica molto diverse rispetto ad altre fasi di esercizio, può capitare che il sistema di controllo abbia difficoltà a mantenere le condizioni di set-point, con la conseguenza di un eccessivo aumento della temperatura

ingresso secondario. Si segnala fin da ora, che la problematica riscontrata nell'impianto sperimentale potrebbe presentarsi anche su un impianto reale e che la tipologia di sensore di temperatura impiegata potrebbe acuire o mitigare il problema. Da questo punto di vista, con riferimento all'apparato sperimentale si è visto che le sonde di temperatura impiegate sull'HiL, di tipo RTD (resistance temperature detectors), adottate per l'elevata precisione, hanno dei tempi di risposta piuttosto elevati. Questo, soprattutto nelle fasi di transitorio, costituisce un limite, perché il controllore PID opera su un dato di input non veritiero e non riesce ad impedire la deriva della temperatura, a meno di tararlo ad hoc per la fase transitoria. La complessità della regolazione, che si riscontrerebbe anche in un impianto reale, ha causato peraltro un considerevole dispendio di tempo per la corretta impostazione dei PID.

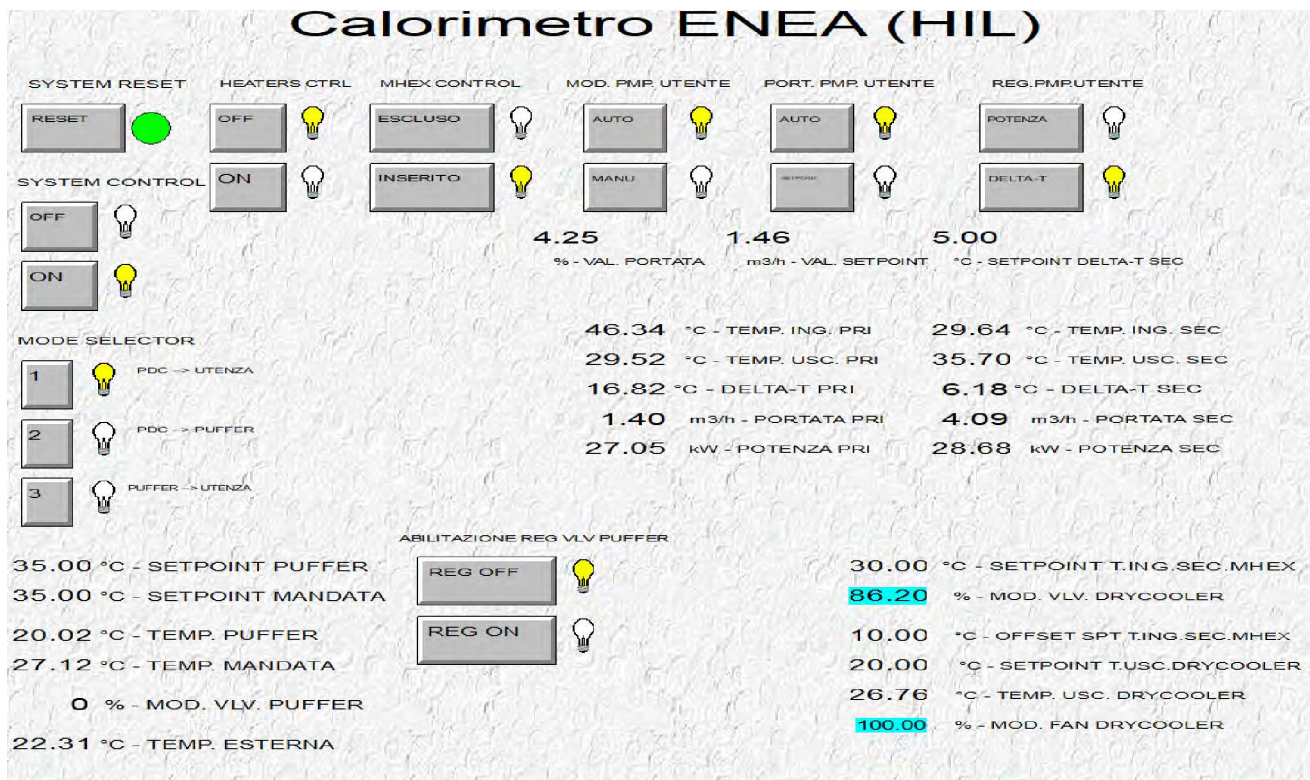


Figura 8- Schermata pagina iniziale software di controllo Ultrasite®

Nell'impianto di prova, il ritardo nel tempo di risposta è risultato evidente dal fatto di avere due tipologie di sensori installate all'ingresso e all'uscita del primario del MHEX, termocoppie e PT100 (sensori di tipo RTD), dove il tempo di risposta, minore, delle termocoppie è apparso più idoneo all'abbinamento con la logica di controllo PID.

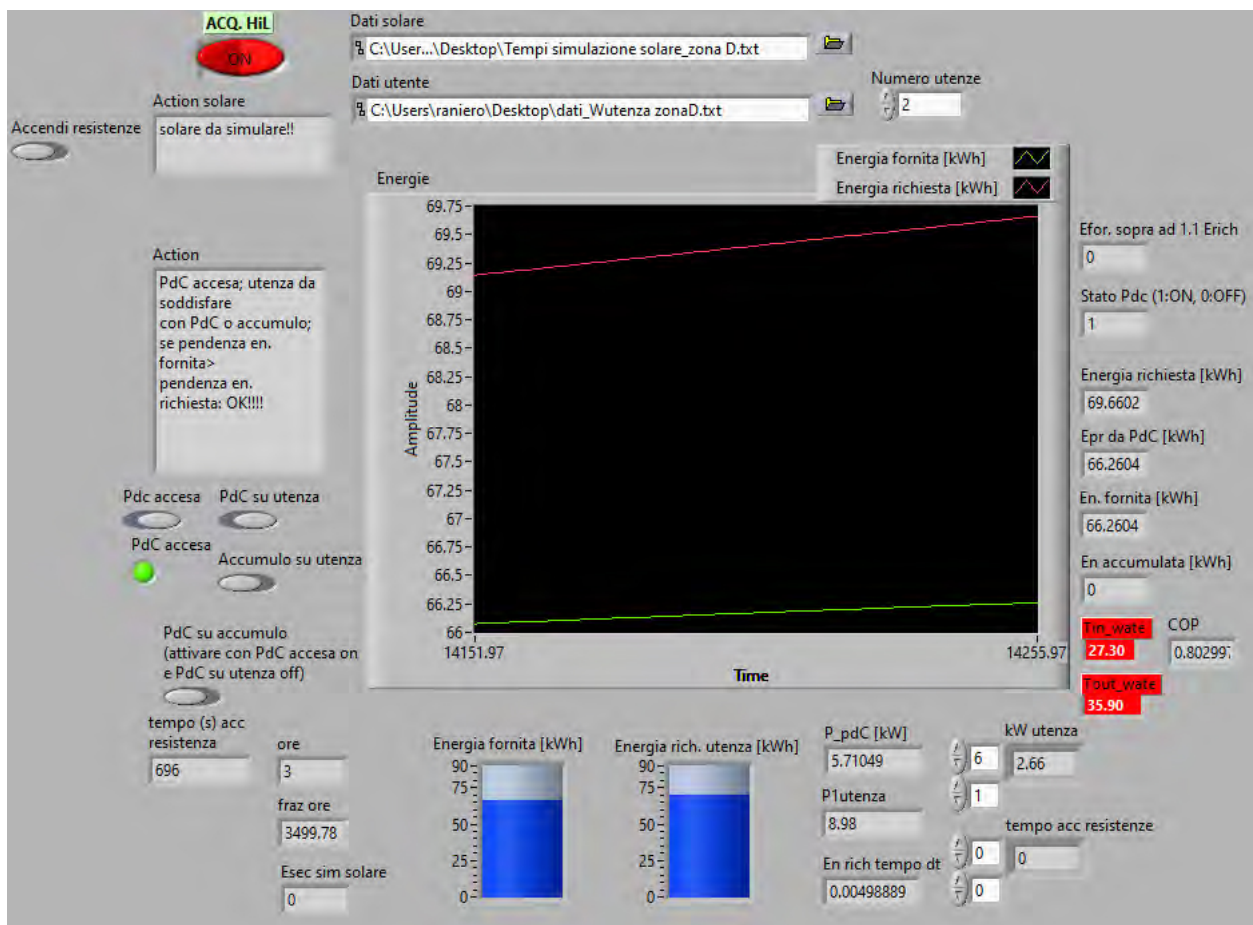


Figura 9- Schermata pagina Labview di controllo e acquisizione HiL

Il programma Labview è impiegato per il monitoraggio delle energie richieste dall'utenza e prodotte dalla pompa di calore e per l'acquisizione dei dati di prova (Figura 9). Il programma effettua una acquisizione al secondo.

La Figura 10 mostra invece la schermata di controllo delle condizioni di lavoro della pompa di calore, realizzata dal produttore della macchina. Tramite questo software è possibile gestire, automaticamente o manualmente, alcuni dei parametri operativi della PdC, quali il grado di apertura della valvola di evaporazione, che gestisce il surriscaldamento in uscita evaporatore, il grado di apertura della valvola di bypass, che gestisce il surriscaldamento ingresso compressore, il numero di eiettori attivi, la velocità della pompa di circolazione. Quando il sistema è controllato automaticamente, una serie di controllori PID deve essere impostato per la riduzione dei transitori, in particolare per l'erogazione della portata d'acqua sul primario, atta a garantire la desiderata temperatura di produzione dell'acqua stessa. Anche in questo caso il sensore di temperatura installato sulla macchina è di tipo RTD e può causare ritardi nel comando della pompa di circolazione, con relativa, temporanea, perdita di efficienza da parte della PdC.

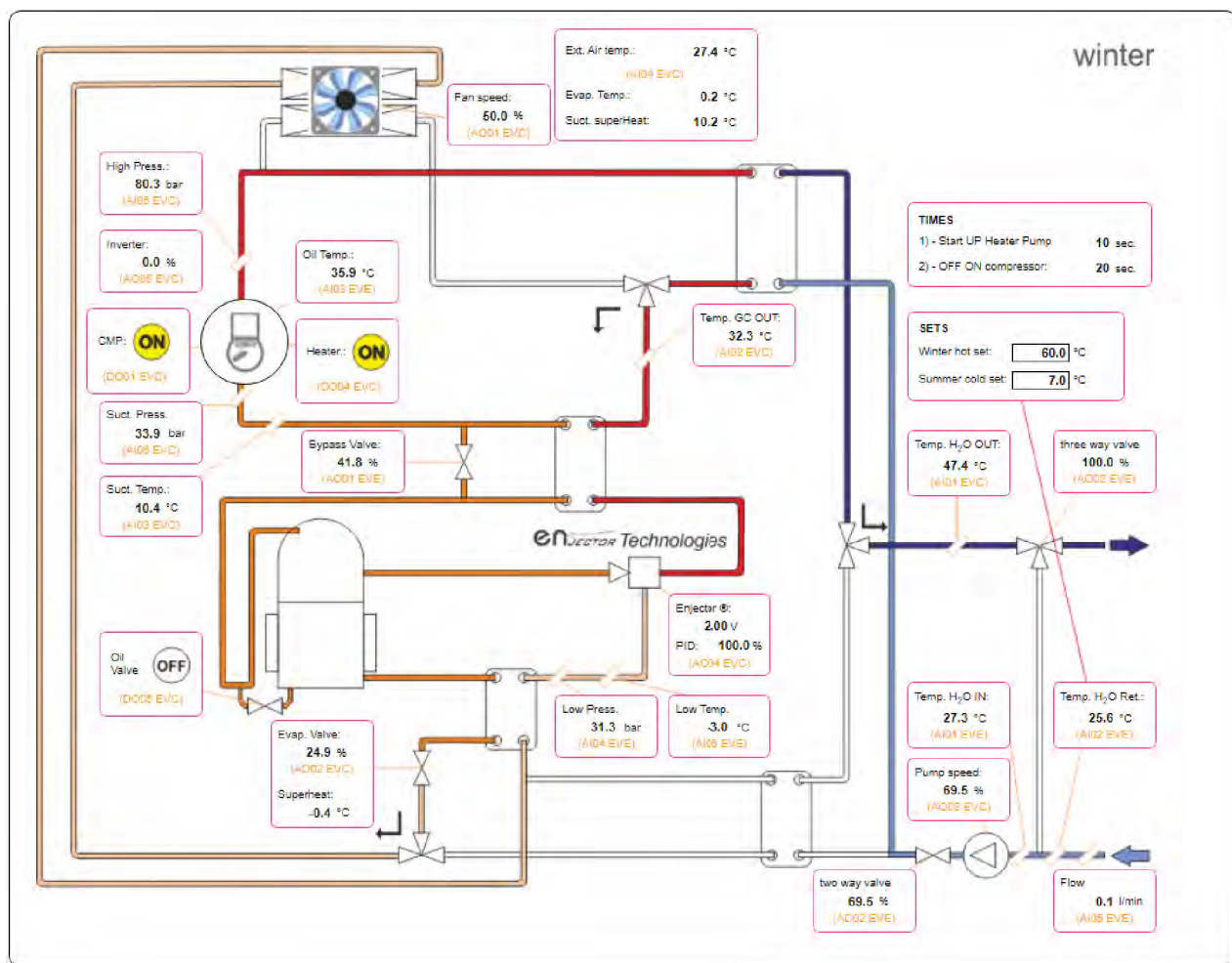


Figura 10- Schermata pagina di controllo Pompa di Calore con eiettori ENEX

Per la gestione delle condizioni dell'aria, è stato impiegato il software di gestione della camera climatica WinKratos. Tale software consente l'impostazione di un profilo giornaliero di temperatura, che poi è automaticamente eseguito (Figura 11). Riguardo il controllo delle condizioni dell'aria, si rileva che, anche in questo caso, nelle fasi di accensione e spegnimento della PdC, la perturbazione sulla temperatura dell'aria rispetto al set-point può essere cospicua, nonostante la trasmissione di un segnale di on/off dalla PdC al PLC della camera climatica. In Figura 12 sono mostrate queste perturbazioni: mentre quelle nella fase di spegnimento della PdC non provocano ovviamente alcun effetto sulle prestazioni energetiche, la perturbazione in accensione (peraltro ridotta temporalmente, si ricorda che il sistema di acquisizione ENEA registra un dato al secondo) fa lavorare la PdC in una condizione più penalizzante nella sua fase d'avvio. Per limitare tale perturbazione, si è lavorato all'impostazione dei parametri PID del controllore della camera climatica, che sono stati adeguati anche a seguito dell'installazione di un gruppo frigorifero di maggiore potenza rispetto a quello precedentemente installato.

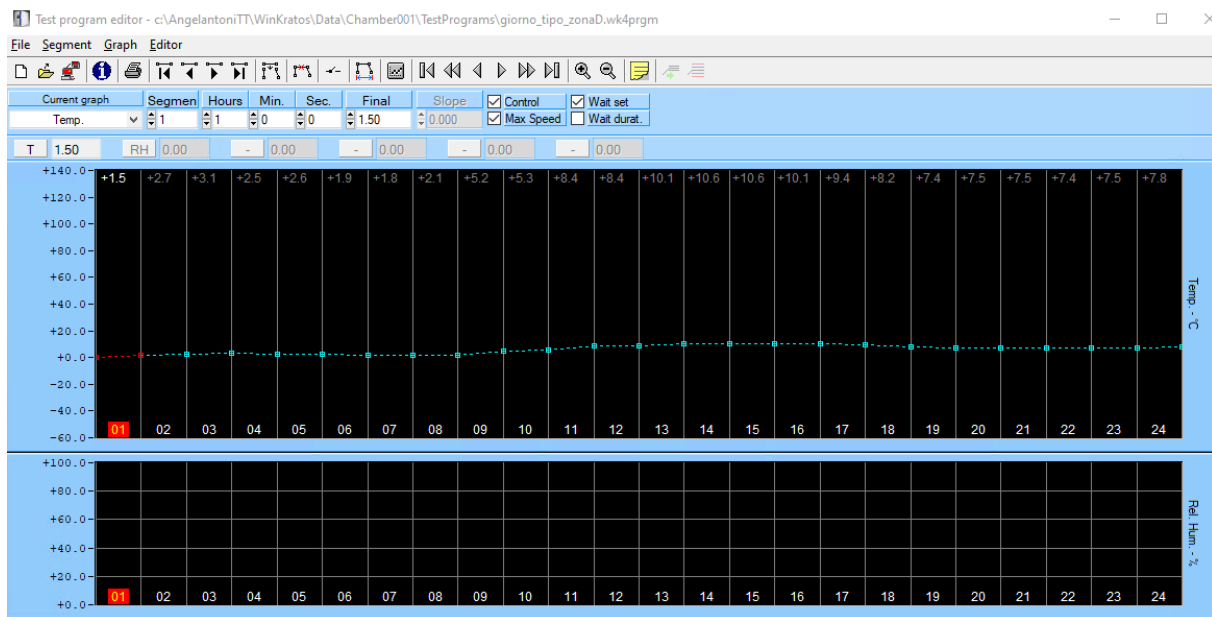


Figura 11 - Schermata pagina Software WinKratos® per il set della temperatura giornaliera

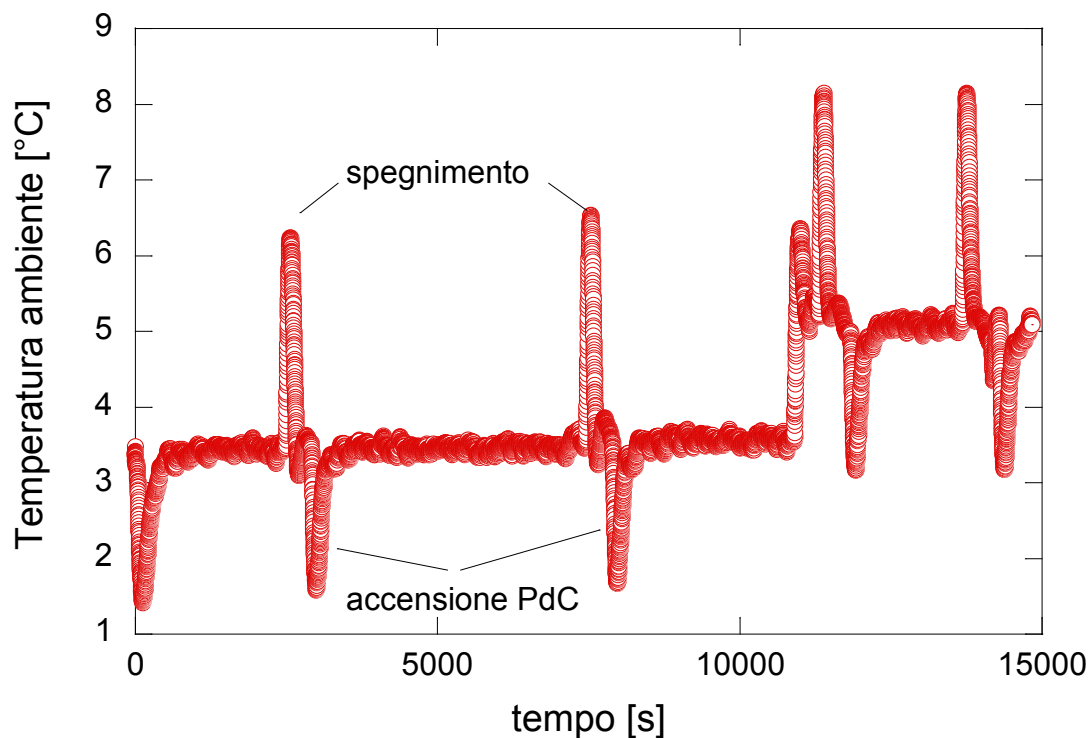


Figura 12 - Perturbazioni della temperatura ambiente rispetto al set-point nelle fasi di accensione e spegnimento delle PdC, test zona D, ore 6-10

2.1.6 Matrice di prova

Sono stati condotti una serie di test per la simulazione del funzionamento dinamico della PdC in modalità riscaldamento in corrispondenza delle zone climatiche D ed E. Erano inizialmente previsti anche dei test per la zona climatica F, ma si è preferito approfondire lo studio delle due zone climatiche più popolate in Italia, testando anche una diversa distribuzione del carico termico per la zona climatica E.

Tutti i test prevedono simulazioni di utenze dotate di terminali a pavimento, con temperature di esercizio dell'impianto termico nel range 35-30 °C. La temperatura di produzione dell'acqua da parte della pompa di calore è stata impostata, a seconda dei test, a 45°C o a 60°C. La temperatura di ritorno dall'impianto, in

questo tipo di test, si colloca naturalmente intorno a 30 °C. I vari test differiscono anche per la velocità dei fan della PdC, la frequenza del compressore, l'impostazione della valvola di evaporazione e del numero di eiettori attivi.

Per quanto riguarda la zona climatica D, si ricorda che è stata operata la scelta di erogare l'energia richiesta nell'arco di 12 ore, in tre blocchi da quattro (Figura 3). Sono stati condotti i test riassunti in tabella 1, tutti con velocità dei fan pari al 50% del massimo:

Tabella 1 – Test dinamici eseguiti per la simulazione della zona climatica D

Fascia oraria	Temperatura di prod acqua da PdC: 45 °C	Temperatura di prod acqua da PdC: 60 °C
	Freq compressore [Hz]	Freq compressore [Hz]
6-10	50	50
6-10	40	40
12-16	40	50
18-22	40	50
18-22		0

Per quanto riguarda i test di simulazione della zona climatica E, si è aggiunto un ulteriore parametro di test: Oltre alla distribuzione di potenza su 14 ore di Figura 5, sono stati eseguiti anche dei test comparativi con distribuzione di potenza su 12 ore. La tabella seguente riporta i diversi valori di distribuzione di potenza nel tempo nelle due ipotesi, calcolate secondo il procedimento sopra esposto:

Tabella 2 - Possibili distribuzioni di potenza per la zona climatica E

orario	Temperatura esterna [°C]	Potenza [kW] (distribuzione su 14 ore)	Potenza [kW] (distribuzione su 12 ore)
00÷01	0,1	0	0
01÷02	-0,65	0	0
02÷03	-1,55	0	0
03÷04	-1,68	0	0
04÷05	-2,35	0	0
05÷06	-2,13	7,40	0
06÷07	-1,65	7,20	8,66
07÷08	-1,85	7,28	8,76
08÷09	-1,48	7,13	8,58
09÷10	-0,98	6,93	8,33
10÷11	2,08	0	0
11÷12	4,58	0	0
12÷13	6,80	3,75	4,52
13÷14	7,20	3,59	4,32
14÷15	7,85	3,33	4,00
15÷16	7,73	3,38	4,06
16÷17	6,88	0	0
17÷18	4,35	0	0
18÷19	2,60	5,47	6,58
19÷20	1,63	5,87	7,05
20÷21	1,18	6,05	7,27
21÷22	1,10	6,08	7,31
22÷23	1,30	6,00	0
23÷24	-0,1	0	0

Alla luce di quest'ulteriore parametro e della necessità in certi casi di erogare una potenza maggiore, che ha portato alla opportunità di testare anche situazioni con velocità dei fan al 100%, i test per la zona climatica E sono classificabili secondo le tabelle seguenti (in alcuni casi, per esigenze di sperimentazione e laddove i risultati di comparazione sembravano palesemente evidenti) sono stati eseguiti test su blocchi orari più brevi di quelli riportati in tabella 2):

Tabella 3 – Test dinamici eseguiti per la simulazione della zona climatica E, potenza su 14 ore

Fascia oraria	Temperatura di prod acqua da PdC: 45 °C		Temperatura di prod acqua da PdC: 60 °C	
	Freq compressore [Hz]	Velocità fan [%]	Freq compressore [Hz]	Velocità fan [%]
5-10 (5-7*)	50	50	50*	50*
5-10 (5-7*)	50	100	50*	100*
5-10 (5-7*)	50*	50*		
12-16	50	50		
12-16	40	50		
18-23 (18-22)	40	50		

Tabella 4 – Test dinamici eseguiti per la simulazione della zona climatica E, potenza su 12 ore

Fascia oraria	Temperatura di prod acqua da PdC: 45 °C		Temperatura di prod acqua da PdC: 60 °C	
	Freq compressore [Hz]	Velocità fan [%]	Freq compressore [Hz]	Velocità fan [%]
6-10			50	50
12-16			variabile	50
18-22	50	50	variabile	50
18-22	40	50		

2.1.7 Analisi dei risultati delle simulazioni dinamiche della zona climatica D

La zona climatica D comprende un importante raggruppamento di popolazione e di comuni italiani, in termini quantitativi. Infatti, secondo varie fonti bibliografiche [2], la popolazione italiana in tale zona climatica ammonta a circa 14993000 abitanti, corrispondenti a circa il 24,7% della popolazione totale, residenti in circa 1576 comuni.

Da test preliminari, è risultato che la pompa di calore a CO₂ testata, di potenza termica nominale di 30 kW, può essere utilizzata da 4 utenze contemporaneamente. Quindi le potenze richieste dalle utenze saranno quadruplicate rispetto ai valori indicati in figura 3.

2.1.7.1 Test della fascia oraria 6-10

I primi test sono stati condotti per la fascia oraria 6-10. Sono stati condotti 4 test, due con temperatura di produzione dell'acqua a 60 °C (uno con inverter compressore a 50 Hz e l'altro con inverter compressore a 40Hz) e due a 45 °C (con gli stessi settaggi per la frequenza del compressore. Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature ambientali comprese tra 3,5°C (praticamente costante nelle prime tre ore) e 5,2°C. Di conseguenza, i carichi termici richiesti subiscono poche variazioni nell'arco della giornata, rimanendo compresi nel range 5,07-5,84 kW. La corrispondente energia termica richiesta, considerando 4 utenze, è di 23,36kWh nella prima e nella seconda ora, di 23,24 nella terza ora e di 20,28 nella quarta ora, per un totale di 94,24kWh (Figura 13). Data la potenza nominale della PdC di 30kW, si prevedono tempi di spegnimento orari dell'ordine di 12 minuti circa.

Test con Temperatura produzione acqua 60 °C, inverter compressore 50Hz, Fan 50%

La Figura 13 mostra l'andamento dell'energia prodotta e richiesta dall'utenza durante le quattro ore di funzionamento (pari a 14400 secondi). Mentre l'andamento dell'energia richiesta è praticamente lineare, con leggero decremento della pendenza nell'ultima ora, il trend dell'energia prodotta è caratterizzato dagli spegnimenti e successive riaccensioni della PdC. In particolare la PdC ha avuto sette spegnimenti nelle quattro ore di funzionamento di questo blocco orario_utenza su 12 ore.

La temperatura dell'acqua prodotta dalla PdC, nonostante sia stato fissato il set point a 60 °C si è attestata intorno a 52 °C – 54 °C nelle fasi di funzionamento stazionarie. (Figura 14).

La temperatura di ingresso in PdC, che simula la temperatura di ritorno dall'impianto di riscaldamento e che quindi dipende, nel nostro apparato sperimentale, dalle condizioni di lavoro del circuito secondario dell'HiL, si è attestata, alla stabilizzazione, a valori compresi tra 28 e 29 °C, come atteso e come mostrato in Figura 15. Da questa figura si rileva anche che in certe fasi di funzionamento, la temperatura in questione assume valori molto elevati, intorno a 36-39 °C, con punte fino a 41°C. Tali oscillazioni sono da addebitarsi a ritardo di rilevazione della variazione di temperatura da parte delle sonde PT100 installate, che provocano un ritardo nell'azione dei PID che controllano la portata del secondario. Si ribadisce che tale problematica può presentarsi anche in un impianto reale, se lo strumento di misura della temperatura non ha un tempo di risposta idoneo. Poiché i picchi di temperatura si presentano all'avvio della PdC, si potrebbe pensare di avviare la pompa di circolazione contestualmente alla PdC facendole erogare una portata sufficientemente elevata. Questa possibilità ha due inconvenienti: da un lato si introduce un consumo elettrico aggiuntivo (dal momento che si avvia la pompa di circolazione con portata maggiore e quindi consumi più elevati) e dall'altra si ritarda il raggiungimento di condizioni di comfort, perché si induce l'erogazione di un flusso d'acqua ad temperatura minore di 35 °C, necessaria per operare correttamente un impianto di riscaldamento con pannelli radianti.

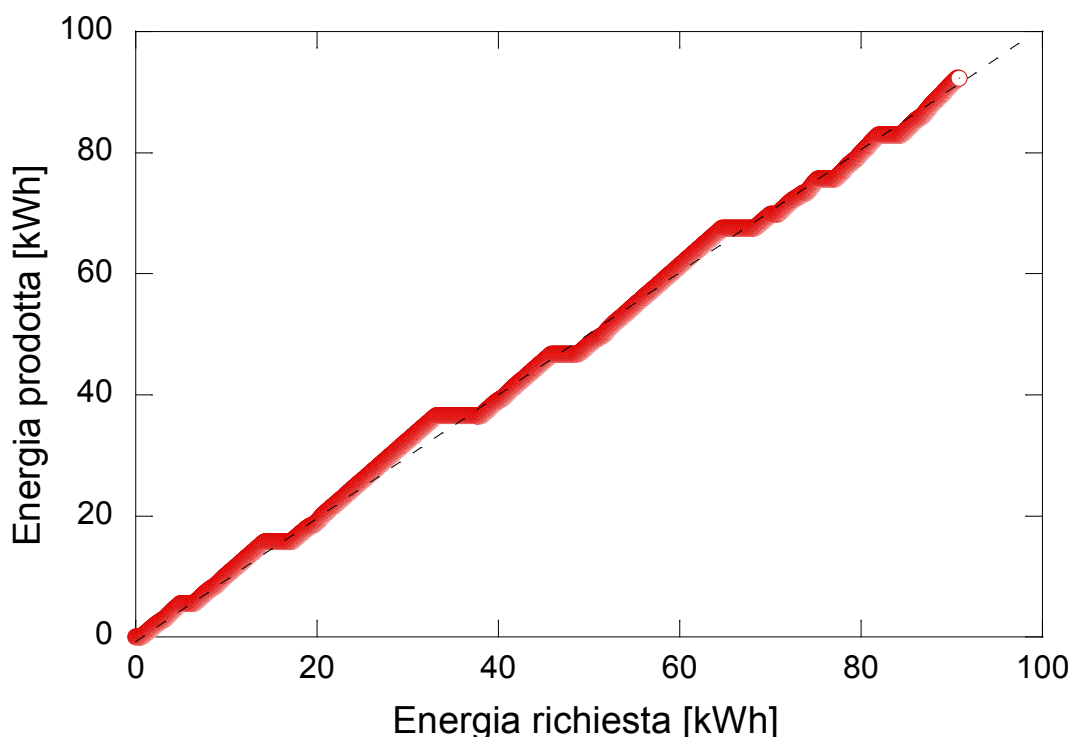
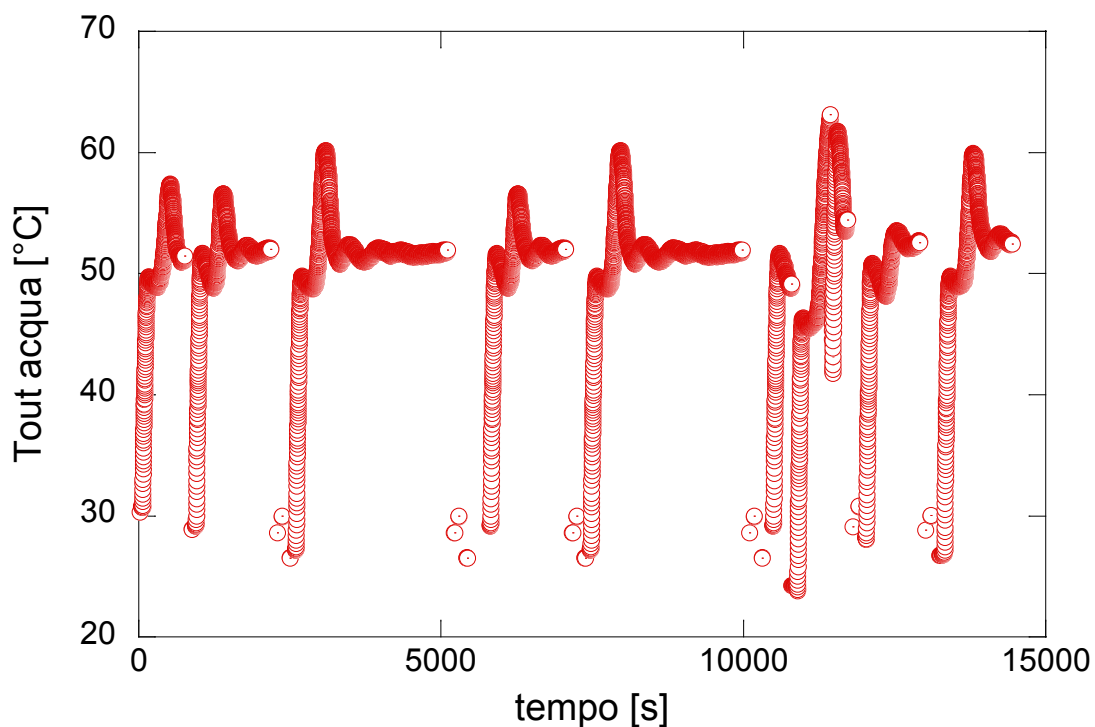


Figura 13 - Energie, richieste e prodotte (test zona D, ore6-10, Tout acqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)



**Figura 14– Temperatura effettiva acqua uscita vs tempo,
(test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)**

I picchi di temperatura dell'acqua avvengono in corrispondenza della variazione di portata d'acqua elaborata dalla pompa di circolazione sul secondario che influisce anche sulla portata erogata dalla pompa a bordo macchina, con la quale il controllore dedicato, oltre a controllare la temperatura di set-point, cerca di controllare anche il ΔT tra ingresso e uscita.

Gli incrementi di velocità della pompa di circolazione del primario provocano un incremento della potenza elettrica assorbita dalla macchina (Figura 16).

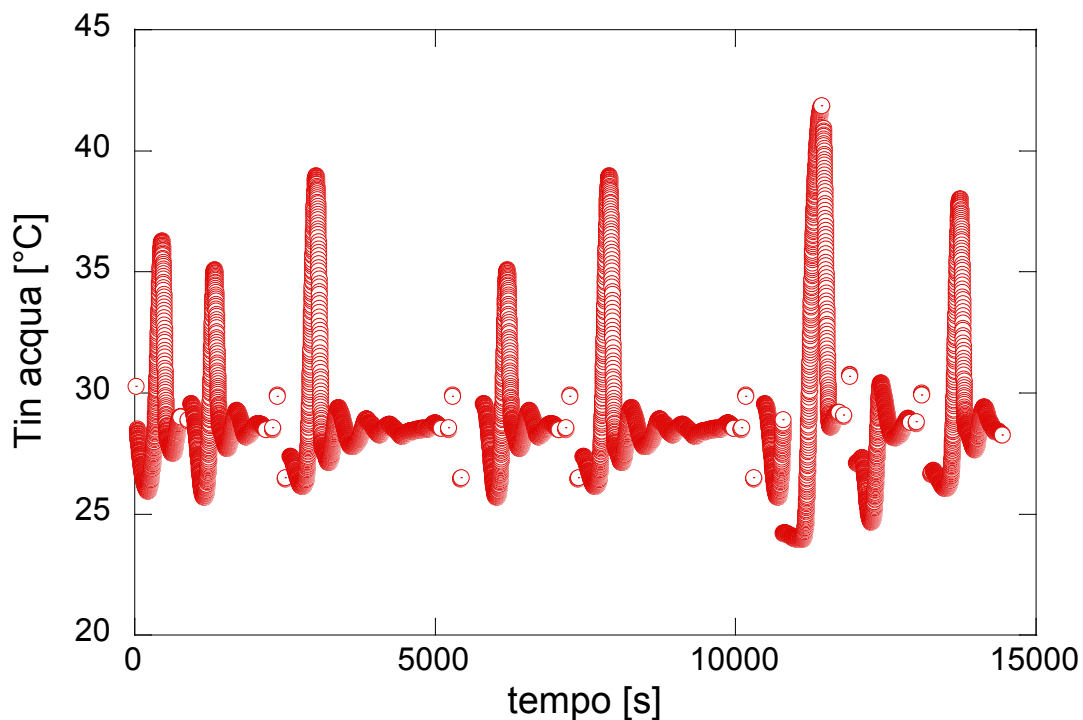


Figura 15 – Temperatura ingresso PdC vs tempo (test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

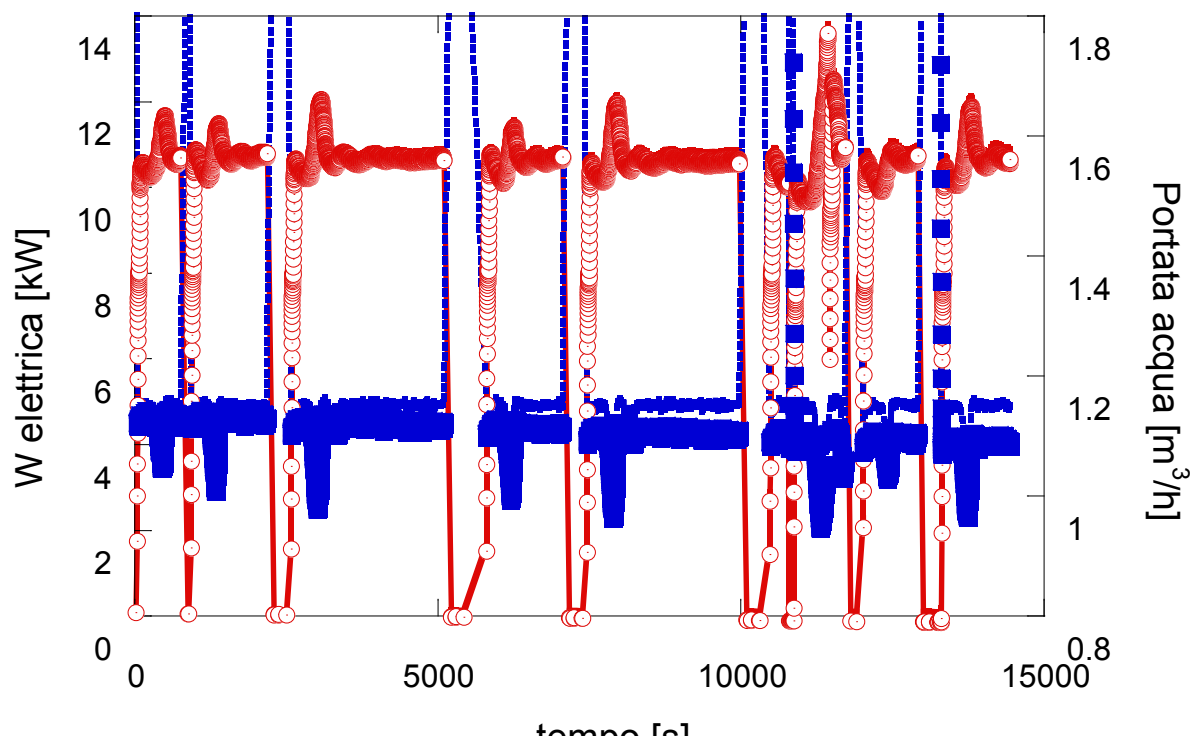


Figura 16– Potenza elettrica e Portata acqua vs tempo
(test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

Ciò si ripercuote sul COP della macchina, che, nelle fasi stazionarie, si è attestato in valori compresi tra 2.8 e 3. Nelle fasi di avviamento, in corrispondenza delle fluttuazioni di portata d'acqua, subisce invece delle forti escursioni, scendendo anche sotto il 2 (Figura 17).

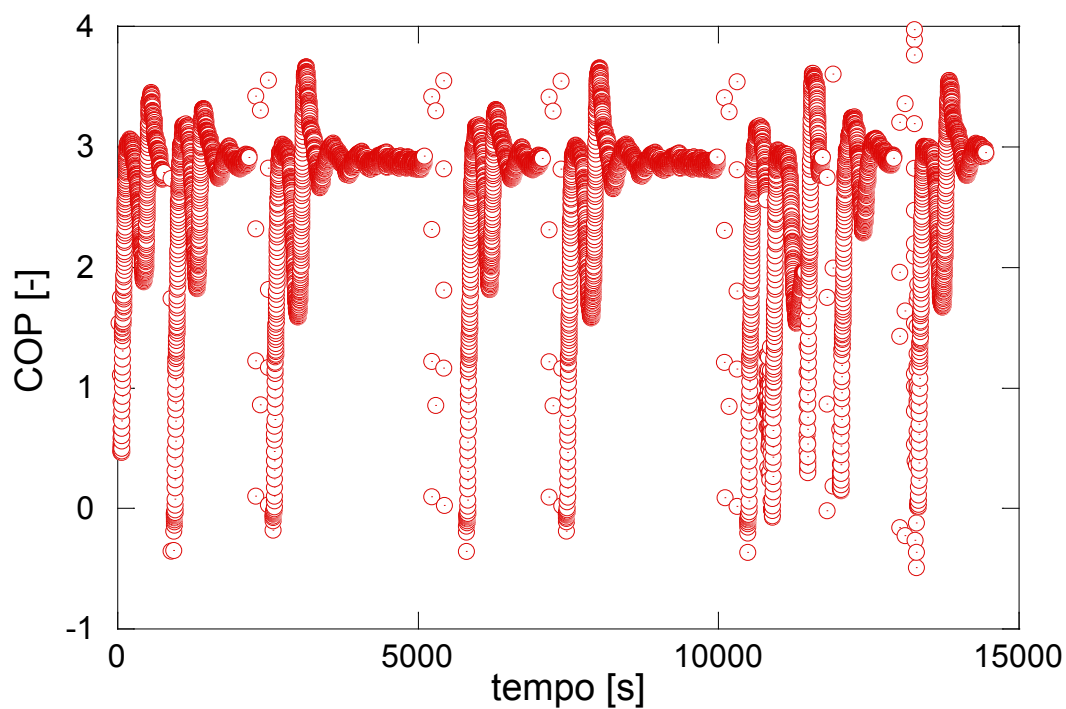


Figura 17 – COP vs tempo, test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

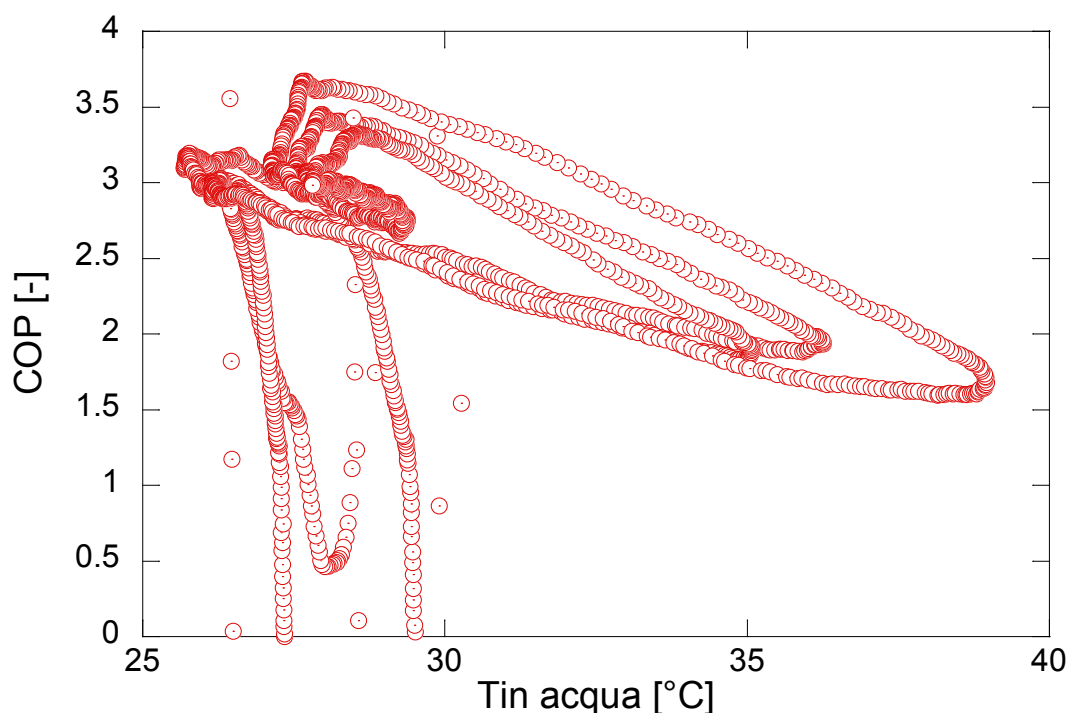


Figura 18 – COP vs Tin acqua, test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50% (prima ora)

A questo proposito, sin da ora si rileva, che in particolar modo per la macchina in prova, a CO₂ (temperatura critica del refrigerante pari a 30.98 °C), è di fondamentale importanza lavorare con una temperatura dell'acqua in ingresso più bassa possibile. Nelle condizioni di esercizio qui indagate, tale temperatura non dovrebbe essere superiore a 30°C, in virtù delle condizioni di erogazione all'utenza e della configurazione d'impianto (per la quale la temperatura di ritorno in macchina non può essere superiore alla temperatura di ritorno dai terminali, qui fissata, a regime, a 30°C).

Nelle fasi transitorie si verifica invece quanto riportato in Figura 18, che si riferisce alla prima ora di funzionamento della PdC. La temperatura dell'acqua in ingresso PdC raggiunge valori anche dell'ordine dei 38°C, con corrispondenti valori di COP ampiamente sotto 2. In questo grafico le oscillazioni verso alte temperature sono tre perché, nella prima ora, si hanno tre avviamenti (oltre a quella d'avviamento iniziale, ve ne sono altri due, a metà circa dell'ora e a fine ora, quando l'energia richiesta torna ad essere superiore della quantità x rispetto a quella prodotta). Dalla medesima figura si può anche notare che, nelle fasi di funzionamento pseudo-stazionarie, il COP si attesta, come detto, tra 2.8 e 3, con i valori più alti corrispondenti alla temperatura dell'acqua di 26÷28 °C.

In termini energetici, globalmente il valore di prestazione registrato, nel tempo, calcolato in termini di energia prodotta in rapporto all'energia elettrica assorbita, indicato qui e nel seguito come ECOP, è mostrato nella Figura 19. Si rileva una modesta riduzione di tale indicatore nell'ultima parte del test, in virtù di alcune instabilità di funzionamento del sistema a PdC.

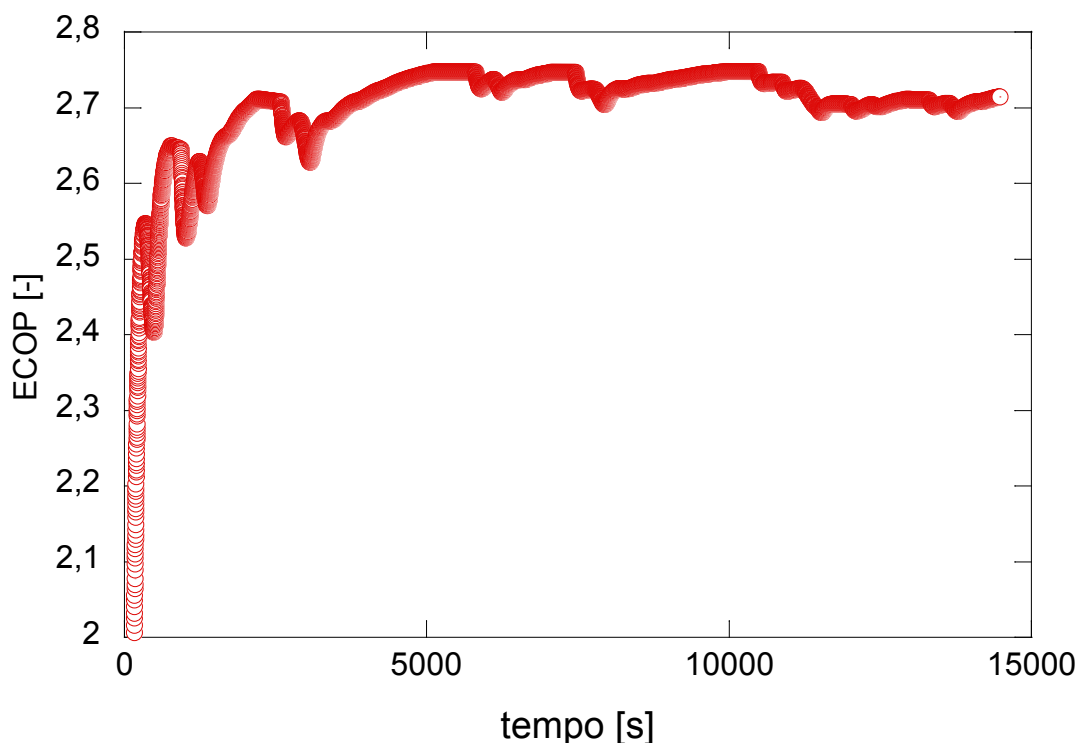


Figura 19 – COP medio vs Tin acqua, test zona D, ore 6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

In sintesi, la tabella seguente riporta i valori di ECOP riscontrati ora per ora durante il test in esame. L'ultimo dato si riferisce all'ECOP nel momento del pareggio di energia termica prodotta rispetto alla richiesta nel blocco orario in esame, evenienza che può accadere entro o anche oltre il termine della quarta ora (in tal caso, per il raggiungimento del pareggio energetico si tiene accesa la PdC anche oltre il termine dell'ultima ora del blocco, laddove la richiesta energetica dell'utenza sarebbe nulla).

