

# Ricerca di Sistema elettrico



## **Determinazione dei carichi simulabili tramite la rete termica a bassa temperatura del Centro Ricerche ENEA Portici (LA5.1)**

Luigi Mongibello, Aniello Borriello

RdS\_PTR 22-24\_PR 1.5\_LA5.1\_089

DETERMINAZIONE DEI CARICHI SIMULABILI TRAMITE LA RETE TERMICA A BASSA TEMPERATURA DEL CENTRO  
RICERCHE ENEA PORTICI (LA5.1)

Luigi Mongibello (ENEA), Aniello Borriello (ENEA)

con la collaborazione di Gabriele Ciniglio (ENEA), Antonino Pontecorvo (ENEA), Mauro Atrigna (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto 1.5: Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio  
di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti

Linea di attività: LA 5.1

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi (ENEA)

Responsabile del Work Package: Luigi Mongibello (ENEA)

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	3
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	3
5	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	4
6	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	5

## 1 Risultati attesi

- Set dei carichi simulabili con la rete termica a bassa temperatura in funzione dei parametri caratteristici della rete termica e dei parametri ambientali;
- Dati sperimentali ottenuti con i sensori di portata, temperatura, e pressione nei vari test sperimentali per la caratterizzazione dei carichi simulabili.

## 2 Risultati ottenuti

- Controllori PID ottimizzati per il controllo delle portate di tutti i circuiti che compongono la rete termica a bassa temperatura;
- Caratterizzazione dei carichi invernali ed estivi simulabili sperimentalmente utilizzando le pompe di calore e gli scambiatori di calore integrati nella rete termica a bassa temperatura, effettuata attraverso la realizzazione di molteplici prove sperimentali;
- Dati sperimentali ottenuti con i sensori di portata, temperatura, e pressione nei vari test sperimentali per la caratterizzazione dei carichi simulabili.

## 3 Prodotti attesi

- Report tecnico dal titolo “Determinazione dei carichi simulabili tramite la rete termica a bassa temperatura del Centro Ricerche ENEA Portici”.

## 4 Prodotti sviluppati

- Report tecnico dal titolo “Determinazione dei carichi simulabili tramite la rete termica a bassa temperatura del Centro Ricerche ENEA Portici”.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per quanto concerne le attività e i risultati, non ci sono stati scostamenti rilevanti rispetto a quanto preventivato, mentre, relativamente alla parte economica, c'è uno scostamento in positivo di 42.274,14 € (costi rendicontati maggiori rispetto a quelli preventivati) in parte dovuto al passaggio di livello di due dei ricercatori impegnati nella linea di attività (12.743,00 €), e in parte dovuto a un refuso per il quale alcune quote di ammortamento relative a questa linea di attività (29.531,14 €), per acquisti realizzati nel passato triennio, nel preventivo sono state erroneamente assegnate alla linea di attività 5.6. Chiaramente, tali quote non saranno incluse quando sarà rendicontata la linea di attività 5.6.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte nell'ambito della LA 5.1 hanno avuto come obiettivo principale la caratterizzazione dei carichi simulabili sperimentalmente con la rete termica a bassa temperatura. La prima attività svolta ha riguardato la realizzazione, l'implementazione e l'ottimizzazione di controllori PID per effettuare le regolazioni delle portate di tutti i circuiti che compongono la rete termica. Successivamente, nella stagione invernale e in quella primaverile del 2022 sono state effettuate tutte le attività relative alla realizzazione delle prove sperimentali finalizzate alla determinazione dei carichi invernali simulabili sperimentalmente utilizzando le pompe di calore e gli scambiatori di calore integrati nella rete termica a bassa temperatura. Nella stagione estiva del 2022 sono state realizzate tutte le attività finalizzate alla determinazione dei carichi estivi simulabili sperimentalmente con l'impianto della rete termica a bassa temperatura. Infine, nell'ultimo periodo relativo alla presente linea di attività è stata effettuato il post-processing e l'analisi dei risultati sperimentali ottenuti.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Nella prima parte del periodo di svolgimento delle attività relative alla LA 5.1, è stata effettuata la modellazione e l'implementazione di un controllore PID per il controllo delle portate, utilizzando l'infrastruttura di ricerca "Impianto Prova Accumulo Termico", di cui si riporta un'immagine in Figura 1, presso il C.R. ENEA Portici. Successivamente, è stata effettuata l'ottimizzazione del controllore PID (Proporzionale-Integrale-Derivativo), ovvero delle costanti moltiplicative, in modo da minimizzare il tempo per il raggiungimento dei set-point. Infine, il metodo sviluppato modellazione-ottimizzazione è stato applicato a tutti i circuiti della rete termica a bassa temperatura per ottimizzare i controllori PID per il controllo delle portate, implementati tramite la valvola modulante presente su ogni singolo circuito/linea della rete.



Figura 1. Impianto Prova Accumulo Termico.

La Figura 2 mostra l'ottimo confronto tra i risultati numerici, ottenuti mediante l'implementazione del modello di PID sviluppato in ambiente Matlab, e i risultati sperimentali, nel caso relativo al controllo della portata del circuito termico dell'impianto di Figura 1.

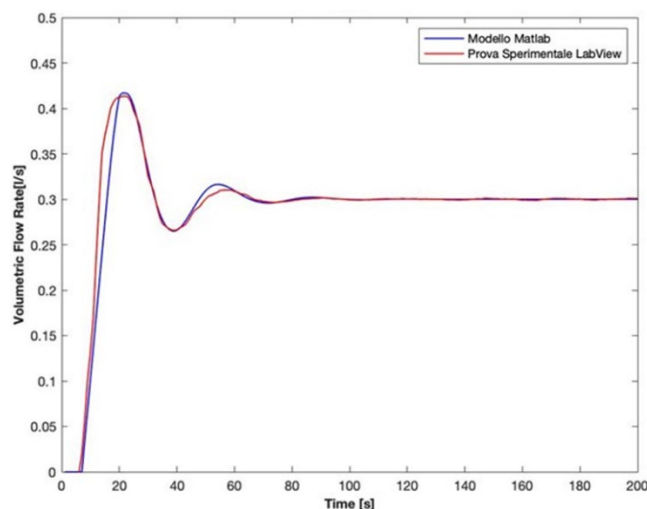


Figura 2. Confronto grafico tra risultati numerici e sperimentali nel caso di un PID proporzionale per il controllo della portata, con set-point fissato a 0.3 l/s.

In Figura 3 è mostrata la rete termica a bassa temperatura realizzata presso ENEA Portici, mentre la Figura 4 mostra uno schema semplificato della rete termica nella configurazione invernale. Al fine di evidenziare le differenze tra la modalità di funzionamento della rete durante la stagione invernale da quella estiva, si riporta in Figura 5 il dettaglio del piping tra recuperatore di calore e dry cooler durante la stagione invernale. Si può notare che tutta la portata di acqua calda proveniente dalle mandate (lato impianto) delle pompe di calore alle utenze confluisce verso il dry cooler, che opererà un primo abbassamento della temperatura. Successivamente, la portata totale va al secondario del recuperatore di calore per cedere ulteriore calore (recuperato) alla portata d'acqua del circuito sorgente della pompa di calore della rete. Il carico totale alle utenze, dato dalla somma della potenza scambiata al dry cooler e quella scambiata al recuperatore, può essere modulato, entro certi limiti, variando la velocità di rotazione delle quattro ventole del dry cooler e/o attraverso il bypass e la relativa valvola modulante, come si può notare nella suddetta figura. La Figura 6 mostra, invece, il dettaglio del piping tra recuperatore di calore e dry cooler durante la stagione estiva. Si può notare che tutta la portata di acqua fredda proveniente dalle mandate (lato impianto) delle pompe di calore alle utenze va direttamente al secondario del recuperatore di calore, per assorbire calore dalla portata d'acqua del circuito sorgente della pompa di calore della rete. Quest'ultima, prima di arrivare al primario del recuperatore di calore, viene diretta al dry cooler dove parte della potenza termica viene ceduta all'ambiente esterno. In questo caso, il carico termico di energia refrigerante alle utenze può essere variato, in maniera indiretta, variando la velocità di rotazione delle ventole al dry cooler.