Tabella 5 – Prestazioni PdC durante il blocco orario 6-10 in zona D, T acqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	23,74	23,01	23,04	22,06	90,24
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	8,8	8,21	8,49	8,30	33,25
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,7	2,80	2,71	2,65	2,71

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 50Hz, Fan 50%

Di seguito si riportano i risultati del test con temperatura di produzione dell'acqua di 45 °C, inizialmente eseguito con inverter del compressore a 50 Hz e fan al 50%. La scelta di ridurre la temperatura di esercizio è stata fatta per ridurre sia le oscillazioni di portata sia le pressioni (e i rapporti di compressione di esercizio), mantenendo comunque un adeguato salto termico tra ingresso e uscita, per non penalizzare eccessivamente le prestazioni della pompa di calore a CO₂.

La Figura 20 mostra l'andamento dell'energia prodotta dalla pompa di calore durante le quattro ore di funzionamento, rimanendo l'energia richiesta ovviamente corrispondente a quella del test precedente. Il numero degli spegnimenti e delle successive riaccensioni è rimasto invariato a 7 rispetto al test precedente. Per quanto riguarda la temperatura dell'acqua prodotta dalla pdC, anche in questo test, nonostante il set point a 60 °C, essa si è attestata intorno ai 50 °C nelle fasi di funzionamento stazionarie. (Figura 21).

La temperatura di ingresso in PdC, è risultata meno stabile rispetto alla prova precedente, con oscillazioni medie comprese tra 25°C e 35°C. (Figura 22).

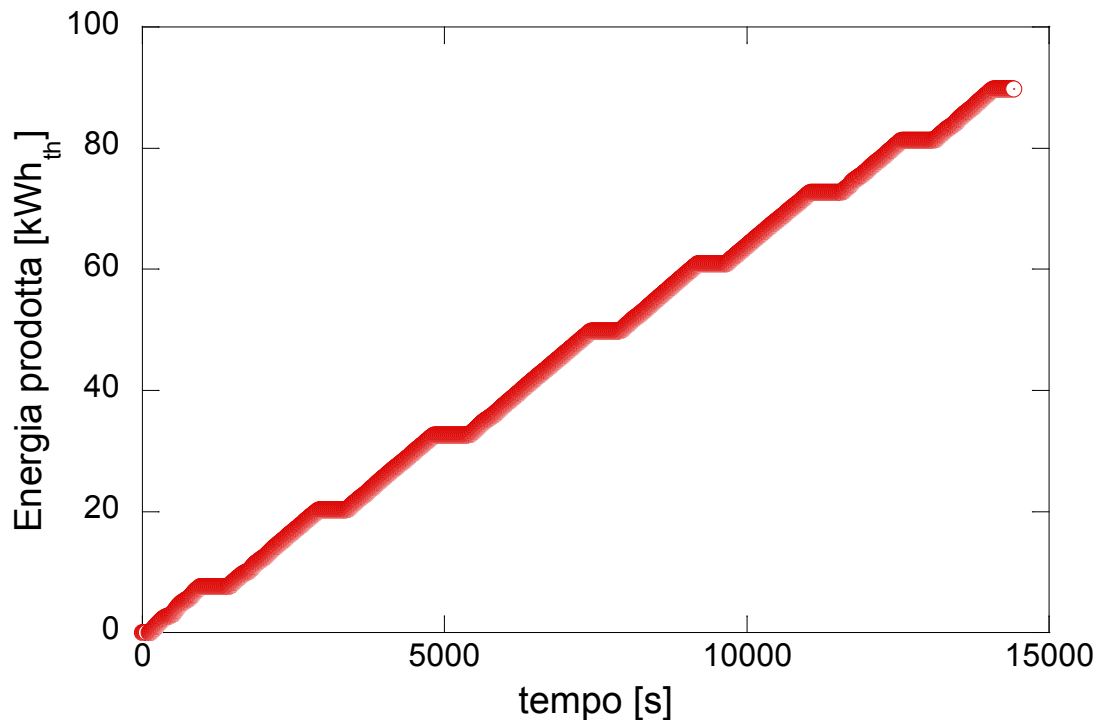


Figura 20- Energia prodotta (test zona D, ore6-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

I picchi di temperatura sono dovuti alle considerevoli escursioni di portata d'acqua, che, contrariamente a quanto atteso, oscillano tra valori prossimi a zero a circa 8,5 m³/h, rispetto ad un valore medio di circa 3,7 m³/h, L'assorbimento elettrico, tuttavia, non subisce le medesime escursioni, mantenendosi più stabile rispetto al test precedente (Figura 23).

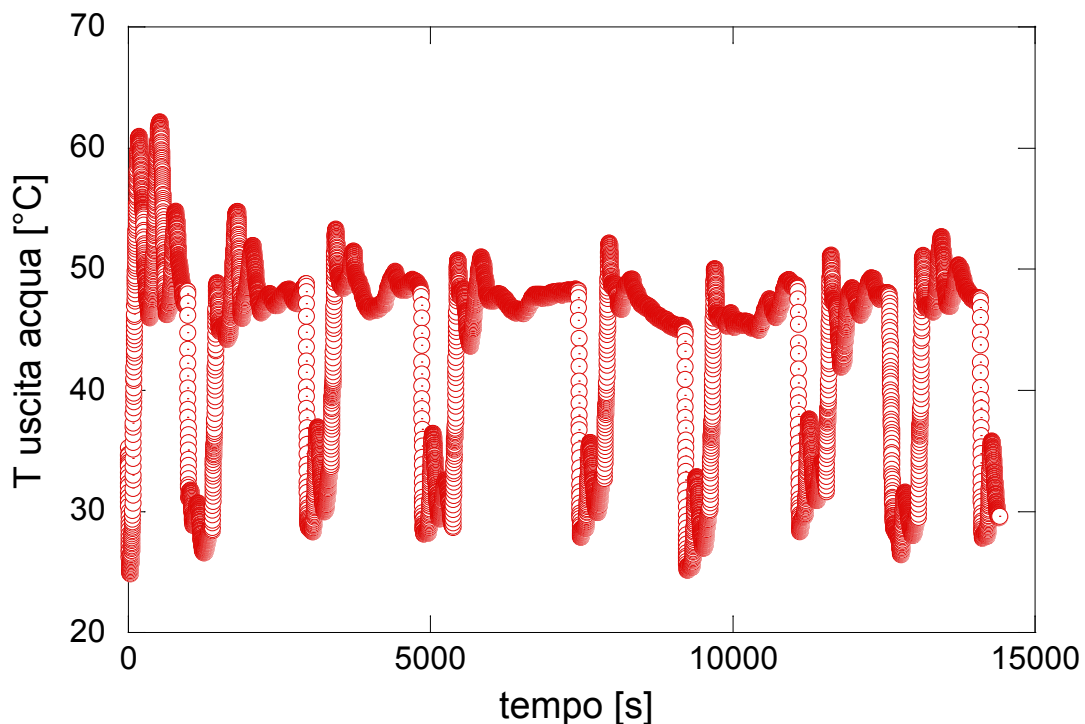


Figura 21 – Temperatura effettiva acqua vs tempo, (test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

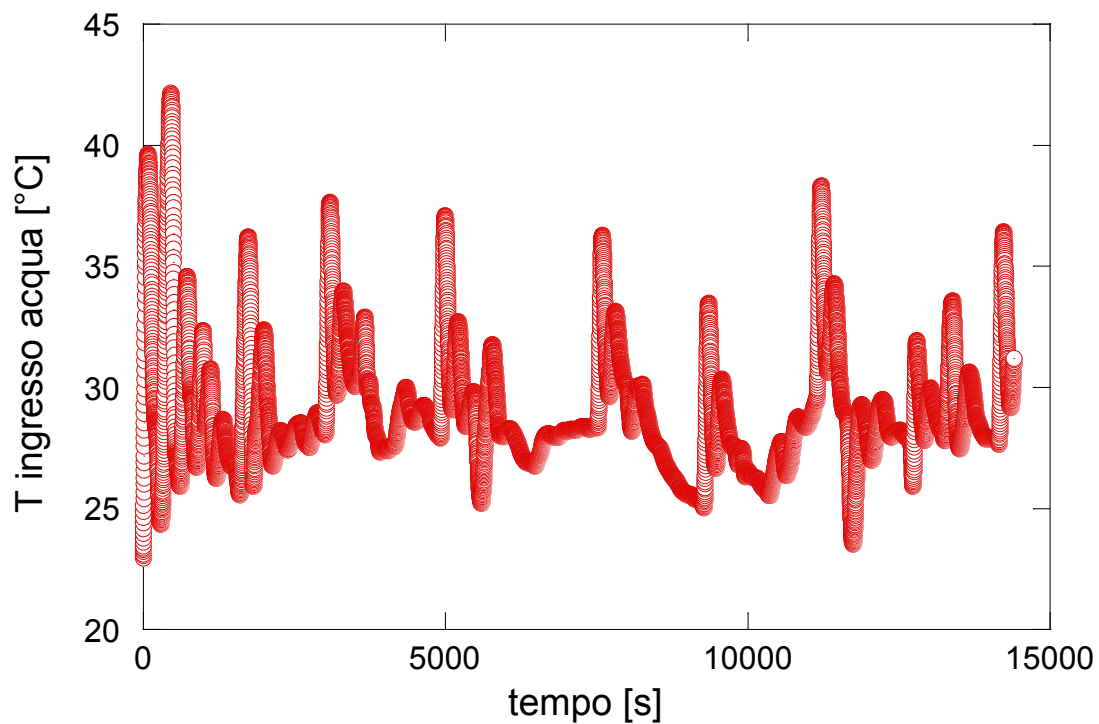


Figura 22 – Temperatura ingresso PdC vs tempo, (test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

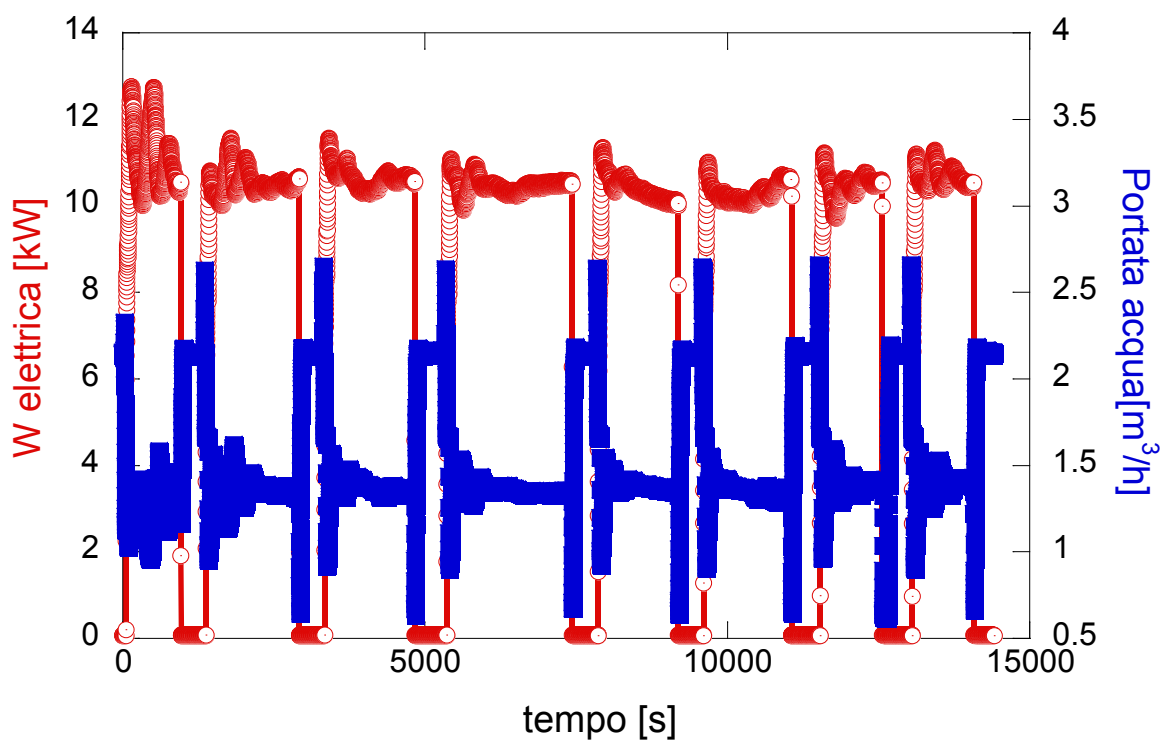


Figura 23 – Potenza elettrica e Portata acqua vs tempo
(test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

In termini di prestazioni, il COP rimane sostanzialmente invariato rispetto al test precedente con maggiori oscillazioni dopo l'avviamento per l'evidente ritardo nel giungere ad una condizione di esercizio stazionaria (Figura 24).

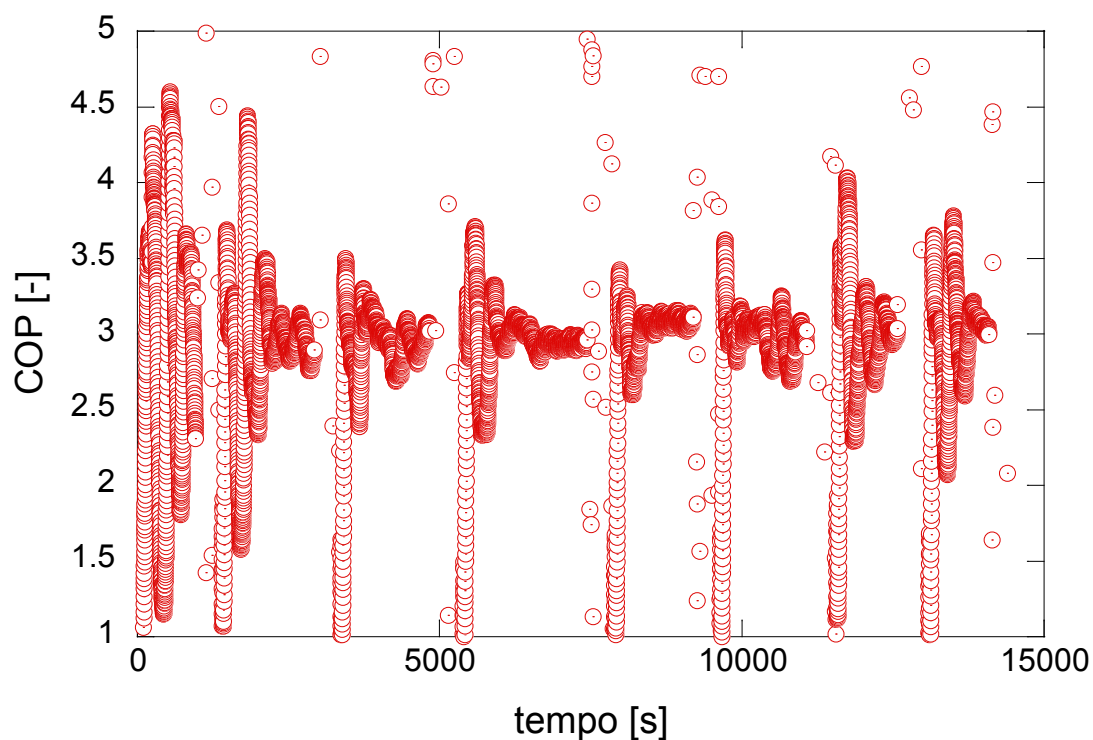


Figura 24 – COP vs tempo, test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

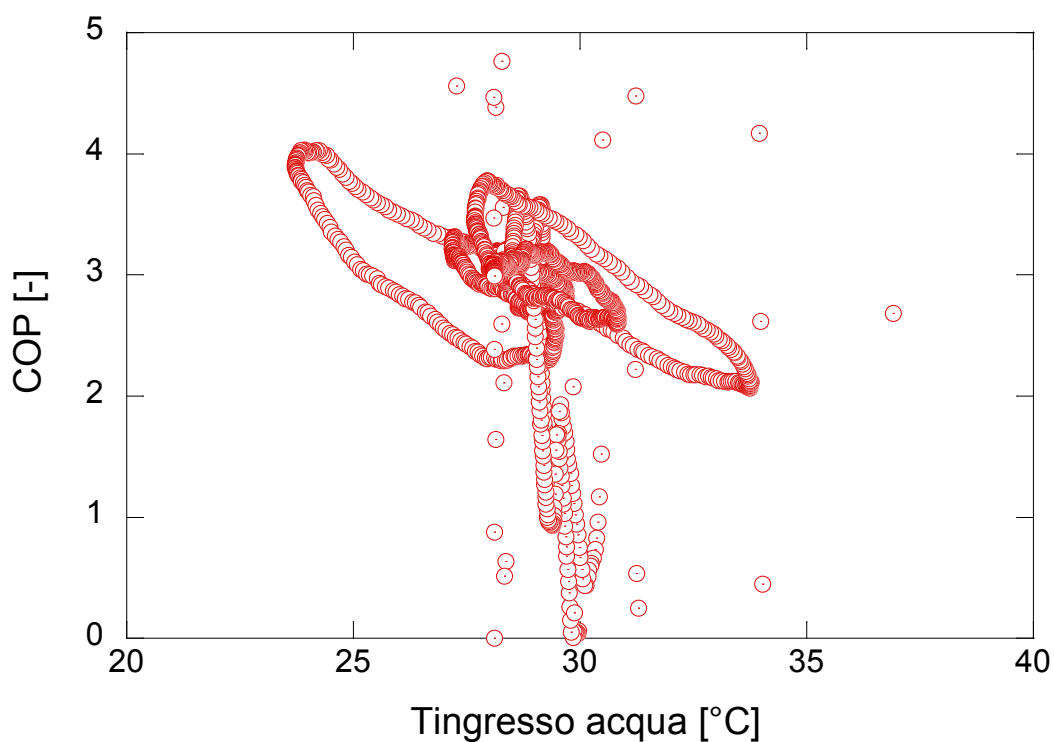


Figura 25 – COP vs Tin acqua, test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50% (quarta ora)

Riguardo l'effetto della temperatura dell'acqua di ritorno in PdC, si riporta, in Figura 25 l'andamento del COP in funzione di questo parametro durante la quarta ora di funzionamento. Essendo l'escursione della temperatura in questione piuttosto elevata (tra 24,5 e 34 °C), appare ancor più evidente la significativa

influenza sul COP: per i valori minori della temperatura dell'acqua in ingresso tende a raggiungere anche valori dell'ordine di 3,8, mentre può avvicinarsi a 2 per temperature dell'acqua in ingresso intorno a 34°C. In termini energetici, globalmente il valore di prestazione registrato ECOP, sopra definito, nel tempo, è mostrato in Figura 26. In questo caso, non si rileva una sua riduzione nella parte finale del test, anche grazie a pressioni di evaporazione leggermente più alte che riducono ulteriormente le eventuali problematiche di brinamento. Si rileva un incremento rispetto al test precedente con valore finale di 2,85 (tabella 6).

Tabella 6 – Prestazioni PdC durante il blocco orario 6-10 in zona D, T acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	22,16	25,70	22,66	19,72	90,24
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	8,01	8,93	7,84	6,89	31,67
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,76	2,88	2,89	2,86	2,85

Si deve sottolineare che, in questo blocco orario, caratterizzato da temperature esterne comprese tra 3,5°C e 5,15 °C, non si rileva alcun decremento di prestazione nel tempo, quindi non si verifica una situazione di possibile brinamento della batteria alettata. Tra l'altro, il ciclo di sbrinamento è impostato per avviarsi se la temperatura di evaporazione si mantiene sotto un certo valore per un dato periodo. Lo spegnimento della PdC al soddisfacimento dell'utenza fa sì che il contatore dell'avvio sbrinamento si azzeri prima di far partire il ciclo, con il risultato che non si avviano cicli di sbrinamento. D'altra parte, la costanza delle prestazioni lascia supporre che, a parte l'implementazione dei tempi di sbrinamento, in queste condizioni di esercizio, la macchina non necessiti di alcuno sbrinamento.

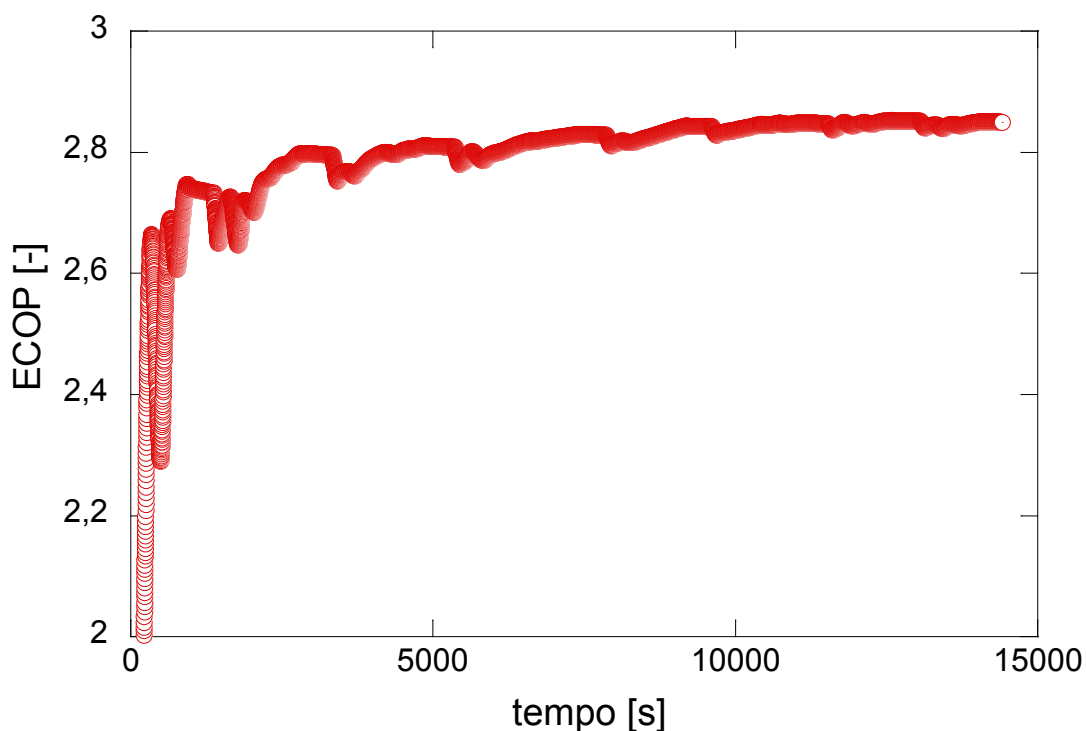


Figura 26– COP medio vs Tin acqua, test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

Test con Temperatura produzione acqua 60 °C, inverter compressore 40Hz, Fan 50%

Sono stati successivamente eseguiti il test con la frequenza del compressore impostata a 40Hz, con l'intenzione di adeguare maggiormente la potenza richiesta dall'utenza e quello prodotta dalla PdC in modo da ridurre le fasi di accensione e spegnimento. Nel primo dei questi test con compressore a 40 Hz è stata impostata una temperatura dell'acqua di 60°C.

La Figura 27 mostra l'andamento dell'energia prodotta dalla pompa di calore durante le quattro ore di funzionamento, che è caratterizzato da solamente tre spegnimenti e successive riaccensioni della PdC.

Per quanto riguarda la temperatura dell'acqua prodotta dalla pdC, anche in questo test, nella prima ora di funzionamento, con il set point a 60 °C, essa si è attestata intorno a 52 °C – 54 °C nelle fasi di funzionamento stazionarie. (Figura 28). Successivamente è stata apportata una modifica alla regolazione PID della pompa di circolazione a bordo macchina. Tale variazione ha provocato un iniziale maggiore oscillazione della temperatura, che in seguito, dopo la fase di "apprendimento" della logica PID, si è ottimamente stabilizzata a valori di poco inferiori a 60 °C.

La temperatura di ingresso in PdC, si è attestata, alla stabilizzazione, a valori compresi tra 27 e 28 °C, come mostrato in Figura 29. In questo caso, non sono state registrate oscillazioni verso temperature superiori a 32 °C (a parte l'avviamento) grazie al miglior controllo della portata di acqua sul primario (Figura 30).

Di conseguenza, a parte la prima ora di funzionamento, si stabilizza anche l'assorbimento elettrico, che si attesta su valori intorno a 8,5 kW, come atteso in virtù della minore velocità di rotazione del compressore (Figura 30).

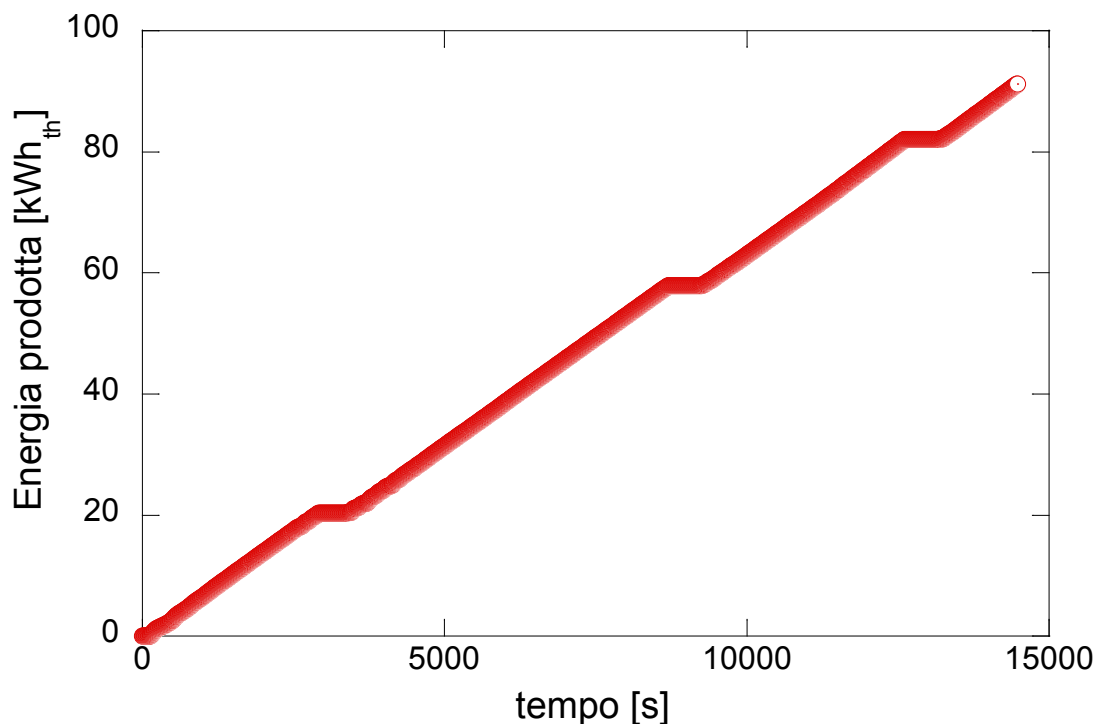


Figura 27 - Energia prodotta (test zona D, ore6-10, Tout acqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

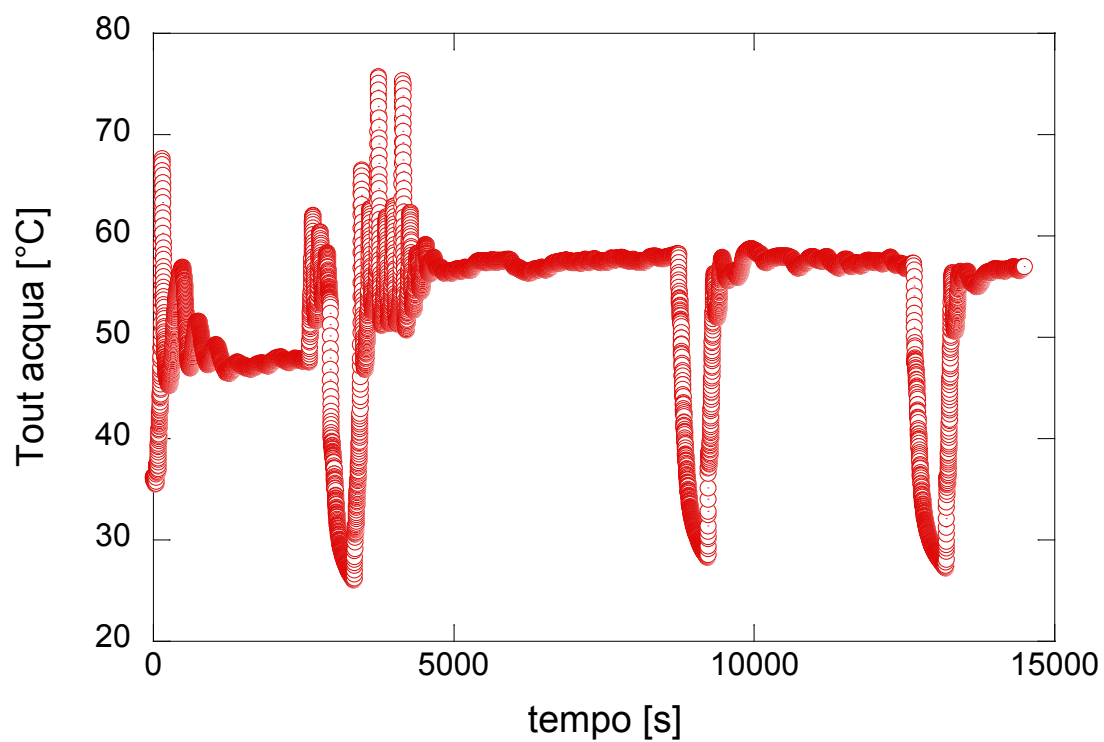


Figura 28 – Temperatura effettiva acqua vs tempo
(test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

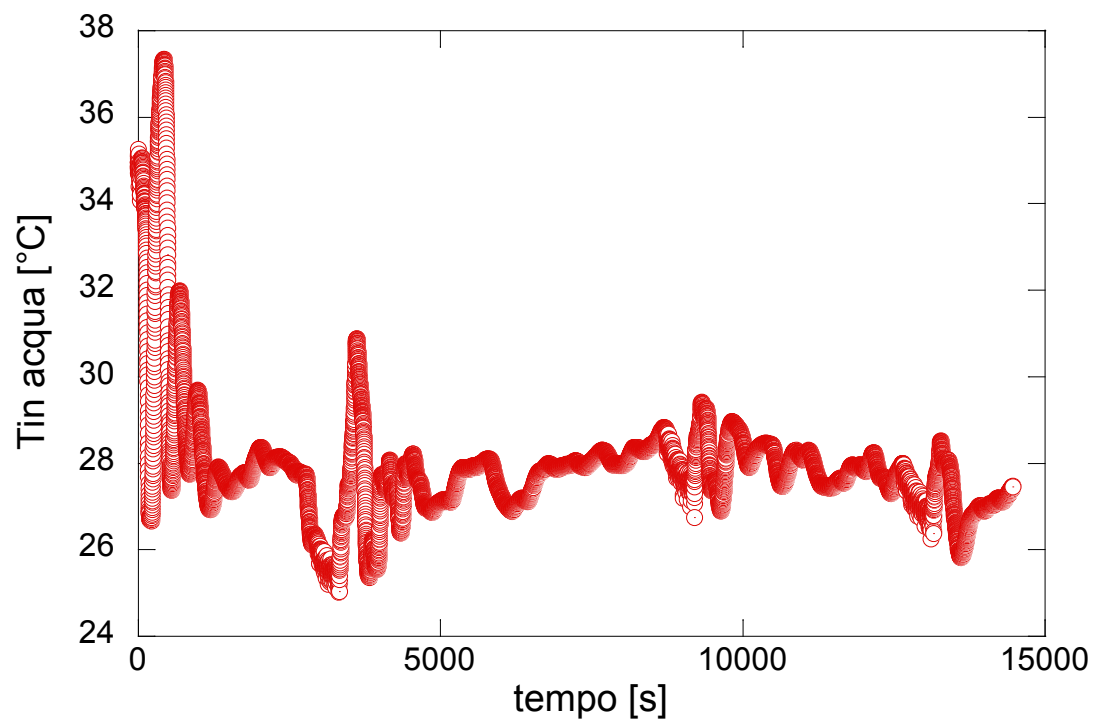


Figura 29– Temperatura ingresso PdC vs tempo, (test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

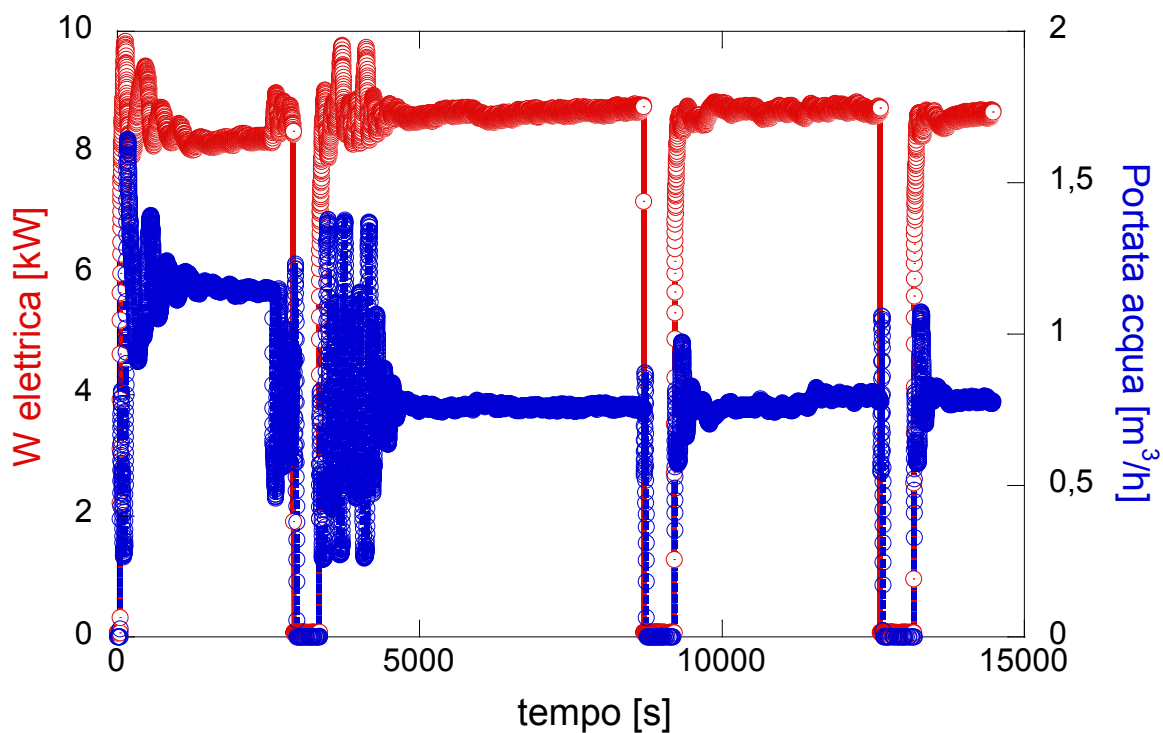


Figura 30 – Potenza elettrica e Portata acqua vs tempo,
(test zona D, ore 6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

In termini di prestazioni, il COP migliora sensibilmente (Figura 31) attestandosi su valori superiori a tre, per la migliore capacità della pompa di calore di raggiungere e mantenere la pressione ottimale di esercizio in uscita compressore.

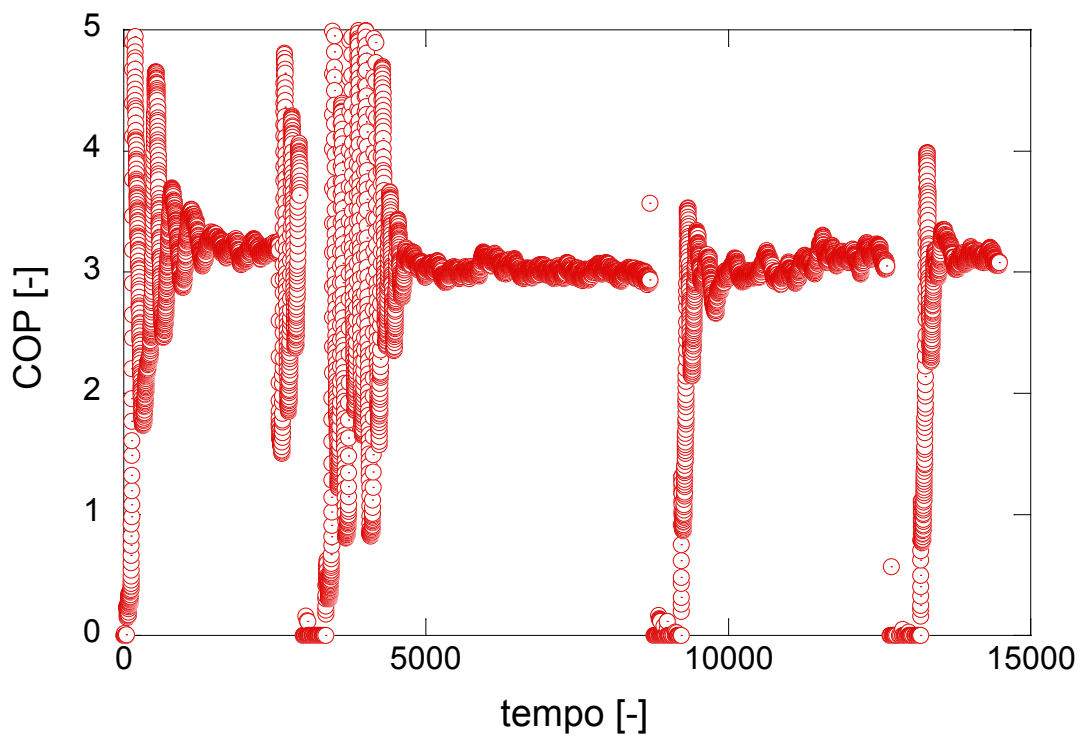


Figura 31 – COP vs tempo, test zona D, ore 6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

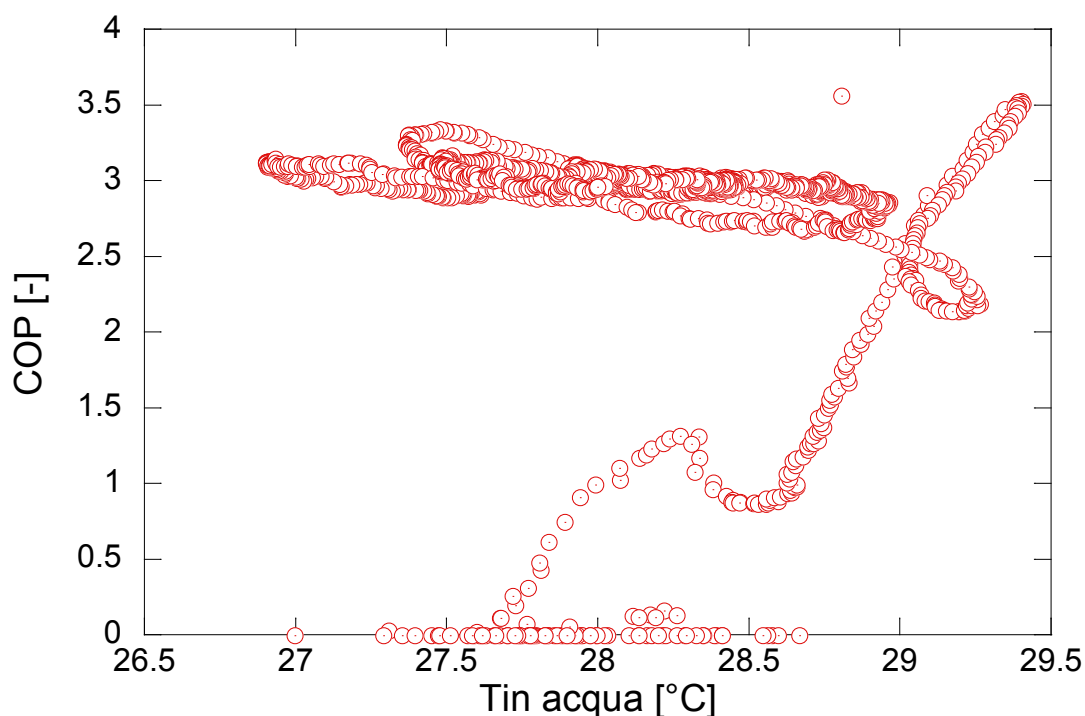


Figura 32 – COP vs Tin acqua, test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50% (terza ora)

Riguardo l'effetto della temperatura dell'acqua di ritorno in PdC, si riporta, in Figura 32 l'andamento del COP in funzione di questo parametro durante la terza ora di funzionamento. Pur essendo l'escursione della temperatura in questione piuttosto contenuta (tra 27 e 29,5 °C), rimane confermata la significativa influenza sul COP che, per i valori minori della temperatura dell'acqua in ingresso, tende a raggiungere anche valori dell'ordine di 3,4, mentre può scendere sotto il 3 per temperature dell'acqua in ingresso intorno a 29°C.

In termini energetici, globalmente il valore di prestazione registrato ECOP, sopra definito, nel tempo, è mostrato in Figura 33. Si rileva un evidente incremento rispetto al test precedente con valore finale poco inferiore a 3 (2,95). In tabella 7 sono riepilogati i valori di ECOP in ogni ora di funzionamento e nell'istante di pareggio termico al termine della prova.

Tabella 7 – Prestazioni PdC durante il blocco orario 6-10 in zona D, T acqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	21,43	25,64	21,49	21,95	90,24
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	7,28	8,64	7,44	7,31	30,60
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,94	2,97	2,88	3,00	2,95

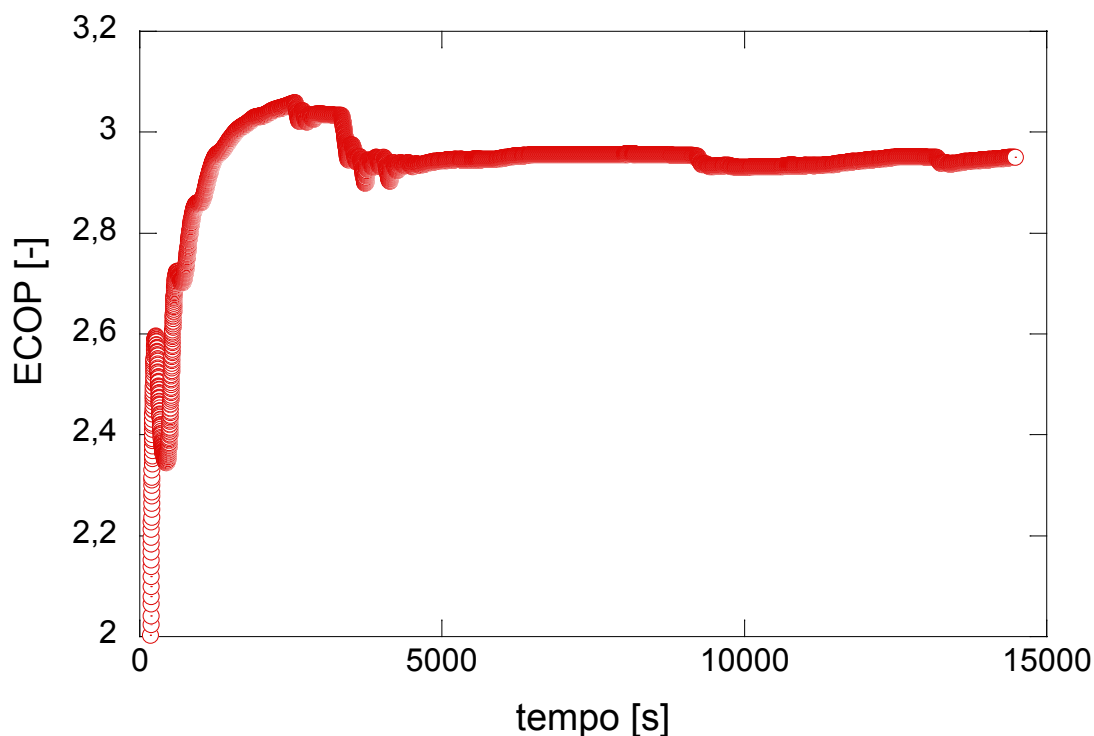


Figura 33 – COP medio vs Tin acqua, test zona D, ore6-10, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 40Hz, Fan 50%

Nel secondo dei test con compressore a 40 Hz è stata impostata una temperatura dell'acqua di 45°C.

La Figura 34 mostra l'andamento dell'energia prodotta dalla pompa di calore durante le quattro ore di funzionamento. Come per il test precedente la Pdc si è spenta in tre occasioni, oltre ad una quarta, a fine ciclo, quando la pompa di calore ha già completato il soddisfacimento dell'utenza. Quest'ultima evenienza evidenzia che la macchina ha erogato una potenza mediamente maggiore rispetto al caso precedente, tanto da poter usufruire di uno spegnimento aggiuntivo.

Per quanto riguarda la temperatura dell'acqua prodotta dalla pdC, essa si è attestata intorno al valore di set-point, con marcate oscillazioni solo nelle fasi di avviamento (Figura 35). Da questa figura è evidente come il quarto periodo di accensione della PdC sia stato considerevolmente più breve dei precedenti, in virtù di una temperatura dell'aria esterna maggiore (5,1 °C contro 3,5 °C circa delle fasi precedenti) che consente una maggiore produzione termica.

E' inoltre evidente, da questa figura, come dalla successiva Figura 36, come l'ottimizzazione dei parametri PID della pompa di circolazione a bordo macchina e sul secondario riducano i tempi di stabilizzazione delle temperature.

Come conferma, anche in questo caso a parte la prima ora di funzionamento, si stabilizza sia la portata (Figura 37) sia l'assorbimento elettrico, che si attesta su valori poco superiori a 8 kW (Figura 38).