Figura 3. Rete termica a bassa temperatura presso ENEA Portici.

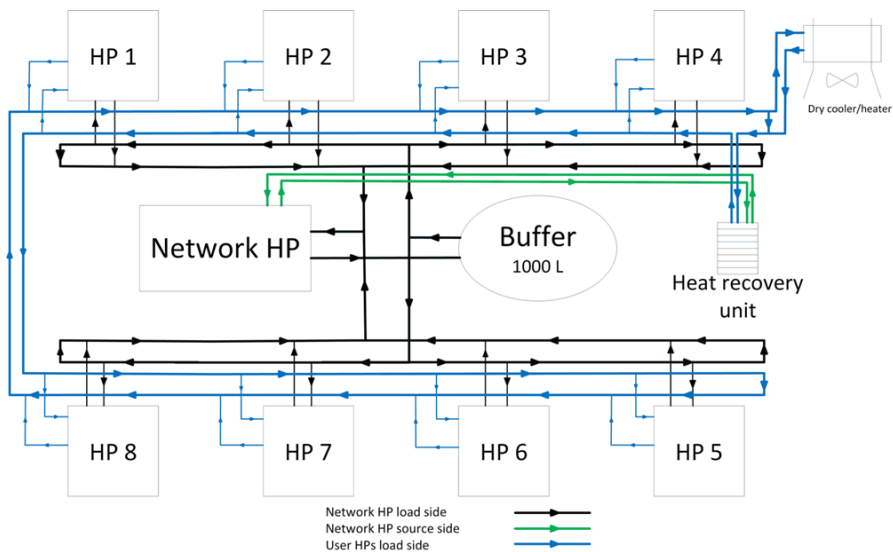
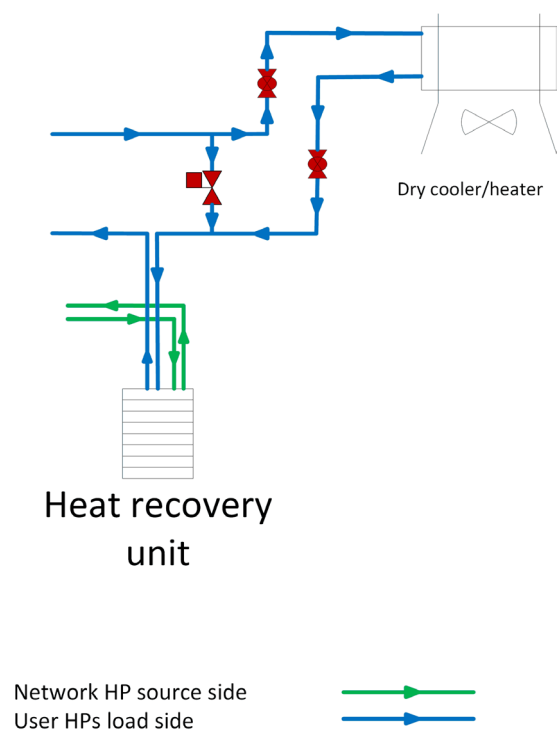
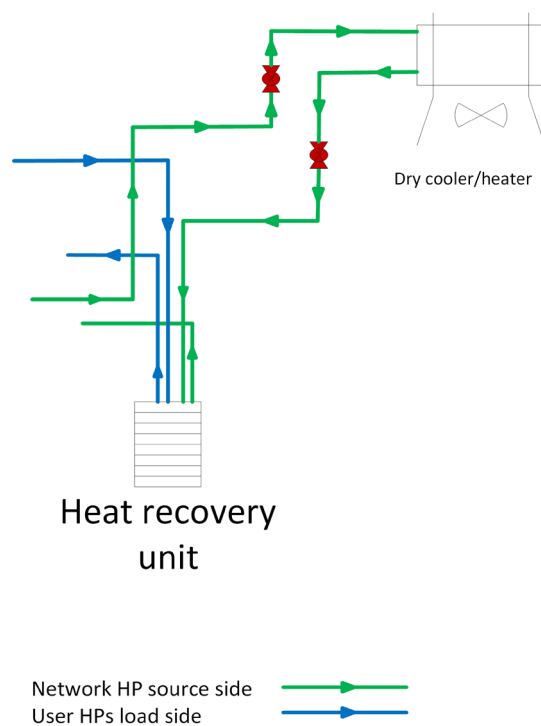


Figura 4. Layout semplificato della rete termica relativo al funzionamento invernale.



**Figura 5. Dettaglio collegamento tra dry cooler e recuperatore nel funzionamento invernale.**



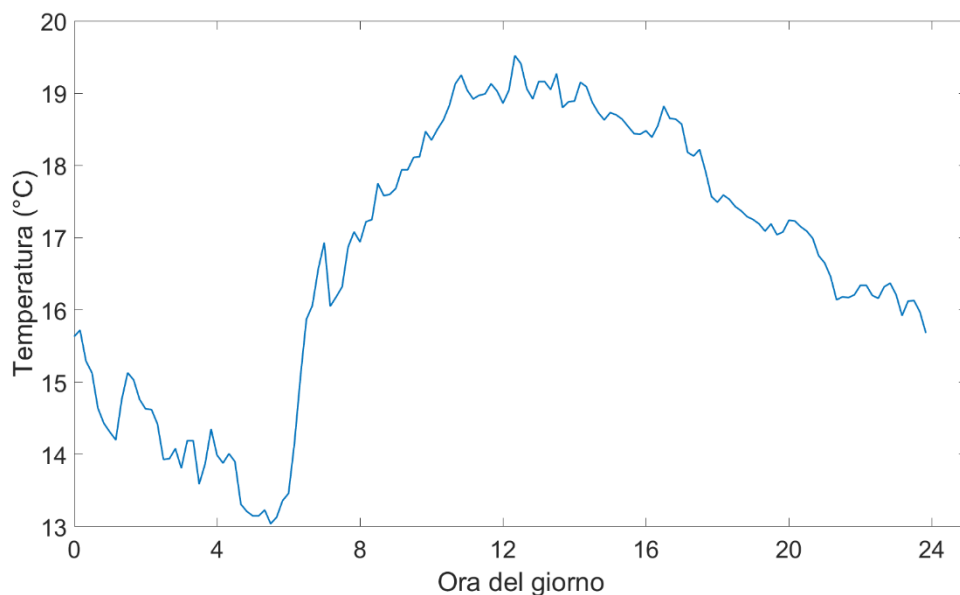
**Figura 6. Dettaglio collegamento tra dry cooler e recuperatore nel funzionamento estivo.**

Relativamente alle prove sperimentali realizzate per la caratterizzazione dei carichi invernali, le prime prove sono state realizzate senza il controllo delle portate, e, per queste prove, tutte le valvole di modulazione sono state lasciate completamente aperte.

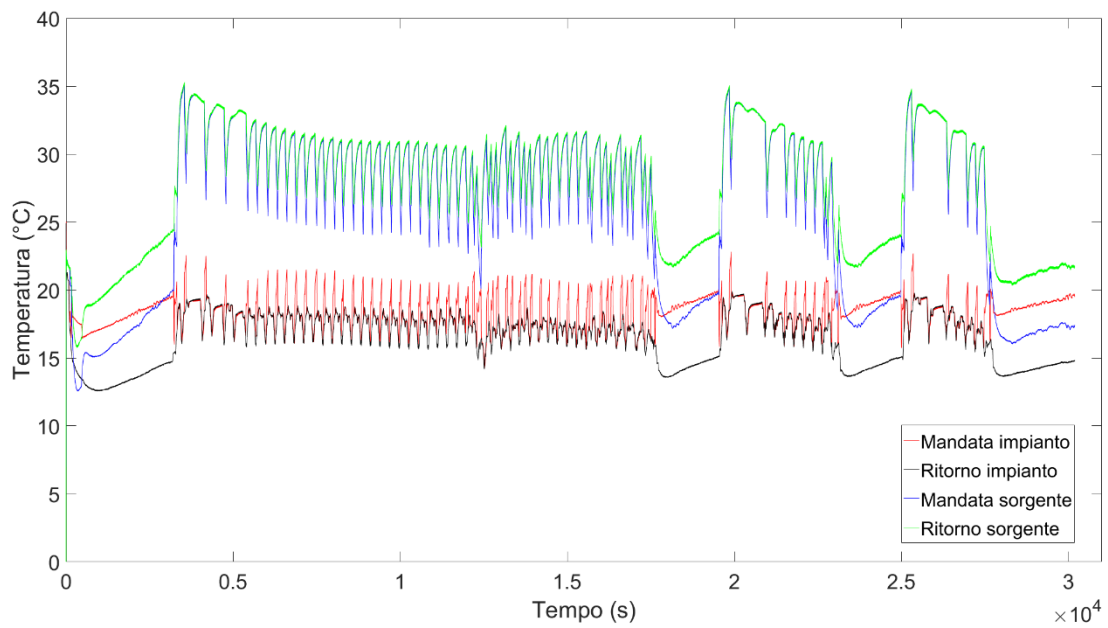
La prima prova a portate controllate è stata effettuata il 27 aprile 2022. Questa prova è stata realizzata per valutare i carichi emulabili grazie al dry-cooler in serie con il recuperatore nel caso con by-pass aperto e con portate controllate.

In questa prova, avviata alle 10:15 del mattino, i set-point di temperatura per la PDC rete e per le PDC utenze sono fissati rispettivamente a 20°C e 40°C, i set-point della portata totale rete lato impianto e della portata rete lato sorgente sono entrambi fissati a 15 m<sup>3</sup>/h, i set-point delle portate lato impianto delle PDC utenze sono fissati a 1 m<sup>3</sup>/h, mentre le portate lato sorgente sono regolati a 0,9 m<sup>3</sup>/h.

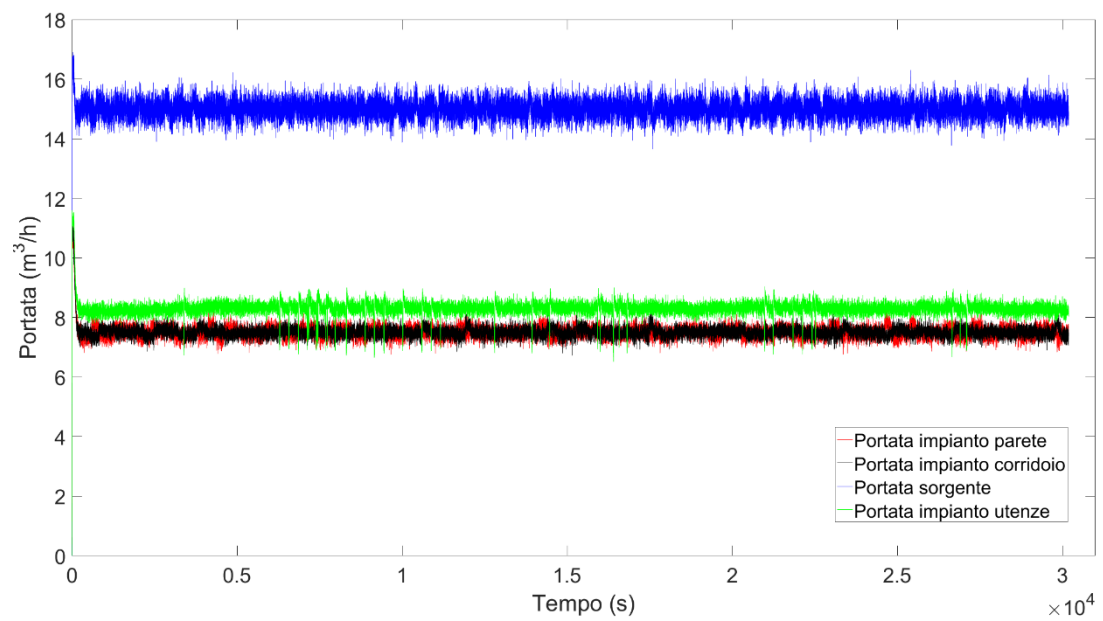
Allo start-up, le ventole sono al minimo (12%) e la valvola di bypass è completamente aperta, e questa configurazione viene mantenuta per circa 5 ore (fino alle 15:10 circa). Dopo circa un'ora dallo start-up, vengono raggiunti i set-point di temperatura, e i compressori delle PDC si spengono tutti. Da questo momento fino a che la configurazione non viene modificata, si verifica un continuo ON/OFF dei compressori per effetto del basso carico applicato, come si può notare dalle figure che seguono. In merito a ciò, c'è da aggiungere che in questa prova le portate sono regolate a valori ben più bassi rispetto ai "massimi" implementati nelle prime prove, e questo chiaramente ha contribuito, assieme alla bassa velocità iniziale delle ventole del dry-cooler, a determinare un carico applicato relativamente basso. Alle 15:10 le ventole vengono portate al 24%. Dopo poco minuti ripartono i compressori delle PDC, che restano accesi per circa 30 minuti prima del raggiungimento dei set-point di temperatura, quindi si spengono intorno alle 15:40. Alle 16:40 i compressori ripartono, e dopo circa 30 minuti si spengono di nuovo per raggiunti set-point, coerentemente rispetto a quanto successo in precedenza, non essendo variata la velocità delle ventole. Alle 18:00 le ventole vengono portate al 35%, e alle 19:05 vengono spente tutte le PDC. Le Figure dalla 8 alla 11 mostrano rispettivamente gli andamenti temporali delle temperature alla PDC rete, le portate relative ai circuiti della PDC rete e del recuperatore, le temperature al recuperatore, e le potenze relative alla PDC rete e al recuperatore, mentre le Figure dalla 12 alla 14 mostrano rispettivamente temperature, portate, e potenze per una delle PDC utenze. Relativamente alla PDC rete, non si notano differenze sostanziali rispetto alle prove precedenti, mentre per le PDC utenze, si può notare un carico più definito, ovviamente con riferimento ai periodi di funzionamento dei compressori, dovuto essenzialmente al controllo delle portate. Comunque, anche in questa prova si può notare che vi è una differenza relativamente piccola tra il carico minimo, ovvero quello con le ventole al 12%, e carico massimo con le ventole al 35%.



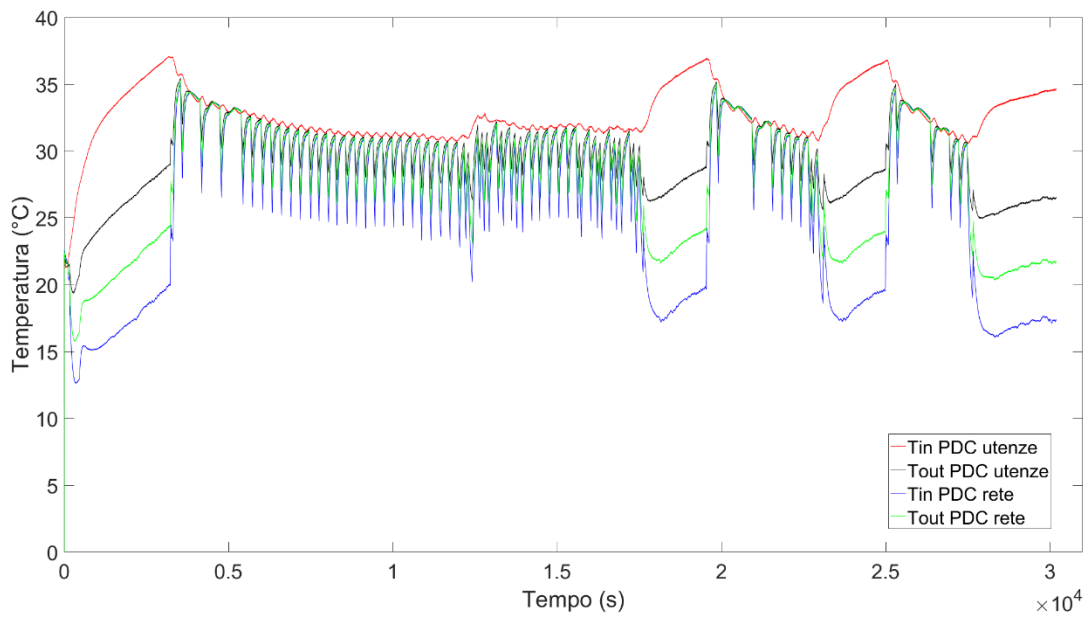
**Figura 7. Andamento temporale della temperatura ambiente del 27 aprile 2022.**