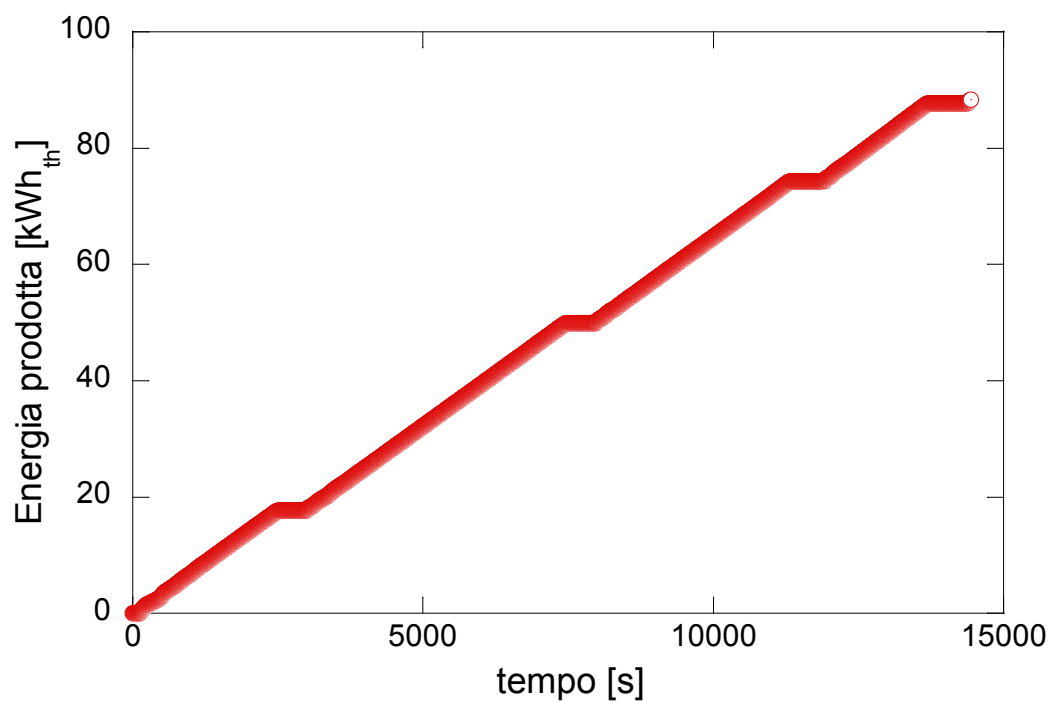


Figura 34 - Energia prodotta (test zona D, ore6-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

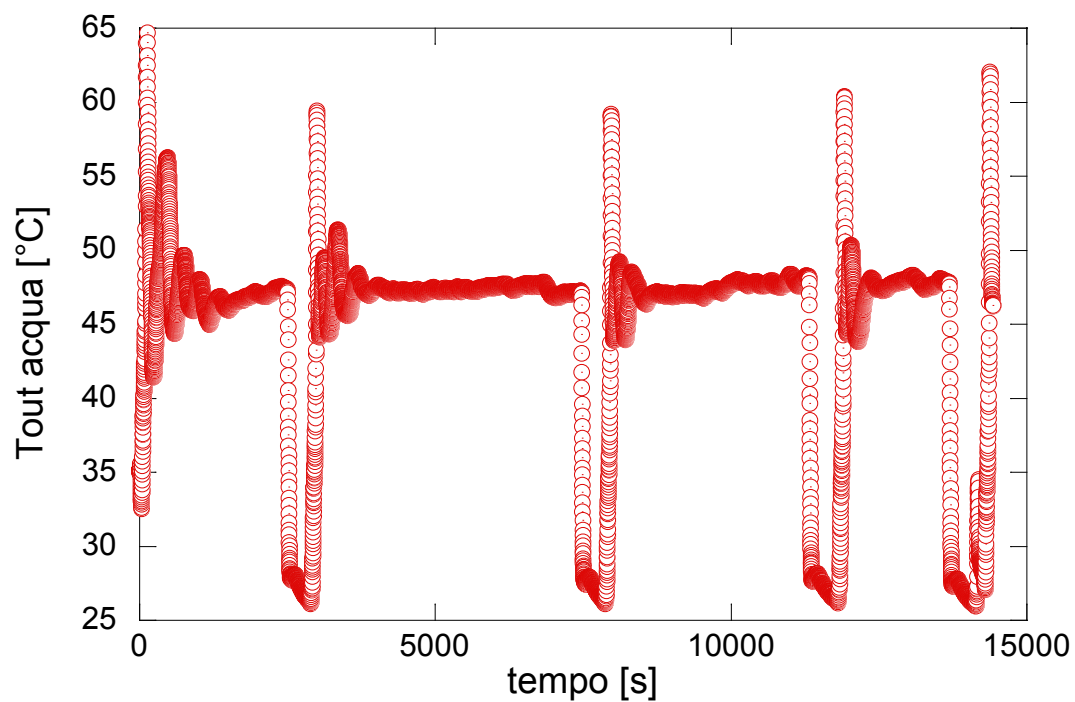


Figura 35 – Temperatura effettiva acqua vs tempo,
(test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

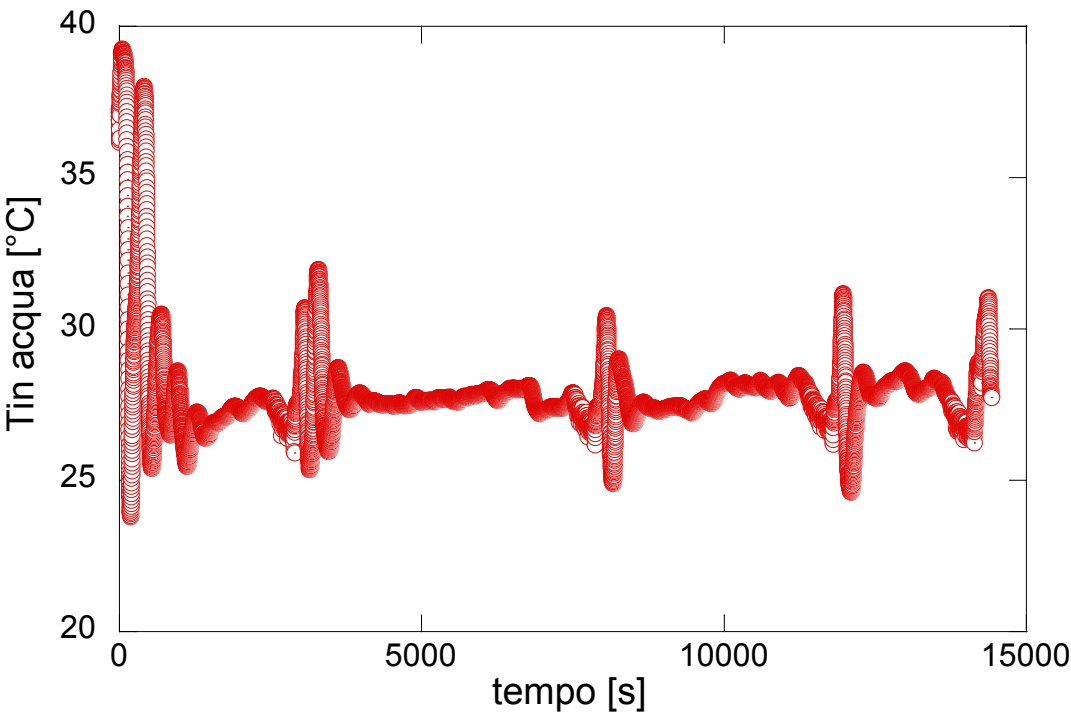


Figura 36– Temperatura ingresso PdC vs tempo, (test zona D, ore6-10, Tacqua 45°C, Inverter 40Hz, fan 50%)

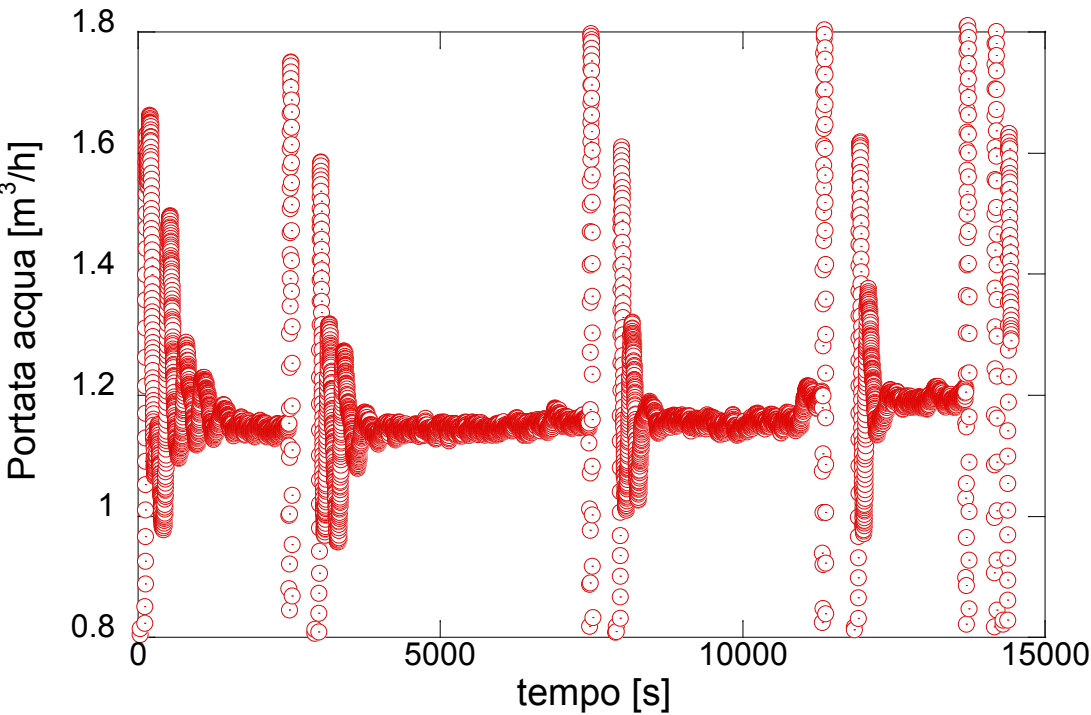


Figura 37 – Portata acqua vs tempo, test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

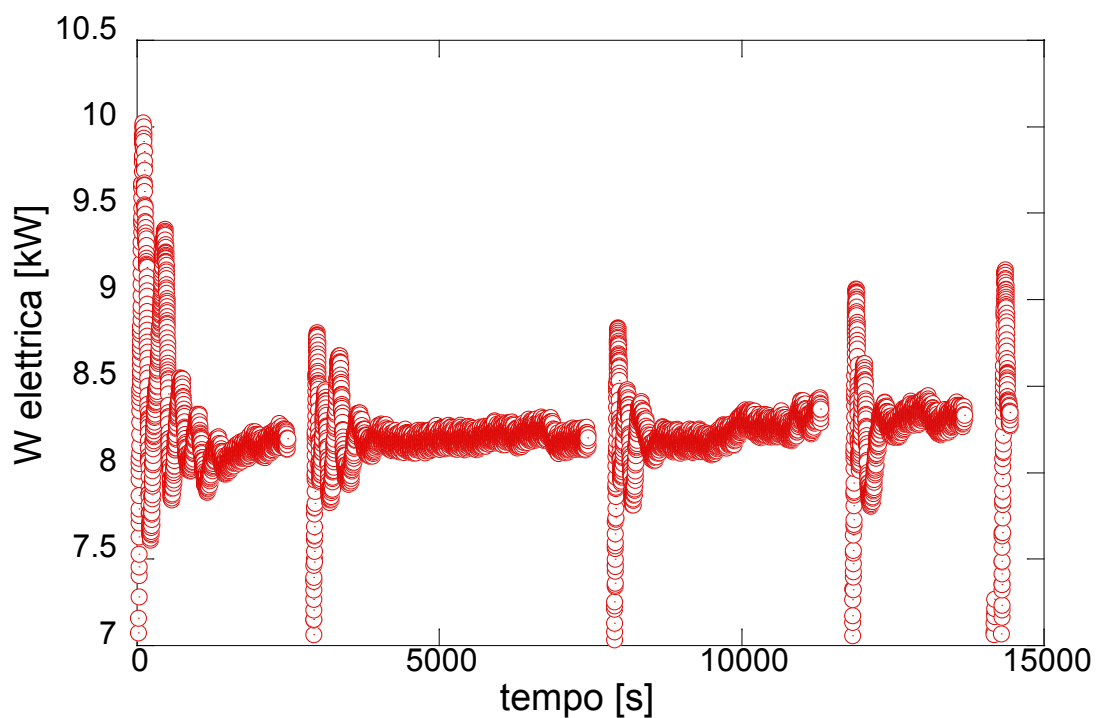


Figura 38 – Potenza elettrica vs tempo, test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

In termini di prestazioni, il COP migliora ancora rispetto al test precedente (Figura 39) attestandosi su valori superiori a 3,1.

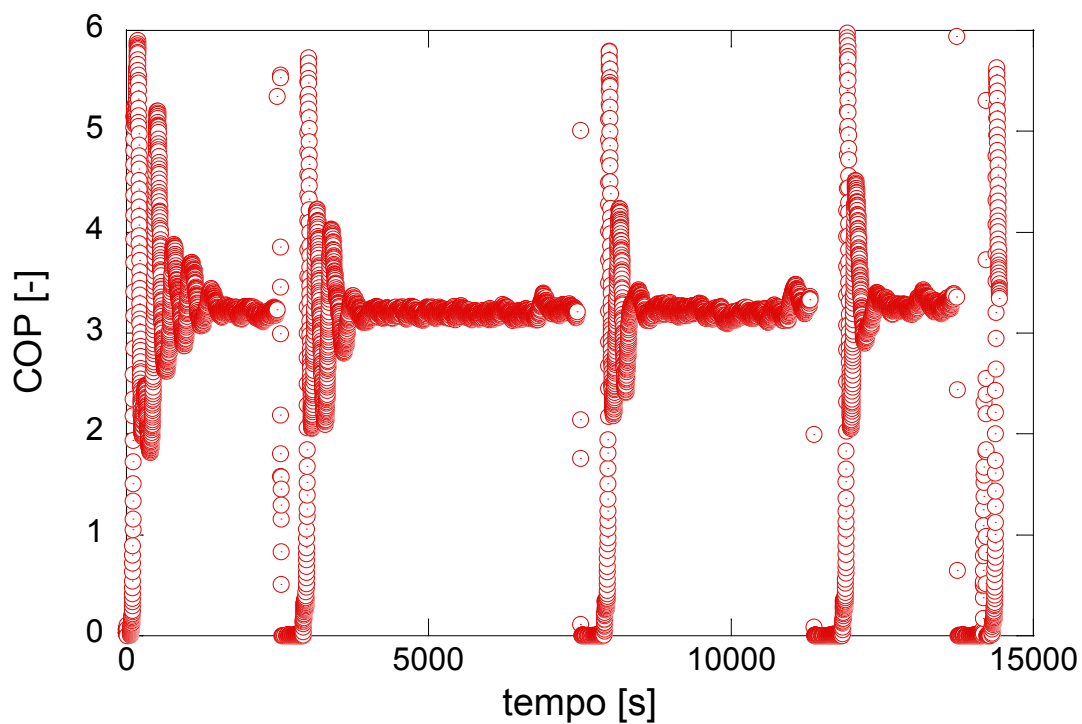


Figura 39 – COP vs tempo, test zona D, ore6-10, Tacqua 45°C, Inverter 40Hz, fan 50%

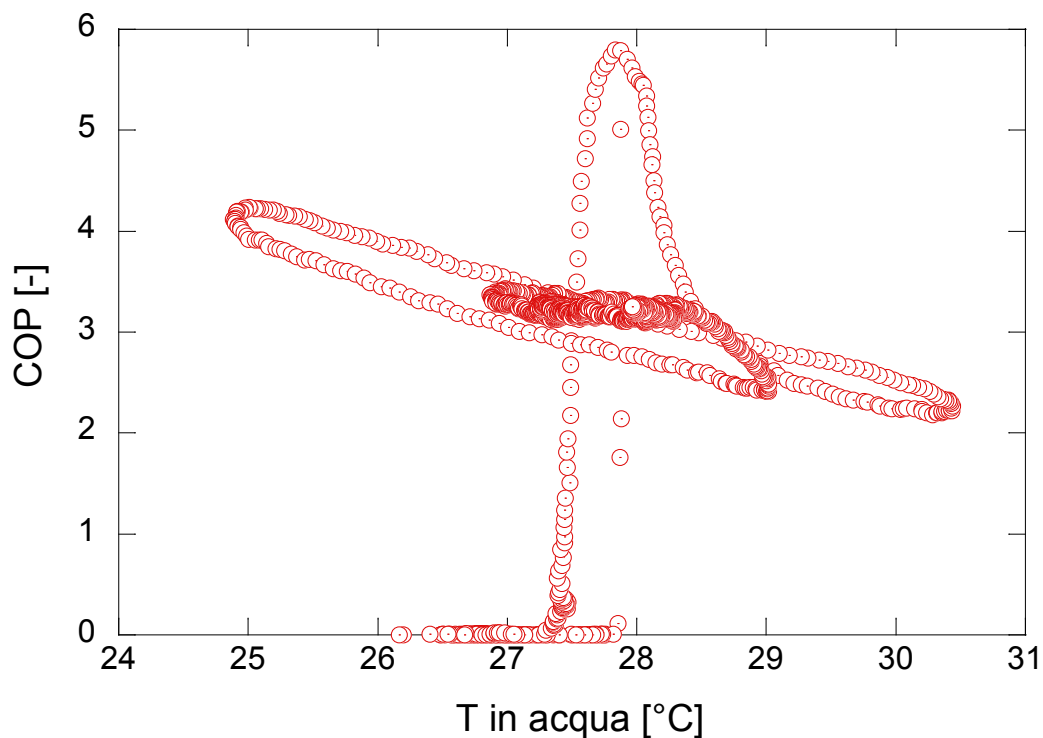


Figura 40 – COP vs Tin acqua, test zona D, ore6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50% (terza ora)

L'effetto della temperatura dell'acqua di ritorno in PdC è ancora evidente in Figura 40. Soprattutto nella fase di stabilizzazione, il COP varia tra 2 e 4,2 in funzione di questo parametro durante la terza ora di funzionamento.

In termini energetici, globalmente il valore di prestazione registrato ECOP, sopra definito, nel tempo, è mostrato in Figura 41. Si rileva un evidente incremento rispetto al test precedente con valore superiore a 3 (3,10) al termine della quarta ora. In tabella 7 sono riepilogati i valori di ECOP in ogni ora di funzionamento e nell'istante di pareggio termico al termine della prova.

Tabella 8 – Prestazioni PdC durante il blocco orario 6-10 in zona D, T acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	22,09	25,92	22,44	17,52	90,24
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	7,26	8,18	7,22	5,76	29,04
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	3,04	3,16	3,11	3,04	3.11

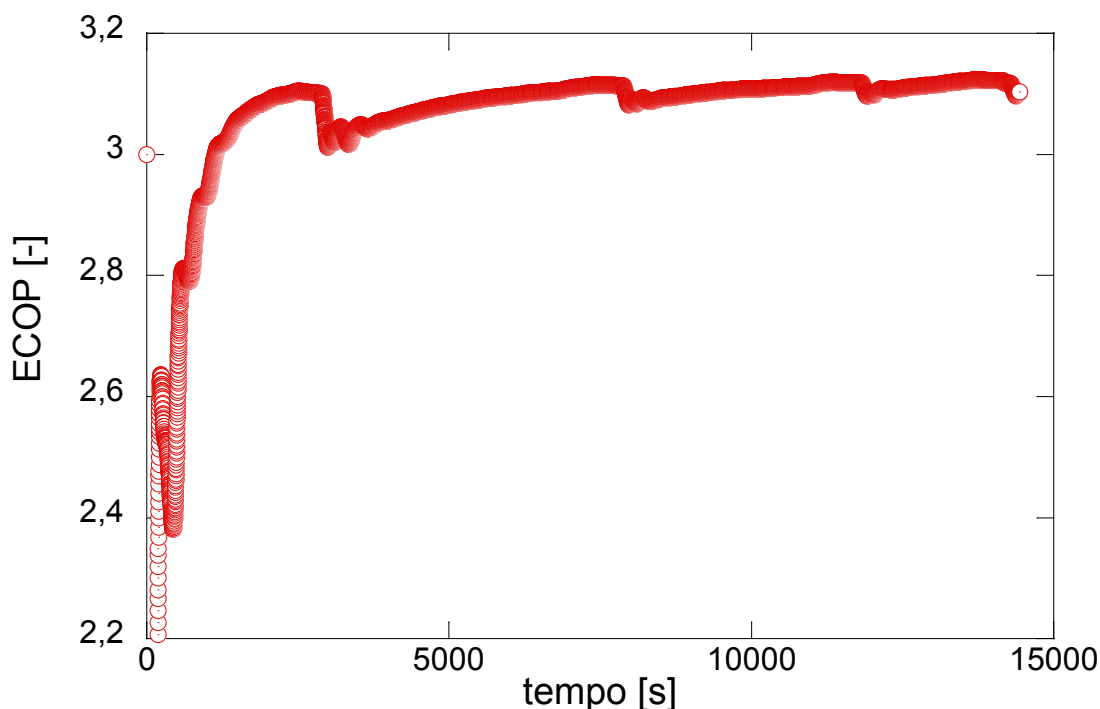


Figura 41 – COP medio vs T_{in} acqua, test zona D, ore 6-10, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

In conclusione di questa analisi dei test relativi alla simulazione del blocco orario mattutino della zona climatica D, si rileva che si è ottenuto un considerevole incremento dell'ECOP, di circa il 14,8%, ottimizzando due aspetti:

- le modalità di lavoro della pompa di calore, adeguando il più possibile la produzione termica alla richiesta dell'utenza (riducendo la frequenza di lavoro del compressore), in modo da minimizzare le fasi transitorie. A questo proposito si ricorda che la frequenza minima testata di 40 Hz è quella consigliata dal costruttore;
- la regolazione dei parametri PID delle logiche di controllo delle pompe di circolazione del primario e del secondario; tale aspetto può avere un impatto determinante anche nell'esercizio di un impianto reale e una eventuale cattiva messa a punto può causare le problematiche di oscillazione delle temperature con conseguenti cali di rendimento. Tali oscillazioni dipendono ovviamente dall'impianto effettivo e la simulazione sperimentale su apparato HiL può darne una indicazione qualitativa, più che quantitativa. Quest'ultima deve essere demandata ad una accurata modellazione dell'utenza e dell'apparato di trasmissione termica reale.

2.1.7.2 Test della fascia oraria 12-16

Per la valutazione dinamica delle prestazioni della pompa di calore in questa fascia oraria, sono stati eseguiti due test, uno con temperatura di produzione di 60 °C con inverter a 50 Hz e fan a 50% della velocità (test di riferimento per consentire una comparazione con l'analogo test del blocco orario mattutino) ed un secondo test con temperatura dell'acqua di 45 °C con inverter a 40 Hz e fan al 50%. Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature ambientali piuttosto elevate, comprese tra 10,3 e 11,1 °C, per cui i carichi termici attesi sono piuttosto modesti. Infatti la potenza richiesta dall'utenza, secondo le stime effettuate con la procedura sopra esposta, è compresa nel range 2,29-2,66 kW. La corrispondente energia termica richiesta, considerando 4 utenze, è di 10,64 kWh nella prima ora, di 9,92 kWh nella seconda ora, di 9,16 kWh nella terza e di 9,6 kWh nell'ultima ora di questo blocco, per un totale di 39,3 kWh (Figura 42). Data la potenza nominale della PdC di 30kW, si prevedono tempi di spegnimento di circa 40 minuti per ora. In ogni caso, per evitare erogazioni continue e situazioni di

discomfort per l'utente, ci si attende un elevato numero di spegnimenti e riaccensioni, per cui è fondamentale ottimizzare le fasi di transitorio per massimizzare le prestazioni.

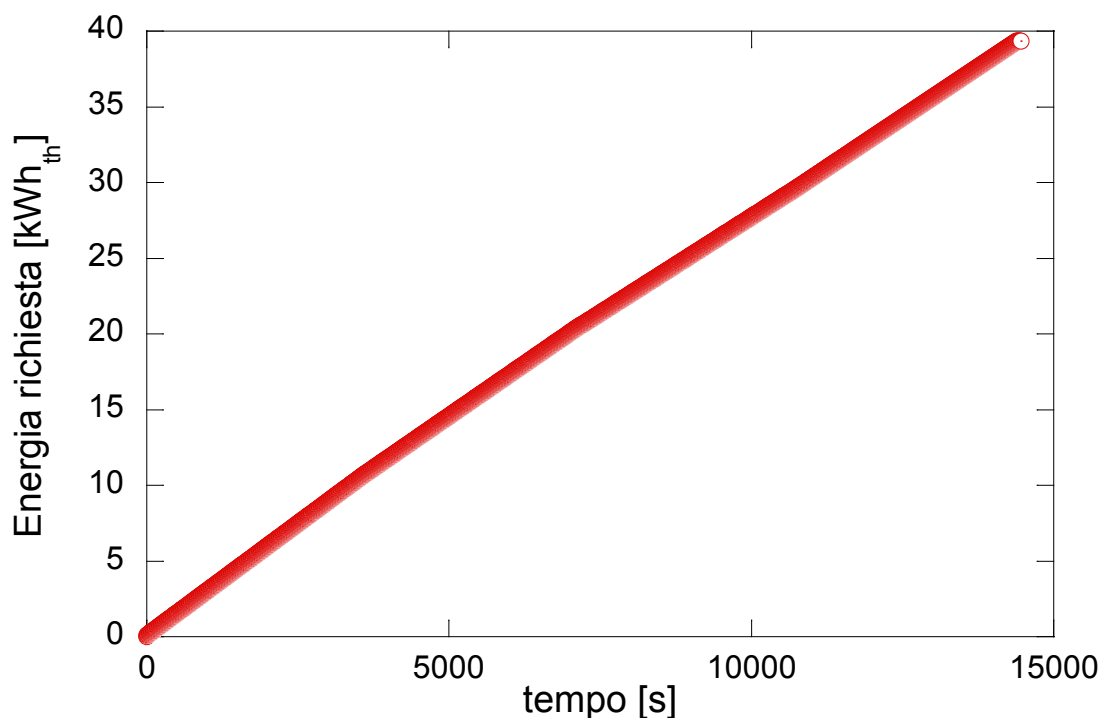


Figura 42 – Energia richiesta dall'utenza, test zona D, ore12-16

Test con Temperatura produzione acqua 60 °C, inverter compressore 50Hz, Fan 50%

La Figura 43 conferma che in questa fascia oraria il numero di spegnimenti e successive riaccensioni è molto elevato (circa 10) a detrimento delle prestazioni e dello stato complessivo di lavoro della pompa di calore. Da questa modalità di funzionamento risulta evidente l'importanza della corretta scelta della taglia della macchina. D'altra parte, laddove le escursioni termiche giornaliere sono piuttosto consistenti, può capitare che una macchina ben dimensionata per i momenti più freddi della giornata, si trovi a lavorare in condizioni non ottimali nelle fasi più calde, senza un sistema di controllo che tenga conto delle condizioni esterne e della velocità di variazione della temperatura all'interno dell'abitazione.

La Figura 44 mostra, per le prime due ore di funzionamento la temperatura dell'acqua in ingresso PdC, che ha subito considerevoli variazioni, in quanto le logiche di controllo, settate per altre condizioni di funzionamento, hanno lavorato in maniera non corretta in questo test. E' opportuno ancora rilevare che in un impianto reale tali temperature potrebbero non raggiungere i picchi di figura 43, ma quest'ultima mette comunque in rilievo, in termini qualitativi, la non stazionarietà del funzionamento, che naturalmente influisce sul COP della macchina.

La Figura 45 mostra proprio l'estrema variabilità del COP durante il test, a causa della mancata stabilizzazione delle condizioni di lavoro durante il test. Di conseguenza, l'ECOP della macchina si è mantenuto su valori piuttosto bassi e peggiori della prova corrispondente del blocco mattutino (Figura 46). I trend ottenuti rendono ancor più chiaro come il solo COP della pompa di calore, ed in alcuni casi lo SCOP calcolato secondo quanto prescritto dalla normativa vigente, non può essere un indicatore completamente affidabile delle prestazioni della PdC, se questa non è dotata di sistemi di controllo e regolazione in grado di adattare la produzione termica alle esigenze dell'utenza e alle condizioni ambientali.

In tabella 9 si riepilogano le prestazioni orarie nell'arco delle quattro ore di funzionamento. L'ECOP complessivo al termine delle quattro ore è risultato pari a 2,50, inferiore di circa il 7,5% rispetto all'analogo test della fascia oraria mattutina, nonostante le condizioni climatiche nettamente più favorevoli.

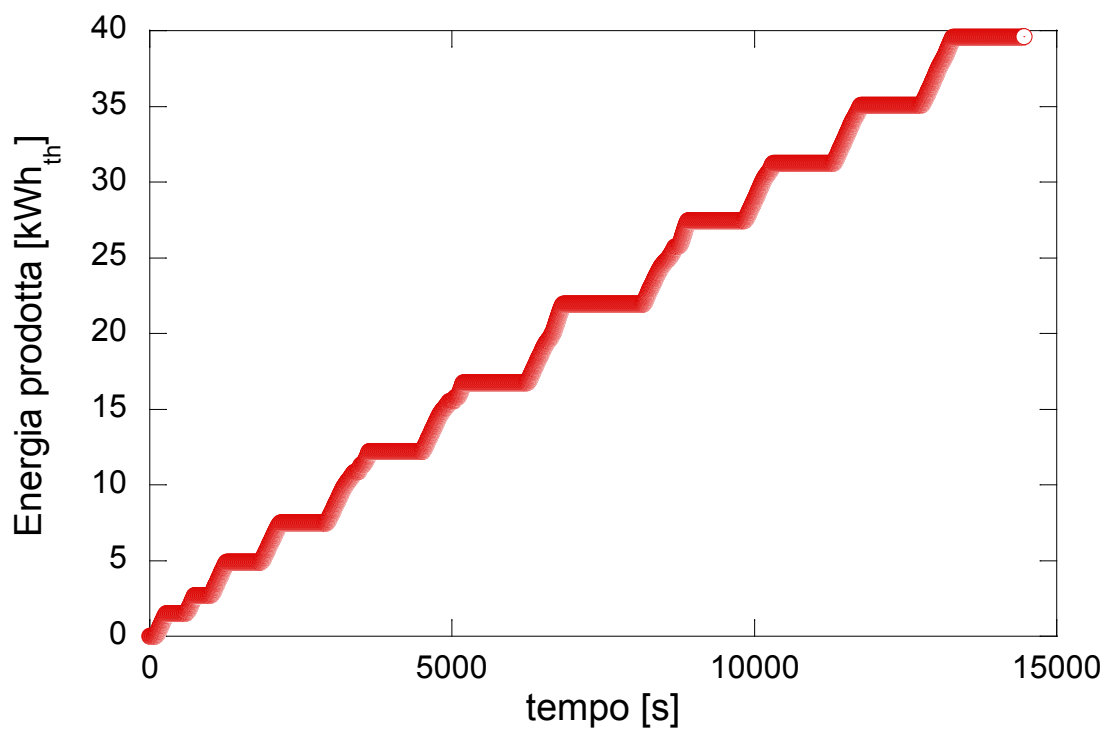


Figura 43 - Energia prodotta (test zona D, ore 12-16, Tout acqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

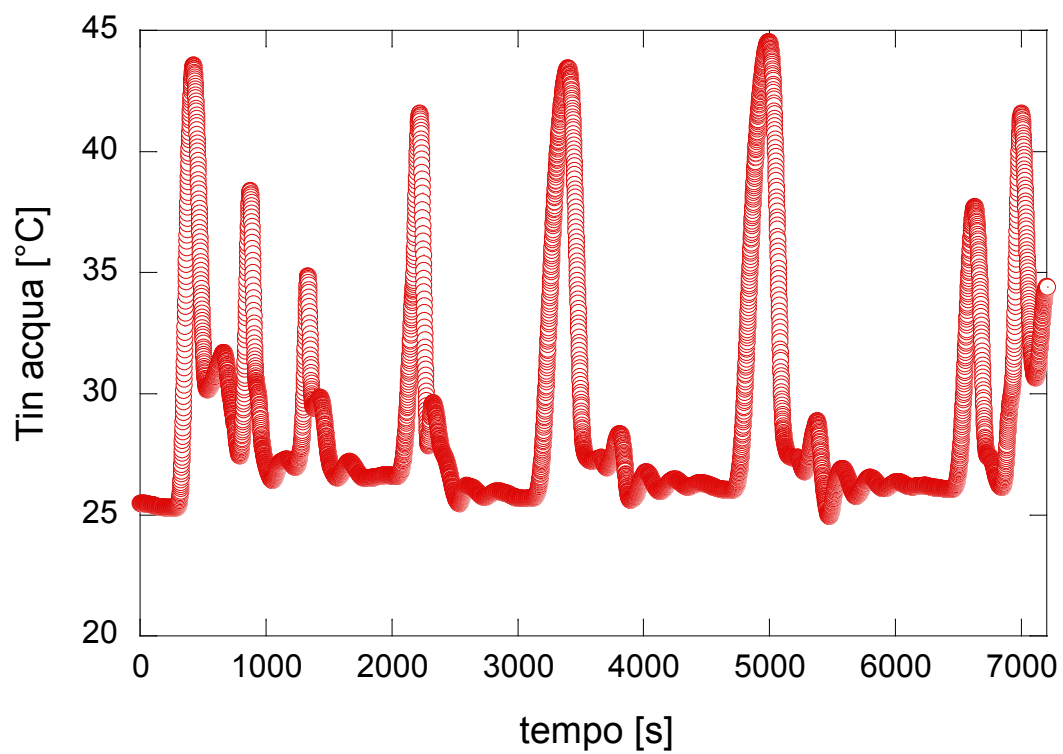


Figura 44 – Temperatura acqua ingresso vs tempo
(test zona D, ore 12-16, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

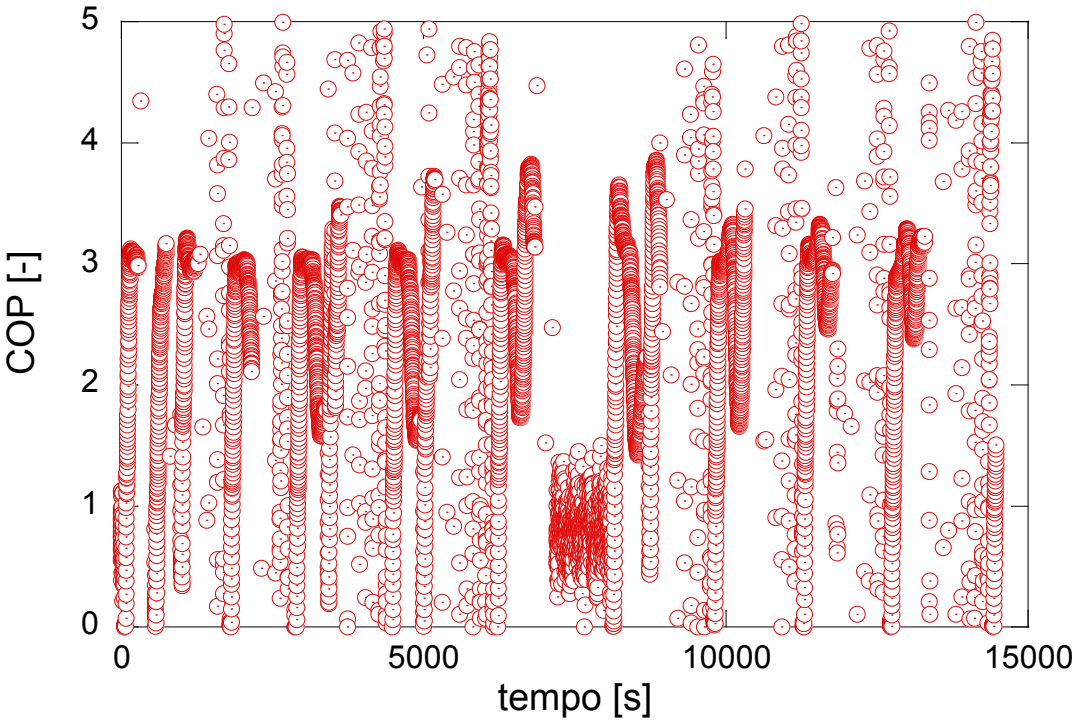


Figura 45 – COP vs tempo, test zona D, ore 12-16, Tacqua 60°C, Inverter 50Hz, fan 50%

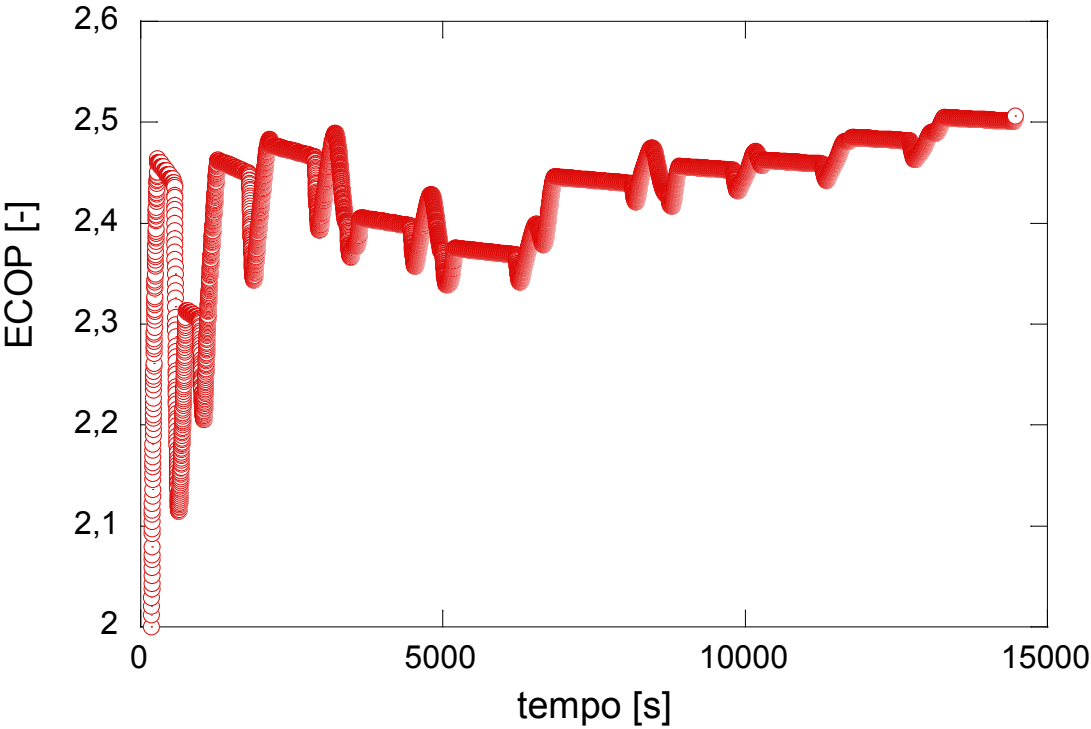


Figura 46 – COP medio vs tempo, test zona D, ore 12-16, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

Tabella 9 – Prestazioni PdC durante il blocco orario 12-16 in zona D, T acqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	11,86	10,08	9,31	8,31	39,3
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	4,97	4,06	3,72	3,12	15,71
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,38	2,51	2,50	2,66	2,50

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 40Hz, Fan 50%

Nel secondo dei test è stata impostata una temperatura dell'acqua di 45°C e una frequenza del compressore

La Figura 46 mostra l'andamento dell'energia prodotta dalla pompa di calore durante le quattro ore di funzionamento in confronto all'energia richiesta. Come per il test precedente, il numero di accensioni e spegnimenti è stato molto elevato e pari a 9.

Per quanto riguarda la temperatura dell'acqua prodotta dalla pdC, essa si è attestata intorno al valore di set-point, con una marcata singola oscillazione solo nelle fasi di avviamento (Figura 47, terza ora di funzionamento). Allo stesso modo, la temperatura d'ingresso in PdC, grazie all'appropriata impostazione del sistema di controllo, contiene le sue variazioni entro i 3 °C, a parte la fase iniziale (Figura 48).

La Figura 49 mostra i COP registrati nel tempo. Le numerose fasi di accensione e spegnimento non consentono una stabilizzazione di questo parametro, che a regime tenderebbe a portarsi a valori dell'ordine di 3,5 circa (Figura 50).

La Figura 51 mostra il trend della pressione ingresso compressore nel tempo. La pressione tende a crescere nelle fasi di funzionamento stazionario, con un piccolo effetto positivo sulle prestazioni delle PdC.

In termini di assorbimento elettrico, i massimi picchi di assorbimento arrivano a circa 10 kW con valori dell'ordine di 8,5 kW nelle fasi di stabilizzazione.

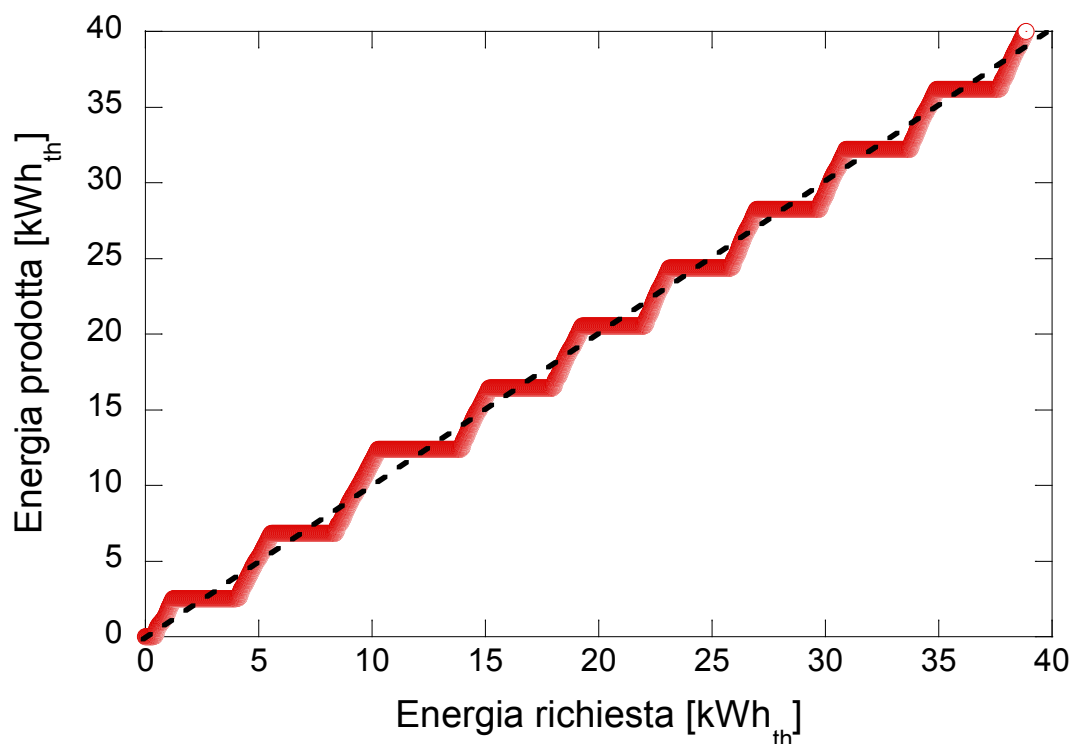


Figura 47 - Energia prodotta vs Energia richiesta
(test zona D, ore12-16, T_{out} acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

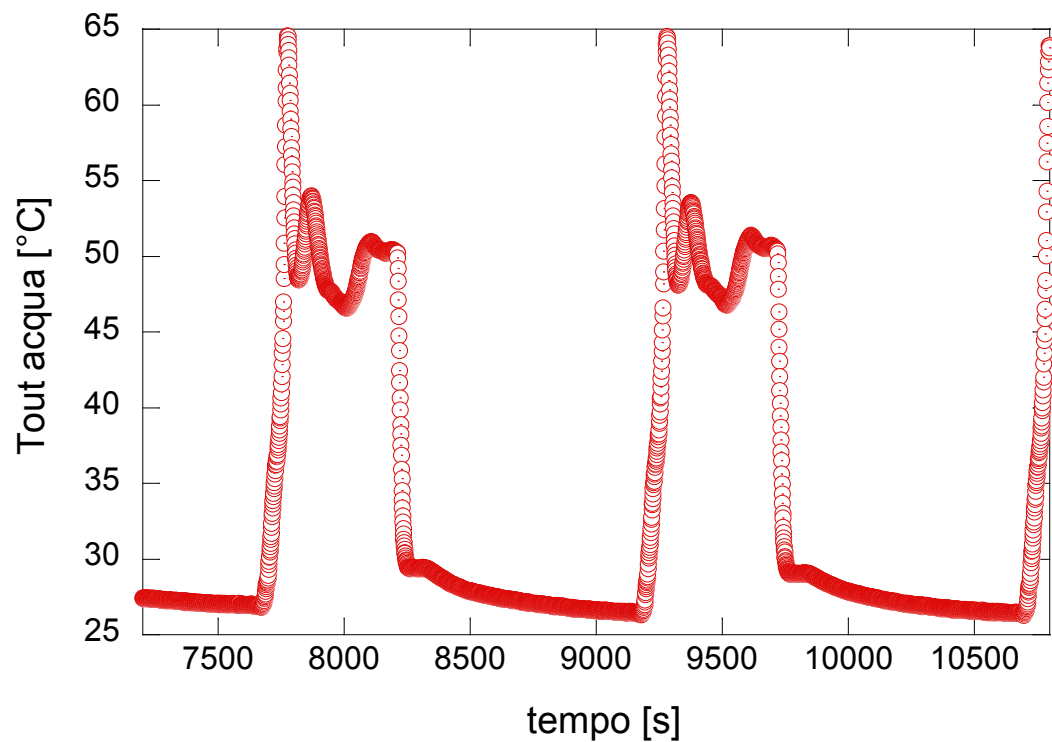


Figura 48 – Temperatura effettiva acqua vs tempo nella terza ora di funzionamento (test zona D, ore 12-16, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

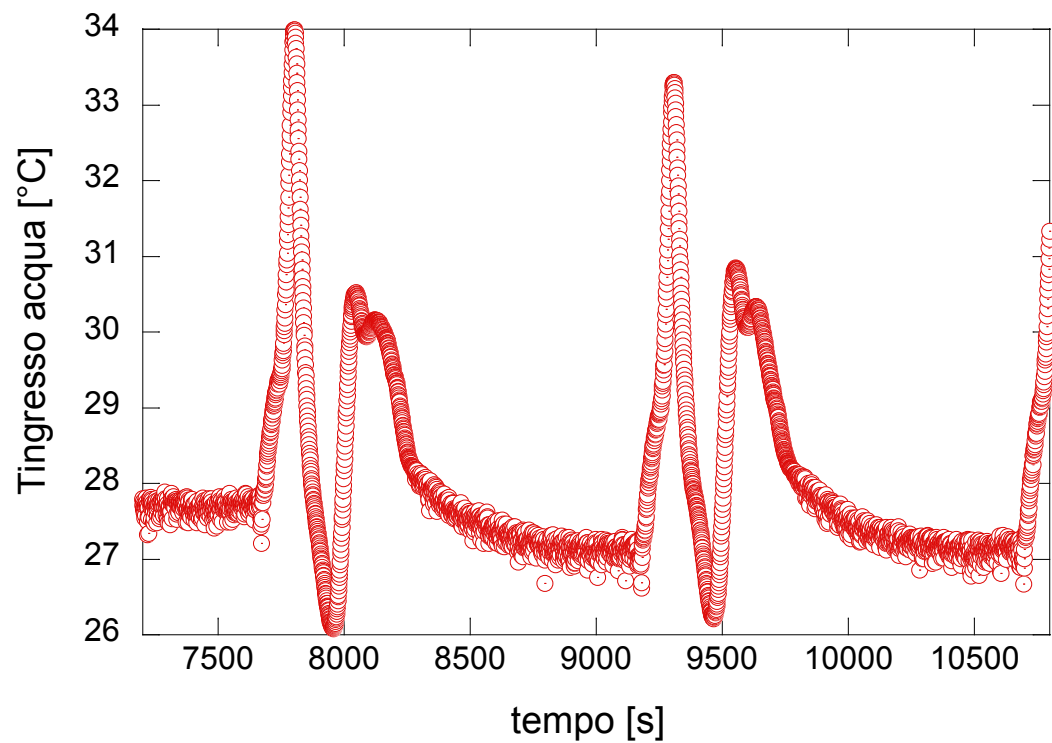


Figura 49 – Temperatura ingresso PdC vs tempo, terza ora di funzionamento (test zona D, ore 12-16, Tacqua 45°C, Inverter 40Hz, fan 50%)