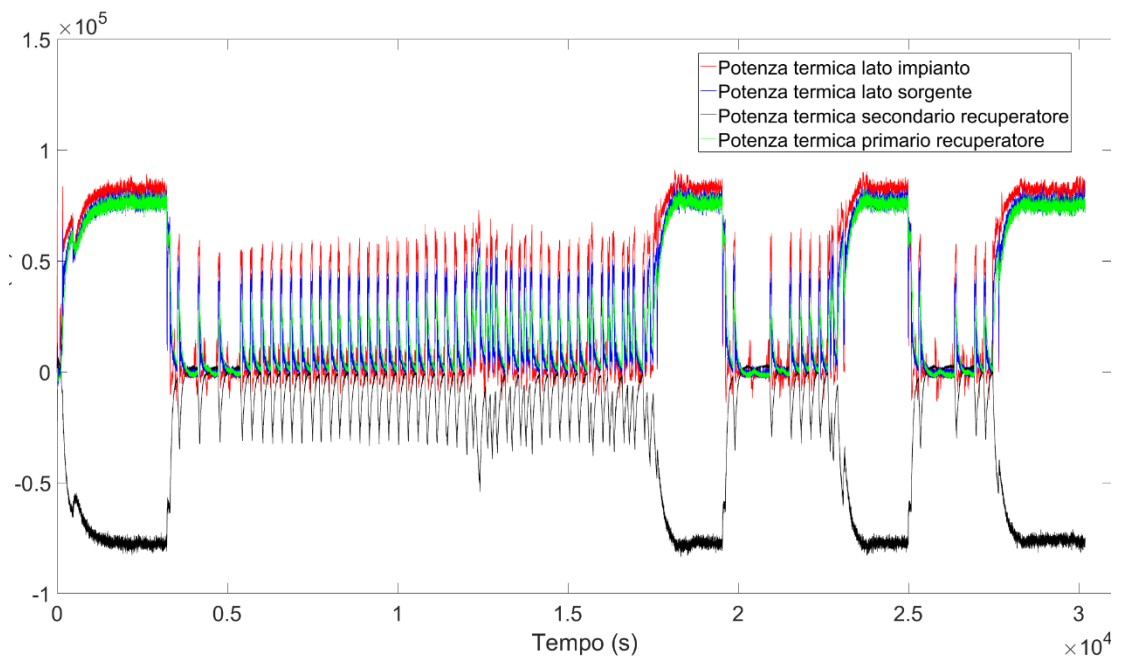
**Figura 8. Temperature PDC rete.**



**Figura 9. Portate PDC rete.**



**Figura 10. Temperature recuperatore.**



**Figura 11. Potenze PDC rete e recuperatore.**

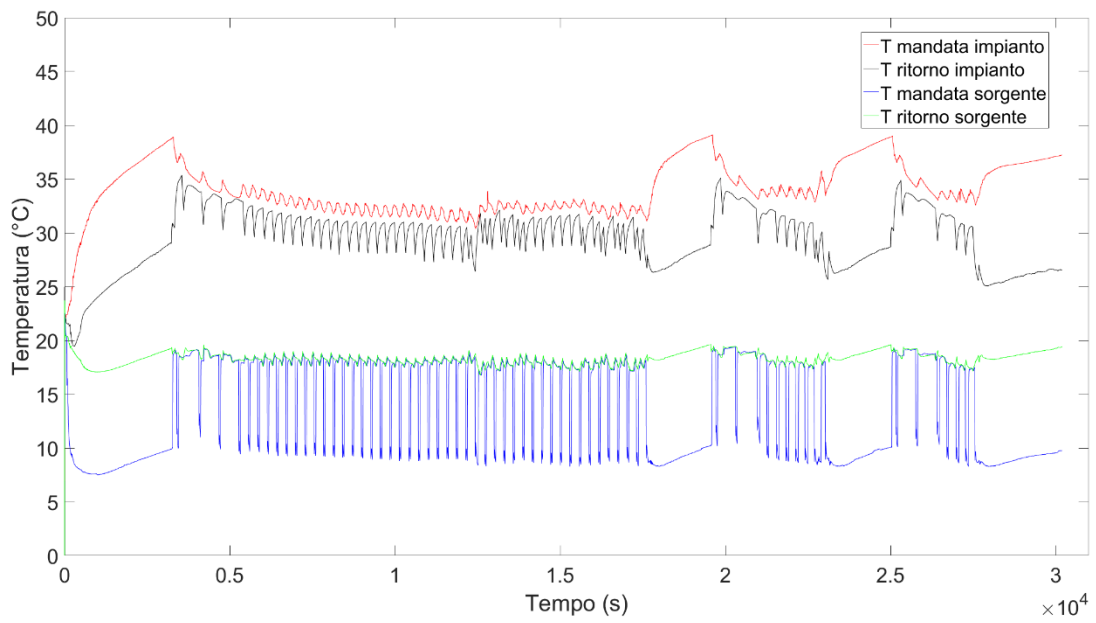


Figura 12. Temperature PDC utenza.

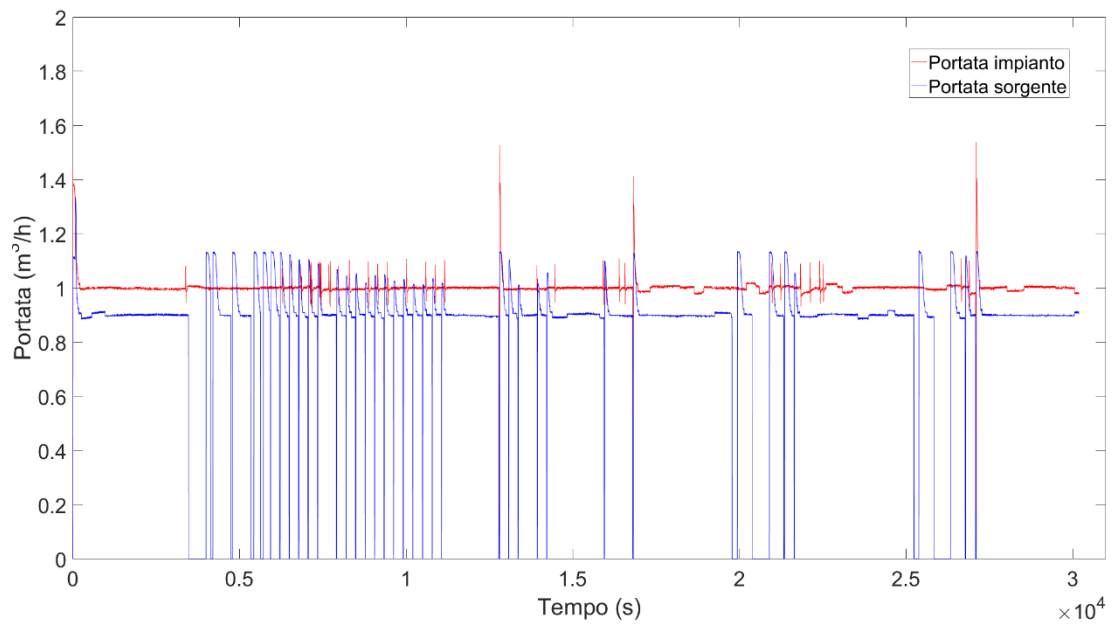


Figura 13. Portate PDC utenza.

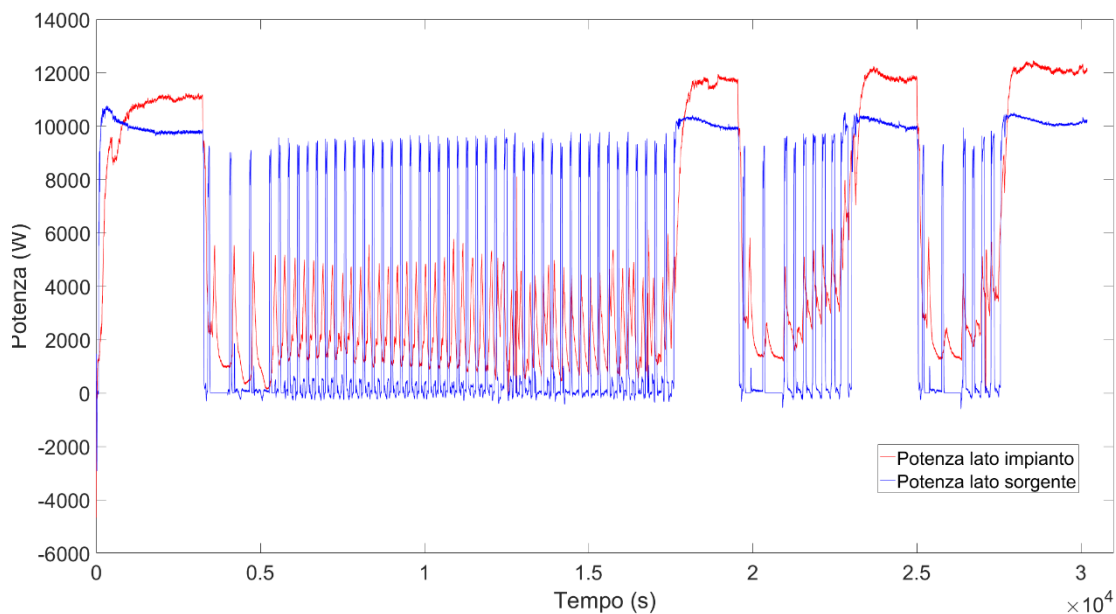


Figura 14. Potenze PDC utenza.

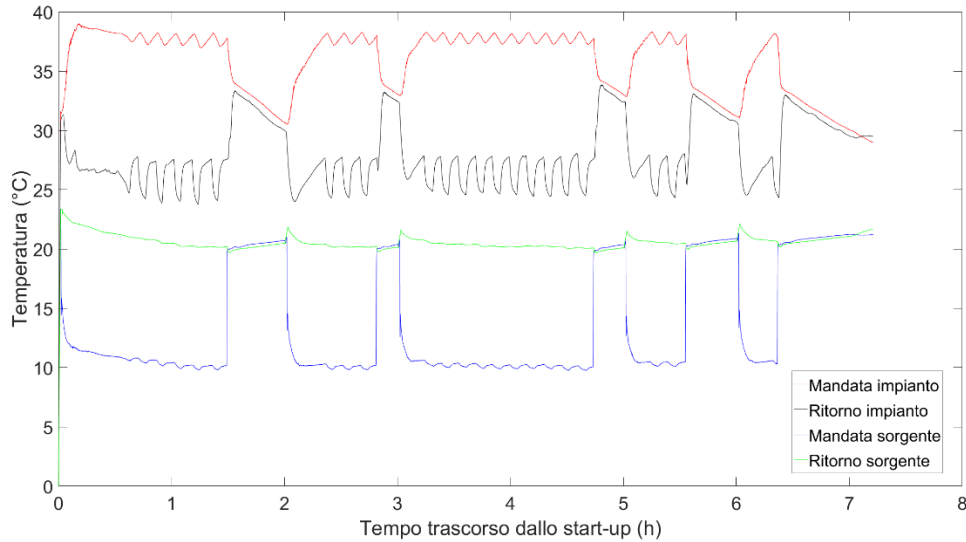
Dalla suddetta prova sperimentale, si è potuto constatare che, tramite la valvola di by-pass, e/o la variazione della velocità delle ventole del dry cooler, non è possibile simulare sperimentalmente un range di carico alle utenze relativamente ampio utilizzando soltanto la modulazione della potenza termica. Pertanto, si è deciso di simulare sperimentalmente il carico termico alle utenze senza modulare la potenza, ma utilizzando una potenza pressoché costante, e spegnendo i compressori delle PDC utenze una volta raggiunto il carico termico in termini di energia termica trasferita all'utenza, su base oraria.

Per quanto sopra, nei primi giorni di maggio 2022 sono state effettuate le modifiche al PLC realizzato in Labview al fine di implementare il suddetto approccio per la simulazione sperimentale dei carichi termici su base oraria. Il 10 maggio è stato effettuato il primo test per sperimentare l'implementazione del carico termico su base oraria. I risultati della prova del 10 maggio sono serviti per perfezionare le modalità operative dei vari componenti della rete al fine di ottenere il funzionamento desiderato, che stato raggiunto nella prova successiva realizzata il 12 maggio.

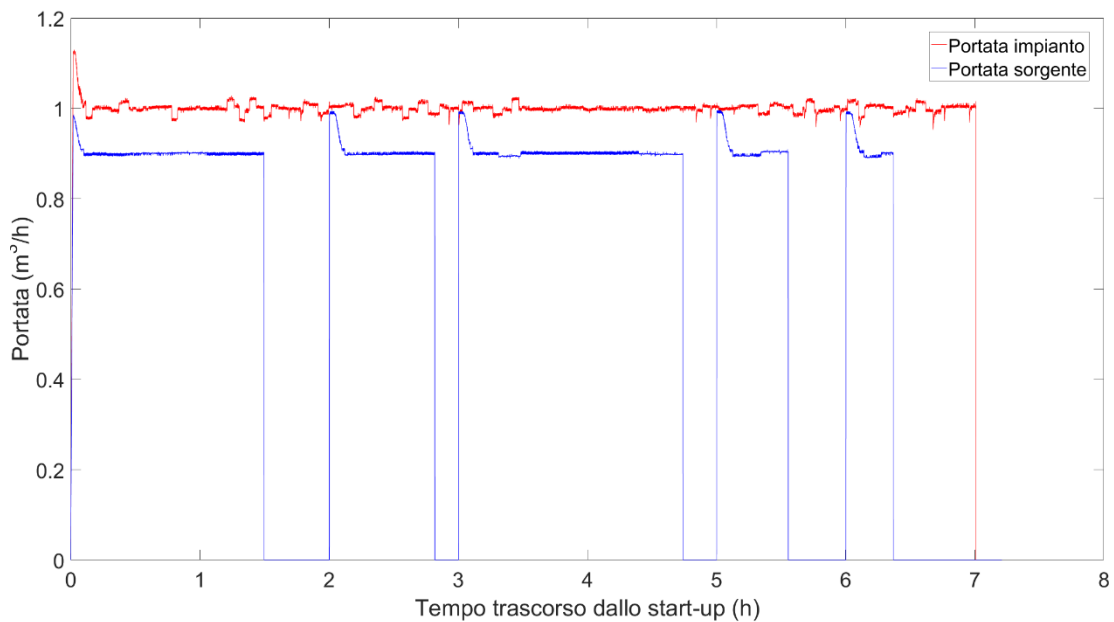
Dal 16 al 27 maggio sono state effettuate varie prove sperimentali, in 7 giorni differenti, per il dimensionamento di un controllore PID che permettesse di regolare la temperatura dell'acqua dalle PDC utenze verso le utenze (T mandata impianto), variando la velocità delle ventole. La Figura 15 e la Figura 16 mostrano rispettivamente le temperature e le portate relative alla PDC utenza n. 3. In questo caso, per la PDC utenza considerata, il set-point alla PDC della temperatura di mandata lato impianto è fissato a 40°C, il set-point effettivo verso le utenze da realizzare con le ventole del dry-cooler è fissato a 37,5°C, quello della portata impianto a 1 m<sup>3</sup>/h, mentre quello della portata sorgente a 0,9 m<sup>3</sup>/h. Considerando la Figura 15, si può notare che, nonostante tutto l'impegno profuso nei giorni precedenti per il dimensionamento del PID, non si è riusciti ad ottenere una temperatura costante verso le utenze. Le difficoltà sono legate al fatto che si tratta di un controllo indiretto, poiché praticamente si sta controllando la temperatura all'ingresso delle ventole, variando la velocità delle ventole. Tuttavia, le oscillazioni della T mandata impianto sono abbastanza contenute, per cui il risultato è considerato da migliorare ma accettabile. Per quanto riguarda il carico, con riferimento a entrambe le suddette figure, si può constatare che:

- Nella prima ora, il carico è fissato a un valore superiore a quello massimo, quindi la PDC non va in stand-by
- Nella seconda ora il carico è fissato a metà carico massimo, quest'ultimo pari a circa 12 kWh. Infatti, dopo circa 30 minuti si spegne il compressore e la PDC va in stand-by;
- Nella terza ora il carico è fissato al 75% di quello massimo

- Nella quarta ora il carico è fissato al valore massimo
- Alla quinta ora il carico è di nuovo al 75% di quello massimo
- Alla sesta ora il carico è di nuovo fissato al 50% di quello massimo
- Alla settima ora il carico è al 30% di quello massimo
- Nella ottava ora, il carico è zero e dopo poco dall'inizio dell'ora la rete è stata spenta.