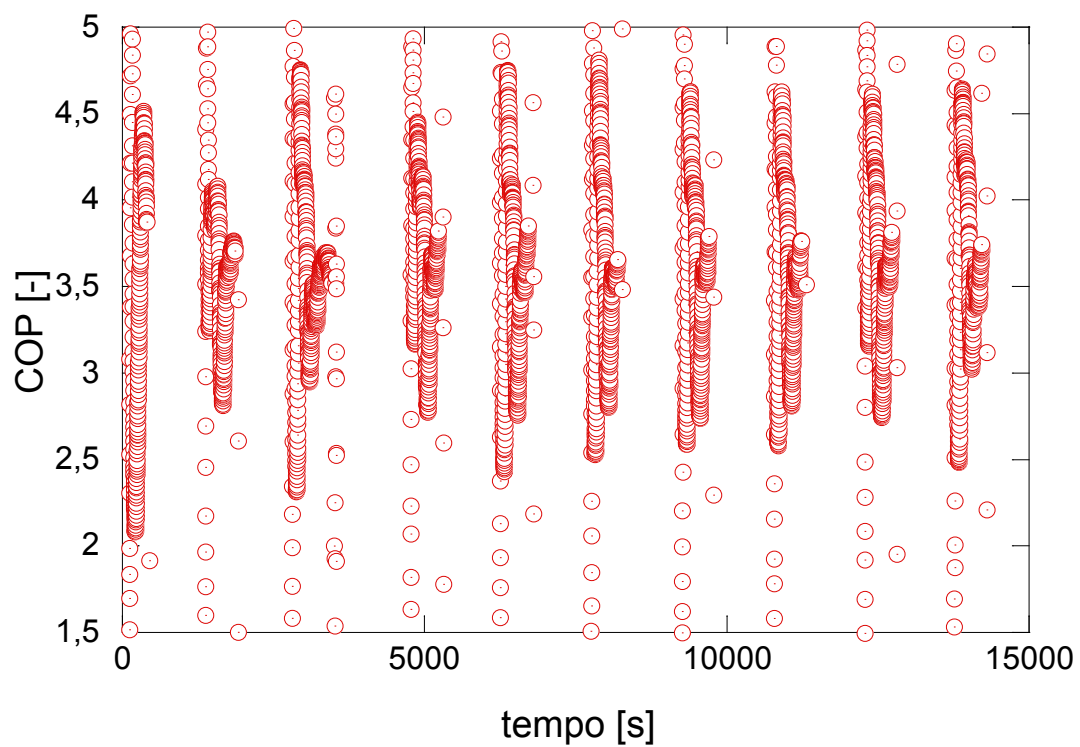


Figura 50 – COP vs tempo, (zona D, ore 12-16, Tacqua 45°C, Inverter 40Hz, fan 50%)

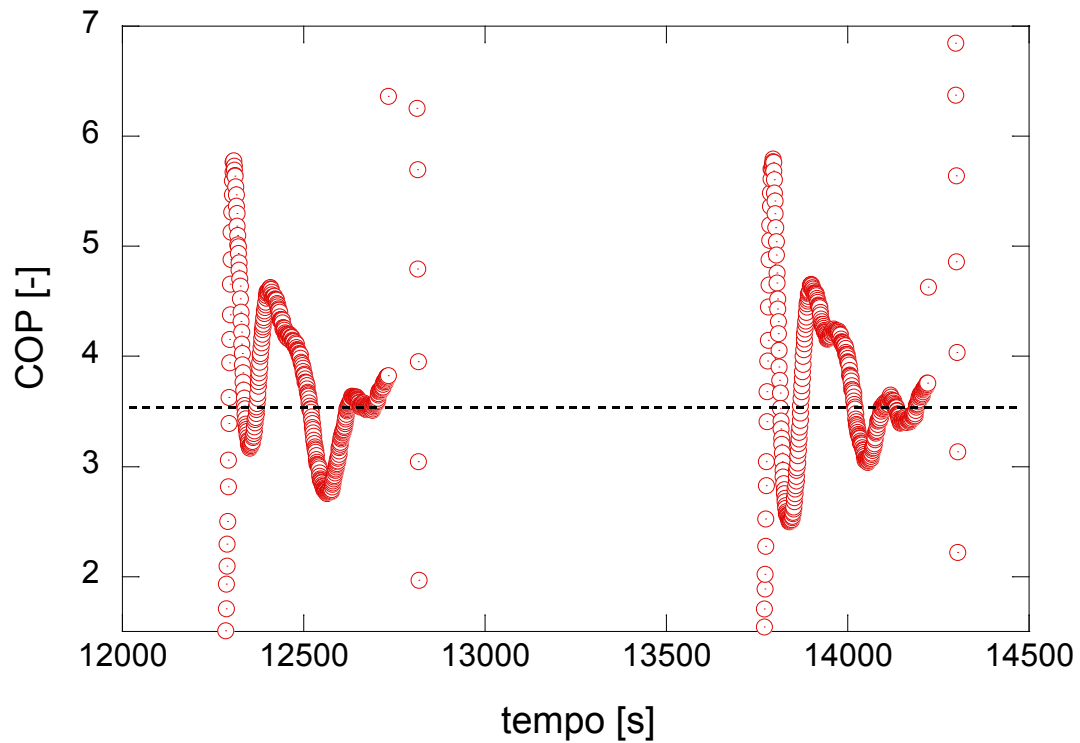


Figura 51 – COP vs tempo, (zona D, ore 12-16, Tacqua 45°C, Inverter 40Hz, fan 50%) – particolare quarta ora

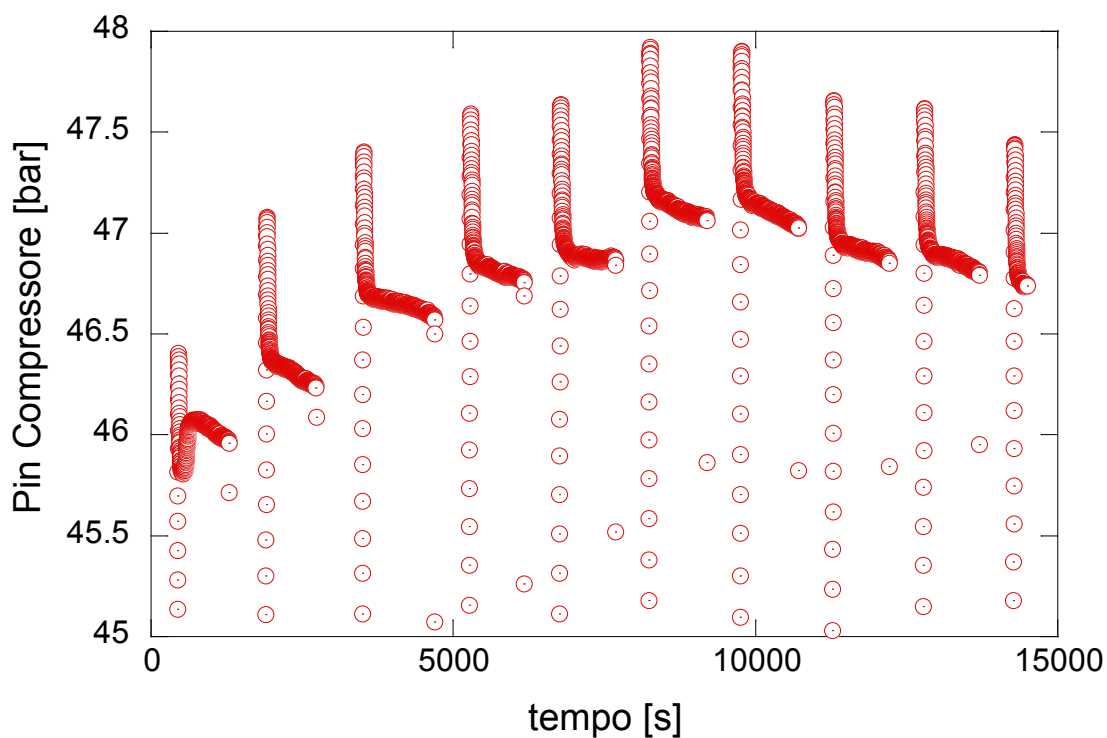


Figura 52 – Pressione ingresso compressore vs tempo
(test zona D, ore 12-16, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

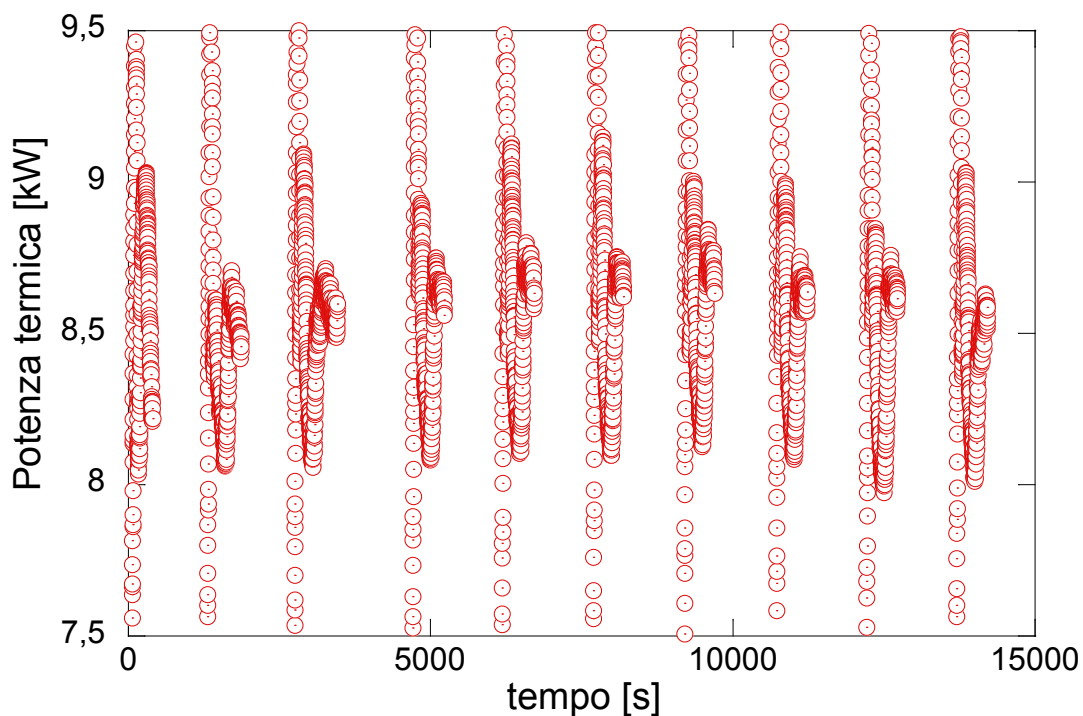


Figura 53 – Potenza elettrica vs tempo, test zona D, ore 12-16, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

In termini di ECOP, il valore di prestazione registrato, nel tempo, è mostrato in Figura 54. Si rileva un evidente incremento rispetto al test precedente con valore superiore a 3 (3,10) al termine della quarta ora. In tabella 10 sono riepilogati i valori di ECOP in ogni ora di funzionamento e nell'istante di pareggio termico durante la fase terminale di esecuzione del test. Il calo di prestazioni nella terza ora di funzionamento (-7%

rispetto alla seconda ora) è dovuto ad un incremento delle pressioni di esercizio (visibile anche in Figura 52 relativamente alla pressione di aspirazione) dovute ad un leggerissimo aumento della temperatura di produzione dell'acqua. Questa situazione conferma ancora una volta l'importanza del controllo delle temperature dell'acqua per ottimizzare le prestazioni delle PdC, soprattutto se a CO₂.

Tabella 10 – Prestazioni PdC durante il blocco orario 12-16 in zona D, T acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	12,38	8,149	7,90	11,73	39,30
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	3,97	2,64	2,74	3,58	12,72
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	3,11	3,08	2,88	3,27	3.09

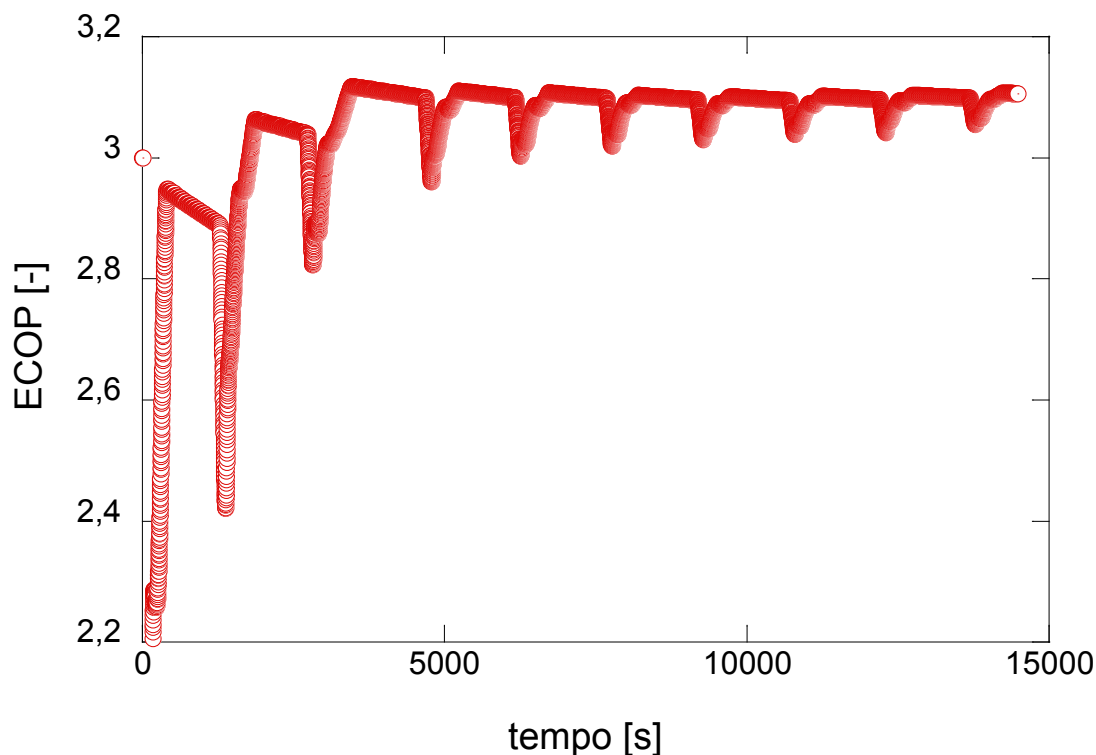


Figura 54 – COP medio vs Tin acqua, test zona D, ore12-16, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

Il test con temperatura di produzione impostata a 45°C, inverter a 40Hz e fan al 50%, dopo un tentativo di correzione dei PID della pompa di circolazione a bordo macchina è stato ripetuto. I risultati ottenuti non si sono scostati particolarmente da quelli ottenuti in precedenza. La tabella seguente ne riporta una breve sintesi:

Tabella 11 – Prestazioni del terzo test del blocco orario 12-16
(zona D, T acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	11.37	8.489	11.47	7,92	39,30
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	3,67	2.66	3.53	2,56	12,47
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	3,09	3,17	3.24	3,10	3.15

2.1.7.3 Test della fascia oraria 18-22

La valutazione dinamica delle prestazioni della pompa di calore in questa fascia oraria è stata demandata a tre test: quello di riferimento (temperatura di produzione di 60 °C con inverter a 50 Hz e fan a 50% della velocità), un test con le medesime condizioni a parte la frequenza dell'inverter a 40 Hz, ed un test finale con temperatura di produzione di 45 °C, inverter a 40 Hz e fan a 50% della loro velocità di rotazione massima. Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature ambientali comprese tra 6,2 °C e 8 °C, intermedie tra quelle della fascia mattutina e centrale del giorno tipo. Di conseguenza, anche i carichi termici richiesti si collocano su valori intermedi rispetto alle altre due fasce orarie. La potenza richiesta dall'utenza è compresa nel range 3,7-4,58 kW. La corrispondente energia termica richiesta, considerando 4 utenze, è di 14,8 kWh nella prima ora, di 16,48 kWh nella seconda ora, di 17,2 kWh nella terza e di 18,32 kWh nell'ultima ora di questo blocco, per un totale di 66,8 kWh (Figura 55). Data la potenza nominale della PdC di 30kW, si prevedono tempi di spegnimento orari compresi tra 25 e 30 minuti.

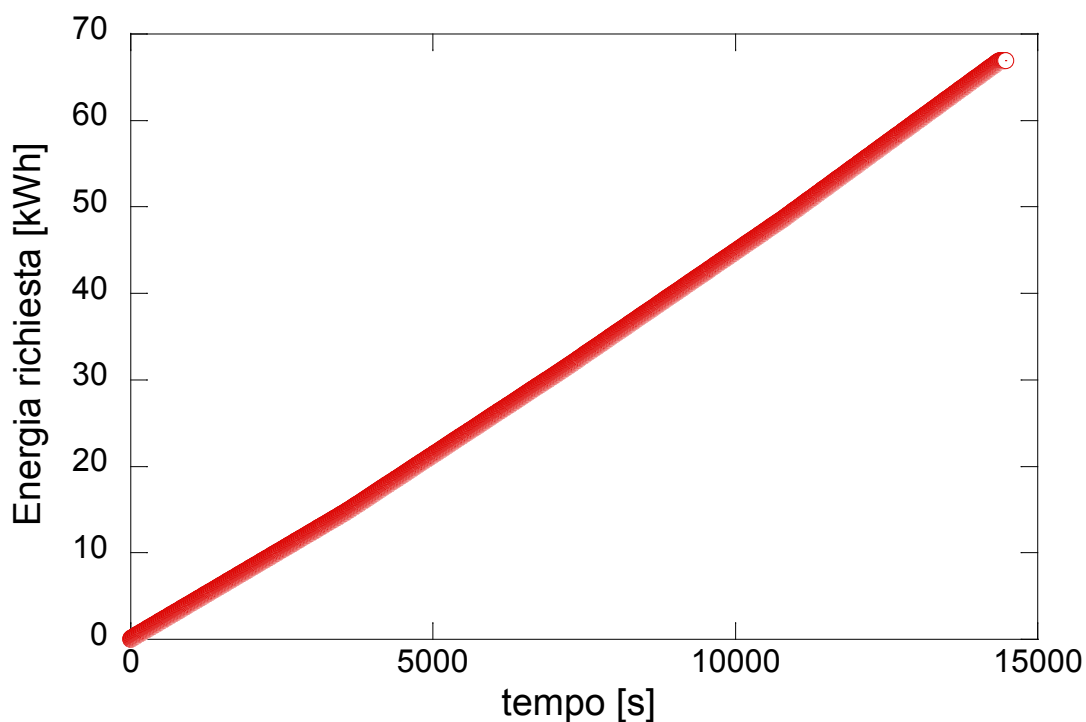


Figura 55 – Energia richiesta dall'utenza, test zona D, ore 18-22

Test con Temperatura produzione acqua 60 °C, inverter compressore 50Hz, Fan 50%

La Figura 56 mostra che anche in questa fascia oraria, con questa frequenza del compressore, il numero di spegnimenti e successive riaccensioni è molto elevato. La macchina ha lavorato quindi sempre in condizioni lontane dalla stabilità.

Per avere un'idea di questo aspetto, in Figura 57 si mostra l'andamento della temperatura dell'acqua in ingresso che non giunge praticamente mai ad un valore costante. La stessa figura è ancora una volta utile per rilevare come la non perfetta messa a punto del sistema di controllo può portare a delle inefficienze evitabili. Tenendo in considerazione il picco di temperatura massimo, oltre i 60 °C, si può rilevare dall'andamento del COP di Figura 58, che in quella fase quell'indicatore registra valori elevati, ma anche un periodo di lavoro piuttosto lungo con valori prossimi o parecchio inferiori a 2,5.

La Figura 59, relativa alla terza ora di funzionamento, conferma invece che le oscillazioni della temperatura dell'acqua in ingresso PdC, fortemente influenzata dalla portata d'acqua circolante sul secondario, può determinare consistenti inefficienze, ancor più importanti in caso d'impiego di PdC a CO₂. La dinamica di funzionamento conferma quindi che, in caso di adozione di un sistema di trasmissione termica con scambiatore separatore tra generatore termico e terminale d'impianto, si dovrebbe dotare anche la pompa di circolazione del circuito secondario di una logica di regolazione avanzata, in grado di stabilizzare prima possibile le condizioni di lavoro da un lato e di garantire il corretto ΔT di esercizio dei terminali d'impianto dall'altro.

Il COP nella fase di funzionamento stazionario della pompa di calore, nella terza ora, si attesta su valori compresi tra 2,9 e 3,5 (Figura 59), denotando un potenziale di prestazione del sistema piuttosto elevato.

Le problematiche di stabilizzazione più volte rimarcate portano invece il COP medio registrato a valori molto meno lusinghieri, come mostrato in Figura 59 e nella tabella riepilogativa 12.

I dati riepilogativi confermano che, nella prima ora di funzionamento, a causa della instabilità evidenziata in Figura 57, il COP medio è stato inferiore di circa l'8,8% rispetto alle successive tre ore di funzionamento. Inoltre si rileva che l'ECOP è risultato superiore rispetto al corrispondente test del blocco orario 12-16 perché la taglia della macchina e la potenza erogata con frequenza di lavoro 50 Hz meglio si attaglia a questa fascia oraria.

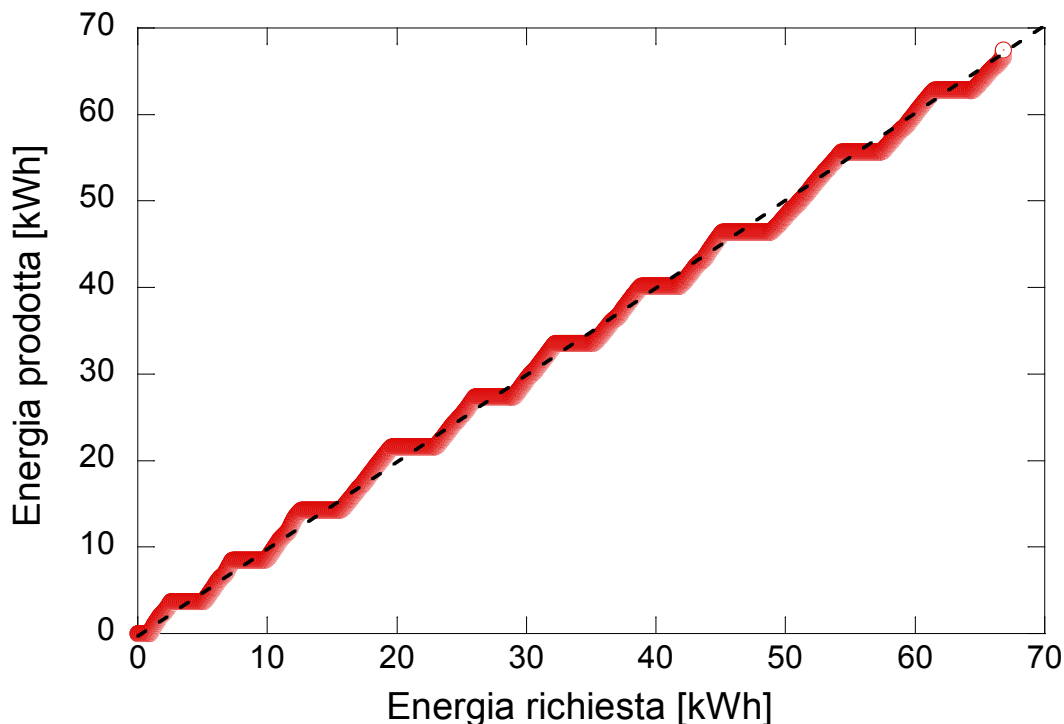


Figura 56 - Energia prodotta vs richiesta (test zona D, ore 18-22, Tout acqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

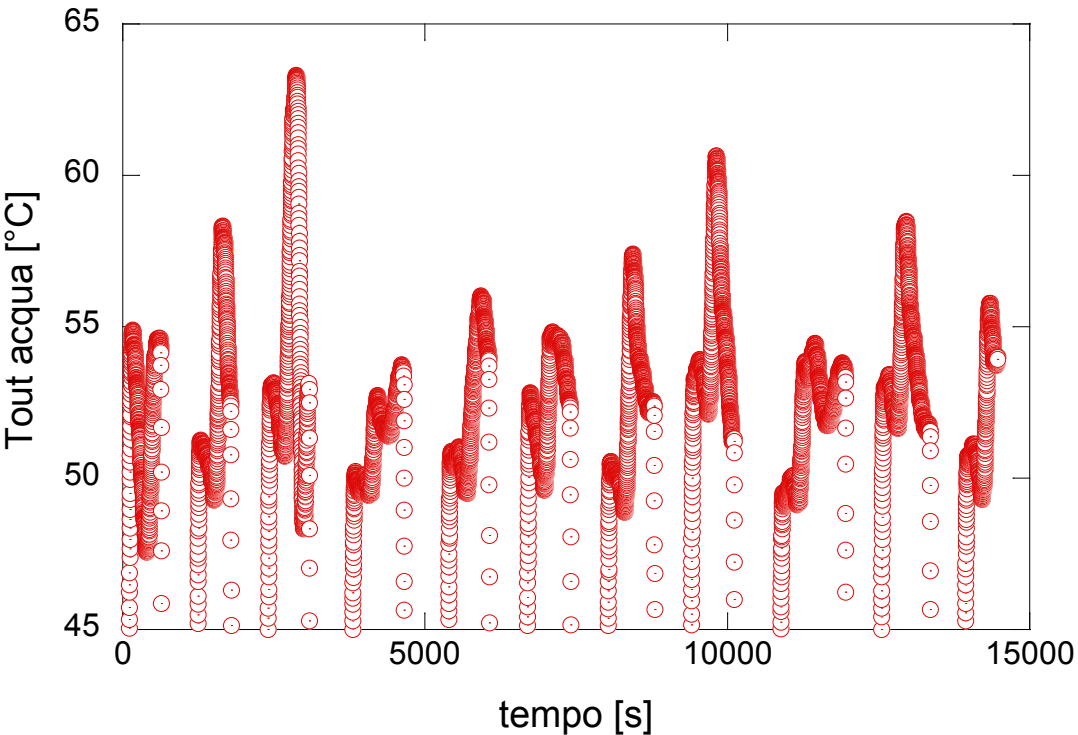


Figura 57 – Temperatura acqua uscita PdC vs tempo
 (test zona D, ore 18-22, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

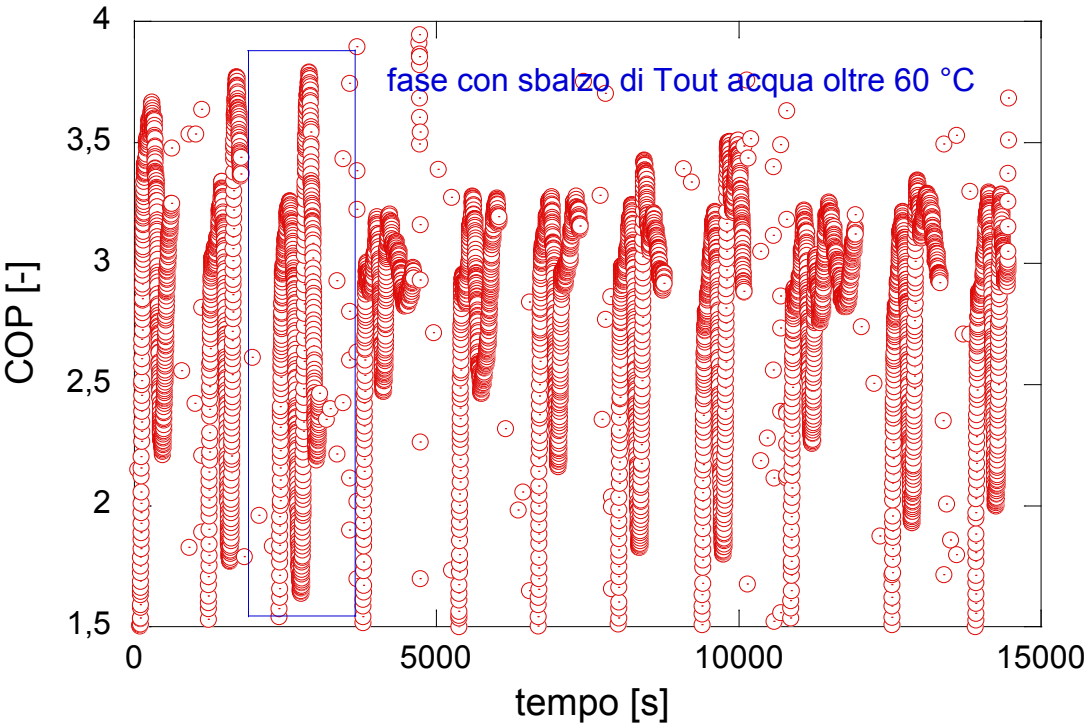


Figura 58 – COP vs tempo, test zona D, ore 18-22, Tacqua 60°C, Inverter 50Hz, fan 50%

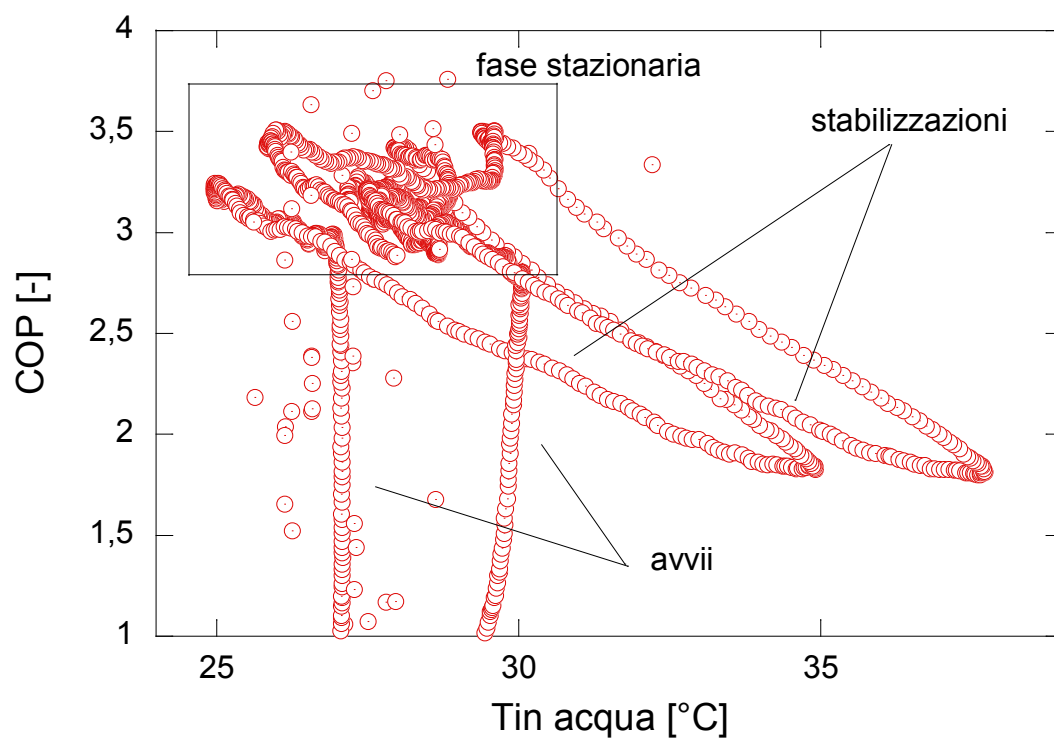


Figura 59 – COP vs Tin acqua, test zona D, ore 18-22, Tacqua 60°C, Inverter 50Hz, fan 50%, terza ora

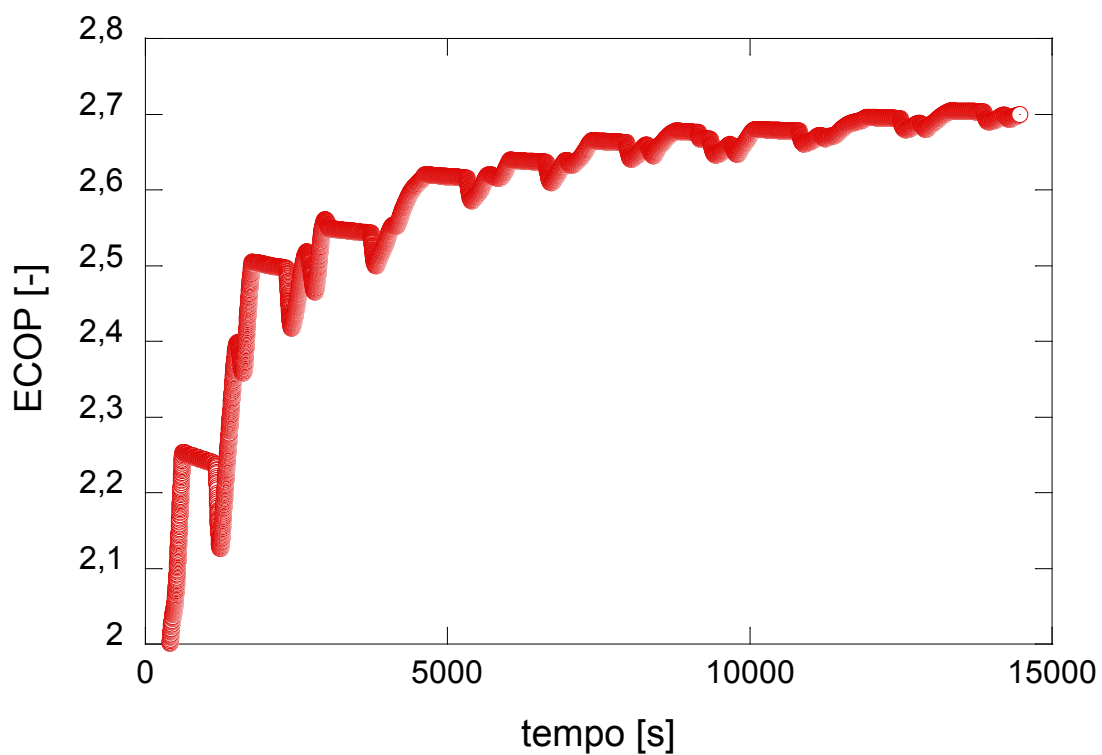


Figura 60 – COP medio vs tempo, test zona D, ore 18-22, Tacqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

Tabella 12 – Prestazioni del secondo test del blocco orario 18-22
(zona D, T acqua 60 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	14.30	17,50	14.63	20,37	
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	5,62	6,42	5,31	7,43	
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,54	2,73	2.75	2,74	2,70

Test con Temperatura produzione acqua 60 °C, inverter compressore 40Hz, Fan 50%

In virtù dell'evidente eccesso di potenza erogata rispetto alla richiesta, si è proseguito con l'esecuzione di un test diverso dal precedente solo per l'impostazione della frequenza del compressore a 40 Hz.

La Figura 61 mostra che le riaccensioni in questo caso si riducono a 9, di cui una oltre la quarta ora di funzionamento (tratto verticale finale della figura, laddove l'energia richiesta, al termine della quarta ora è stimata essere nulla).

I periodi di accensione sono stati più lunghi, consentendo una maggiore stabilizzazione delle condizioni di esercizio. Il COP, in queste fasi, si è assestato a valori di poco inferiori a 3,5 (Figura 62). Nei transitori di avvio, i COP minimi registrati non sono quasi mai scesi sotto il 2, a parte in occasione della prima accensione, in cui esso è giunto a valori inferiori a 1,5, in corrispondenza, ancora una volta di una consistente instabilità delle temperature di esercizio. In questo caso, il ritardato avviamento della pompa di circolazione sul secondario ha provocato un incremento della temperatura di ingresso alla PdC (Figura 63).

L'assorbimento elettrico si riduce rispetto al test precedente, portandosi a circa 8,3 kW nelle fasi stazionarie, con picchi intorno a 9 kW nelle fasi transitorie "regolari" e di oltre 10 kW nei due picchi iniziali (Figura 64).

La Figura 65, come nel caso precedente, può essere impiegata per stimare il potenziale di prestazione massimo del sistema, che sembra essere dell'ordine di 3,4 con temperature dell'acqua maggiori di 27,5°C. Consente inoltre di stimare un ulteriore possibile aumento di COP, qualora l'acqua giunga alla PdC a temperatura inferiore a 27°C. Questo potrebbe essere ottenuto con l'applicazione di uno scambiatore aria-acqua che sfrutti la bassa temperatura dell'aria esterna per mantenere l'acqua alla temperatura ottimale di esercizio per una pompa di calore a CO₂.

La Figura 66 chiarisce che l'adozione di una configurazione d'impianto di questo tipo, non provocherebbe una riduzione della potenza termica erogata della macchina, che rimane sempre intorno a 30kW.

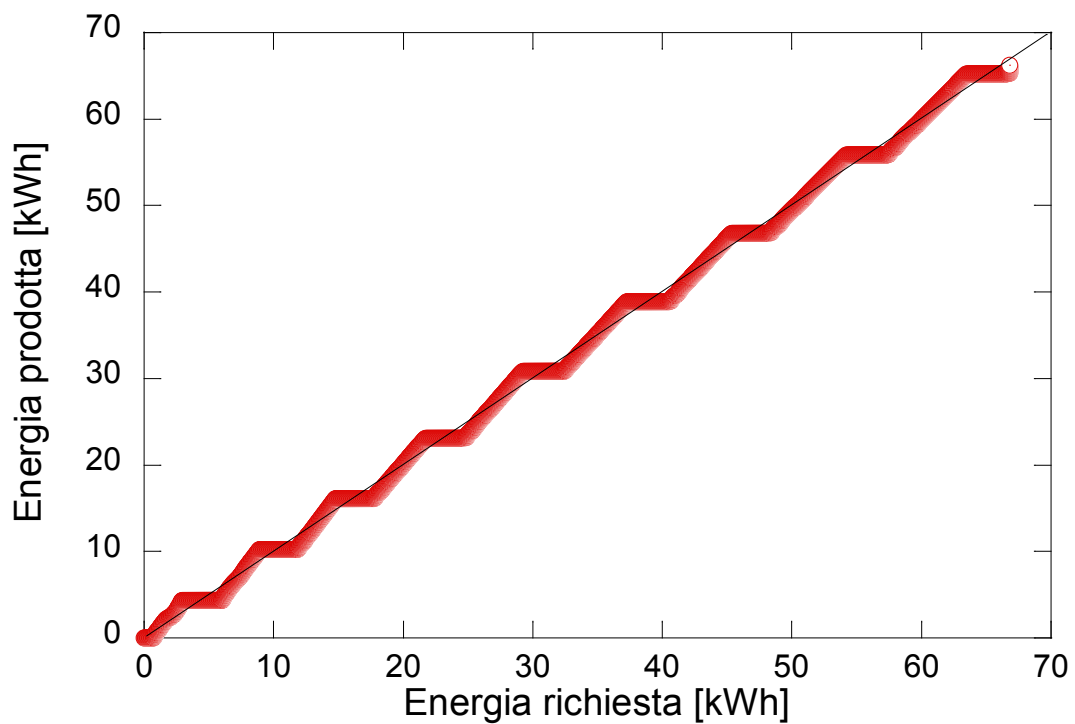


Figura 61 - Energia prodotta vs richiesta (test zona D, ore 18-22, Tout acqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

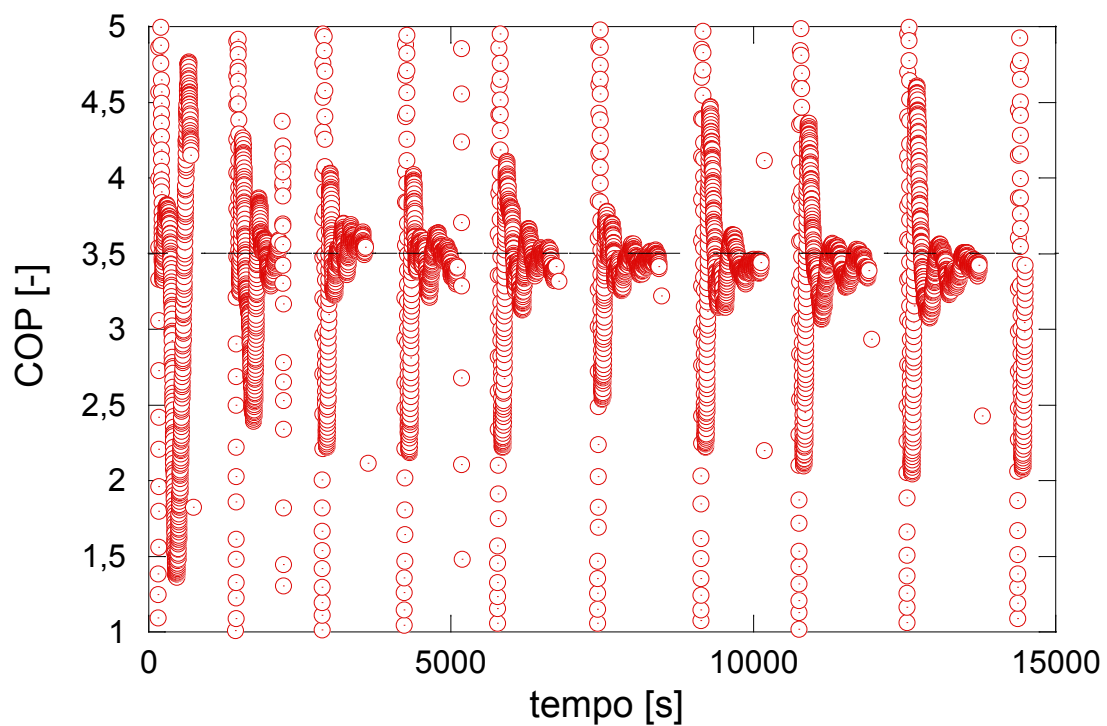


Figura 62 – COP vs tempo, test zona D, ore 18-22, Tacqua 60°C, Inverter 40Hz, fan 50%

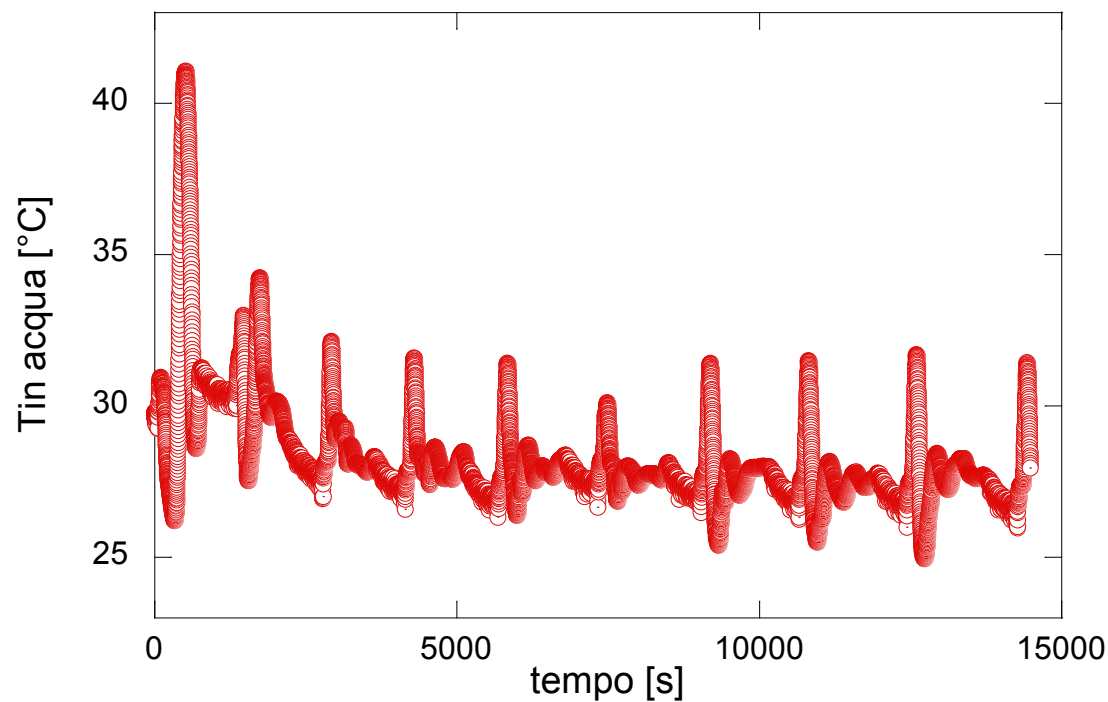


Figura 63 – Temperatura acqua uscita PdC vs tempo
(test zona D, ore 18-22, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

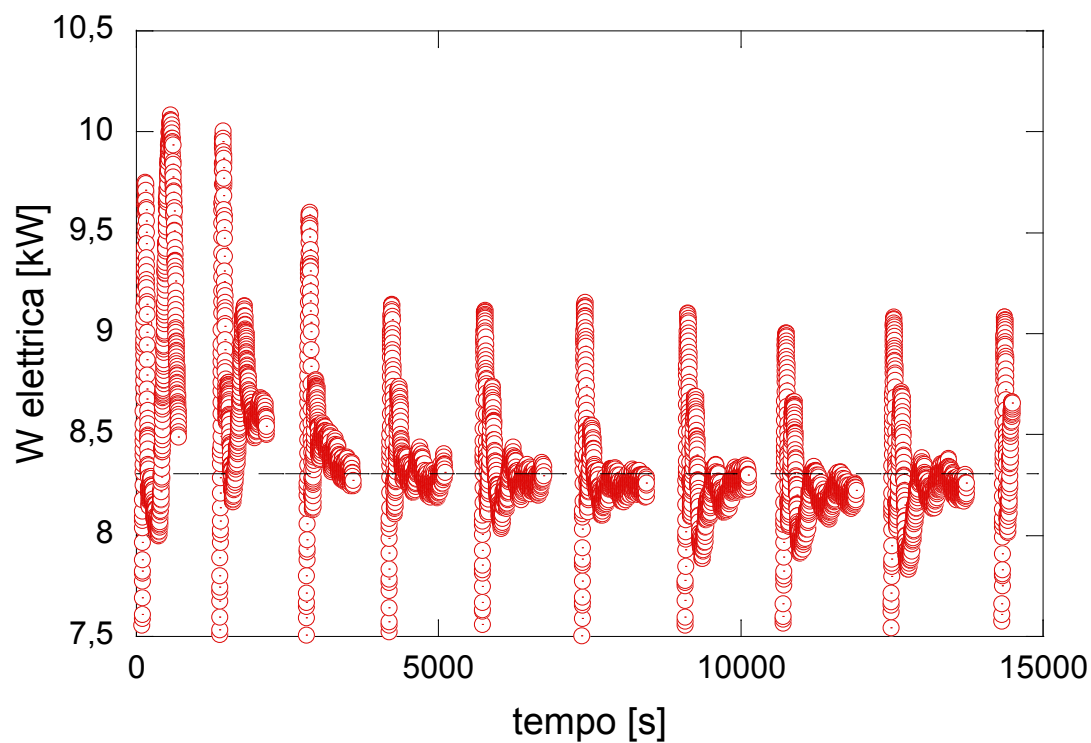


Figura 64 – Potenza elettrica vs tempo (test zona D, ore 18-22, Tacqua 60°C, Inverter 40Hz, fan 50%)

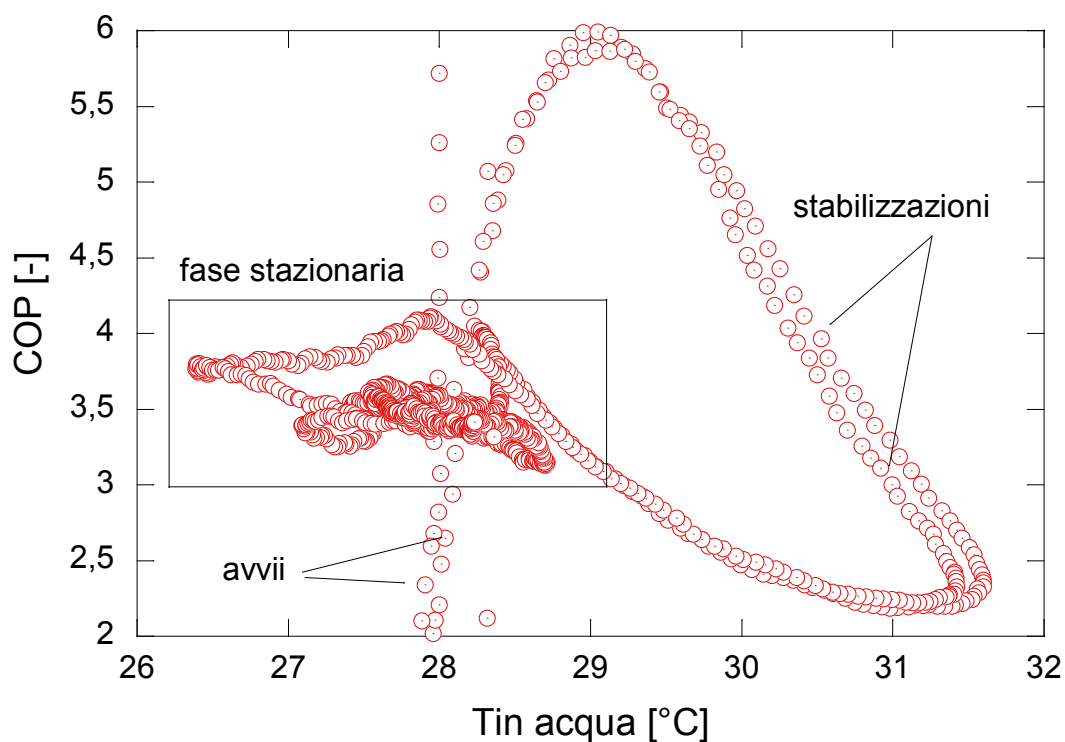


Figura 65 – COP vs Tin acqua, test zona D, ore 18-22, Tacqua 60°C, Inverter 40Hz, fan 50%, seconda ora

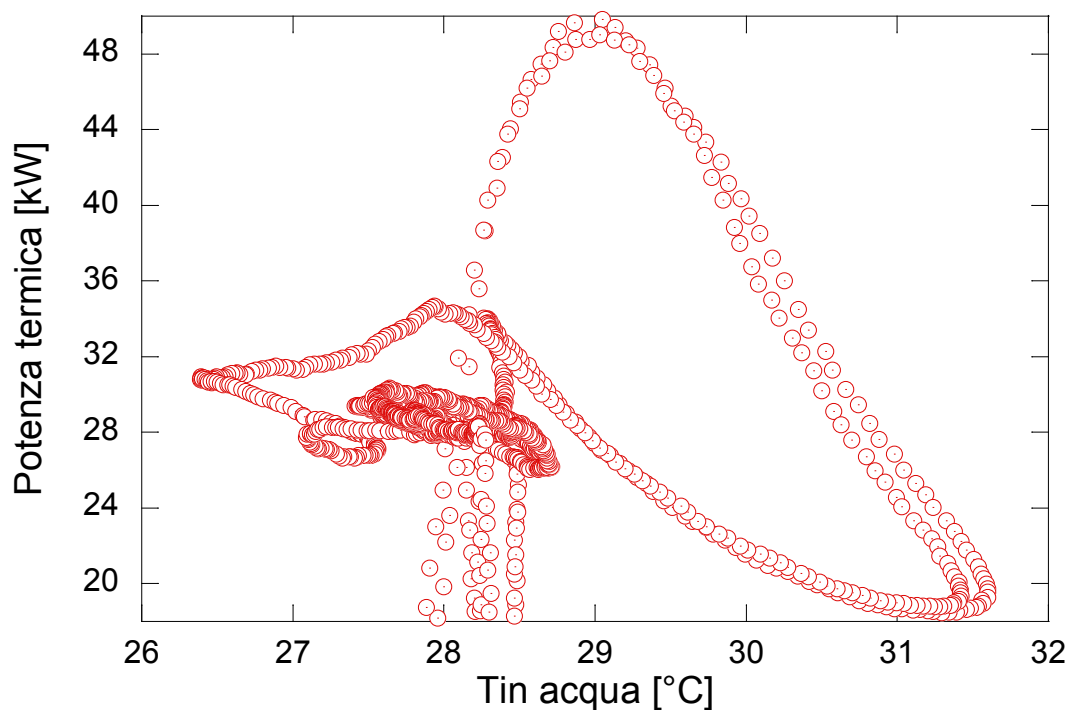


Figura 66 – Potenza termica vs Tin acqua
(Test zona D, ore 18-22, Tacqua 60°C, Inverter 40Hz, fan 50%, seconda ora)

La Figura 67 e la tabella riepilogativa 13 rendono conto delle prestazioni medie durante le quattro ore di funzionamento. La prestazione complessiva è migliorata del 15,5% rispetto alla configurazione precedente.

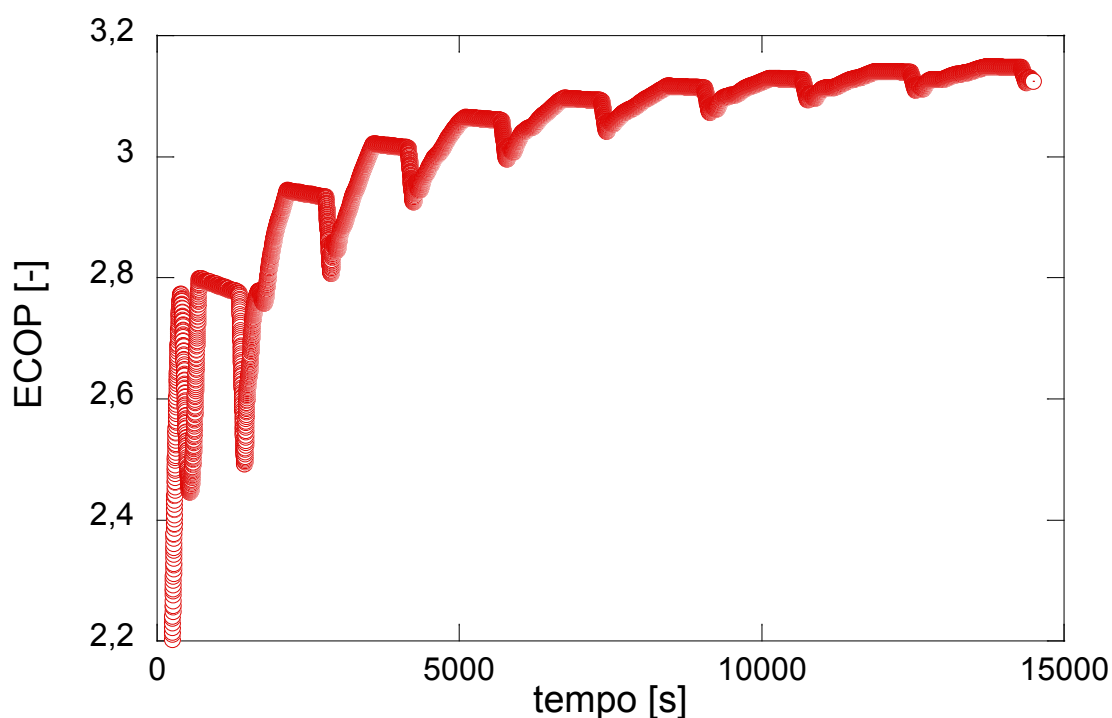


Figura 67 – COP medio vs tempo, test zona D, ore 18-22, Tacqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

Tabella 13 – Prestazioni del secondo test del blocco orario 18-22
(zona D, T acqua 60 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	16,03	14,66	16,40	18,15	66,8
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	5,31	4,62	5,23	5,71	66,8
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	3,02	3,17	3,11	3,18	3,12

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 40Hz, Fan 50%

Questo test è stato caratterizzato da una leggera riduzione del numero di riaccensioni, che ha consentito un leggero prolungamento delle fasi di funzionamento stabile a più alto valore di COP. Inoltre, l'impostazione di un set-point di produzione più basso evita un eccessivo aumento della temperatura d'uscita, che in genere è responsabile pressioni di esercizio non ottimali.

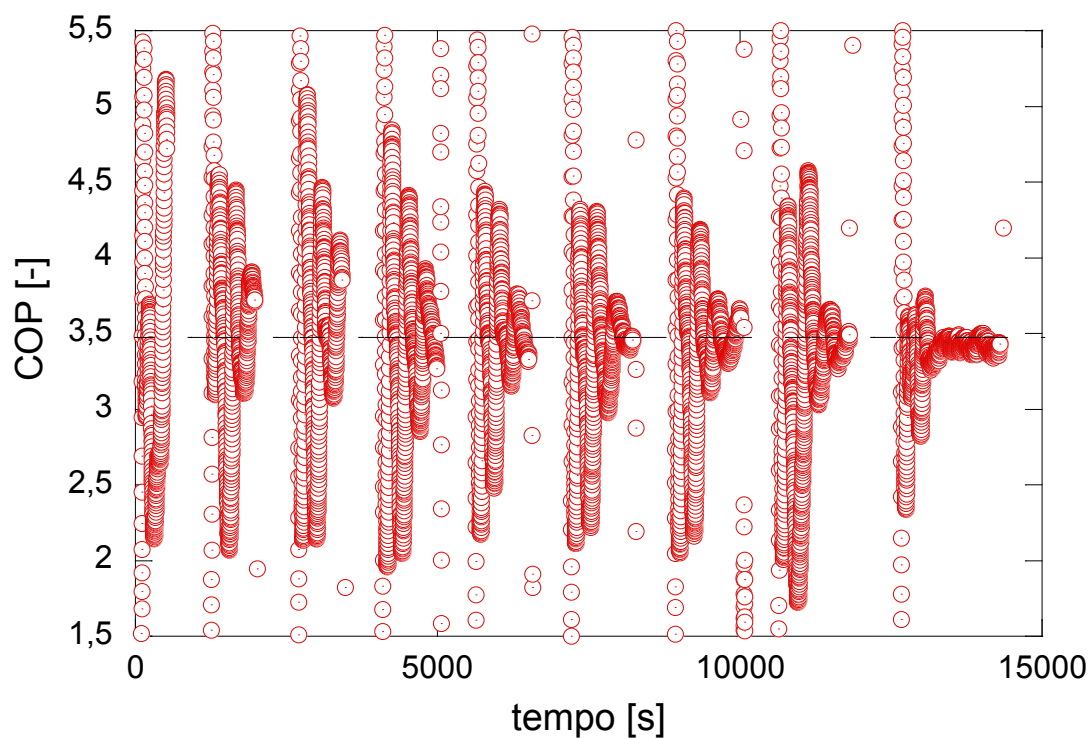


Figura 68 – COP vs tempo, test zona D, ore 18-22, Tacqua 45°C, Inverter 40Hz, fan 50%

La Figura 69 e la tabella riepilogativa 14 rendono conto delle prestazioni medie durante le quattro ore di funzionamento. La prestazione complessiva rimane sostanzialmente invariata rispetto al test precedente.

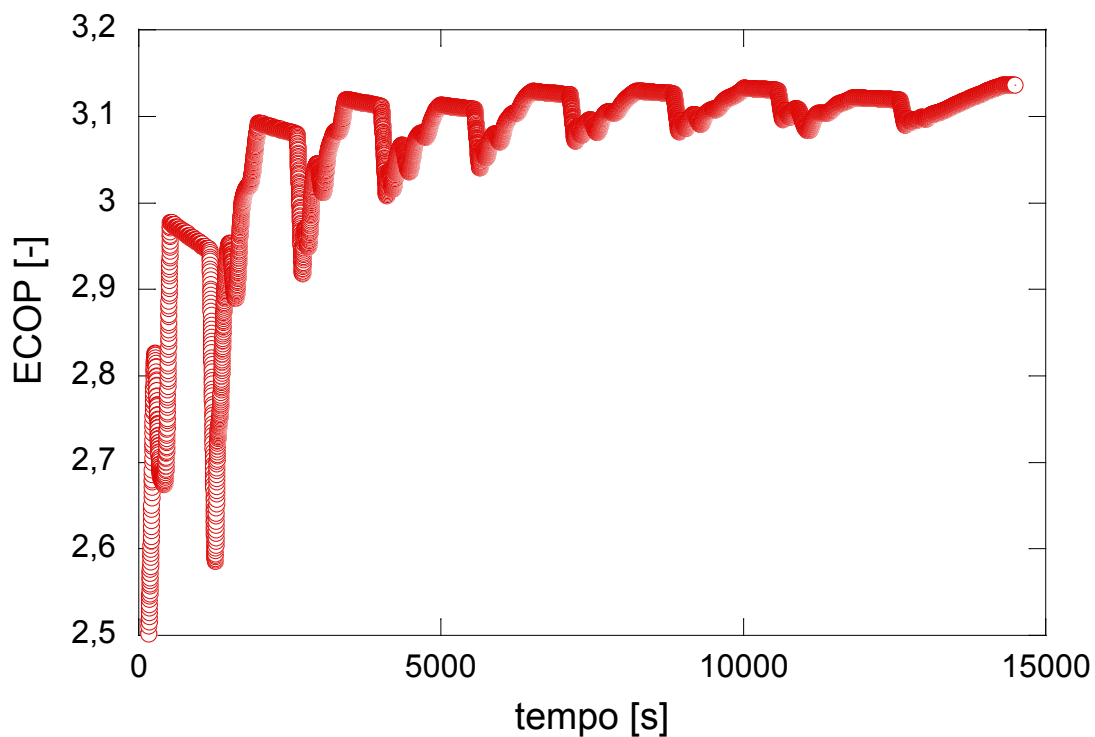


Figura 69 – COP medio vs tempo, test zona D, ore 18-22, Tacqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%

**Tabella 14 – Prestazioni del secondo test del blocco orario 18-22
(zona D, T acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)**

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	15,36	14,14	17,78	20,53	66,8
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	4,93	4,645	5,661	6,39	21,3
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	3,12	3,04	3,14	3,21	3,13

2.1.7.4 Riepilogo risultati complessivi zona climatica D

Nel presente paragrafo si riepilogano i dati principali dei tre test, uno per ogni fascia oraria, con le migliori prestazioni in termini di ECOP. La tabella seguente riepiloga il tempo (in percentuale) nel quale la PdC è spenta, il numero di accensioni, l'assorbimento elettrico medio nelle fasi di funzionamento della PdC, il picco massimo di potenza elettrica, le energie richieste/prodotte ed elettriche e l'ECOP.

Tabella 15 – Riepilogo Prestazioni PdC su giorno invernale tipo della zona climatica D

Fascia oraria	Durata periodo spegnimento [%]	Numero accensioni	Potenza elettrica media [kW]	Potenza di picco [kW]	Energia Richiesta/Prodotta [kWh _{th}]	Energia elettrica [kWh _{th}]	ECOP [-]
6-10	13,26	5	8,16	10,02	90,24	29,02	3,11
12-16	62,3	9	8,44	10,9	39,30	12,47	3,15
18-22	35,2	9	8,29	9,8	66,80	21,3	3,13

Complessivamente quindi, il consumo elettrico stimato ammonta a 62,79 kWh, ossia 15,69 kWh per utenza al giorno. La prestazione complessiva è molto simile per i tre blocchi orari: la motivazione va ricercata nel fatto che la PdC è ben dimensionata per la fascia oraria mattutina, come dimostra la durata del periodo di spegnimento e il numero di accensioni, ma, per l'impossibilità di modulare la potenza sotto a un certo valore, lavora con un elevato numero di spegnimenti e accensioni nelle altre due fasce orarie. Il potenziale della pompa di calore non è quindi completamente sfruttato in queste fasi. Si giunge quindi ad una situazione di esercizio in cui l'abbinamento con sistemi di accumulo di tecnologia avanzata possono contribuire a sfruttare completamente il potenziale della pompa di calore [3]. Nel caso di pompe di calore a CO₂, si acuisce il problema dell'influenza negativa dell'aumento della temperatura di ritorno sulle prestazioni della PdC. In questa annualità non è stato possibile individuare una configurazione d'impianto ed un accumulo di adatte dimensioni in grado di mitigare tale problematica. Nell'unico test di caricamento tramite PdC del serbatoio presente sul circuito (di tipo tradizionale, non ad elevata stratificazione) è risultato subito evidente l'inefficienza della soluzione, con COP subito scesi a valori intorno ad 1. La ricerca di soluzioni più efficienti sarà demandata quindi a future fasi dell'attività di ricerca.

2.1.8 Analisi dei risultati delle simulazioni dinamiche della zona climatica E

La zona climatica E comprende il più ampio raggruppamento di popolazione e di comuni italiani, in termini quantitativi. Infatti, secondo [2], la popolazione italiana in tale zona climatica è pari a circa 27701135 abitanti, corrispondenti a circa il 45,7% della popolazione totale, residente in circa 4230 comuni.

Per questa fascia climatica, si è stimato, con test preliminari, che la pompa di calore da 30 kW può soddisfare un numero di utenze pari a tre. Considerando che il numero di ore massimo di accensione degli impianti termici è pari a 14 (in assenza di termoregolazione), si è proposta una distribuzione di potenza su tale suddivisione temporale. Inoltre sono stati condotti alcuni test impostando la distribuzione di potenza su 12 ore secondo i valori riportati in tabella 2. Si precisa che i tempi di spegnimento durante questi test

non sono stati variati rispetto a quelli della zona D (ossia la PdC si riavvia quando l'energia richiesta è superiore alla prodotta della stessa quantità impostata in zona D), perché il parametro impostato è legato al comfort dell'utente e quindi appare indipendente dalla fascia climatica esaminata. Rimane comunque inteso che tale parametro potrà essere impostato più compiutamente attraverso una caratterizzazione di diversa tipologia (es. modellazione tramite simulazione specifica) rispetto a quella impostata in questo report.

2.1.8.1 Test della fascia oraria mattutina

Questa fascia oraria è caratterizzata da temperature ambientali comprese tra -1°C e $-2,13^{\circ}\text{C}$ ($-1,85^{\circ}\text{C}$ se non si considera l'ora dalle 5 alle 6). I carichi termici richiesti sono dell'ordine dei 7 kW in caso di distribuzione su cinque ore e di oltre 8,5 kW se distribuiti su 4 ore. Con le due distribuzioni, la potenza complessiva da fornire nella fascia oraria è leggermente diversa nei due casi perché dipendente dalla temperatura esterna dei periodi di attivazione della PdC. Con la distribuzione su 14 ore, è prevista una erogazione di 35,94 kW per utente (107,82 kW complessive), mentre nell'altro caso di 34,33 kW per utente (102,99 kW complessive). Con le temperature di esercizio stimate, prevedendo una riduzione di potenza erogata a 27 kW, la PdC dovrebbe rimanere accesa per un tempo compreso tra l'80% e il 95%.

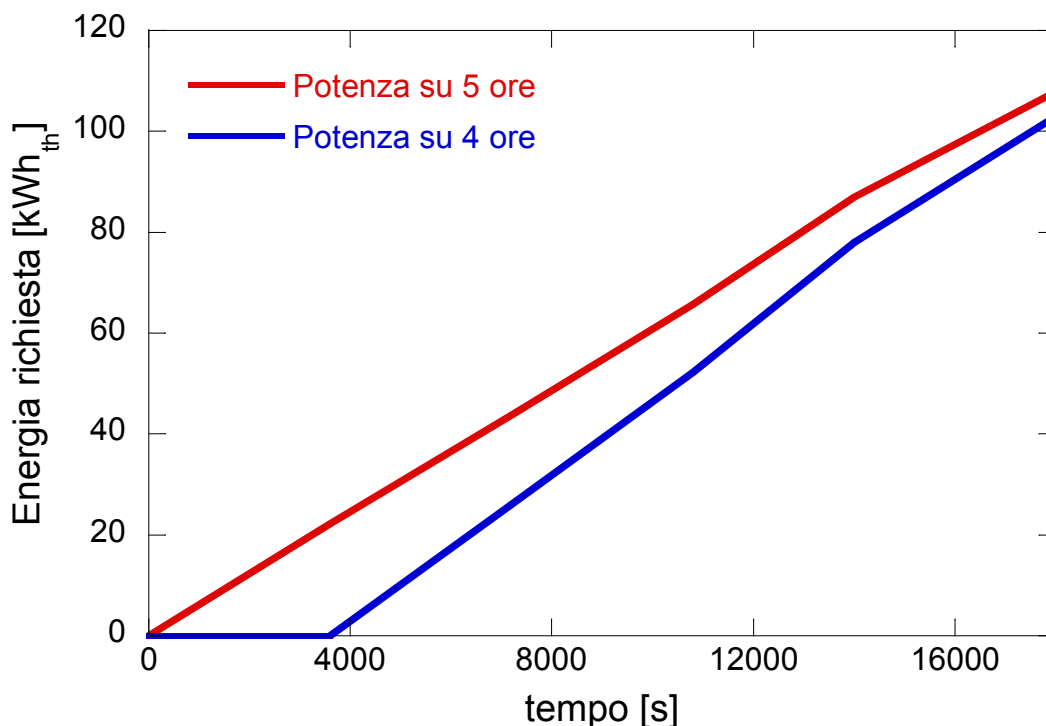


Figura 70 – Energia richiesta vs tempo, zona E, fascia oraria mattutina, distribuzione su 4 e 5 ore

TEST CON DISTRIBUZIONE DI POTENZA TERMICA SU 14 ORE

Test con Temperatura produzione acqua 45°C , inverter compressore 50Hz, Fan100%

L'elevato fattore di carico atteso ha portato alla scelta di eseguire un test di riferimento con inverter a 50 Hz e i fan al 100% della velocità massima per minimizzare la riduzione di potenza erogata dalla pompa di calore. In effetti la macchina ha erogato una potenza prossima alla nominale, cosicché il numero di accensioni /spegnimenti rilevati è risultato piuttosto elevato, come si evince da Figura 71, che mostra l'energia prodotta nel tempo in confronto alla richiesta.

Durante questi test, con i controllori PID impostato come nei test precedenti, sono state registrate delle perturbazioni di temperatura superiori rispetto ai test precedenti. La Figura 72 mostra l'oscillazione della temperatura ingresso PdC, di cui risentono gli altri parametri, come ad esempio gli assorbimenti elettrici. A

questo proposito, la Figura 73 mostra come, a fronte di un valore medio di assorbimento elettrico di 10,5 kW, si può arrivare a valori di picco i oltre 13kW.

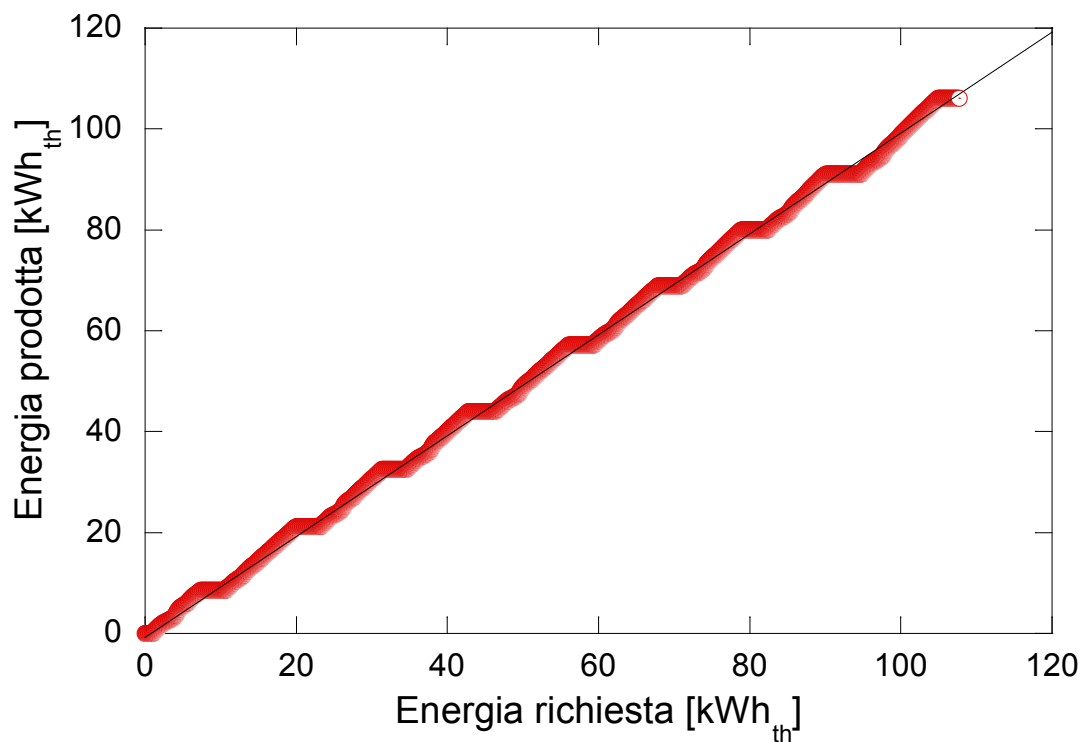


Figura 71 - Energie, richieste e prodotte (test zona E, ore5-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 100%)

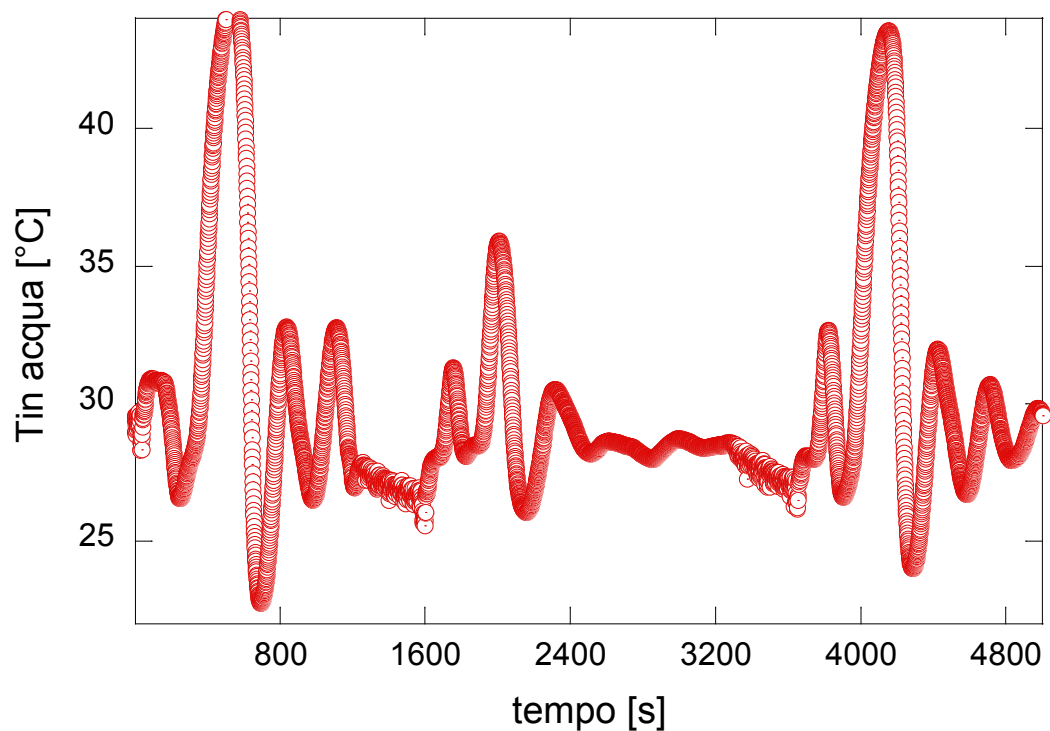


Figura 72 – Perturbazione sulla temperatura ingresso PdC
(test zona E, ore5-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 100% - particolare)

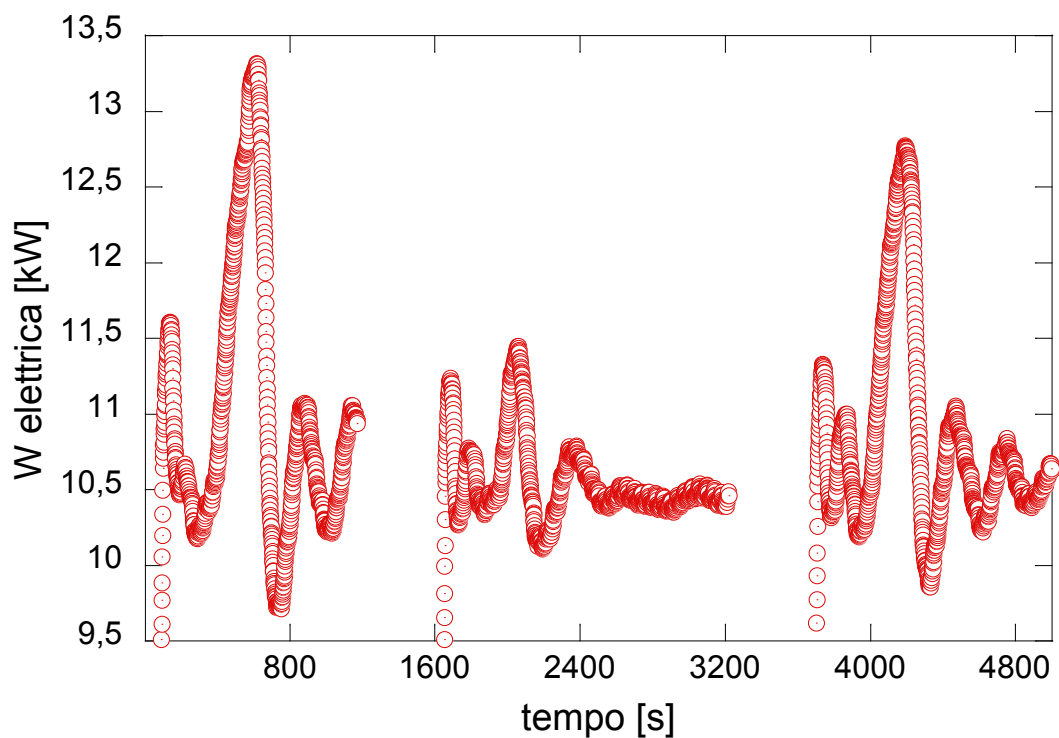


Figura 73– Potenza elettrica vs tempo
(test zona E, ore 5-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 100% - particolare)

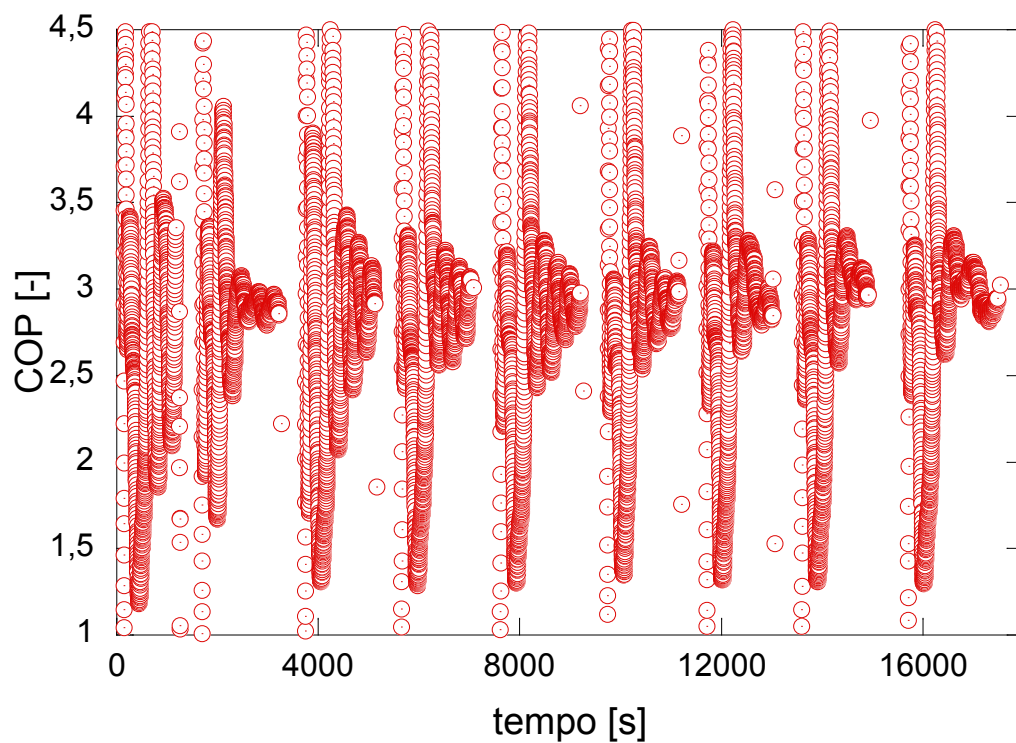


Figura 74 – COP vs tempo, test zona E, ore 5-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 100%

La Figura 74 mostra il COP registrato durante il test. Oltre alla conferma che le numerose accensioni non hanno consentito un funzionamento stazionario della PdC, si rileva anche che, in corrispondenza delle perturbazioni i COP sono diminuiti fino a valori ampiamente inferiori a 2. Si conferma quindi come una

corretta impostazione dei sistemi di controllo costituisce una priorità per il conseguimento di prestazioni elevate durante l'esercizio complessivo della PdC. Dai riscontri ottenuti, inoltre, appare opportuno impostare tali parametri in forma dedicata a seconda della diversa applicazione della PdC.

In tabella 16 sono riportate le prestazioni orarie ottenute durante il test.

**Tabella 16 – Prestazioni del test del blocco orario 5-10
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 100%)**

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Quinta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	21,22	22,97	21,94	20,72	19,49	107,80
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	8,08	8,67	8,32	7,87	7,03	40,58
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,62	2,64	2,64	2,63	2,77	2,66

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 50Hz, Fan 50%

L'elevato numero di accensioni della PdC del test precedente ha indotto all'esecuzione di un test con velocità dei fan al 50 %. Pur avendo rilevato la non perfetta impostazione dei controllori PID per il controllo della temperatura ingresso PdC, si è deciso di mantenerli alla stessa impostazione dei test precedenti nelle prime ore di funzionamento per poter fare una comparazione con il test precedente, per poi procedere ad un settaggio più appropriato.

La Figura 75 mostra il trend dell'energia prodotta e dà un'idea del numero di accensioni. In questo test, in occasione della quinta riaccensione, si è verificato un problema di comunicazione tra software di controllo e PdC che ha provocato un periodo di accensione maggiore.

La Figura 76 mostra la differenza di picco di temperatura prima e dopo la modifica dei PID. L'effetto si ripercuote sull'assorbimento elettrico, per il quale il picco raggiunge valori dell'ordine di 10,5 kW, contro gli 13 KW registrati prima della modifica (Figura 77).

Durante questi test, con i controllori PID impostato come nei test precedenti, sono state registrate delle perturbazioni di temperatura superiori rispetto ai test precedenti. La Figura 72 mostra l'oscillazione della temperatura ingresso PdC, di cui risentono gli altri parametri, come ad esempio gli assorbimenti elettrici. A questo proposito, la Figura 73 mostra come, a fronte di un valore medio di assorbimento elettrico di 10,5 kW, si può arrivare a valori di picco i oltre 13kW.

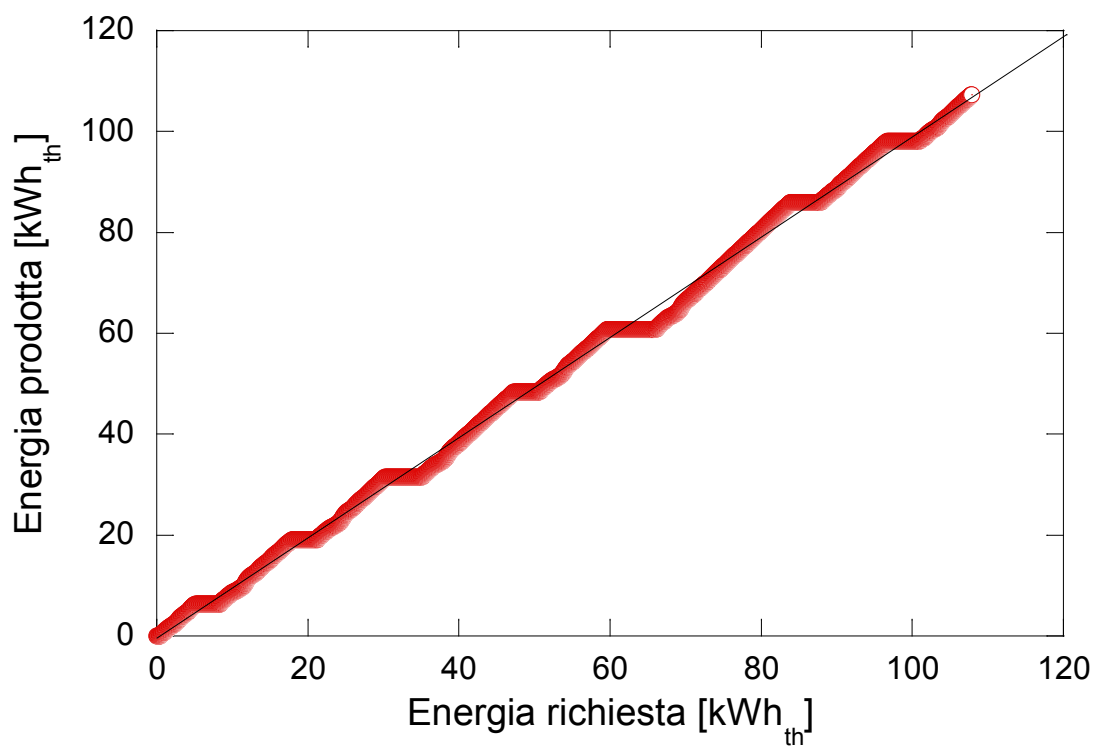


Figura 75 - Energie, richieste e prodotte (test zona E, ore5-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

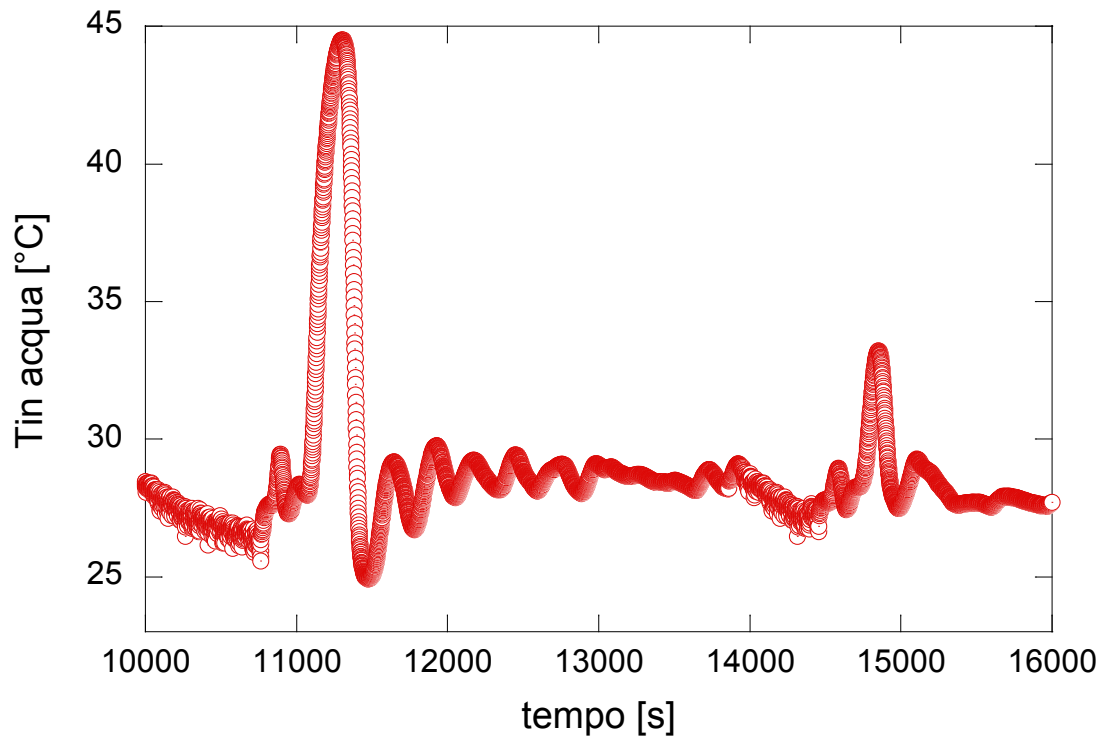


Figura 76 – Perturbazione sulla temperatura ingresso PdC
(test zona E, ore5-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50% - particolare)

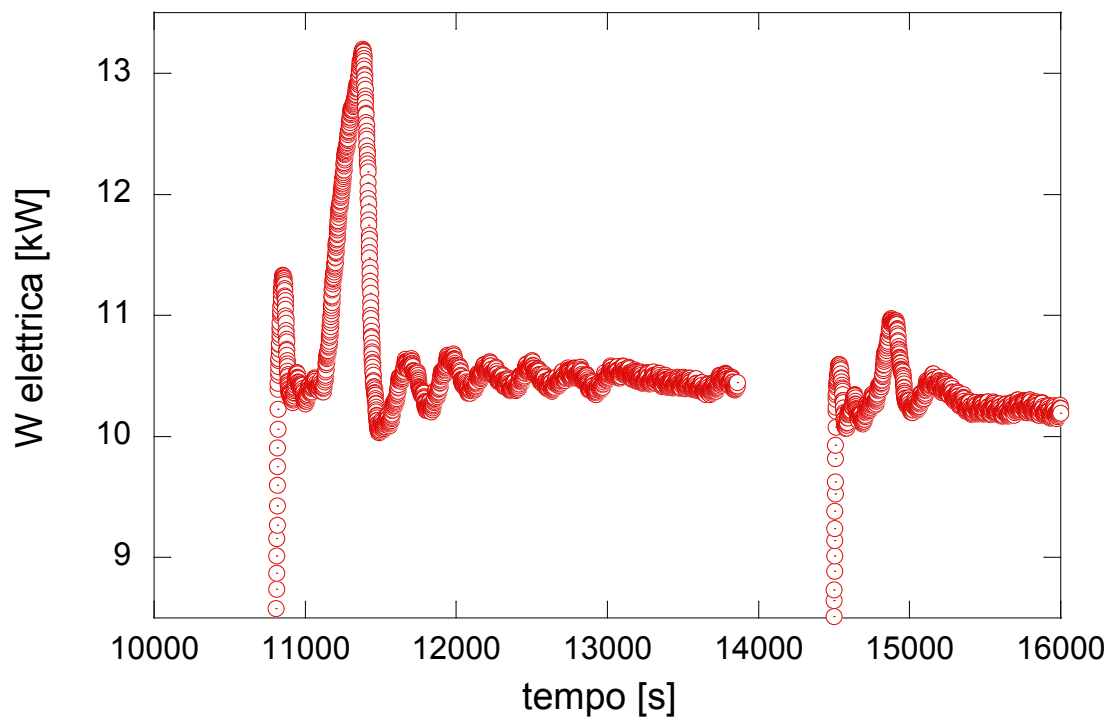


Figura 77– Potenza elettrica vs tempo
(test zona E, ore 5-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50% - particolare)

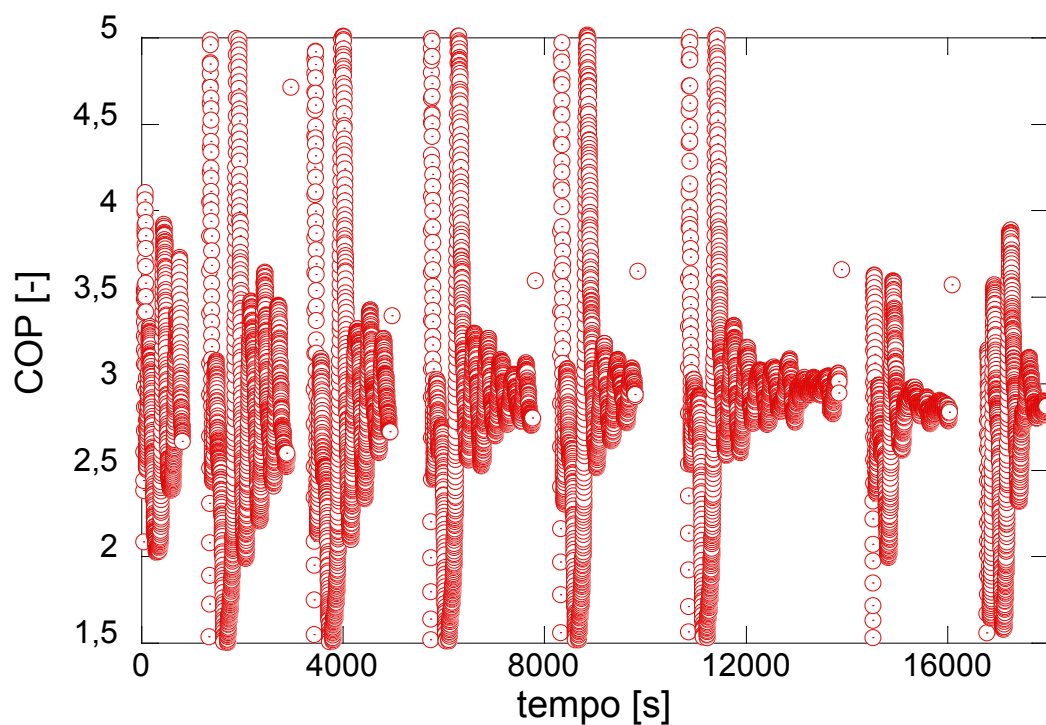


Figura 78 – COP vs tempo, test zona E, ore 5-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%

La Figura 78 mostra il COP registrato durante il test. Nelle fasi di stabilizzazioni ha assunto valori poco inferiori a 3.

La riduzione della velocità dei ventilatori non ha determinato un particolare effetto sulle prestazioni. In particolare non si sono registrate variazioni sostanziali della pressione ingresso compressore (Figura 79) e

della potenza termica erogata dalla PdC (Figura 80). In termini assoluti, la potenza termica erogata è risultata leggermente superiore all'atteso, attestandosi ancora intorno ai 30 kW.