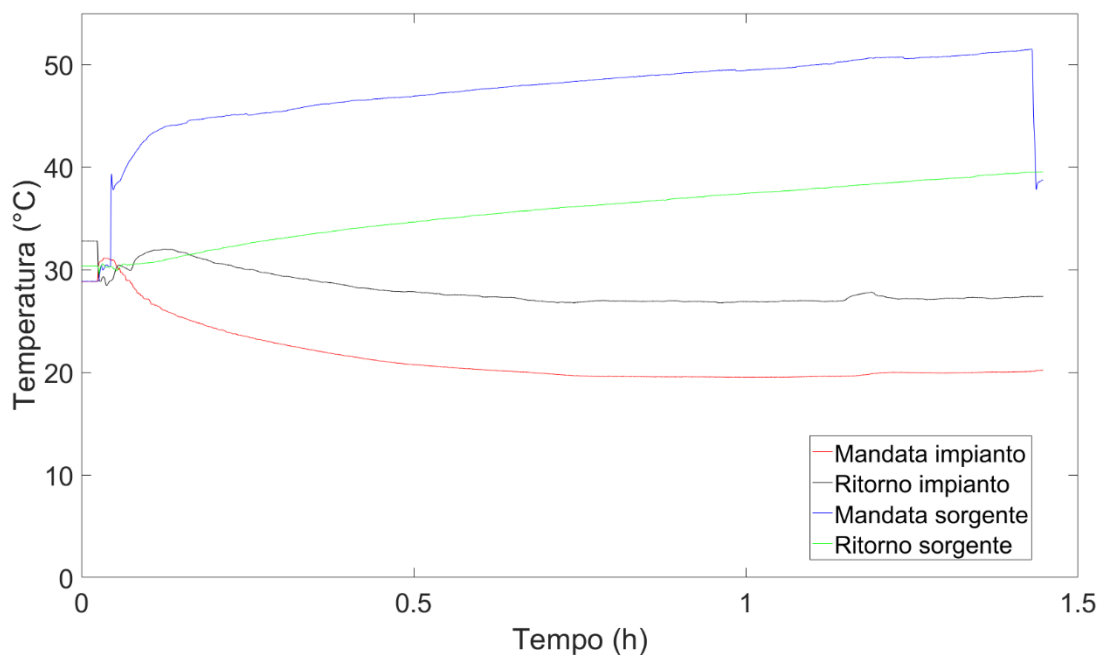
**Figura 15. Temperature PDC utenza.**



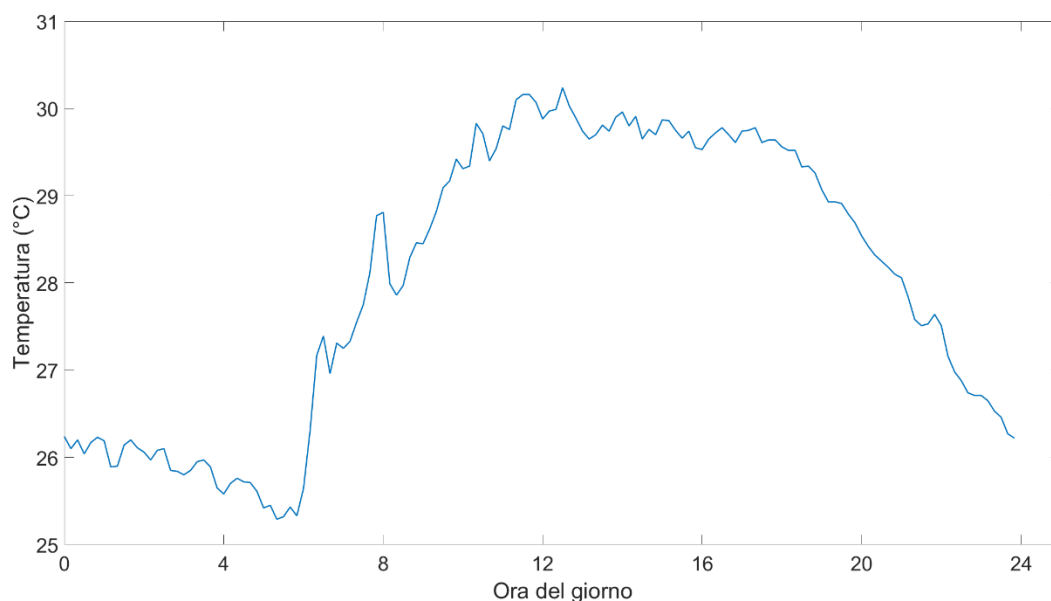
**Figura 16. Portate PDC utenza.**

Le prove sperimentali per la caratterizzazione dei carichi estivi sono state effettuate utilizzando la configurazione riportata in Figura 6 relativamente al collegamento delle linee al recuperatore e al dry cooler. Chiaramente, anche nella stagione estiva è necessario smaltire gran parte della potenza elettrica assorbita sia dalle pompe di calore che dagli altri componenti elettrici collegati alle linee idriche. Pertanto, nella stagione estiva il dry-cooler è collegato al condensatore (linea sorgente) della PDC rete, invece che alle linee impianto delle PDC utenze. L'acqua fredda prodotta dalle PDC utenze nel ramo impianto viene riscaldata direttamente nel recuperatore, per la simulazione del carico estivo.

La prima prova sperimentale nella modalità estiva è stata effettuata il 27 luglio, dopo aver realizzato tutte le modifiche al circuito della rete termica per portare la configurazione nella modalità estiva. La prova è stata realizzata fissando la temperatura di set-point alle PDC utenze a 10°C, quella alla PDC rete a 15°C, i set-point delle portate impianto e sorgente delle PDC utenze rispettivamente a 1,3 m<sup>3</sup>/h e 1 m<sup>3</sup>/h, e i set-point delle portate impianto e sorgente della PDC rete rispettivamente a 20 m<sup>3</sup>/h e 15 m<sup>3</sup>/h. Come si può vedere dalla Figura 17, la temperatura di mandata non riesce ad arrivare al set-point di 10°C, ma si ferma a circa 20°C. Ciò è dovuto alla elevata temperatura esterna, ovvero al fatto che il dry-cooler non riesce a dissipare abbastanza. La Figura 18 mostra l'andamento temporale della temperatura ambiente.