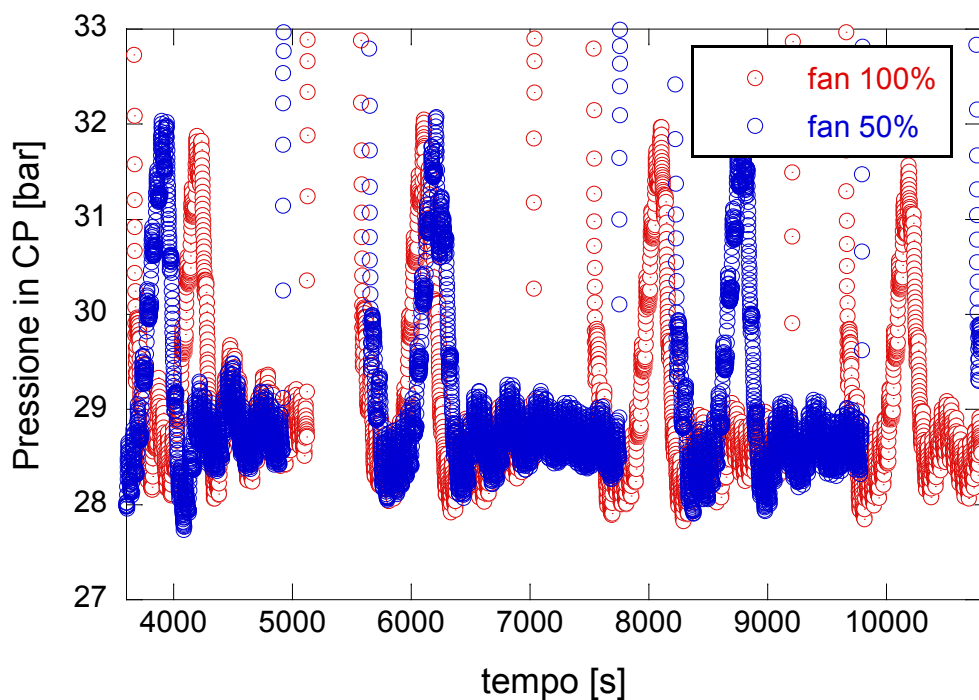


Figura 79 – Confronto pressioni ingresso compressore con fan al 50% e al 100%
test zona E, ore 5-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz (seconda e terza ora)

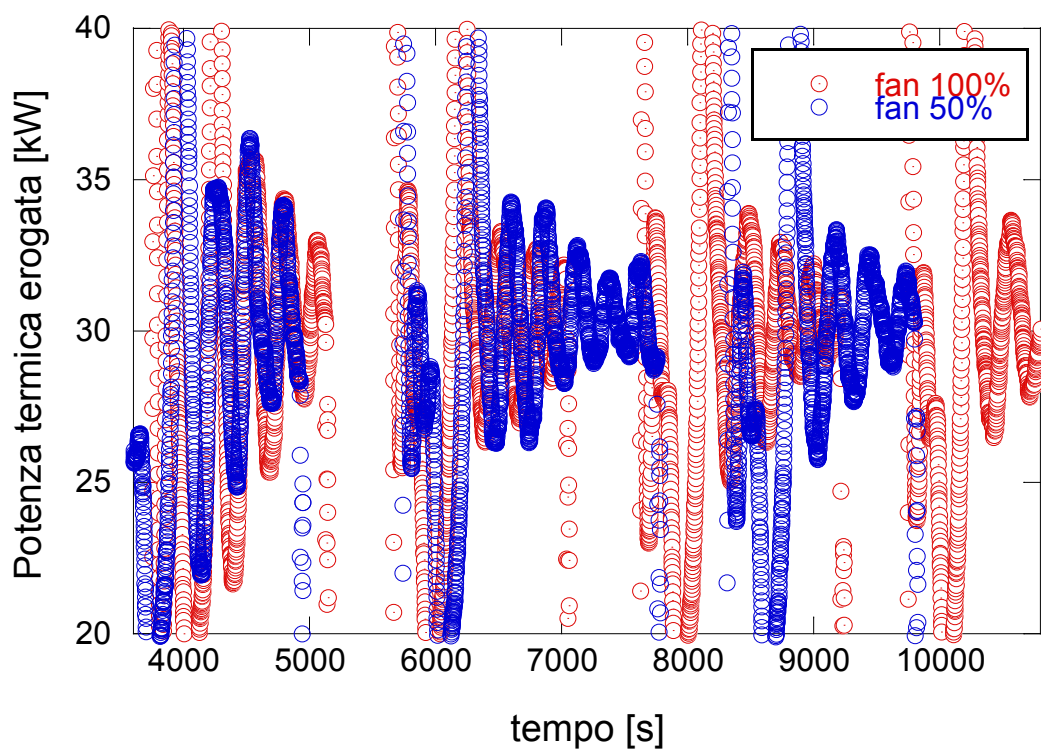


Figura 80 – Confronto potenze termiche erogate con fan al 50% e al 100%
test zona E, ore 5-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz (seconda e terza ora)

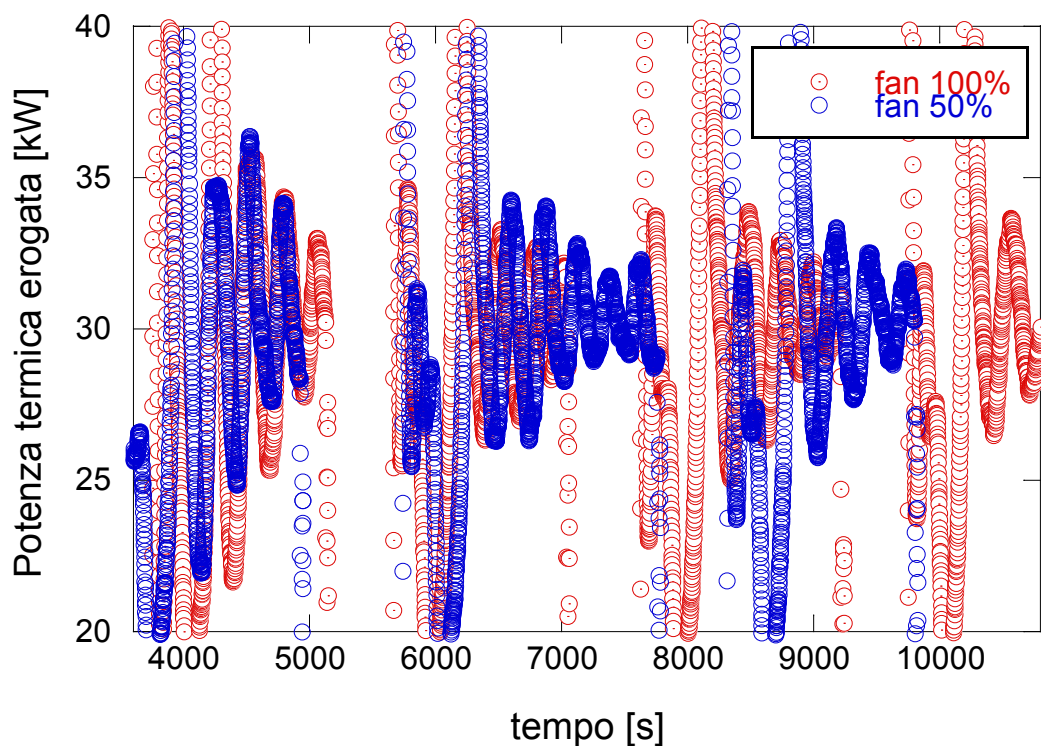


Figura 81 – Confronto potenze termiche erogate con fan al 50% e al 100%
test zona E, ore 5-10, Tacqua 45 °C, Inverter 50Hz (seconda e terza ora)

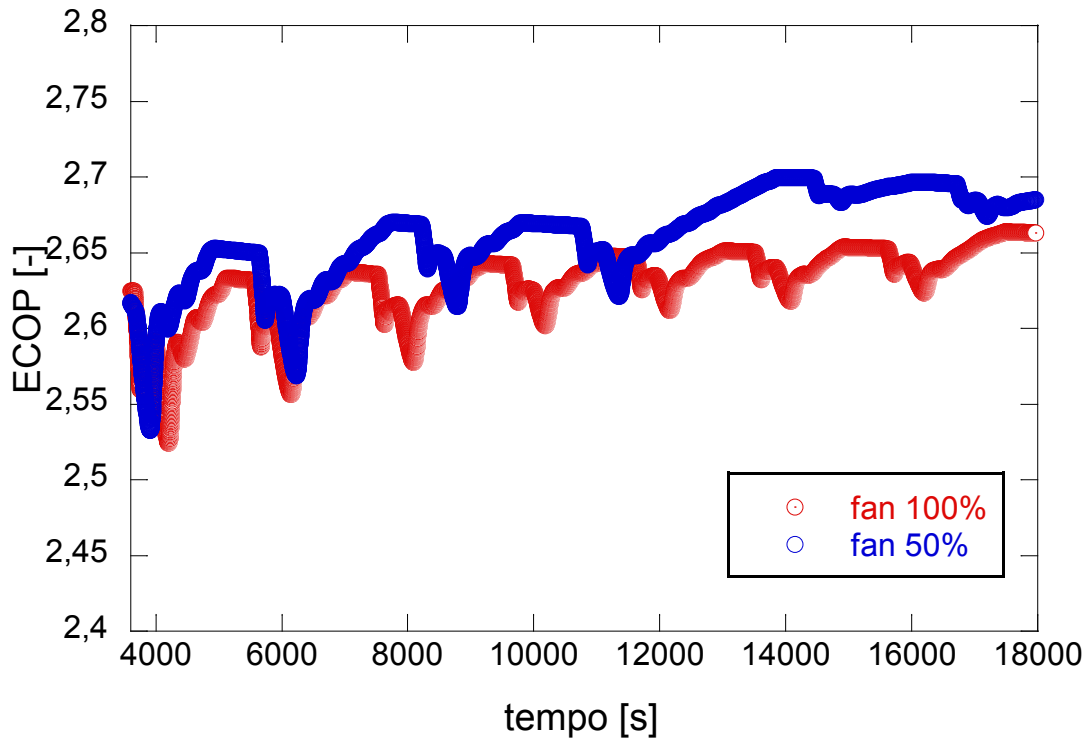


Figura 82 – ECOP vs tempo, test E, fascia oraria 5-10, T acqua 45, inverter fan 100% e 50%

A livello di ECOP, si nota una sostanziale corrispondenza dei valori ottenuti. Il test con fan al 50% tende ad avere prestazioni migliori soprattutto dopo la fase di accensione più lunga.
La tabella seguente riporta i valori di ECOP riscontrati ora per ora durante il test in esame.

**Tabella 17 – Prestazioni del test del blocco orario 5-10
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)**

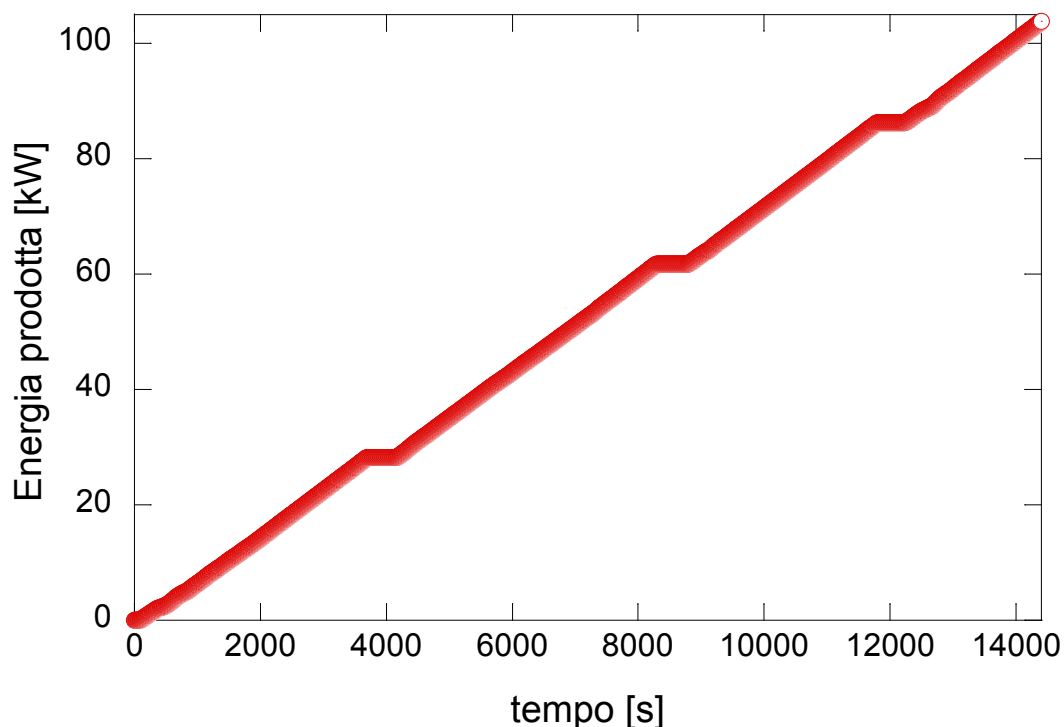
	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Quinta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	20,69	23,14	17,17	25,20	21,5	107,80
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	7,91	8,63	6,39	9,01	8,18	40,14
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,62	2,68	2,69	2,80	2,63	2,68

Per questa fascia oraria e questa distribuzione della potenza da erogare su 5 ore sono stati eseguiti poi dei test con temperatura di produzione dell'acqua impostata a 60 °C, di due ore ciascuno (fascia oraria 5-7). Le prestazioni sono state inferiori: il test con ventilatore al 50% ha fatto registrare un ECOP finale di 2,52, mentre quello con ventilatore al 100% della modulazione ha avuto un ECOP di 2,57.

TEST CON DISTRIBUZIONE DI POTENZA TERMICA SU 12 ORE

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 50Hz, Fan50%

Il test in questione ha inteso verificare le prestazioni ottenibili nel caso di erogazione della potenza mattutina su 4 ore. Questa scelta esclude l'ora compresa tra le 5 e le 6, che è quella a più bassa temperatura di questo blocco orario, dal periodo di accensione della pompa di calore. Questa opzione ovviamente costituisce un vantaggio in termini prestazionali, ma potrebbe non essere ottimale per il comfort dell'utente. La Figura 83 mostra la potenza erogata durante il test. Il fatto che è necessario erogare circa 103 kW in 4 ore (invece di 107,82 kW in 5 ore) implica che la potenza oraria da fornire ammonta a circa 25,7 kW. Questa situazione determina un numero di riaccensioni molto limitato (pari a 3).



**Figura 83 – Energia prodotta vs tempo
(test zona E, ore6-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)**

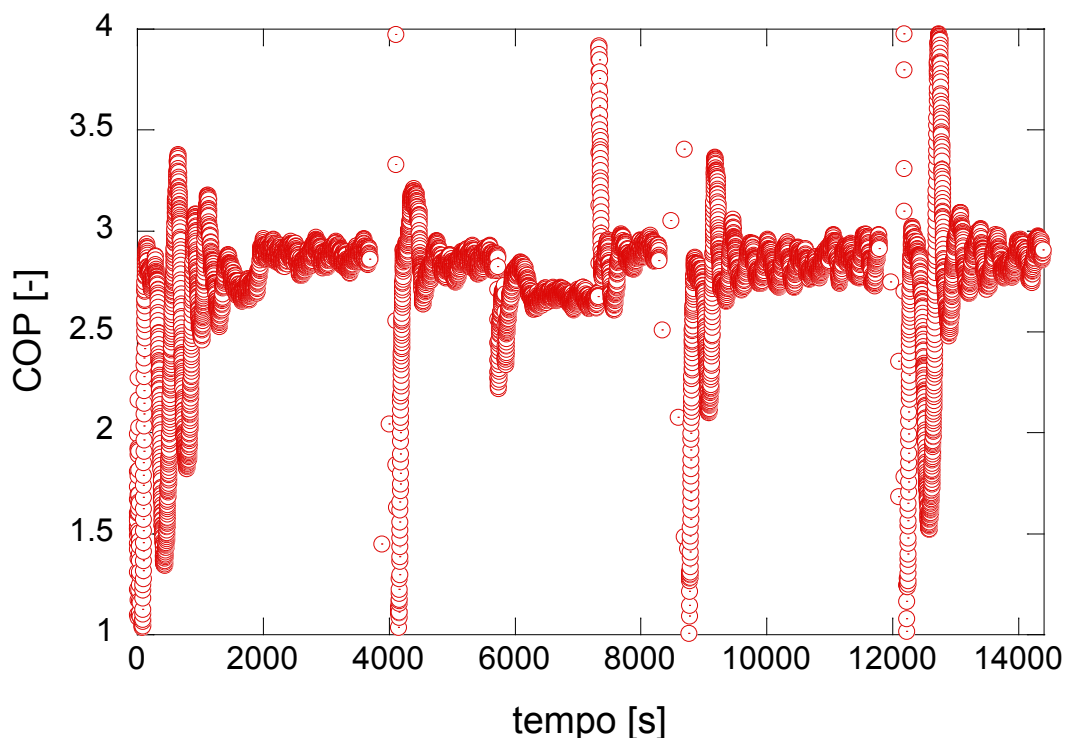


Figura 84 – COP vs tempo
(test zona E, ore 6-10, Tout acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

Il COP ha un andamento più stabile: complessivamente si è registrato un piccolo incremento di COP rispetto al test con erogazione su 5 ore, che ha condotto ad un corrispondente incremento di ECOP, come riportato nella tabella seguente.

Tabella 18 – Prestazioni del test del blocco orario 6-10
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	27,39	25,20	25,41	25,84	103,00
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	10,21	9,31	9,23	9,36	3,86
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,68	2,71	2,75	2,76	2,72

2.1.8.2 Test della fascia oraria centrale

Per la valutazione dinamica delle prestazioni della pompa di calore in questa fascia oraria, sono stati eseguiti due test con la distribuzione di potenza su 14 ore, con temperatura di produzione di 45°C con fan al 50% e inverter del compressore rispettivamente a 50 Hz e 40Hz. Con la distribuzione di potenza su 12 ore è stato condotto un test con frequenza del compressore variabile e fan a 50% della velocità. Le temperature ambientali sono comprese tra 6,8 e 7,85°C, mentre il carico termico complessivo, considerando il servizio su tre utenze, è di 42,15 kW per la distribuzione su 14 ore e di 50,7kW per la distribuzione su 12 ore (Figura 85).

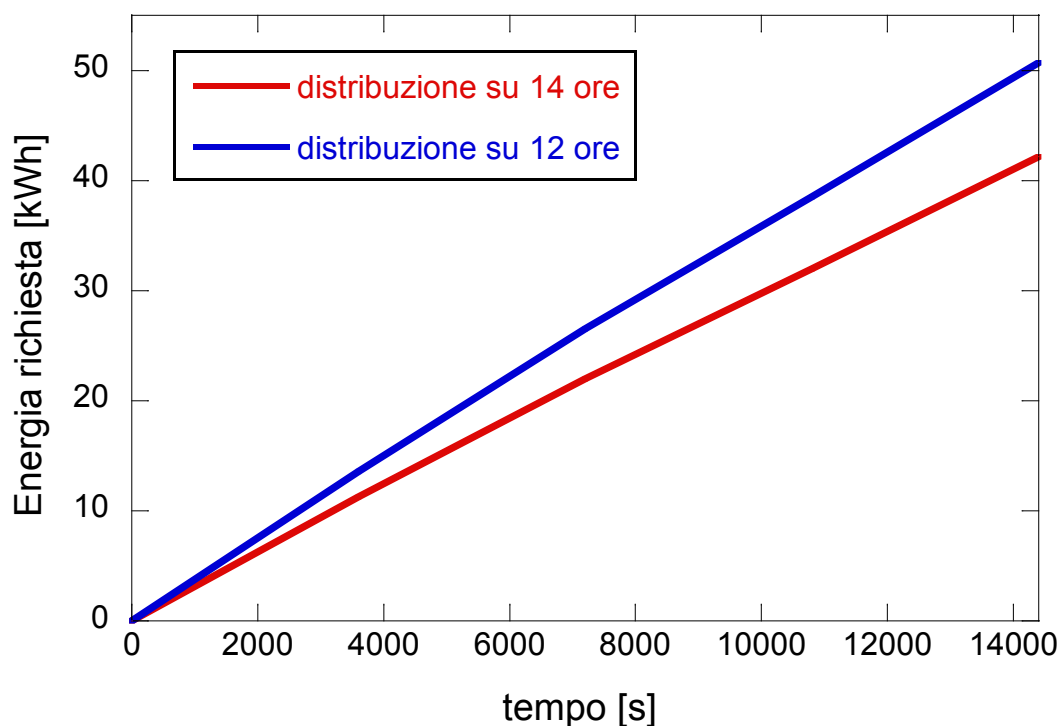


Figura 85 – Energia richiesta vs tempo, zona E, fascia oraria centrale, distribuzione su 4 e 5 ore

TEST CON DISTRIBUZIONE DI POTENZA TERMICA SU 14 ORE

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 50Hz, Fan50%

La limitata potenza termica complessiva richiesta e l'ordine di grandezza della potenza erogata dalla PdC, che in queste condizioni di lavoro è stata superiore ai 30 kW, ha provocato un elevato numero di spegnimenti e riaccensioni (Figura 86).

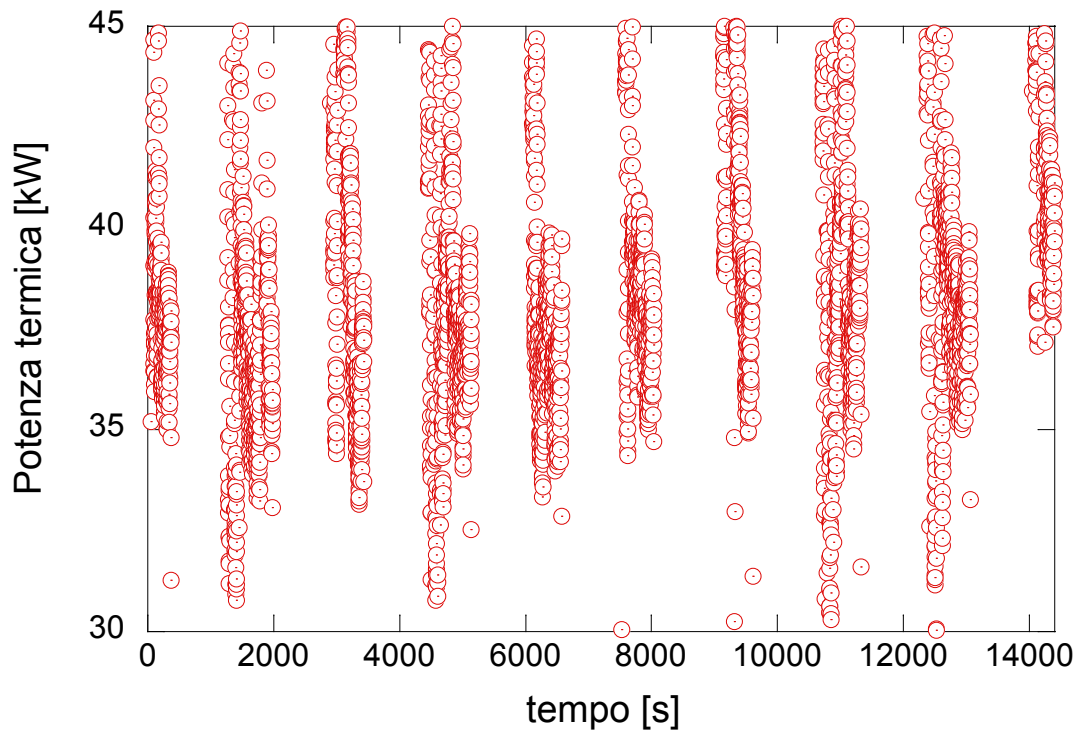


Figura 86 – Potenza termica erogata vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 50 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

In termini di COP, si registra per lo stesso motivo un'assoluta assenza di stabilizzazione (Figura 87) con la tendenza ad un incremento delle prestazioni nella seconda parte della prova.

In termini di ECOP, quindi, vi è un corrispondente incremento nella seconda parte del test (Figura 88).

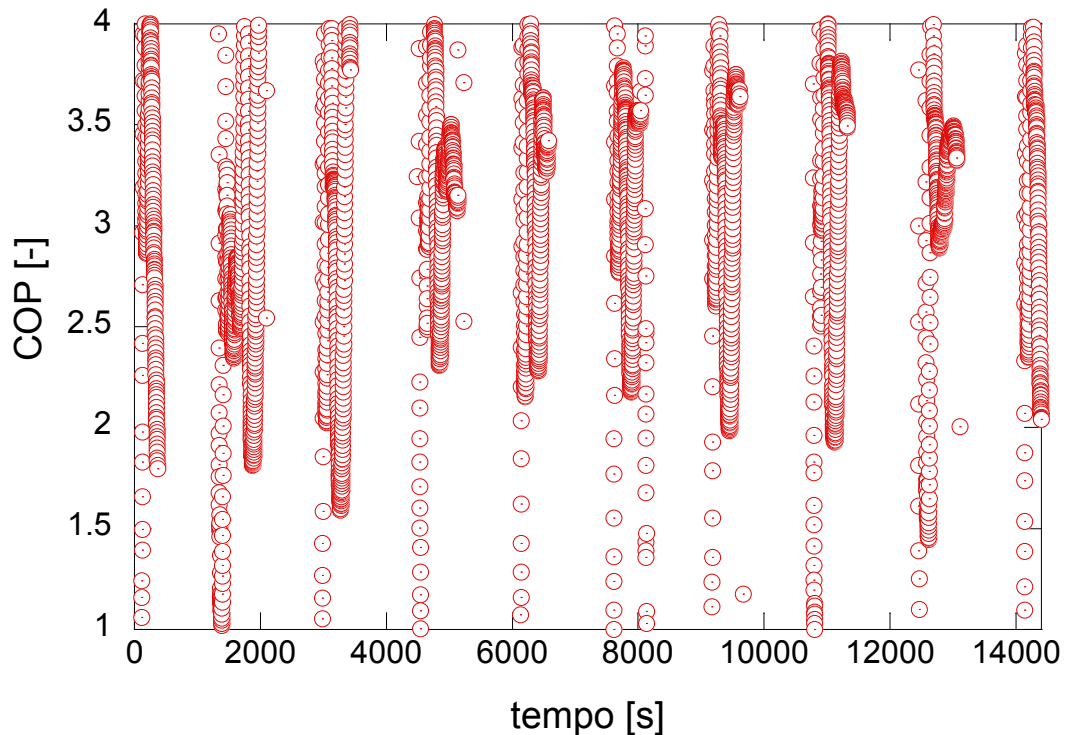


Figura 87 – COP vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 50 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

Complessivamente, le prestazioni restano sotto quanto atteso, soprattutto in considerazione delle temperature dell'aria piuttosto elevate. La tabella 19 riporta un breve sunto delle principali grandezze energetiche registrate.

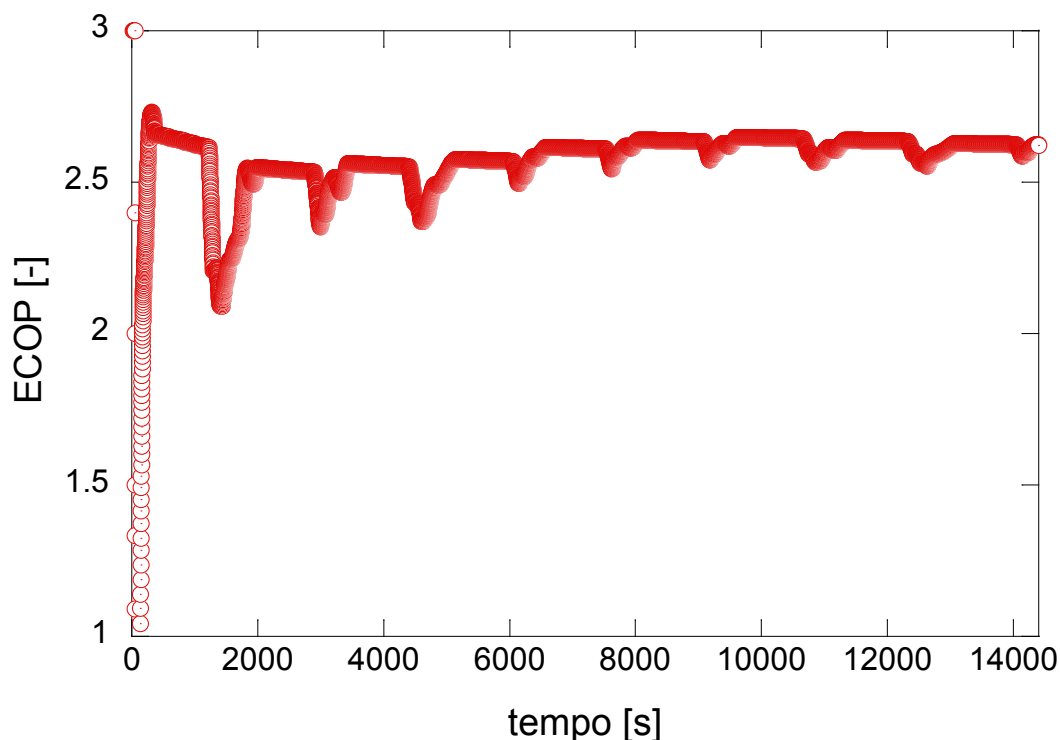


Figura 88 – ECOP vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 50 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

Tabella 19 – Prestazioni del test del blocco orario 12-16
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 50Hz, fan 50%, potenza su 14 ore)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	12,10	9,54	8,79	12,20	42,15
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	4,73	3,56	3,46	4,52	16,07
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,56	2,68	2,54	2,70	2,62

Test con Temperatura produzione acqua 45 °C, inverter compressore 40Hz, Fan50%

Per rendere il funzionamento della PdC più stabile possibile, riducendo gli on-off, è stato fatto un test analogo al precedente, ma con inverter del compressore fissato a 40Hz. Su questo test è stata ulteriormente ritoccata la logica PID dei controllori delle pompe di circolazione, giungendo ad una funzionalità molto stabile, con oscillazioni limitate a $\pm 4^{\circ}\text{C}$ (Figura 89).

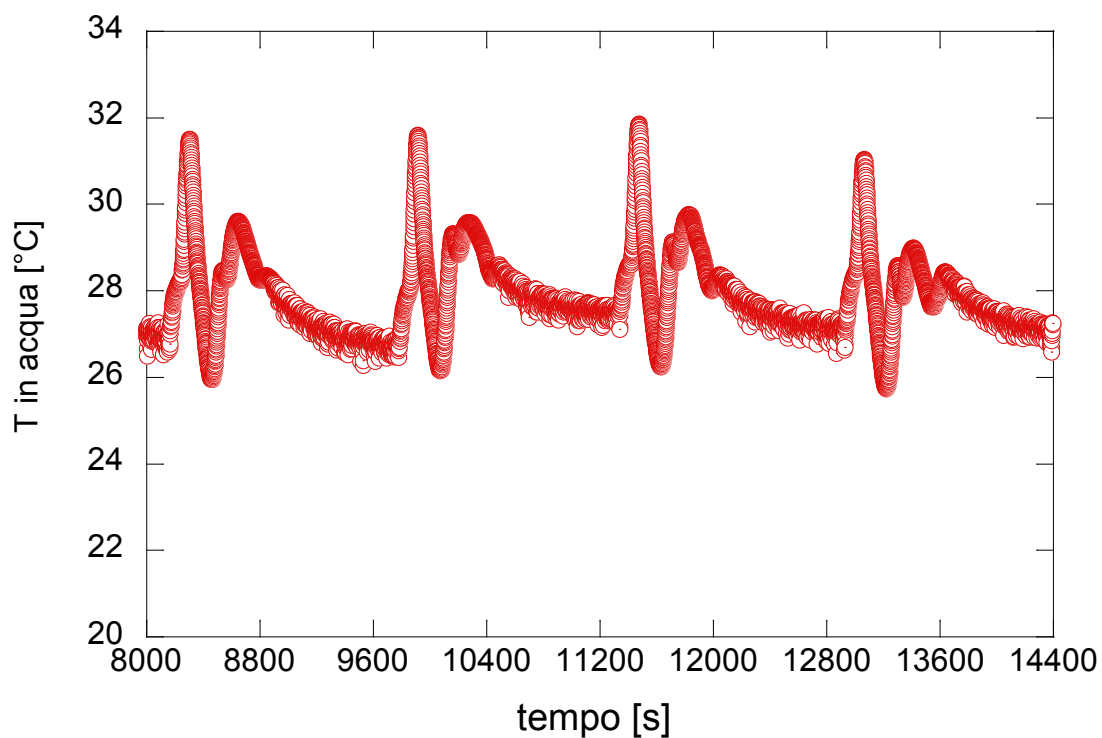


Figura 89 – Temperatura ingresso CP vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

Ciò naturalmente riduce i picchi sull'assorbimento elettrico in maniera significativa, come visibile dalla Figura 90, dalla quale si deduce anche che l'assorbimento, durante la fase di funzionamento stazionario si è attestato a valori di 8-8,5 kW.

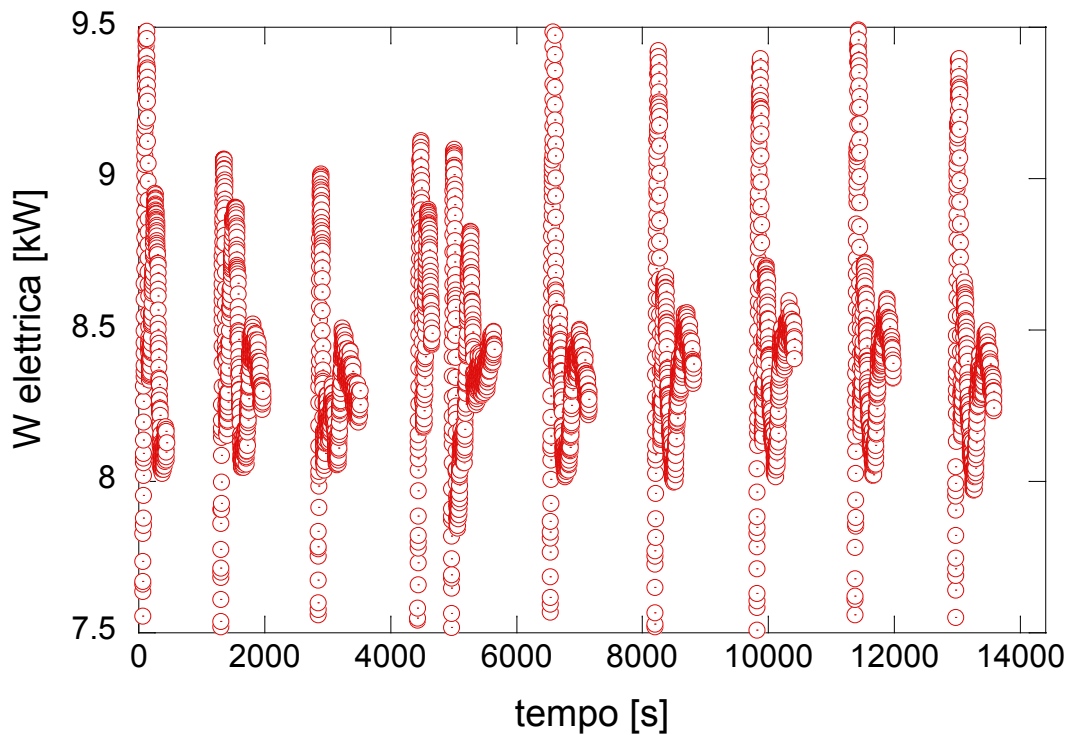


Figura 90 – Potenza elettrica vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

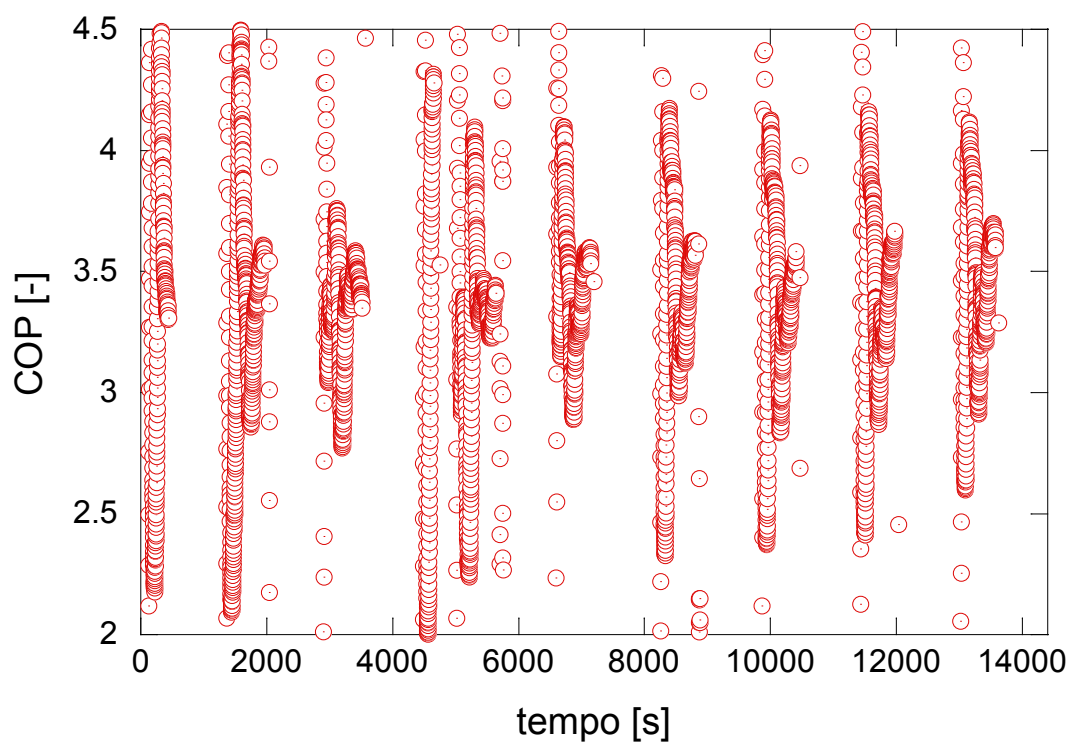


Figura 91 – COP vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

In termini di COP, si registra un suo considerevole aumento durante le fasi stazionarie rispetto al test precedente (Figura 91), con valori puntuali, nelle fasi di stabilizzazione, che raggiungono anche valori oltre 3,2.

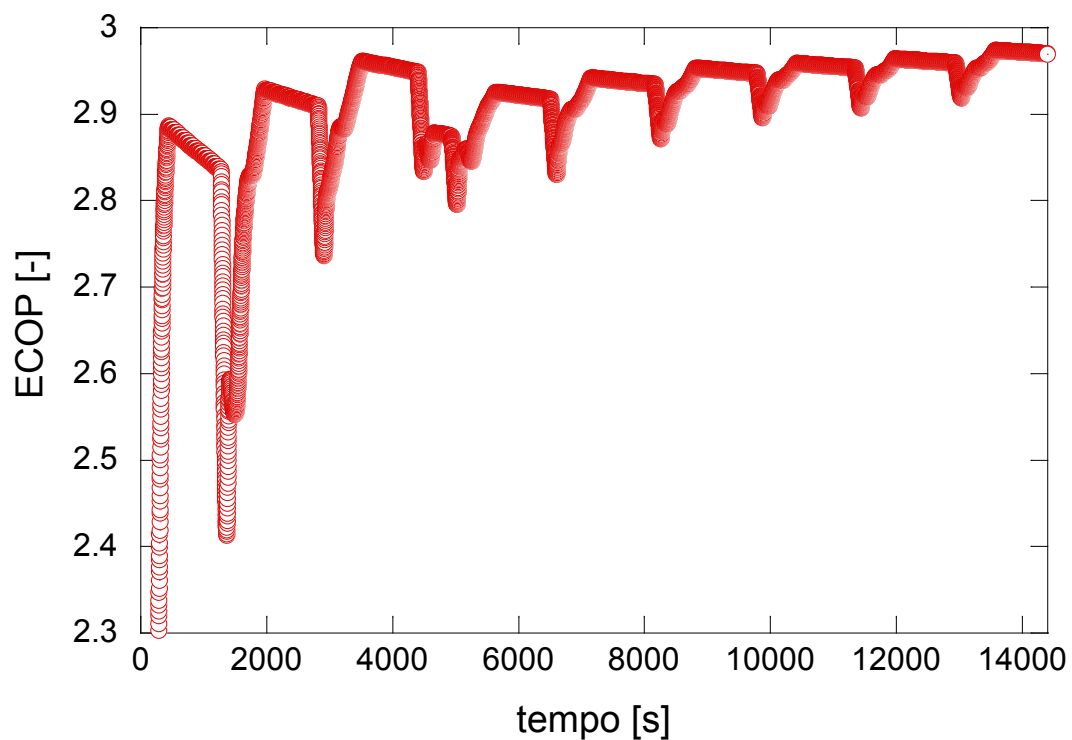


Figura 92 – ECOP vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50% potenza su 14 ore)

Purtroppo, i molti on-off determinano un valore finale di ECOP evidentemente più basso di quest'ultimo valore, come mostra la Figura 92 e la tabella 20.

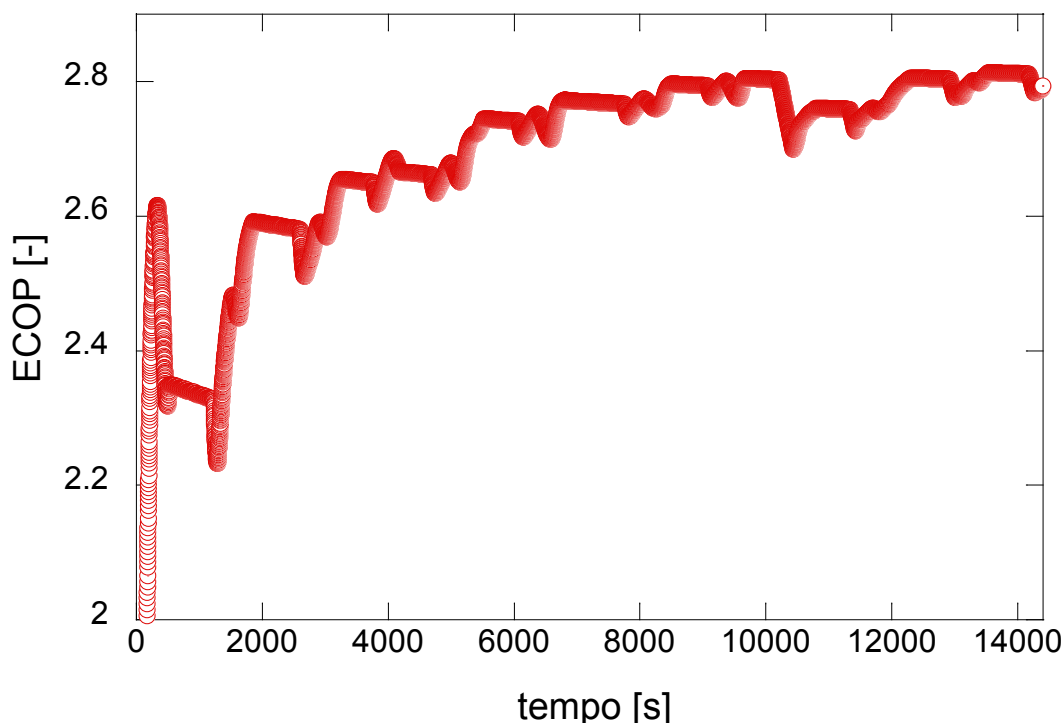
**Tabella 20 – Prestazioni del test del blocco orario 12-16
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)**

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	12,35	10,95	8,96	9,02	42,15
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	4,17	3,75	2,99	2,98	14,3
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,96	2,92	3,00	3,02	2,95

TEST CON DISTRIBUZIONE DI POTENZA TERMICA SU 12 ORE

Test con Temperatura produzione acqua 60 °C, inverter compressore a frequenza variabile, Fan50%

Questo test è stato eseguito con frequenza dell'inverter del compressore variabile, impostato nella prima ora a 50 Hz e successivamente a 40 Hz. Come visibile dal grafico di Figura 93, la prima ora di funzionamento con inverter a 50Hz è molto penalizzante per le prestazioni della PdC. Il rendimento migliora sensibilmente nelle successive tre ore, ma rimane comunque inferiore a quello ottenuto, nello stesso periodo di tempo, con temperatura di produzione dell'acqua fissata a 45°C, come mostra la tabella 21.



**Figura 93 – ECOP vs tempo
(test zona E, ore 12-16, Tout acqua 60 °C, Inverter variabile, fan 50% potenza su 12 ore)**

Tabella 21 – Prestazioni del test del blocco orario 12-16
(zona E, T acqua 60 °C, Inverter CP a frequenza variabile, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	13,65	13,41	12,34	12,37	50,7
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	5,15	4,63	4,51	4,27	18,2
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,65	2,90	2,74	2,90	2,78

2.1.8.3 Test della fascia oraria serale

In questa fascia oraria le temperature ambientali sono comprese tra 1,1 e 2,6°C, mentre il carico termico complessivo, considerando il servizio su tre utenze, è di 88,41 kW per la distribuzione su 14 ore e di 84,63 kW per la distribuzione su 12 ore (Figura 94).

Per la valutazione dinamica delle prestazioni della pompa di calore in questa fascia oraria, sono stati eseguiti quattro test. In questa sede si illustreranno, in forma comparativa, i risultati ottenuti nei due test effettuati per le due distribuzioni di potenza su 12 e 14 ore, nelle medesime condizioni lato macchina (temperatura di produzione dell'acqua 45°C, inverter compressore 40 Hz, fan 50%).

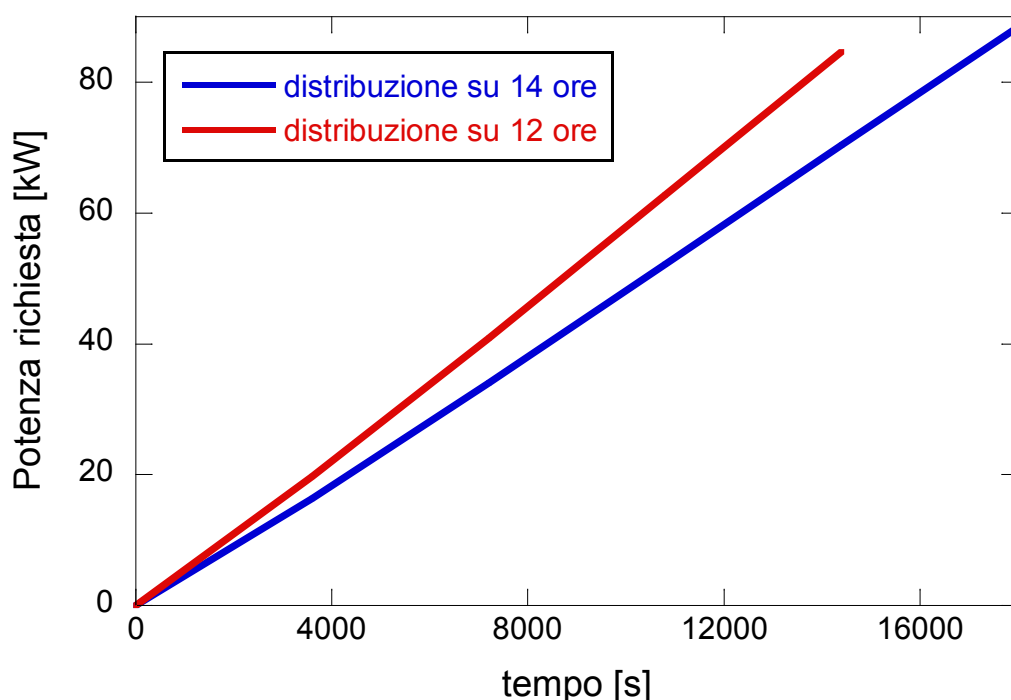


Figura 94 – Energia richiesta vs tempo, zona E, fascia oraria serale, distribuzione su 12 e 14 ore)

Tenendo conto che la prova con distribuzione di potenza su 14 ore complessive è stata interrotta in anticipo per problematiche tecniche sul sistema di controllo esterno, il grafico delle energie prodotte dà conto del diverso numero di on-off della pompa di calore nelle due modalità di funzionamento (Figura 95). Questo determina una maggiore stabilità di funzionamento nel test con distribuzione di potenza su 12 ore, che richiede l'erogazione di una potenza oraria superiore.

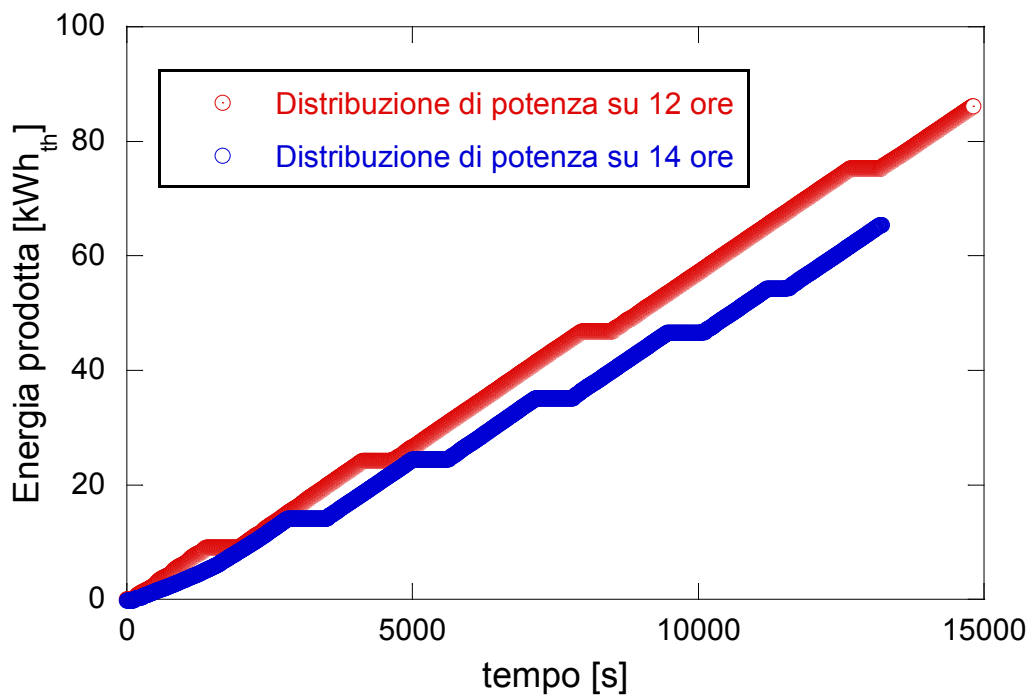


Figura 95 – Energia prodotta vs tempo, zona E, fascia oraria serale
(test con distribuzione di potenza su 12 e 14 ore, , T acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50%)

Durante l'esecuzione dei due test, il sistema di controllo è riuscito a mantenere piuttosto stabile la temperatura di ingresso PdC, con oscillazioni iniziali solo leggermente più accentuate per il test con richiesta di potenza su 12 ore (Figura 96).

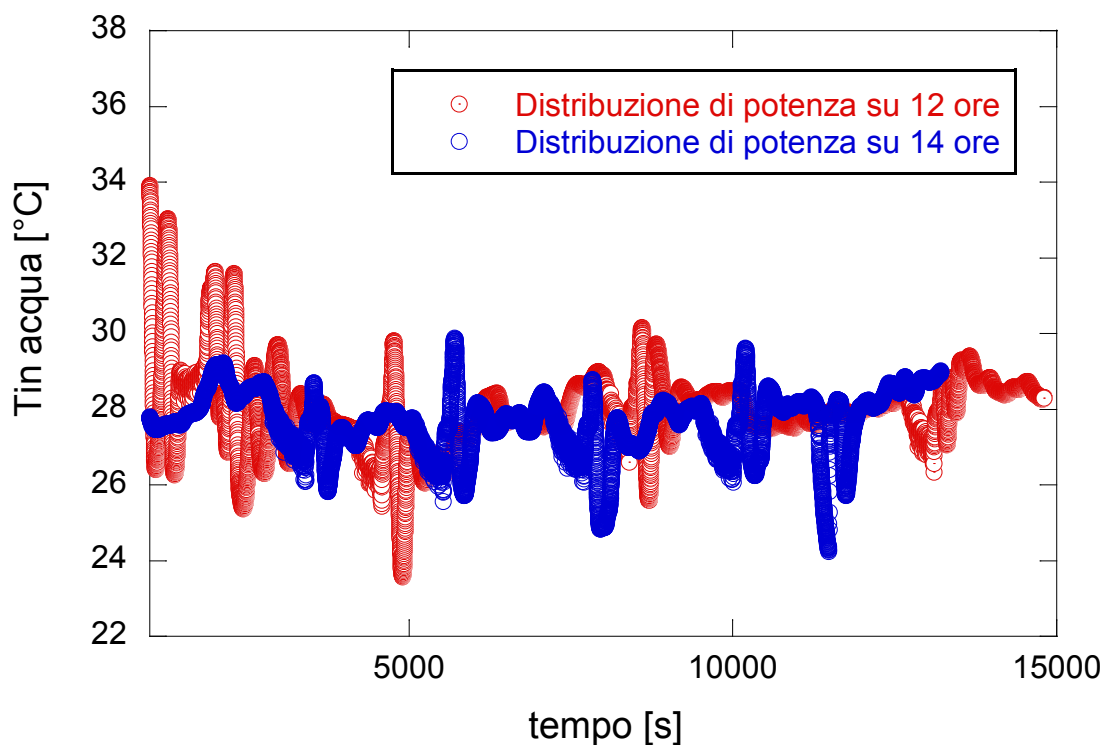


Figura 96 – Temperatura ingresso PdC vs tempo, zona E, fascia oraria serale
(test con distribuzione di potenza su 12 e 14 ore, , T acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50%)

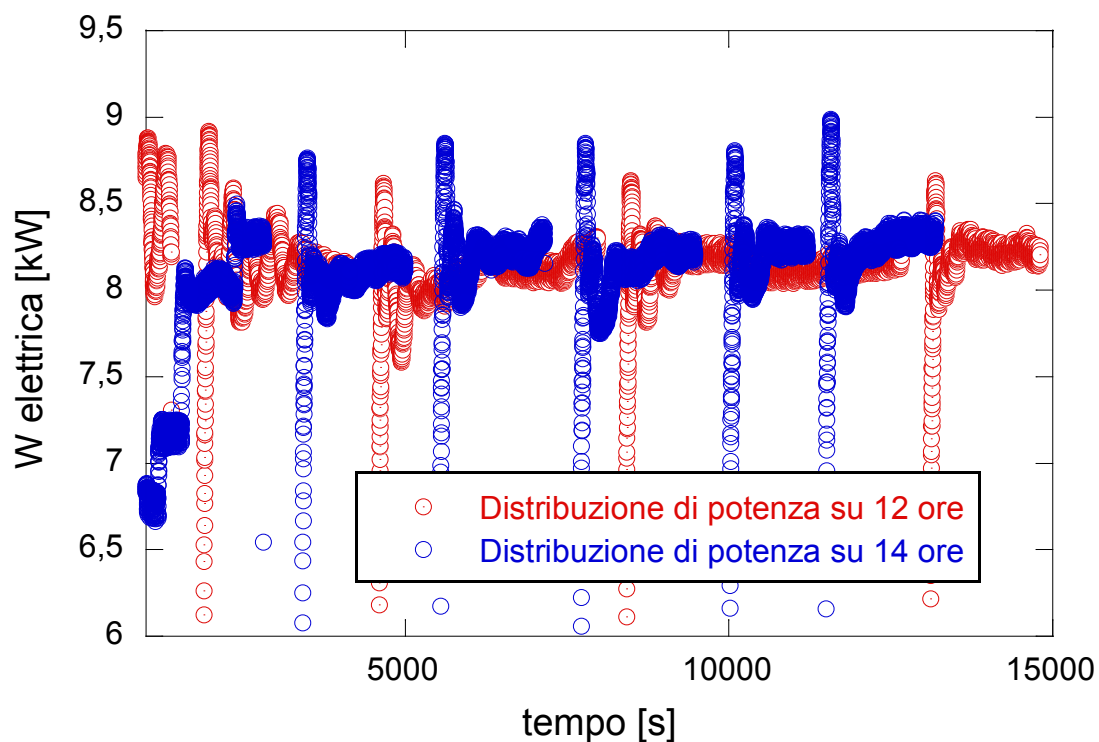


Figura 97 – Potenza elettrica vs tempo, zona E, fascia oraria serale
(test con distribuzione di potenza su 12 e 14 ore, , T acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50%)

In termini di potenza elettrica, di conseguenza, i picchi di potenza sono stati piuttosto contenuti, giungendo ad un massimo di 9kW, con valori leggermente superiori per il test con richiesta di potenza su 14 ore (Figura 97).

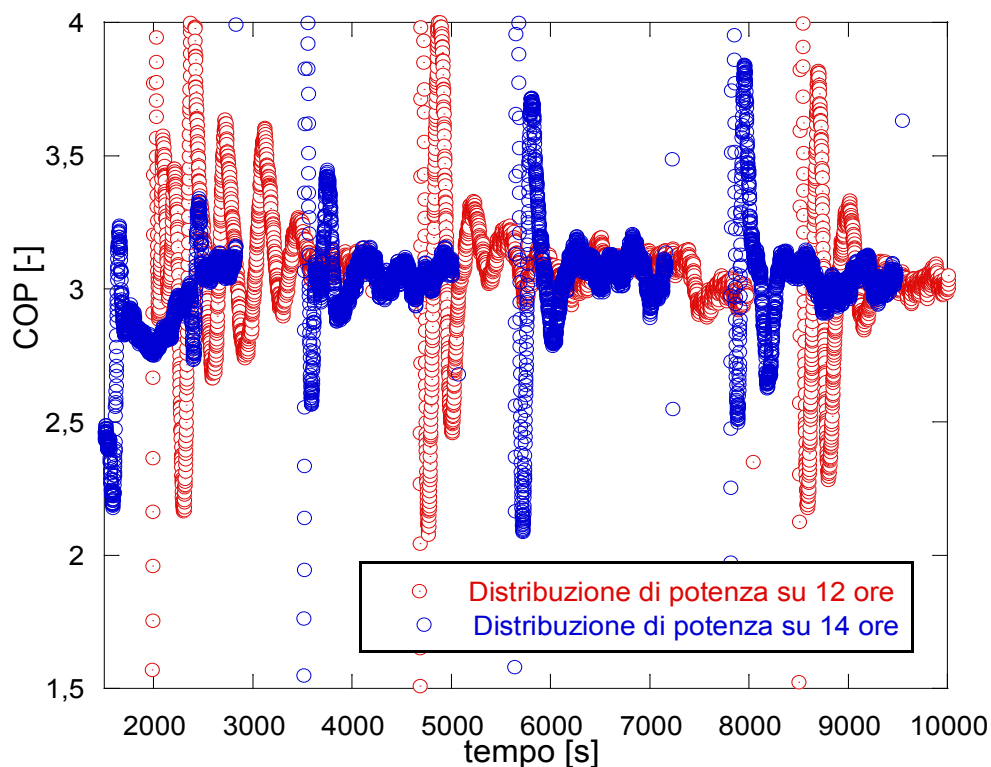


Figura 98 – COP vs tempo, zona E, fascia oraria serale
(test con distribuzione di potenza su 12 e 14 ore, , T acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50%)

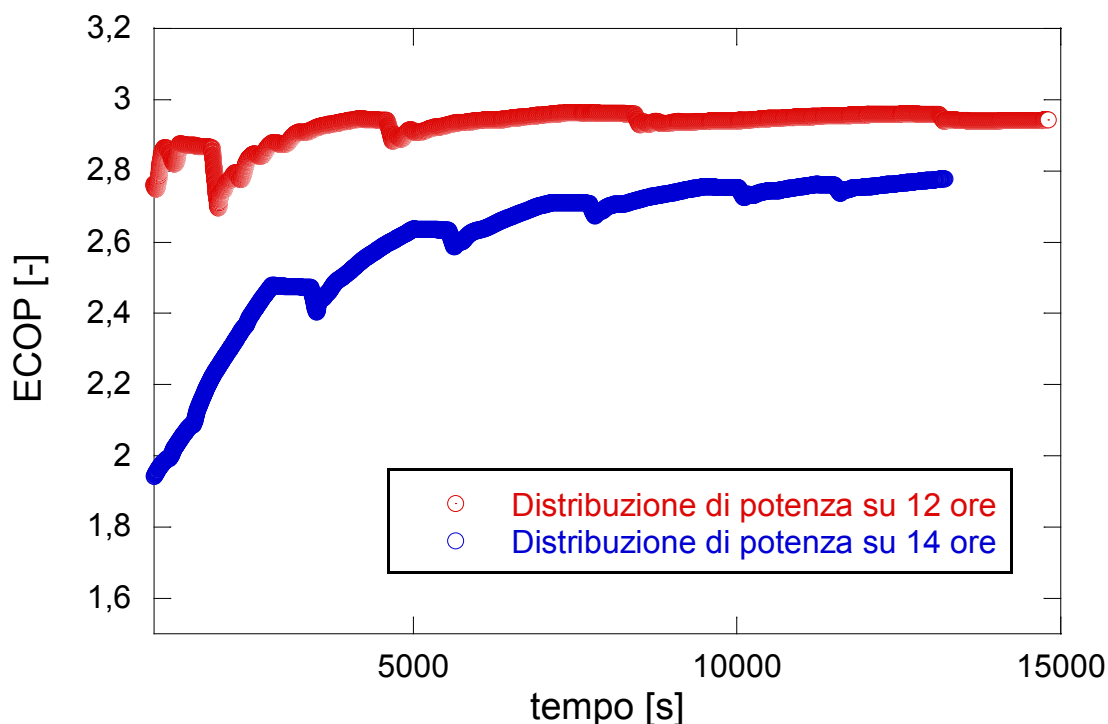


Figura 99 – ECOP vs tempo, zona E, fascia oraria serale
(test con distribuzione di potenza su 12 e 14 ore, , T acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50%)

I valori di COP registrati (Figura 98), di conseguenza, nelle fasi di funzionamento stabile sono stati molto simili. Nelle riaccensioni, l'entità della perturbazione sul test con richiesta su 12 ore sembra maggiore (3-4 cicli di oscillazione prima della stabilizzazione) ma il minor numero di queste determina un complessivo miglioramento della performance energetica. Infatti, come si evince da Figura 99, l'indicatore ECOP subisce comunque una riduzione piuttosto importante in corrispondenza delle fasi di on-off.

Le tabelle 22 e 23 riportano i valori dei parametri energetici misurati durante i due test. Non considerando la prima ora di test, (non comparabile perché il test con richiesta distribuita su 14 ore è stato eseguito con eiettori non controllati), l'ECOP orario del test con distribuzione di potenza su 12 ore è stato sempre maggiore rispetto all'altro, con differenze comunque minime (1,5% sulla seconda ora, 3% sulla terza ora, 1,4% sulla quarta ora). Naturalmente la scelta della distribuzione della potenza su un intervallo di tempo più o meno ampio dipende soprattutto dalle esigenze dell'utenza e dagli scostamenti rispetto alla condizione di benessere ottimale che essa è disposta ad accettare, esulando quindi parzialmente da un discorso strettamente energetico. Si conferma comunque, che una PdC in grado di seguire meglio il carico può garantire un'efficienza energetica migliore.

Tabella 22 – Prestazioni del test del blocco orario 18-23
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 40 Hz, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Quinta ora**	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	15,01	20,33	16,21	14,11	-	65,6**
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	6,14	6,87	5,70	4,88	-	23,6
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,44*	2,96	2,84	2,88	-	2,78

*: prima ora eseguita con eiettori non controllati; **: test terminato nel corso della quarta ora per un'avaria al controllore della camera climatica

Tabella 23 – Prestazioni del test del blocco orario 18-22
(zona E, T acqua 45 °C, Inverter 40Hz, fan 50%)

	Prima ora	Seconda ora	Terza ora	Quarta ora	Al pareggio termico
Energia termica prodotta [kWh _{th}]	20,57	21,15	21,01	20,88	84,6
Energia elettrica assorbita [kWh _{th}]	7,02	7,05	7,16	7,14	28,72
ECOP [kWh _{th} /kWh _{el}]	2,93	3,00	2,93	2,92	2,94

2.1.8.4 Riepilogo risultati complessivi zona climatica E

Si riepilogano i dati principali dei tre test con richiesta termica su 14 ore, uno per ognuna delle fasce orarie di attivazione del generatore termico in zona climatica E, con le migliori prestazioni in termini di ECOP. Come la corrispondente tabella della zona D, nella tabella seguente si riepiloga il tempo (in percentuale) nel quale la PdC è spenta, il numero di accensioni, l'assorbimento elettrico medio nelle fasi di funzionamento della PdC, il picco massimo di potenza elettrica, le energie richieste/prodotte ed elettriche e l'ECOP.

Tabella 24 – Riepilogo Prestazioni PdC su giorno invernale tipo della zona climatica E
Distribuzione oraria su 14 ore

Fascia oraria	Durata periodo spegnimento [%]	Numero accensioni	Potenza elettrica media [kW]	Potenza di picco [kW]	Energia Richiesta/Prodotta [kWh _{th}]	Energia elettrica [kWh _{th}]	ECOP [-]
5-10	24,1	8	10,29	13,3	107,88	40,18	2,68
12-16	56,3	11	7,97	9,68	42,15	14,30	2,95
18-22*	17,8	6	7,91	8,98	65,67 (88,41)	23,6 (30,70)	2,88

*Prova interrotta nel corso della quarta ora; tra parentesi l'energia richiesta totale nel terzo blocco e il relativo consumo elettrico, calcolato in proporzione all'ECOP stimato al termine del test

Complessivamente quindi il consumo elettrico misurato ammonta a 78,08 kWh (85,15 kWh estrapolando il dato complessivo dall'energia totale richiesta e dal COP ottenuto nella porzione di test eseguita), ossia 26,03 (28,38) kWh per utenza al giorno, a fronte di una produzione complessiva di 215,7(238,4) kWh_{th}. L'ECOP complessivo del giorno tipo è quindi pari a 2,8. Anche per questa fascia climatica, la prestazione energetica complessiva è abbastanza simile per i tre blocchi orari: la fascia oraria centrale infatti, che dovrebbe essere avvantaggiata dalle temperature esterne più elevate, è d'altra parte penalizzata dall'elevato numero di on-off, pur avendo la macchina lavorato alla minore modulazione possibile per il compressore. Si conferma quindi che il potenziale della pompa di calore non è completamente sfruttato.

Tabella 25 – Riepilogo Prestazioni PdC su giorno invernale tipo della zona climatica E
distribuzione oraria su 12 ore

Fascia oraria	Durata periodo spegnimento [%]	Numero accensioni	Potenza elettrica media [kW]	Potenza di picco [kW]	Energia Richiesta/Prodotta [kWh _{th}]	Energia elettrica [kWh _{th}]	ECOP [-]
5-10	9,3	4	10,48	11,91	102,99	37,86	2,72
12-16*	48,7	12	8,84	13,79	50,70	18,2	2,78
18-22	12,6	5	9,35	8,15	84,63	28,72	2,94

*Prova con T acqua=60°C, inverter a frequenza variabile

Per quanto riguarda la serie di test con distribuzione di temperatura su 12 ore, in tabella 25 si riporta il riepilogo dei migliori test per ogni fascia oraria. Complessivamente il consumo elettrico misurato ammonta a 84,78 kWh, ossia 28,26 kWh per utenza al giorno, a fronte di una produzione complessiva di 238,4 kWh. L'ECOP complessivo del giorno tipo è quindi pari a 2,81. Complessivamente le prestazioni sono simili, ma bisogna ricordare che il test della fascia oraria 12-16 di tabella 25 non è stato eseguito nelle migliori condizioni possibile per la PdC. In quella fascia oraria, in condizioni di lavoro ottimali, ci si può aspettare di raggiungere un ECOP analogo a quello del corrispondente test di tabella 24. In tal caso, il consumo elettrico di quella fascia oraria si ridurrebbe a 17,18 kWh e l'ECOP complessivo raggiungerebbe il valore di 2,85. A livello elettrico, il test con distruzione su 12 ore sembrerebbe vantare un impegno di potenza di picco minore a fronte di una potenza elettrica media maggiore. Quindi, come conferma anche il numero di accensioni, in questa modalità la PdC sembra lavorare con maggiore stabilità e di questo ne beneficia il valore di ECOP ottenuto.

2.2 Progetto e realizzazione del serbatoio di accumulo termico a PCM

In questo paragrafo si descriverà l'attività di progettazione e realizzazione dell'impianto sperimentale per il test del sistema di ritardo del brinamento e di sbrinamento proposto nelle precedenti annualità, dotato di accumulo a PCM (Phase Change Material). La soluzione tecnica proposta sarà installata a servizio dei prototipi di pompa di calore realizzati nell'ambito dell'attività di ricerca descritta in [4], in virtù delle dimensioni ridotte delle batterie alettate che consentiranno l'assemblaggio di tutto il sistema in camera climatica.

2.2.1 Simulazioni preliminari per il dimensionamento del serbatoio

Lo schema dell'impianto sperimentale è mostrata in Figura 100.

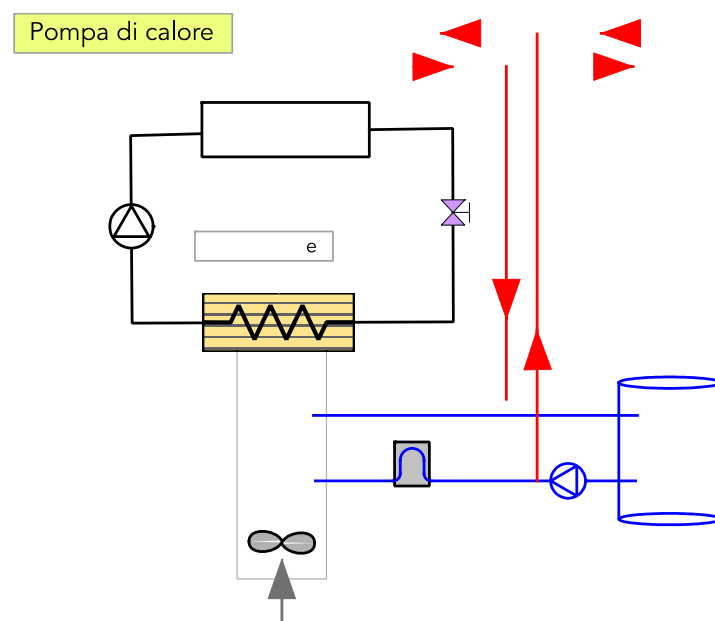


Figura 100 – Schema dell'impianto sperimentale

La pompa di calore in funzionamento invernale fornisce acqua calda all'utenza, con l'aria esterna che viene raffreddata nell'evaporatore. Durante le fasi in cui la richiesta di calore è ridotta ma il rendimento sarebbe alto, ad esempio nelle ore più calde della giornata, si continua la produzione di calore ma la portata viene deviata verso il serbatoio di accumulo tramite l'intervento delle due valvole a 3 vie, mentre la pompa del circuito di preriscaldamento rimane spenta. In questo modo si "carica" l'accumulo fornendogli calore fino alla fusione completa del PCM.

Quando invece l'evaporatore rischia di trovarsi in condizioni di formazione di ghiaccio (se la temperatura esterna diminuisce e aumenta la richiesta di calore dall'utenza), si avvia la pompa e inizia il preriscaldamento dell'aria per spostare il punto di brina. Negli scambiatori dell'accumulo ritornerà acqua più fredda che verrà riscaldata dalla solidificazione del PCM.

Per la progettazione del serbatoio di accumulo termico, i dati di riferimento per della pompa di calore e delle condizioni da ottenere sono i seguenti:

Tabella 26 – Condizioni di riferimento

Temperatura dell'aria esterna in condizioni di rischio brina	$T_{aria} = \text{da } -5^{\circ}\text{C a } 0^{\circ}\text{C};$
Riscaldamento da fornire all'aria per evitare la brina	$\Delta T_{aria} = 5^{\circ}\text{C};$
Portata di aria da riscaldare (dall'ambiente verso l'evaporatore)	$Q_{aria} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ $(\Gamma_{aria} = 0.36 \text{ kg/s});$
Potenza termica da fornire (da parte dell'accumulo)	$W_{acc} = 1805 \text{ W};$
Temperatura dell'acqua nelle fasi di accumulo di calore (derivata da quella in eccesso per il riscaldamento dell'utenza)	$T_{wi} > 40^{\circ}\text{C};$
Temperatura dell'acqua di ritorno dal preriscaldamento dell'aria esterna nelle fasi di utilizzo del calore accumulato	$T_{wi} < 10^{\circ}\text{C}.$

Si è effettuata una prima serie di simulazioni, usando la stessa geometria dello scambiatore sperimentato in [1], lo scambiatore a serpentina "Purswave WT1232S1 Mini Microchannel", mostrato in Figura 101:

- Capacità nominale di dissipazione del calore: 600 W
- Materiale: alluminio
- Tubo piatto a microcanali: spessore esterno 2 mm, altezza 32 mm, 25 microcanali di circa 1x1 mm.
- Serpentina di lunghezza totale 1.7 m e spaziatura 12 mm (10 tratti rettilinei);
- Alette con larghezza 12 mm e pitch 2.1 mm.

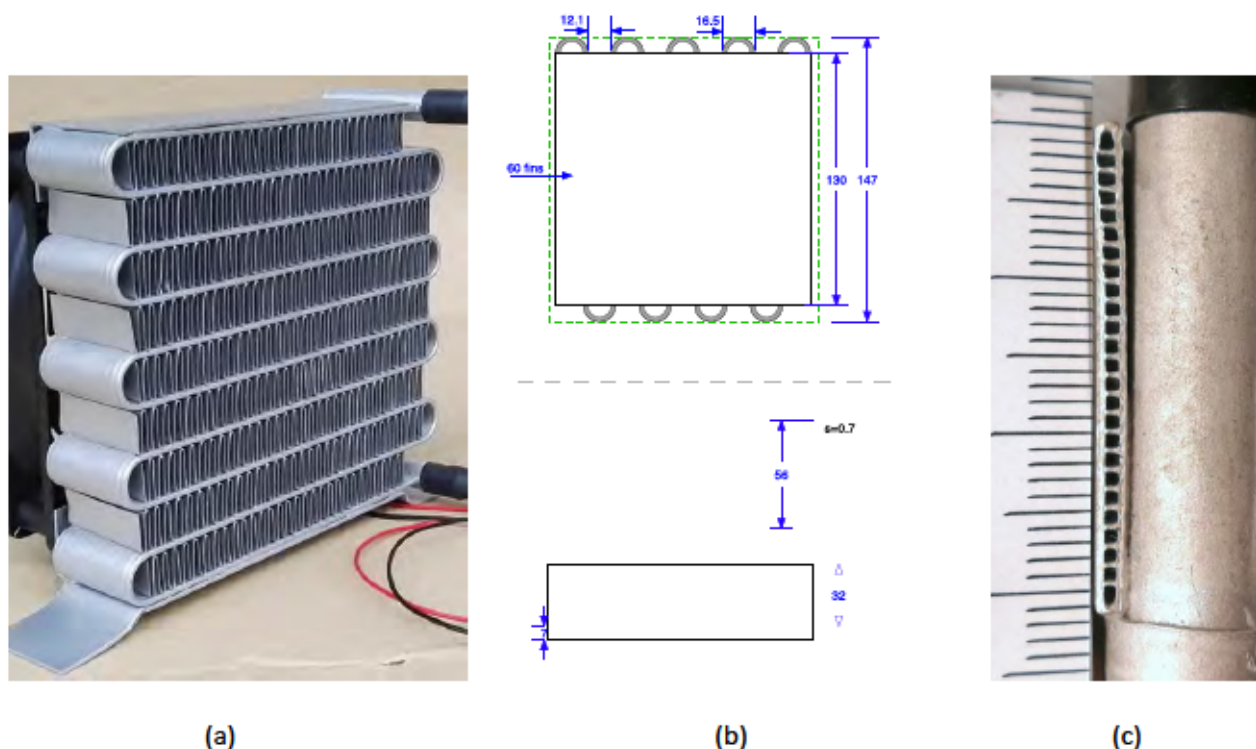
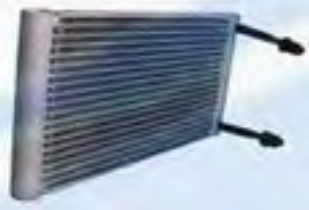


Figura 101 – scambiatore utilizzato nella sperimentazione: a) immagine; b) misure; c) particolare del tubo piatto a microcanali

Per verificare l'effetto del collegamento in serie o in parallelo, è stato considerato un secondo scambiatore dello stesso produttore, con stesse caratteristiche del tubo ma ingombro doppio e 10 tubi in parallelo. In tabella 27 sono riportate le caratteristiche dei due scambiatori

Tabella 27 – misure degli scambiatori considerati per le simulazioni preliminari

	Scambiatore Purswave WT1232S1 usato nella sperimentazione [2]	Scambiatore di dimensione doppia con 10 tubi paralleli
		
Dimensioni [mm]	146x135x32	350x135x32
Potenza nominale [W]	600	1200
Lunghezza tubo [mm]	1706	341
N. tubi in parallelo	1	10
Larghezza tubo piatto [mm]	32	32
Spessore tubo piatto [mm]	2.0	2.0
N. microcanali nel tubo	25	25
Lato del microcanale [mm]	1.0	1.0
Area di passaggio [mm ²]	25	25
Altezza delle alette (distanza tra le piattine) [mm]	12	12
Distanza tra le alette (pitch) [mm]	2.1	2.1

Usando il programma di simulazione dell'accumulo termico descritto in [1], per tenere conto della presenza di più scambiatori in serie è sufficiente inserire come lunghezza del tubo quella totale percorsa dal fluido per ognuna delle serie di tubi. I tubi in parallelo saranno poi ottenuti semplicemente moltiplicandone il numero per i risultati del singolo tubo. Essendo la geometria esterna identica (alettatura, dimensioni della piattina ecc.), per il calcolo del volume di PCM ad esso associato rimangono uguali i raggi della corona circolare e del tubo equivalenti che erano stati calcolati in [1].

Il programma simulerà quindi un ciclo con acqua fredda (dopo aver ceduto calore all'aria) che viene riscaldata dal PCM e immessa nel radiatore del canale dell'aria. Le condizioni simulate sono le seguenti:

- Temperatura iniziale del PCM: $T_{iniz} = 30^{\circ}\text{C}$ (completamente fuso);
- Temperatura dell'acqua da riscaldare (per il preriscaldamento dell'aria): $T_i = 10^{\circ}\text{C}$;
- Temperatura di cambiamento di fase del PCM: $T_{pc} = 25^{\circ}\text{C}$;

In tabella 28 sono mostrati i risultati ottenuti per queste due tipologie. Le prime due simulazioni sono state effettuate considerando 4 gruppi in parallelo con ciascuno costituito da 8 scambiatori a serpentina collegati in serie. Le altre due sono invece per 16 scambiatori in serie, ciascuno del tipo con i 10 tubi in parallelo. La simulazione quindi è effettuata sul singolo tubo e poi moltiplicata per il numero di tubi in parallelo.

Dalle simulazioni (riportate in Appendice 1) è risultato che 32 scambiatori del primo tipo o 16 del secondo, immersi in 21.5 kg di PCM (con le caratteristiche dell'A46 usato nella sperimentazione), permettono di ottenere un accumulo di calore sufficiente a preriscaldare l'aria per circa 1800 s. In particolare a seconda del collegamento tra essi (serie e/o parallelo) si ottengono diverse lunghezze dei tubi ma la stessa autonomia variando opportunamente la portata.

Tabella 28 – simulazioni delle configurazioni preliminari

	N. in serie	L_{tubo} [m]	N. di tubi	L_{tot} [m]	G_{tubo} [kg/h]	W_{tubo} [W]	W_{tot} [W]	autonomia [s]	T_{wu} [°C]
Serpentina 10 tratti	8	13.65	4	54.5	12	470	1880	1800	28
"	8	13.65	4	54.5	11	450	1800	2000	28
10 tubi piatti paralleli	16	5.46	10	54.5	5	195	1950	1800	28
"	16	5.46	10	54.5	4.5	175	1750	2000	28

Da questi risultati è stato ricavato un dimensionamento di massima tale da garantire per almeno 30 minuti il riscaldamento di 5°C della portata di 1000 m³/h di aria nelle condizioni riportate in tabella 26:

- PCM con temperatura di fusione $T_{tp}=25^{\circ}\text{C}$;
- Scambiatori con tubo piatto a microcanali e alette come da tabella 27, in serie e/o parallelo ed in numero e dimensioni tali da avere una lunghezza totale del tubo di circa 50 m e immersi in almeno 22 kg di PCM, disposti in modo da occupare tutto il volume affinché il PCM sia uniformemente distribuito senza zone distanti da essi, ricopra gli scambiatori e concorra tutto alla fusione.
- Contenitore in materiale plastico, con chiusura ermetica per evitare la fuoriuscita di eventuali composti gassosi durante la fusione del PCM.

2.2.2 Progetto e acquisto dei componenti

2.2.2.1 Scambiatori di calore

Per la realizzazione del serbatoio di accumulo il componente principale è il gruppo di scambiatori, in quanto dalla loro forma e dimensione dipende il tipo di impacchettamento e di conseguenza la dimensione del serbatoio e la maggior quantità di PCM per riempire gli spazi aggiuntivi. In prima istanza è stata valutato l'utilizzo di scambiatori commerciali, ma questo è stato impossibile in quanto spesso le dimensioni non si prestavano al collegamento tra loro senza troppi spazi vuoti, mentre per i pochi modelli adeguati è stato impossibile trovare un fornitore che accettasse la vendita di un numero così esiguo. La soluzione è stata invece l'interazione con la società SunCo (Zhejiang Sunco Heat Exchange System Co., Ltd), che si è prestata a realizzare degli scambiatori del tipo a serpentina partendo da tubo e alette con caratteristiche molto vicine a quelle richieste (tabella 27) e con un certo margine di trattabilità nelle dimensioni. Dopo vari aggiustamenti si è arrivati a un progetto concordato, riportato in Figura 102, con inoltre la variante di Figura 103 per gli elementi iniziali di ogni pacco. Questo ha permesso di realizzare due pacchi di scambiatori impilati, ciascuno con gli elementi collegati in parallelo, che poi sono stati inseriti uno nell'altro e collegati in serie, come mostrato in Figura 104. I tubi di ingresso e uscita sono in rame e potranno essere brasati.

Le differenze principali di questi scambiatori rispetto a quelli testati (Tabella 1) è nella altezza delle alette (8 mm invece di 12) a causa della minore distanza tra i tubi piatti (serpentina con 12 tratti rettilinei invece di 10) e per il fatto che queste alette sono di tipo corrugato mentre quelle testate erano lisce, ma entrambi questi aspetti non comportano grandi differenze nelle prestazioni. Le caratteristiche geometriche di questi scambiatori sono riassunte in tabella 29.

Sono stati acquistati 18 scambiatori del primo tipo e 4 del secondo in quanto, oltre ai due gruppi immersi nel PCM, 4 scambiatori (due per tipo) saranno utilizzati nel canale per preriscaldare l'aria di ingresso all'evaporatore.

Tabella 29 – misure degli scambiatori SunCo

Dimensioni [mm]	335x132x32
Lunghezza tubo [mm]	4102
N. tubi in parallelo	1
Larghezza tubo piatto [mm]	32
Spessore tubo piatto [mm]	2.0
N. microcanali nel tubo	18
Lato del microcanale [mm]	1.0x1.4
Area di passaggio [mm ²]	25
Altezza delle alette (distanza tra le piattine) [mm]	8
Distanza tra le alette (pitch) [mm]	2.2

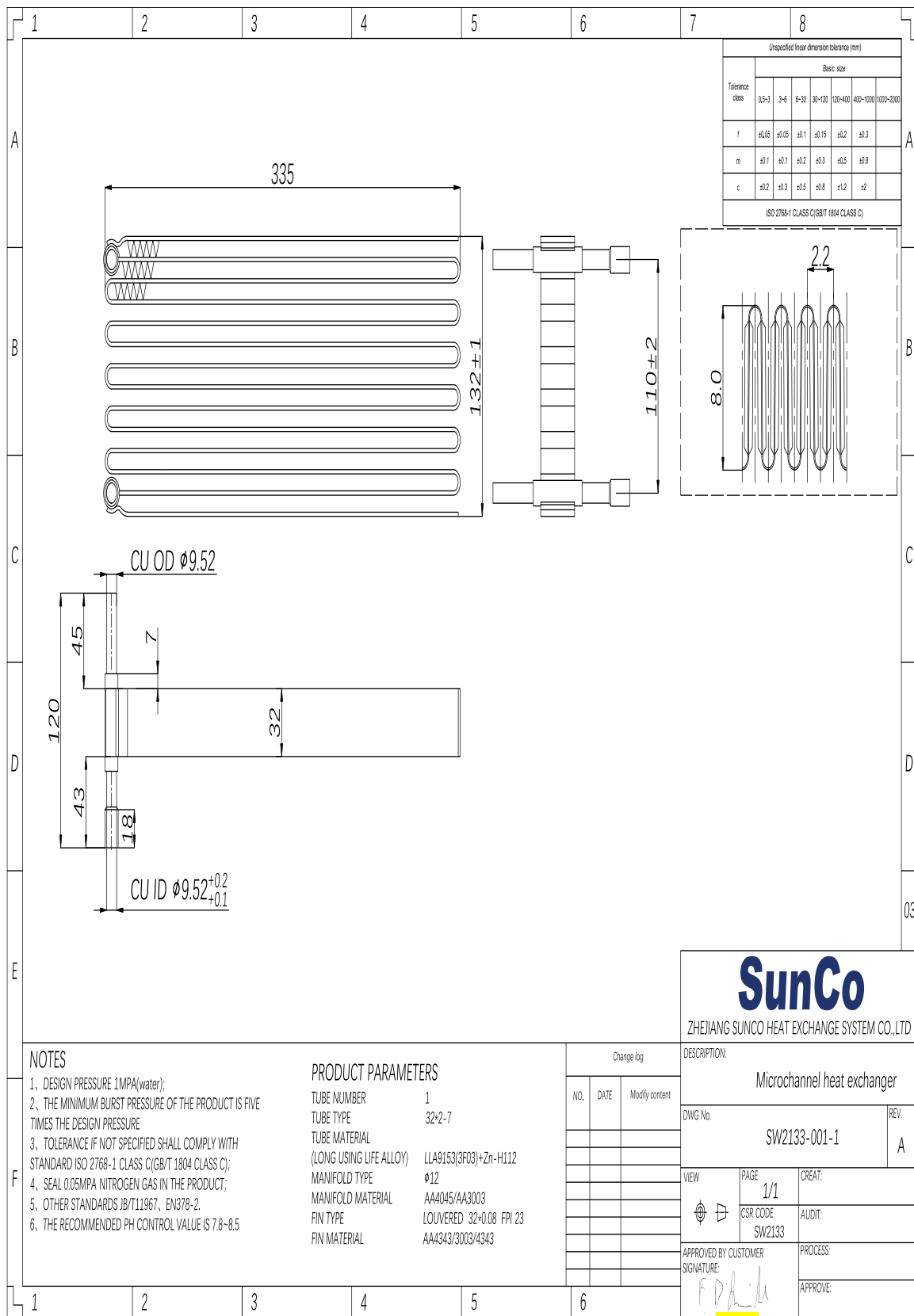


Figura 102 – Scambiatore N. 1, con tubi per la connessione in parallelo

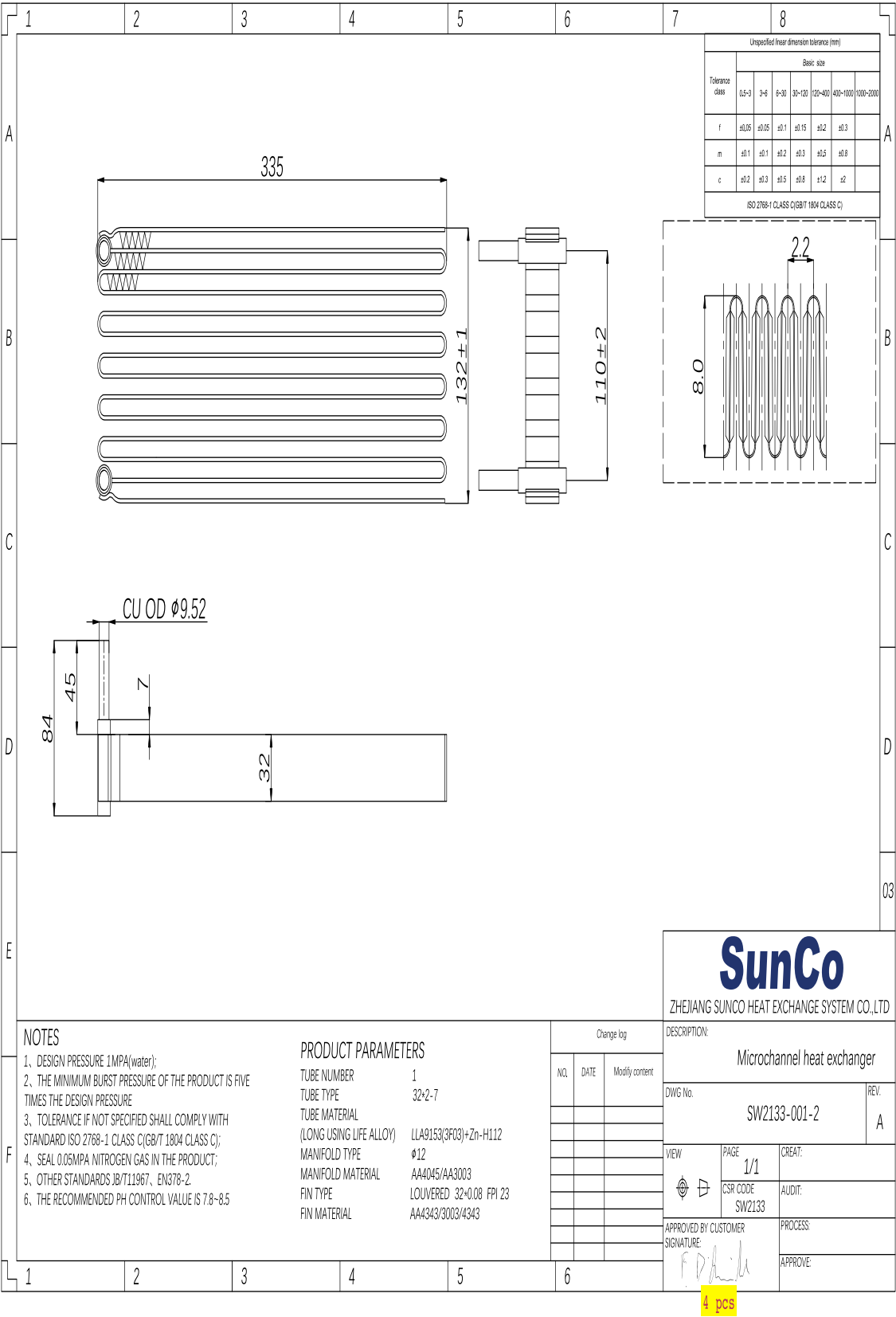


Figura 103 – Scambiatore N. 2, con tubi solo su un lato, per utilizzo come elementi iniziali del pacco

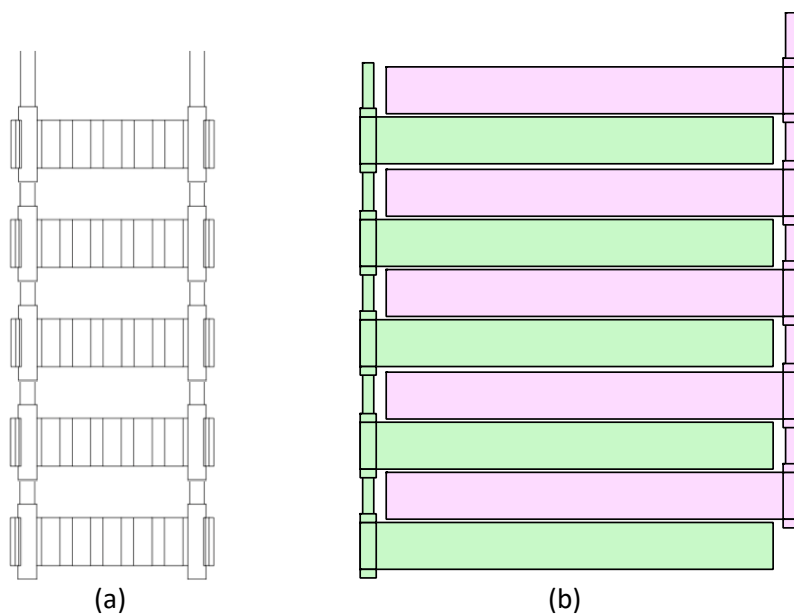


Figura 104 – Disposizione degli scambiatori: a) vista frontale di un pacco; b) vista laterale della disposizione finale dei due pacchi



Figura 105 – Assemblaggio degli scambiatore all'interno del contenitore del PCM

2.2.2.2 PCM

Dall'analisi effettuata con il programma di simulazione è risultato che la temperatura di cambiamento di fase ottimale per le condizioni previste è $T_{pc}=25^{\circ}\text{C}$. E' stato quindi scelto il PCM di tipo organico RT25HC della Rubitherm Technologies GmbH, con temperatura di fusione intorno a 25°C . In Figura 105 sono mostrate le sue caratteristiche.

La quantità acquistata è 30 kg (circa 35 litri), considerando un margine rispetto a quella minima prevista di circa 22 kg dei calcoli preliminari. Bisognerà infatti considerare anche gli spazi aggiuntivi necessari per la disposizione di Figura 104 e le diverse proprietà fisiche del PCM scelto rispetto a quello simulato in precedenza. Per rendere più immediato il confronto con il PCM-A46 usato nei calcoli preliminari, in tabella 30 sono riportate le proprietà fisiche principali dei due materiali.

Tabella 30 – principali proprietà fisiche dei due PCM utilizzati nei calcoli

materiale	T_{pc} $^{\circ}\text{C}$	$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ kg/m^3	$c_{p,20^{\circ}\text{C}}$ kJ/kg K	k_{sol} W/m K	λ kJ/kg	VHC_{sol} MJ/m^3	C_{fus} kWh/ton	ρ_{liq} kg/m^3	VHC_{liq} MJ/m^3
PCM-A46	46	910	2.22	0.220	155	141	43.1	790	122.5
RT25HC	25	880	2.0	0.2	200	176	55.6	782	156.4

Data sheet



RT25HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Typical Values

22-26 [°C]

main peak: 25

Congeeing area

26-22 [°C]

main peak: 25

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 16°C to 31 °C.

230 [kJ/kg]*

58 [Wh/kg]*

Specific heat capacity

2 [kJ/kg·K]

Density solid

at 15°C

0,88 [kg/l]

Density liquid

at 40°C

0,77 [kg/l]

Heat conductivity (both phases)

0,2 [W/(m·K)]

Volume expansion

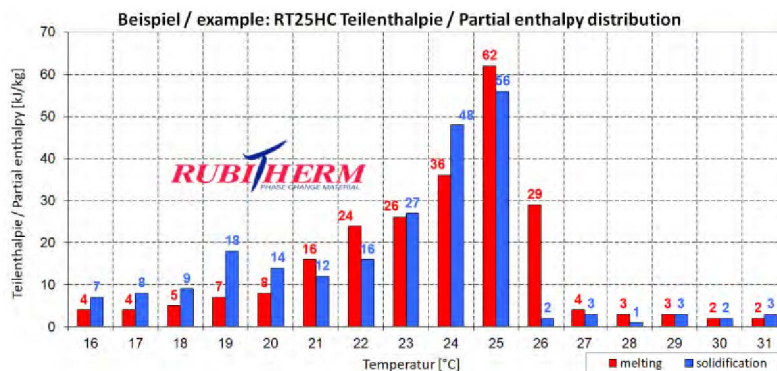
12,5 [%]

Flash point

150 [°C]

Max. operation temperature

65 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Figura 106 – Data sheet del PCM

2.2.2.3 Contenitore

Il contenitore scelto è del tipo per montaggi elettrici. Sono stati scelti due contenitori di dimensioni diverse ma con le stesse caratteristiche:

- Materiale: Policarbonato;
- Temperatura massima: 120°C per brevi periodi, 80°C continuo;
- Protezione in entrata: IP66/67
- Resistenza a impatto: IK 08/09

FIBOX PC 5638 18 G:

- Dimensioni esterne [mm]: 558x378 h180, Volume [l]: 38.0
- Dimensioni interne utilizzabili per il PCM (fino alla base del coperchio): 534x354 h150 mm, Volume [l]: 28.3

FIBOX EKWH 250 G

- Dimensioni esterne [mm]: 760x560 h250, Volume [l]: 106.4
- Dimensioni interne utilizzabili per il PCM (fino alla base del coperchio): 730x530 h150 mm, Volume [l]: 58.0

I relativi datasheet sono riportati in Appendice 2

In fase di assemblaggio è stato possibile inserire 22 scambiatori (2 gruppi da 11) con 23 kg di PCM. Ciascuno gruppo avrà gli scambiatori collegati in parallelo e i due gruppi saranno collegati in serie. Le portate dei due gruppi sono state raccordate attraverso collettori di ingresso e uscita.

Il secondo contenitore è stato previsto nel caso in cui l'ingombro finale reale del pacco scambiatori avesse ecceduto lo spazio disponibile (534x354 mm) rendendo impossibile l'uso del primo contenitore. In questo caso si avrebbe avuta la possibilità di inserire di 24 scambiatori con 45 kg di PCM. Essendo queste quantità eccessive e non disponibili, in questo caso si sarebbe dovuto ridurre il volume con delle pareti interne, per utilizzare un numero minore di scambiatori e la corrispondente quantità di PCM.

Nella parete del contenitore scelto sono stati predisposti i passaggi, con le relative tenute, dei tubi di ingresso e uscita dell'acqua e quelli per le termocoppie di controllo della temperatura del PCM (in almeno tre punti a diverse altezze e posizioni).

2.2.3 Informazioni sui rischi e procedura di riempimento del serbatoio

2.2.3.1 Aspetti di sicurezza

Dalle scheda di sicurezza del PCM risultano i seguenti dati principali:

Hazard statements:

H304 May be fatal if swallowed and enters airways.

Precautionary statements:

P301 + P310 IF SWALLOWED: Immediately call a POISON CENTER or doctor/physician. P331 Do NOT induce vomiting.

P405 Store locked up.

Composition/Information on ingredients:

Substance: Paraffins, normal C>10

CAS.No.: 64771-71-7

Hazard (1272/2008/EG): Asp.1; H304

Physical and chemical properties

Physical state: solid; 20°C; 1013hPa

Water solubility: insoluble

Melting point: 24-26°C

Boiling point: >250°C approx

Flash point: approx. 160°C
Ignition temperature: >200°C

2.2.3.2 Considerazioni sui rischi nell'utilizzo

Il materiale è stabile alle condizioni di esercizio, con flash point=160°C, temperatura di ignizione >200°C e di ebollizione >250°C, ben oltre la temperatura massima prevedibile intorno ai 60°C. Essendo tossico se ingerito o inalato, nell'esercizio sarà chiuso all'interno del contenitore, mentre il riempimento iniziale sarà effettuato sotto cappa e con gli opportuni DPI.

Il carico del serbatoio avviene una sola volta per tutta la campagna sperimentale, in quanto da quel momento esso sarà utilizzato come sistema di accumulo di calore chiuso. L'accumulo o la cessione di calore è con l'acqua che fluisce all'interno degli scambiatori immersi nel PCM (passando in due condotti che attraversano la parete del contenitore con opportune tenute), senza contatto diretto con esso. La fusione e la solidificazione quindi avvengono autonomamente nel contenitore senza contatti con l'esterno. Il contenitore è sovradimensionato per lasciare un sufficiente volume libero che permetta l'espansione durante la fusione senza apprezzabili aumenti di pressione.