**Figura 17. Temperature PDC utenza.**



**Figura 18. Temperatura ambiente del 27 luglio 2022**

Nei giorni successivi, sono state effettuate altre prove, alcune avviate durante la notte per approfittare della temperatura ambiente più bassa. Queste prove hanno portato alla conclusione che, nell'attuale configurazione dei parametri, è possibile ottenere temperature di mandata lato impianto inferiori ai 15°C soltanto quando la temperatura ambiente è inferiore un valore limite che si aggira intorno ai 25°C. Chiaramente, oltre che dalla temperatura, va considerato che lo scambio termico al dry-cooler dipende anche dall'umidità relativa. Tra i risultati ottenuti si mostrano di seguito alcuni di quelli della prova del giorno 8 agosto. In questa prova, l'impianto è stato avviato alle 3:20 di notte, e i set-point sono gli stessi rispetto alla prova del 27 luglio. Come si può notare in Figura 19, la temperatura di mandata scende quasi fino al set-point, per poi cominciare a risalire dalle 7:30 circa quando la temperatura ambiente comincia a crescere, come si può notare in Figura 20. La Figura 21 mostra, invece, la potenza refrigerante, che varia tra i 10 e i 12 kW. Nello stesso giorno, è stata avviata una prova con lo stesso setting dei parametri rispetto alle prove precedenti, ma con una sola differenza che riguarda la portata lato sorgente della PDC rete. Infatti, in questa prova la portata è stata diminuita gradualmente al fine di aumentare la temperatura di mandata verso il dry-cooler, nel tentativo di aumentare l'energia trasferita dal dry-cooler all'ambiente esterno. La Figura 22 e la Figura 23 mostrano rispettivamente le temperature e le portate relative alla PDC rete, mentre la Figura 24 e la Figura 25 mostrano rispettivamente le temperature e le potenze relative alla PDC utenza n.3. Come si può notare, la diminuzione della portata lato sorgente della PDC rete causa un aumento della temperatura al flusso d'acqua in uscita dalla PDC rete lato sorgente (dal condensatore). Ciò produce un aumento della potenza dissipata al dry-cooler, e una conseguente diminuzione della T di mandata lato impianto della PDC utenza, che finalmente si porta e si mantiene in prossimità del set-point fino alla fine della prova (dopo circa due ore quando vengono spenti i compressori). Inoltre, la Figura 25 mostra che la potenza refrigerante generata dalla PDC utenza è leggermente più bassa rispetto a quella di Figura 21, ottenuta con una portata sorgente relativa alla PDC rete maggiore. Questo perché, se da un lato è aumentata la potenza dissipata dal dry-cooler, dall'altro è diminuita la potenza scambiata al recuperatore. Comunque, questa prova ha dimostrato che è possibile ottenere una regolazione della temperatura di mandata lato impianto delle PDC utenze variando la portata lato sorgente della PDC rete.

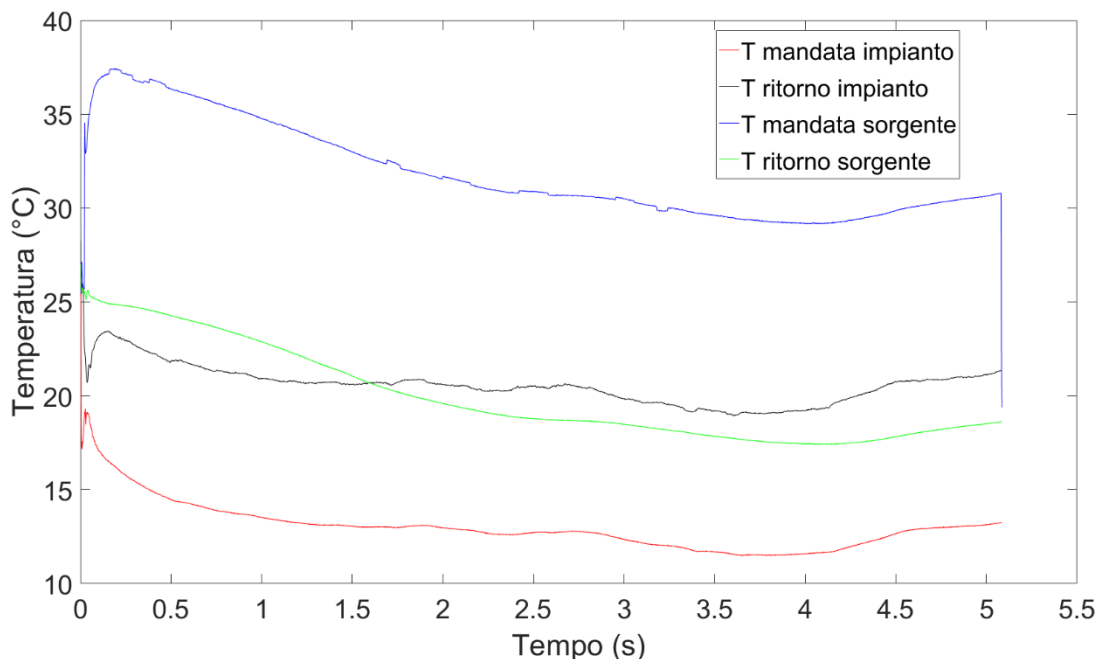
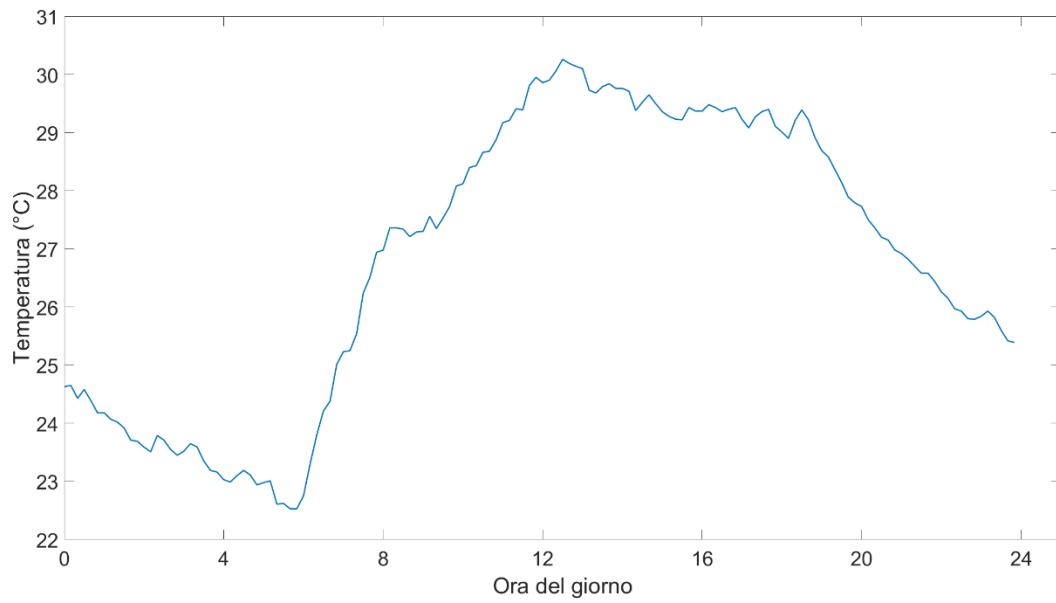
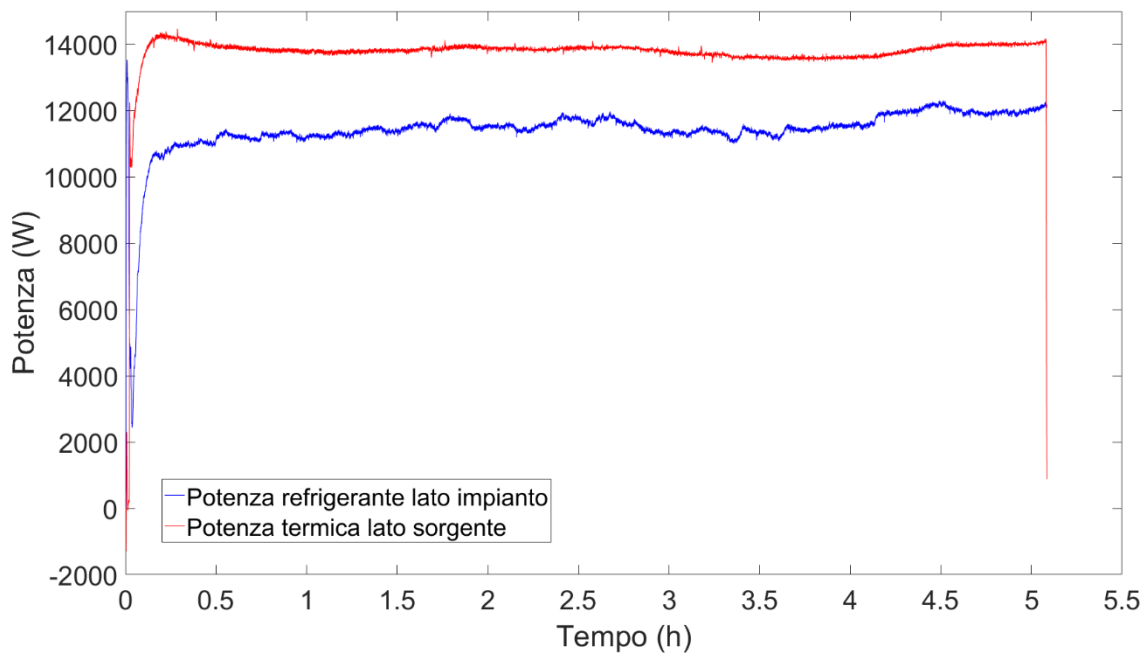


Figura 19. Temperature PDC utenza.