Il riempimento sarà eseguito fondendo il PCM, come specificato in seguito.

2.2.3.3 Procedura di riempimento del serbatoio

Il riempimento sarà eseguito fondendo il PCM (portandolo a circa 35°C) e versandolo nel contenitore (con gli scambiatori già montati). Dalla passata esperienza con altri PCM si ritiene che l'operazione dovrebbe richiedere qualche ora, potendosi quindi completare in una giornata lavorativa. Il tutto sarà effettuato utilizzando una cappa aspirante con filtro per sostanze organiche.

L'operazione sarà essere eseguita con le opportune protezioni (camice, guanti, maschera con filtro per organici, schermo facciale protettivo). Dopo la chiusura del coperchio e il raffreddamento a temperatura ambiente, il serbatoio potrà essere montato nell'impianto sperimentale.

2.2.4 Simulazione della configurazione scelta

Le caratteristiche della configurazione ottenuta sono state utilizzate nel programma di simulazione, ottenendo i risultati riportati nelle ultime due righe della tabella 31, dove per comodità sono riportati (in font ridotto) anche i precedenti risultati di tabella 28. Si può vedere che le diverse proprietà fisiche del PCM RT25 e le differenze nella geometria degli scambiatori permettono di ottenere prestazioni leggermente migliori con circa il 10% di riduzione della lunghezza del tubo.

Tabella 31 – simulazioni della configurazione finale (e confronto con le preliminari)

	N. in serie	L_{tubo} [m]	N. di tubi	L_{tot} [m]	G_{tubo} [kg/h]	W_{tubo} [W]	W_{tot} [W]	autonomia [s]	T_{wu} [°C]
Serpentina 10 tratti	8	13.65	4	54.5	12	470	1880	1800	28
"	8	13.65	4	54.5	11	450	1800	2000	28
10 tubi piatti paralleli	16	5.46	10	54.5	5	195	1950	1800	28
"	16	5.46	10	54.5	4.5	175	1750	2000	28
Serp. reale 12 tratti	2	8.20	6	49.2	8	320	1920	2200	28
"	2	8.20	6	49.2	7.5 - 8	305	1830	2300	28

Le impostazioni in input per il nuovo tubo equivalente, gli andamenti ottenuti sono riportati in Appendice 1 (figure A-9 – A-12).

2.2.5 Altri componenti per la sperimentazione: regolazione dell'umidità

Per i test sperimentali sarà necessaria la regolazione ai valori prestabiliti della temperatura e dell'umidità dell'aria della camera climatica, che sarà inviata all'evaporatore della PDC. Per questo scopo sarà utilizzata la seguente strumentazione

2.2.5.1 Igrometro

Si utilizza un "Trasmettitore digitale di UR attivo e IGROSTATO HD2017" della Delta OHM, con campo di lavoro: $UR=5 \div 98\%$; $T=-40 \div 150^{\circ}C$, già in possesso del laboratorio.

2.2.5.2 Umidificatore

Si utilizza un umidificatore già in possesso del laboratorio, CAREL CompactSteam CH001V2001, potenza 1.15 kW, produzione di vapore max 1.6 kg/h (modulata in modo continuo dal 20% a potenza massima), Condizioni di funzionamento: $1T40^{\circ}C$, 10...90% rH non condensante.

Considerando le condizioni di riferimento di Tabella 26, per portare una portata di aria di 1000 m³/h da $T=5^{\circ}C$ e $UR=80\%$ (condizioni a cui la camera climatica può stabilizzarsi autonomamente) a $T=5^{\circ}C$ e $UR=100\%$ nel condotto per l'evaporatore (condizione di test estrema), il contenuto di acqua deve passare da 4.314 g/kg_{aria} a 5.4 g/kg_{aria}, per cui è necessario evaporare 1.41 kg/h di acqua, minore del massimo permesso dall'umidificatore.

2.2.5.3 Misura della portata di aria

La velocità dell'aria nel condotto verso l'evaporatore sarà misurata da un anemometro già in possesso del laboratorio. Si tratta di una Sonda Anemometrica a filo caldo per la misura della portata di aria "Schmidt modello ss20.500" fornito dalla Delta Strumenti. La sonda è stata tarata ed è attualmente montata nel condotto a sezione quadrata che sarà utilizzato come canale di ingresso all'evaporatore, per cui non necessita di essere ricalibrata. Tale condotto, cioè il canale aria dell'impianto BACO per i test di raffreddamento delle batterie, dispone anche di ventilatori che permettono di forzare la portata di aria in aggiunta a quello della PDC, ed ha inoltre una lunghezza di assetto prima dell'anemometro sufficiente a stabilizzare il flusso. Lo strumento richiede lunghezze pari ad almeno 15 diametri prima e 5 dopo. La configurazione attuale del condotto è mostrata in Figura 106, dove l'igrometro è posizionato a circa metà della lunghezza e contraddistinto dalle grandezze misurate (Γ , T). Per la presente attività può essere eliminato il tratto a 90° con i riscaldatori, mentre al parte dopo l'allargamento può essere utilizzata per contenere gli scambiatori.

Per le misure di pressione a monte e a valle dello scambiatore alettato saranno impiegati un sensore di pressione assoluta/relativa tipo CERABAR M della Endress and Hauser, ed un sensore di pressione differenziale DELTABAR PMD 55 per minimizzare l'errore nel processo di misura.

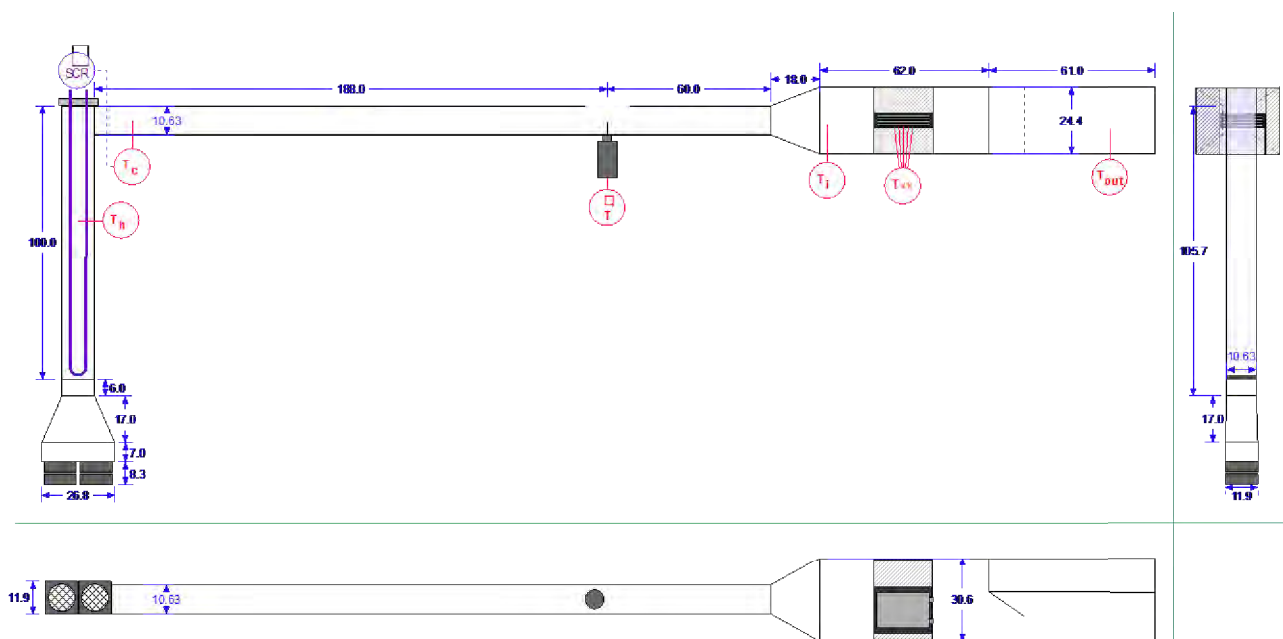


Figura 107 – Dimensioni dell'attuale condotto per il trattamento aria con energia termica da serbatoio PCM



Sintesi delle specifiche

Precisione

Standard 0.1%
Platino 0.075%

Temperatura di processo

-40 ... 125 °C
(-40 ... 275 °F)

Campo di misura della pressione

1 bar...400 bar
(15 psi...6000 psi)

Pressione assoluta di processo / limite massimo di sovrappressione

600 bar (9000 psi)

Distanza massima di misura

4000 m (13123 ft) H₂O

Parti bagnate

316L

Materiale della membrana di processo

316L, AlloyC,
Rodioporo

Cella di misura

400 mbar...400 bar
(15 psi...6000 psi)
relativa/assoluta

Figura 108 – Sensore di pressione assoluta o relativa CERABAR PMC 51 di Endress+Hauser



Gas

Caratteristiche e specifiche

Principio di misura

Pressione differenziale

Nome del prodotto

Trasmettitore digitale con membrane di misura metalliche
Dimensioni compatte
Trasmettitore modulare
Elevata stabilità

Errore di misura massimo

0,1%
"PLATINO" 0,075%

Campo di pressione

10 mbar...40 bar
(0.15...580 psi)

Temperatura di processo

Gradiente temperatura da tubazione in pressione

Display / Operazione

Opzione

Usdite

4...20 mA HART

Comunicazione

HART

Approvazioni Ex

ATEX, FM, CSA, IECEX, INMETRO, NEPSI, TIIS

Sicurezza funzionale

SIL

Certificati dei materiali

NACE MR0103
NACE MR0175
EN10204-3.1

Figura 109 – Sensore di pressione differenziale DELTABAR PMD 55 di Endress+Hauser

3 Conclusioni

Il presente report ha descritto, nella prima parte, le attività sperimentali condotte sull'impianto "HiL" del C.R. ENEA Casaccia, per i test dinamici su una pompa di calore a CO₂ da 30 kW con gruppo multi-eiettore. Lo scopo della ricerca è stato quello di quantificare le prestazioni effettive di una PdC di questo tipo, in funzionamento dinamico, abbinata ad un'utenza fittizia modellata in precedenti LA e simulata dal circuito idronico secondario dell'impianto stesso. I carichi termici simulati sono stati quelli caratteristici delle zone climatiche italiane C e D; inoltre si è ipotizzato di interfacciare il generatore termico con un'utenza a bassa temperatura (es. pannelli radianti), che lavora nel range 30÷35 °C.

L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di quantificare, in termini energetici, gli effetti delle fasi di transitorio, sempre negativi, sulle prestazioni complessive. Ne sono scaturite alcune proposte generali di ottimizzazione della logica di controllo della PdC e degli ausiliari operanti sul circuito idronico (es. pompe di circolazione circuito primario e secondario), che qui si riassumono:

- Per l'ottimizzazione delle prestazioni della PdC è fondamentale un corretto dimensionamento della stessa in funzione dei carichi termici richiesti. In presenza di carichi termici variabili nell'arco di funzionamento della PdC, il dimensionamento deve avvenire sul carico termico più gravoso, ma sarà necessario disporre di una macchina in grado di modulare significativamente la propria potenza, perché, in caso contrario, si verificherebbero numerosi on-off della PdC con conseguenti penalizzazioni di prestazione;
- E' altresì fondamentale applicare logiche di controllo avanzate, non solo sulla pompa di calore, ma sugli ausiliari. La soluzione impiantistica dell'impianto sperimentale ENEA è costituita da due loop idronici distinti separati da uno scambiatore di alta capacità. Tale soluzione potrebbe essere

adottata anche in un impianto reale, in modo da sfruttare completamente le potenzialità del generatore termico (soluzione particolarmente vantaggiosa per la pompa di calore a CO₂, che mantiene prestazioni elevate lavorando con salti termici piuttosto elevati). In tal caso, le logiche di controllo delle due pompe di circolazione dovrebbero essere ben coordinate per evitare significative perturbazioni di temperatura dei due flussi termici e conseguenti riduzioni di efficienza. Per quanto riguarda la pompa di circolazione sul primario, in genere integrata nella PdC, ha il compito di mantenere la temperatura di produzione dell'acqua al set-point ed è dotata di una regolazione PID impostata dal costruttore. La pompa di circolazione del secondario, nel caso sperimentale, è gestita da una logica di controllo (con parametri PID impostati dagli sperimentatori) che mantiene il ΔT desiderato e simula la temperatura di ritorno da un impianto di trasmissione termica reale. Come evidenziato, passando da un test ad un altro, caratterizzato per esempio da carichi termici diversi, è accaduto che il controllore non sia riuscito ad evitare la perturbazione sulle temperature di esercizio, con cali di performance. In un impianto reale, si porrebbe lo stesso problema ed una singola impostazione di fabbrica per il sistema di controllo potrebbe non essere adatta ad ogni accoppiamento tra utenza e generatore termico. In tal caso, soluzioni di monitoraggio e controllo remoto (eventualmente integrato in un sistema di supervisione più completo, di tipo IoT) potrebbero consentire l'impostazione dedicata dei parametri di controllo al caso specifico, sia dei componenti (compressore, fan, ecc.) della PdC che degli ausiliari. Un sistema di controllo specifico per ogni utenza, naturalmente potrebbe essere impiegato anche per gestire e ottimizzare la modulazione della PdC, dopo l'acquisizione, da parte del sistema, delle caratteristiche e delle esigenze dell'utenza stesso, come dati di input del controllo.

- Nel caso specifico della macchina a CO₂ esaminata, si è evidenziato la considerevole influenza negativa della temperatura di ritorno sulle prestazioni energetiche. Per questo tipo di macchina quindi, il fatto di poter contare su un sistema di controllo dei flussi termici avanzato è di importanza capitale. Il controllo della temperatura di ritorno in PdC può anche essere ottenuto con modifiche impiantistiche. Infatti, nella stagione di riscaldamento è sempre possibile contare su una sorgente termica fredda, per cui, potrebbero essere adottate anche semplici soluzioni impiantistiche per garantirsi una temperatura di ritorno sempre al di sotto dei 30 °C (limite critico per la CO₂).

In conclusione di questi commenti sull'attività di sperimentazione su impianto di tipo HiL, si deve rimarcare che la mole di dati prodotta ha consentito di evidenziare alcuni aspetti di grande importanza per il corretto esercizio di una PdC. La sperimentazione ha consentito, in molti casi di quantificare la differenza tra la prestazione effettiva della PdC in termini energetici, rispetto alla prestazione puntuale, indicata per esempio dal COP, o estensiva (per esempio, lo SCOP, che sostanzialmente integra i valori di COP in un certo intervallo di tempo, tenendo conto della modulazione della PdC attraverso certi parametri correttivi). L'attività su impianti di tipo HiL può essere quindi utile anche per raffinare la stima delle prestazioni stagionali, dando un contributo alla correzione delle norme di riferimento, per ottenere degli indicatori di prestazione più aderente alla prestazione effettiva. Inoltre, l'importanza di eseguire test dinamici, deriva anche dal fatto che molti dei dati ottenuti e dei fenomeni analizzati, soprattutto i transitori, possono essere di difficile modellazione.

D'altra parte, è evidente che l'attività sperimentale non può tener conto della specificità di ogni utenza. In questo senso l'attività di modellazione deve costituire un supporto fondamentale all'attività di sperimentazione, in modo che i risultati complessivi siano ottenuti sfruttando appieno tutti e due gli strumenti.

Nella seconda parte del report è descritta l'attività di progettazione e realizzazione dell'impianto sperimentale per il test del sistema di ritardo del brinamento e di sbrinamento proposto nelle precedenti annualità. Utilizzando il programma di simulazione del ciclo con pompa di calore a CO₂, realizzato in precedenti annualità del progetto in corso, è stato eseguito il dimensionamento del serbatoio di accumulo termico a PCM. L'apparato sperimentale, opportunamente strumentato, sarà utilizzato per valutare sperimentalmente la possibilità di evitare la formazione di brina e i relativi cicli di sbrinamento dell'evaporatore nei casi di condizioni climatiche critiche (temperatura esterna bassa e

alta umidità relativa), durante il funzionamento invernale. Il principio di funzionamento prevede che l'energia termica accumulata nel PCM sarà impiegata per preriscaldare l'aria che investe l'evaporatore allontanando il rischio di brina nelle alette. Il suo dimensionamento è stato effettuato per permettere aumentare la temperatura di 5°C per almeno 30 minuti, per permettere di eseguire test sperimentali in condizioni stabili.

4 Appendici

Appendice 1 – Esempio di risultati delle simulazioni preliminari

I risultati delle simulazioni per lo scambiatore di tipo Purswave WT1232S1 sono mostrati nelle seguenti figure.

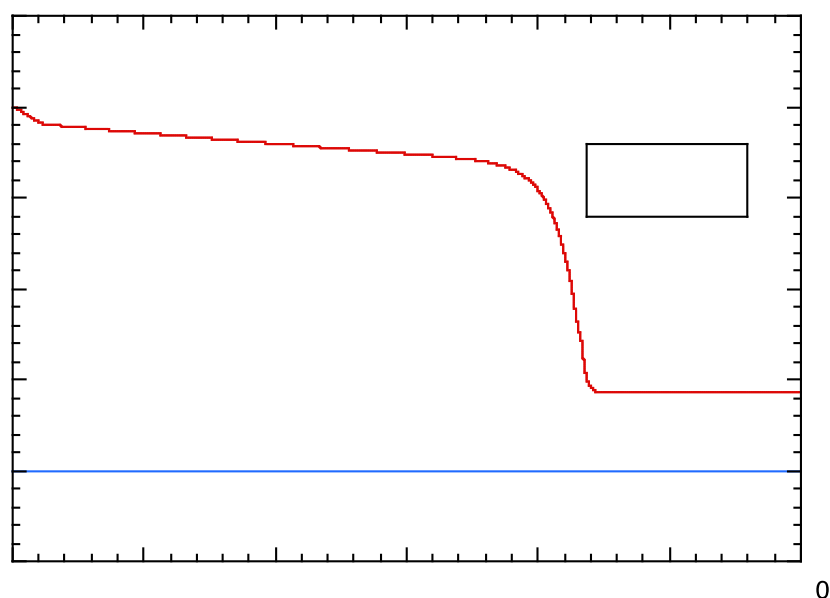


Figura A.1 - Profili di temperatura dell'acqua vs tempo nella simulazione con serpentina 10 tratti (146x135mm), temperatura di cambiamento di fase $T_{pc} = 25\text{ °C}$

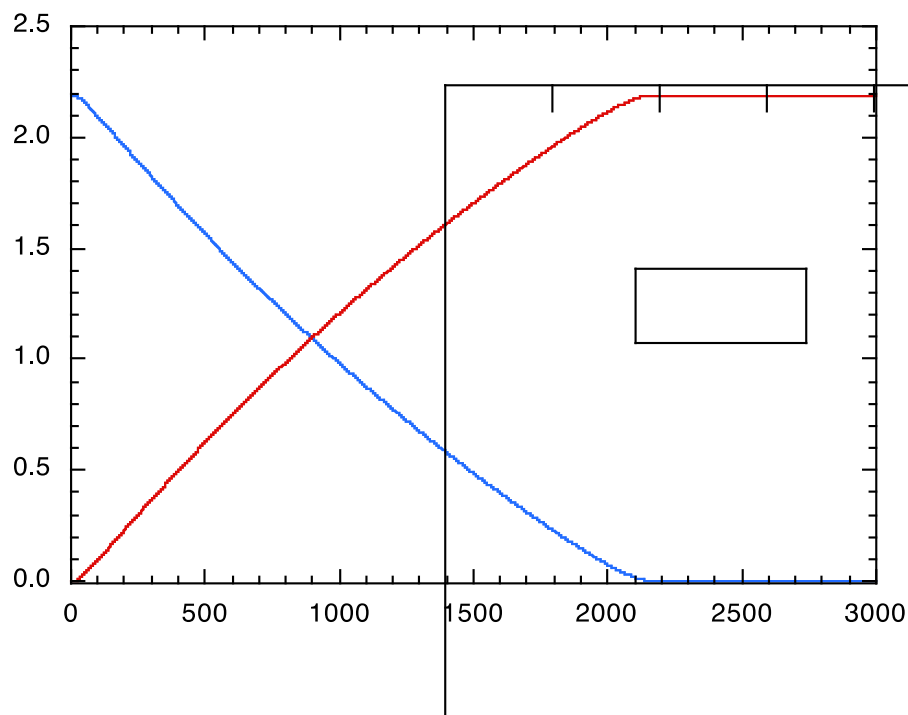


Figura A.2 – Massa di PCM in stato liquido o solido vs tempo nella simulazione con serpentina 10 tratti (146x135mm), temperatura di cambiamento di fase $T_{pc} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

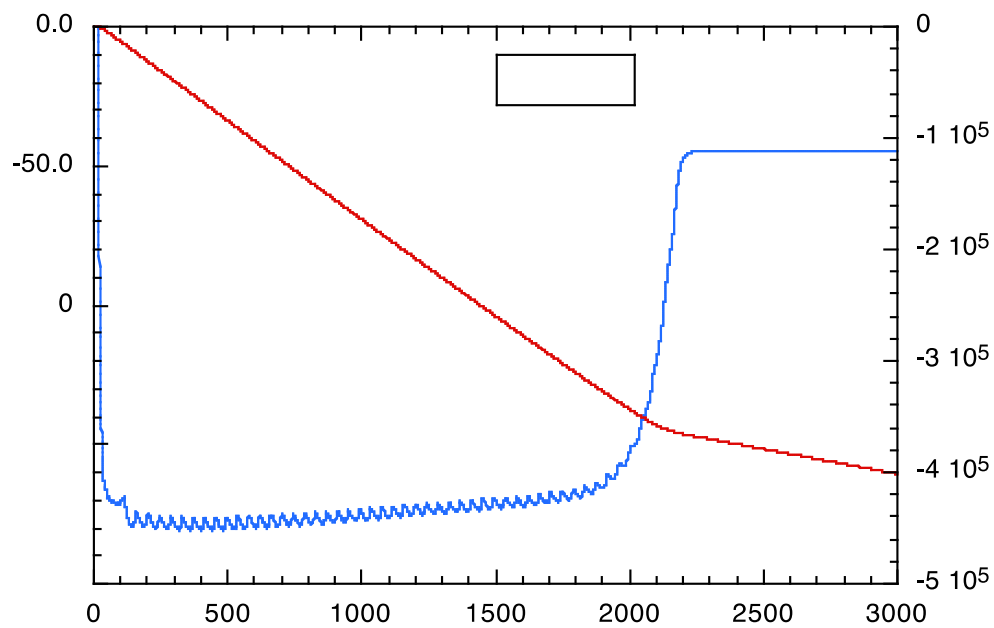


Figura A.3 – Potenza ed energia termica vs tempo nella simulazione con serpentina 10 tratti (146x135mm), temperatura di cambiamento di fase $T_{pc} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

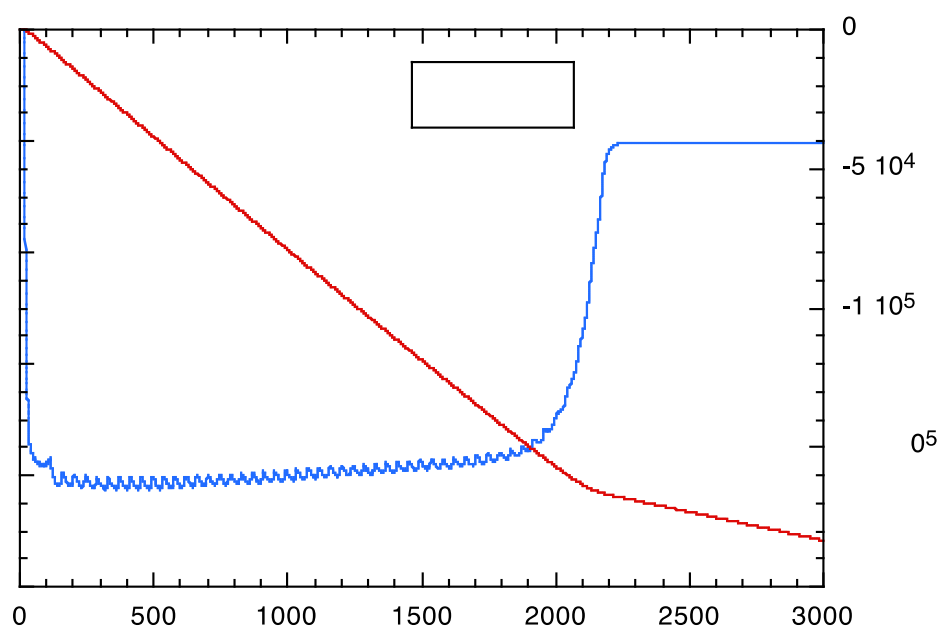


Figura A.4 – Potenza ed energia termica specifica vs tempo nella simulazione con serpentina 10 tratti (146x135mm), temperatura di cambiamento di fase $T_{pc} = 25^\circ\text{C}$

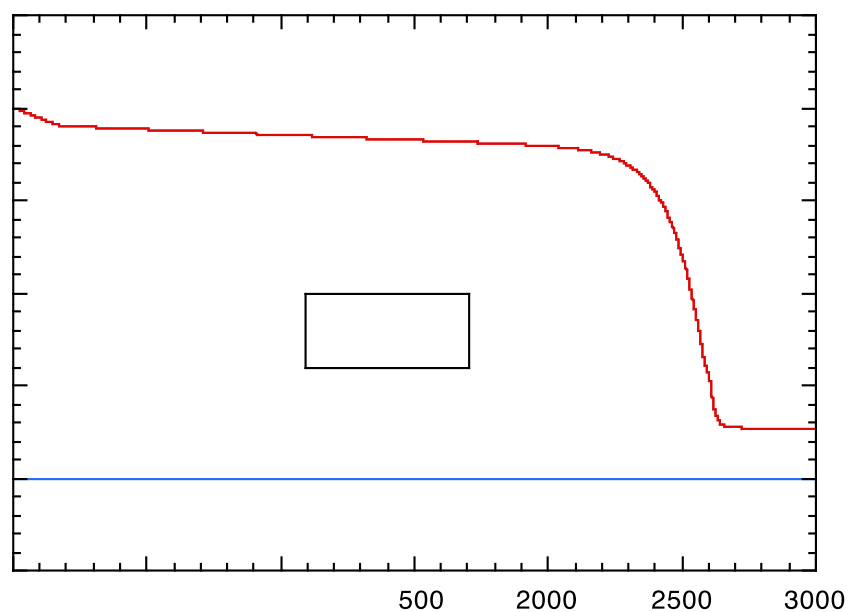


Figura A.5 - Profili di temperatura dell'acqua vs tempo nella simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), temperatura di cambiamento di fase del PCM $T_{pc} = 25^\circ\text{C}$

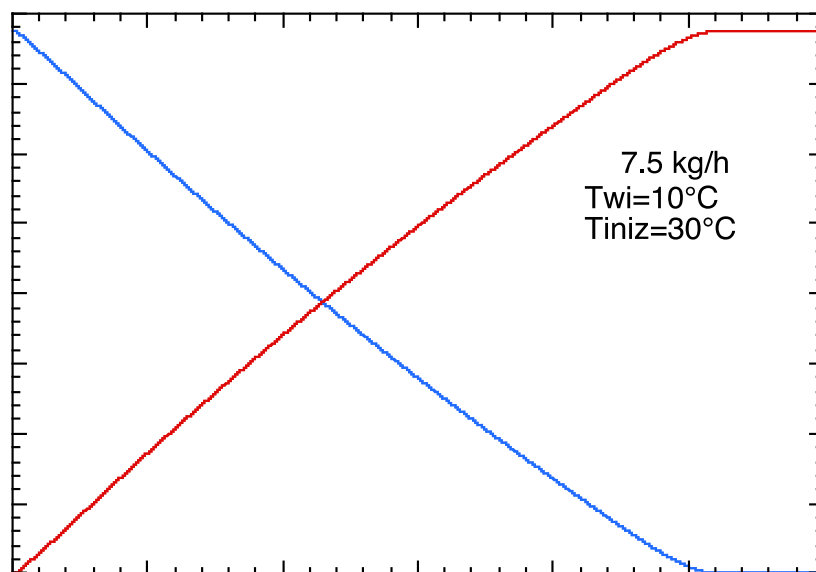


Figura A.6 – Massa solida e liquida di PCM vs tempo simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), temperatura di cambiamento di fase del PCM $T_{pc}=25^{\circ}\text{C}$

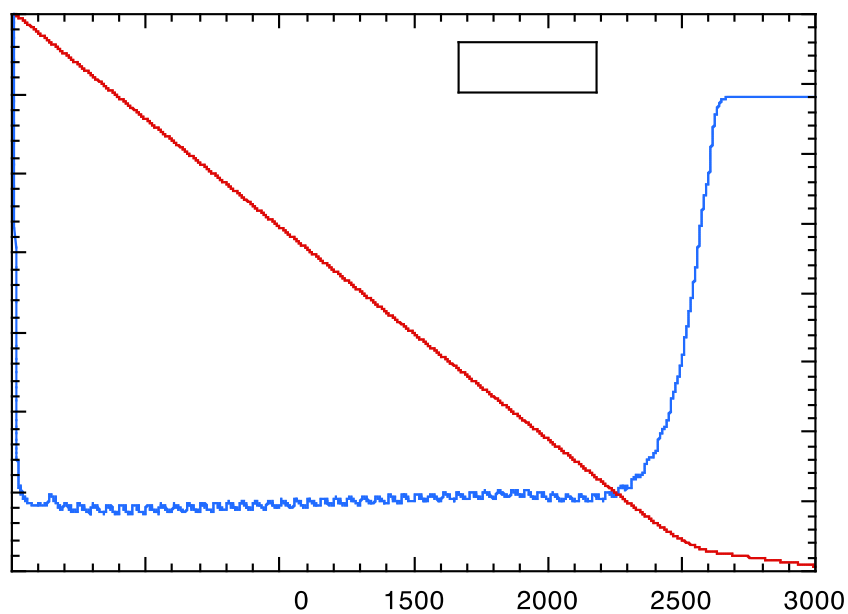


Figura A.7 – Potenza e Energia termica vs tempo simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), temperatura di cambiamento di fase del PCM $T_{pc}=25^{\circ}\text{C}$

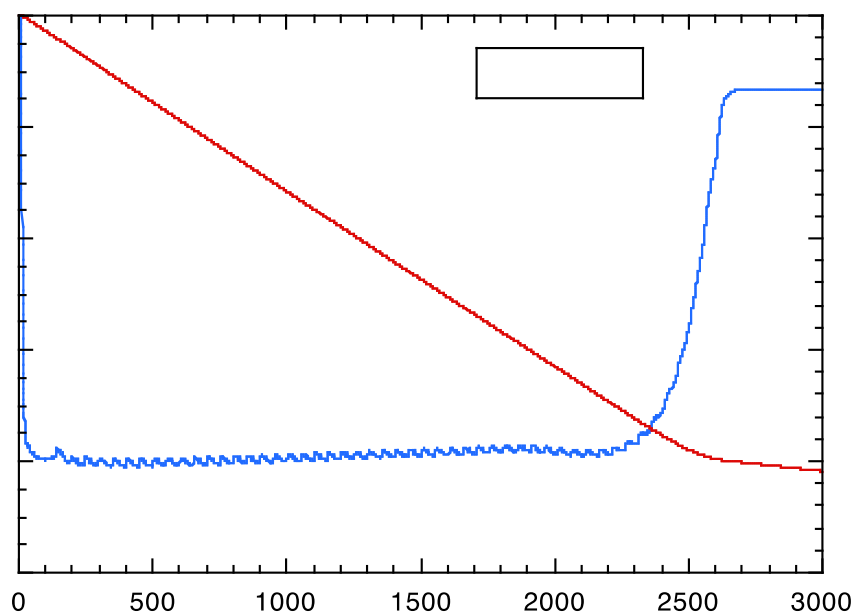


Figura A.8 – Potenza e Energia specifica vs tempo simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), temperatura di cambiamento di fase del PCM $T_{pc} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

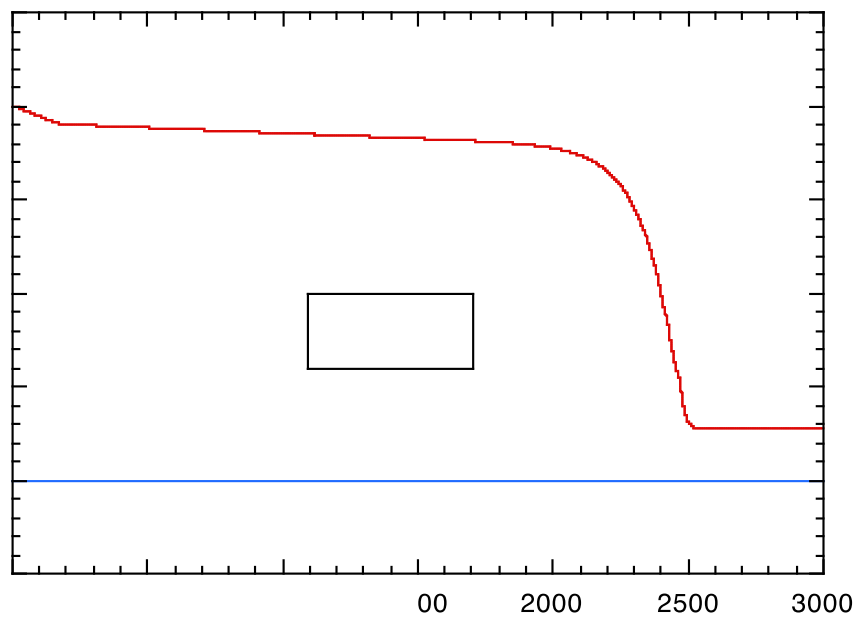


Figura A.9 - Profili di temperatura dell'acqua vs tempo nella simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), $T_{pc} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, portata 8 kg/h

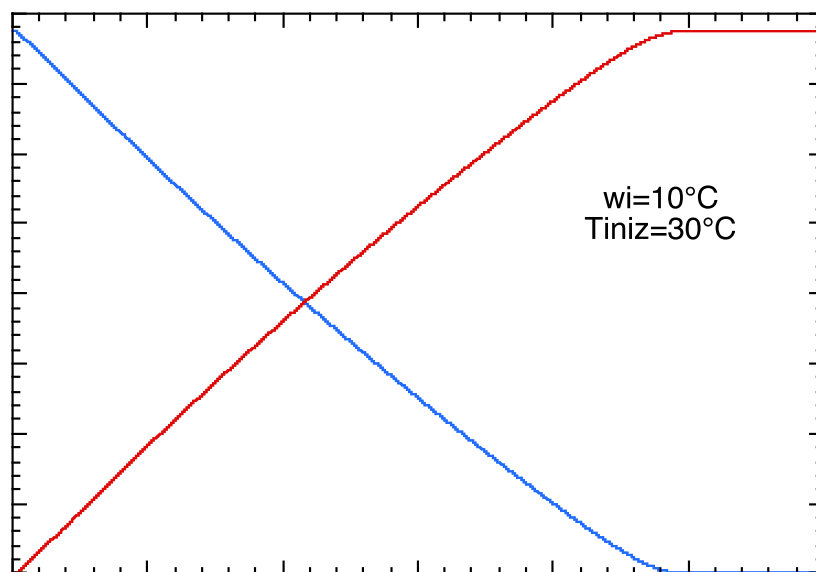


Figura A.10 – Massa solida e liquida di PCM vs tempo simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), $T_{pc}=25^{\circ}\text{C}$, portata 8 kg/h

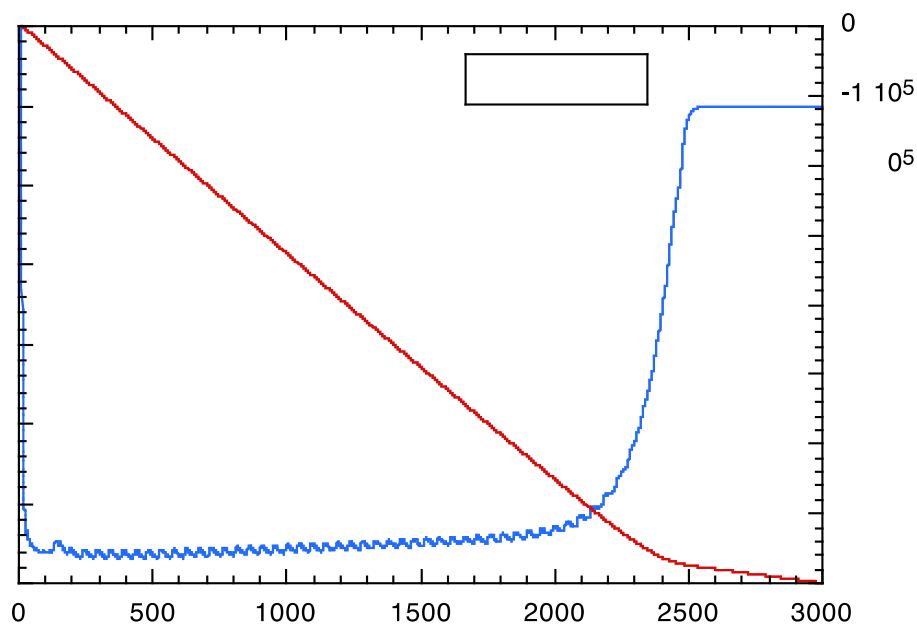


Figura A.11 – Potenza e Energia termica vs tempo simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm), $T_{pc}=25^{\circ}\text{C}$, portata 8 kg/h

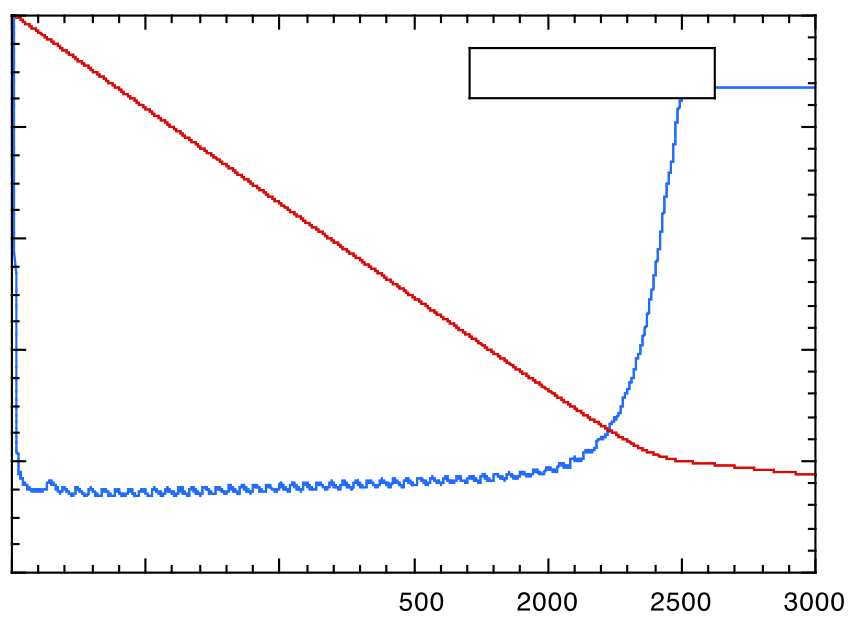


Figura A.12 – Potenza e Energia specifica vs tempo simulazione con serpentina 12 tratti (335x132mm),
 $T_{pc} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, portata 8 kg/h

Appendice 2 – Datasheet dei contenitori



Sample photo

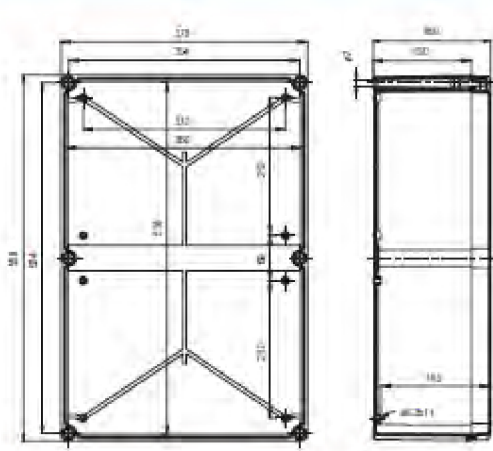
FIBOX
Enclosing innovations

SOLID PC 5638 18 G

Order symbol:	PC 5638 18 G	EAN:	6418074005625
Product nbr:	5330365	EL. number:	
Description:	Enclosure, PC	Finland:	3423723
Remarks:	Grey cover	Italy:	7401065
		Sweden:	2539428

Including: Base with screws for mounting plate/DIN-rail, cover with PUR gasket and polyamide cover screws.

Dimensions:		Length	Width	Height	Rating:
mm:		558	378	180	Ingress Protection (EN 60529): IP 66/67
inch:		22.0	14.9	7.1	Impact Resistance (EN 62262): IK 08/09
Materials:					
Material:		Polycarbonate			Electrical insulation: Totally insulated
Base colour:		RAL 7035			Halogen free (DIN/VDE 0472, Part 815): Yes
Cover colour:		RAL 7035			UV resistance: UL 508
Cover screws material:		Polyamide			Flammability Rating (UL 746 C 5): UL 94 5V
Cover screws colour:		Grey			Glow Wire Test (IEC 695-2-1) °C: 960
Gasket material:		Polyurethane			NEMA Class: NEMA 1, 3, 3S, 4, 4X, 6, 6P, 12
Temperatures:					Certificates:
Short term:		-40 ... 120 °C			Underwriters Laboratories
Continuous:		-40 ... 80 °C			Fimko
Short term:		-40 ... 250 °F			Europe EN 62208: 2003
Continuous:		-40 ... 175 °F			
Accessories:					
EKUMT		Mounting plate			
EKV 32		DIN-35 Mounting rail			
EKUZR		Extension frame			



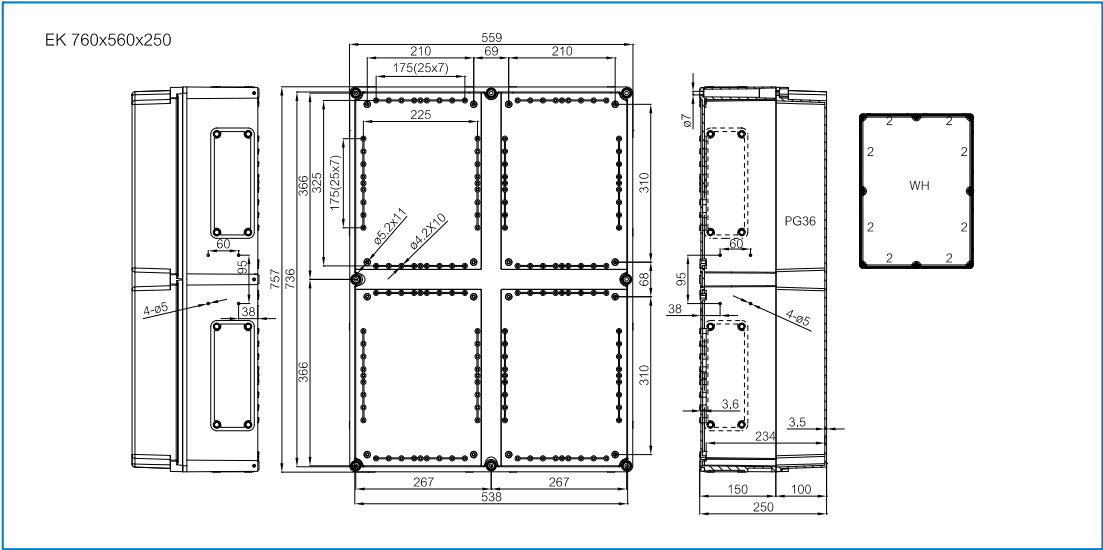
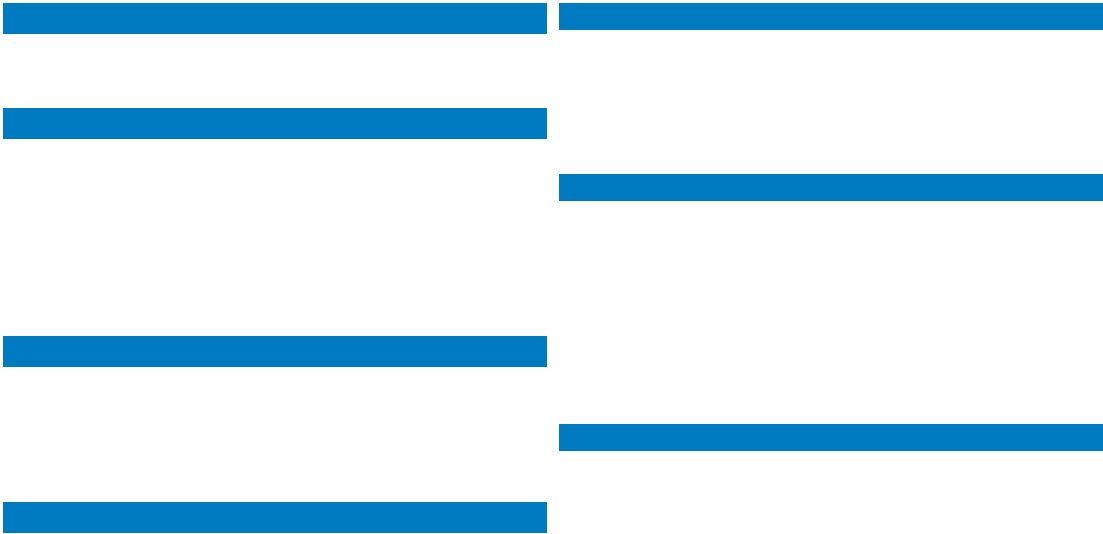
© Fibox Oy, Data subject to change without notice (revised: 11.12.2010)

Figura A.13 – Caratteristiche e dimensioni serbatoio contenitore per PCM SOLID PC 56 38 18G

FIBOX
 Enclosing innovations



Sample photo



tice (printed: 27.7.2018)

Figura A.14 – Caratteristiche e dimensioni serbatoio contenitore per PCM EK EKWH 250 G new

5 Riferimenti bibliografici

1. G. Boccardi, F. D'Annibale, G. Cicconi, A. Franchi, L. Gugliermetti, A. Mariani, A. Lattanzi, C. Menale, M. Morlacca, M. Pieve, A. Scotini, L. Simonetti, R. Trinchieri, Studio teorico/sperimentale di componenti e sistemi integrati per la climatizzazione. Progettazione preliminare e realizzazione di "HiL", Report RdS/PTR(2020)/041
2. F. D'Annibale, M. Pieve, G. Boccardi, L. Simonetti, R. Trinchieri, "Sistemi integrati in pompa di calore: individuazione dei casi studio e simulazione software di sistemi polisorgente con PdC a CO₂", (ENEA), Report RdS/PTR2019/024
3. A. Franco, A., Bartoli, C., Conti, P., Testi, D., "Optimal Operation of Low-Capacity Heat Pump Systems for Residential Buildings through Thermal Energy Storage", Sustainability 2021, 13, 7200. <https://doi.org/10.3390/su13137200>.
4. A. Mariani, F. D'Annibale, L. Gugliermetti, A. Lattanzi, C. Menale, M. Morlacca, M. Pieve, L. Simonetti, R. Trinchieri, Realizzazione di prototipi di pompa di calore operanti con refrigeranti a basso GWP, Report RdS/PTR(2021)/336

6 Abbreviazioni ed acronimi

A46	PCM paraffina con $T_{pc}=46^{\circ}\text{C}$
Bin	ore in cui si registra una certa temperatura esterna
c	Calore specifico [J/kg K]
COP	Coefficient Of Performance (Q/L)
ECOP	Rapporto tra Energia termica prodotta e Energia elettrica in un certo arco temporale
	Portata acqua [kg/s]
G	Portata in massa [kg/h]
k	Conducibilità termica [W/m K]
L	Lunghezza; Lunghezza assiale (*) [m]
M	Massa [kg]
p	pressione [Pa]
PCM	Phase change material
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
T_{pc}	Temperatura di cambiamento di fase [$^{\circ}\text{C}$]
UR	Umidità relativa [-]
VHC	Capacità termica volumetrica [J/m ³]
W	Potenza [W]
W_{spec}	Potenza specifica [W/kg]

Simboli Greci

Γ	portata [kg/s]
λ	Calore latente di fusione [J/kg]
ρ	Densità [kg/m ³]

Pedici

a	aria
des	design
ext	esterna
i	ingresso
LR	limite riscaldamento

pc	phase change
PCM	relativo al PCM
Si	ingresso serbatoio
u	uscita
w	acqua