**Figura 20. temperatura ambiente del giorno 8 agosto 2022.**



**Figura 21. Potenze PDC utenza.**

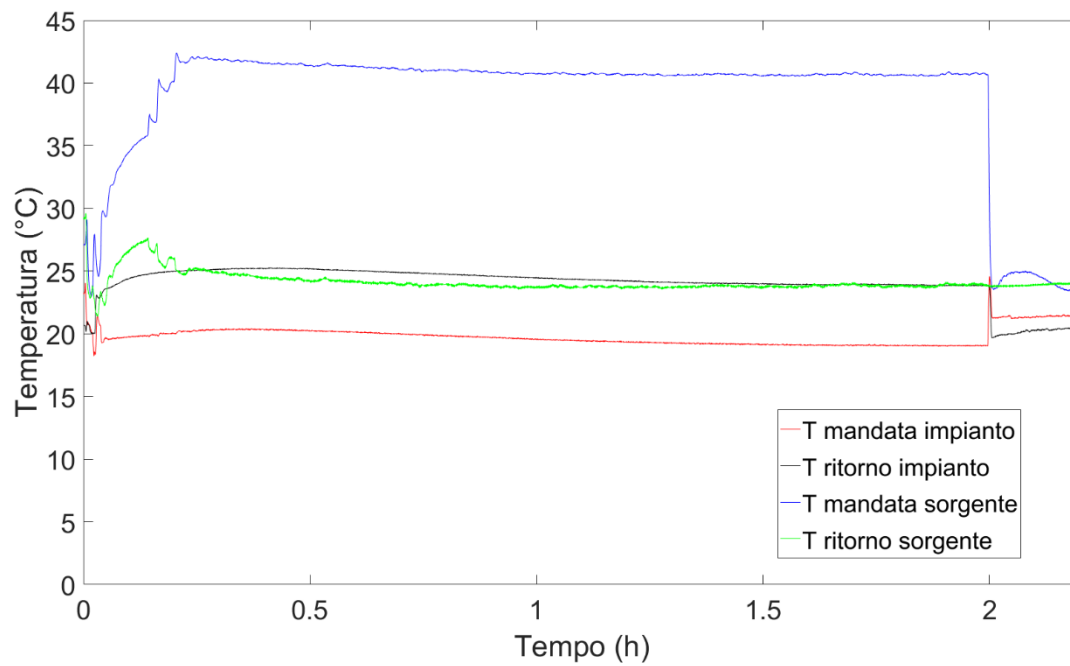


Figura 22. Temperature PDC rete.

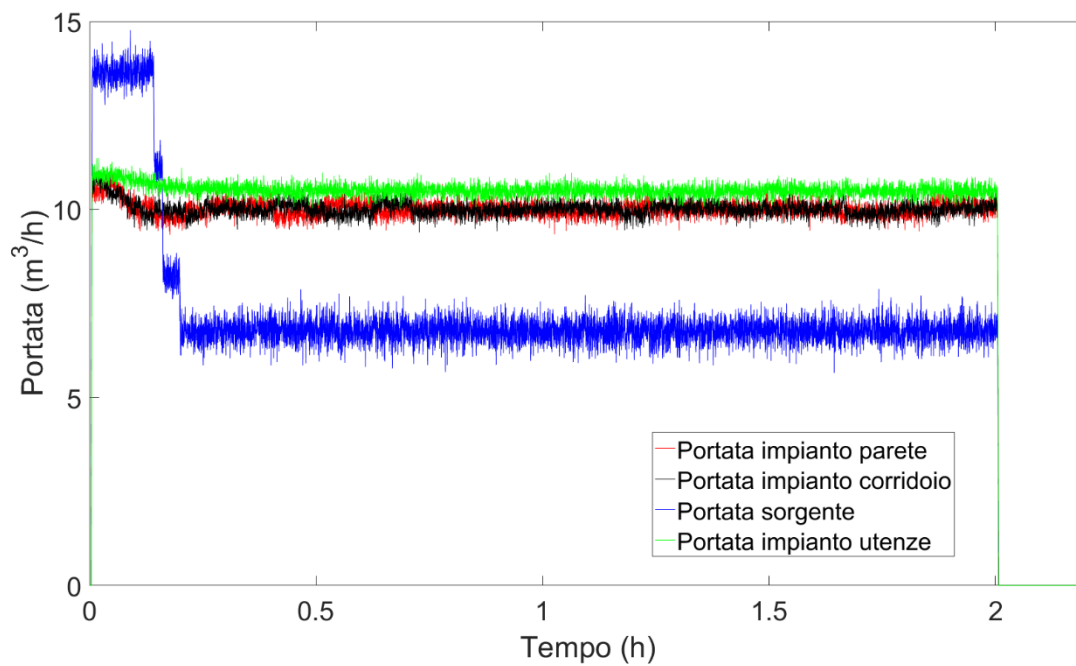


Figura 23. Portate PDC rete.

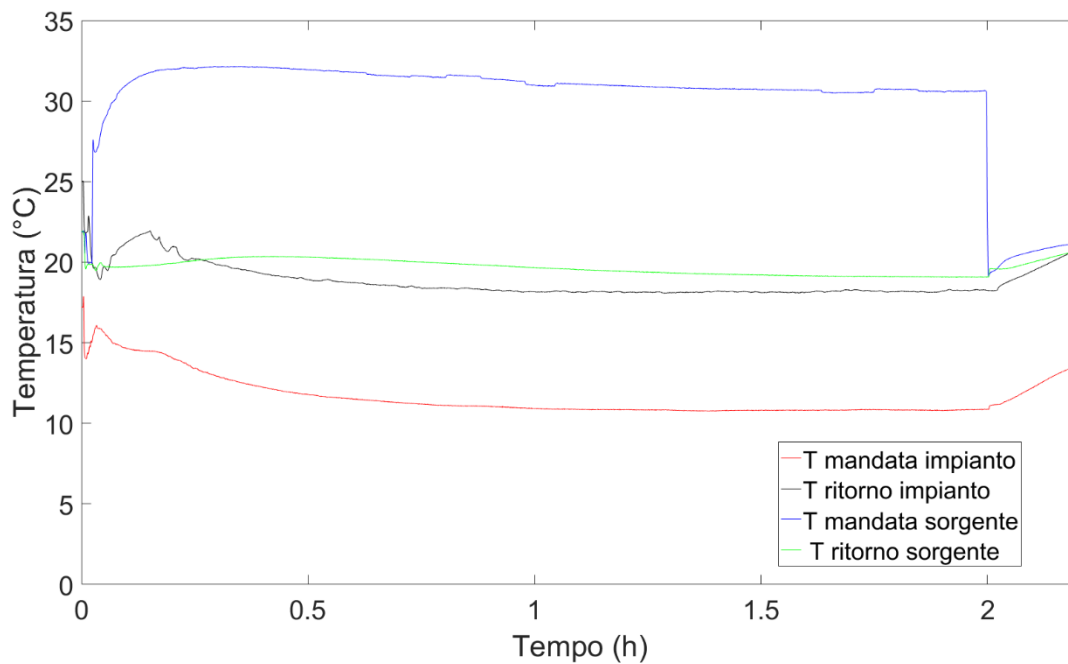


Figura 24. Temperature PDC utenza.

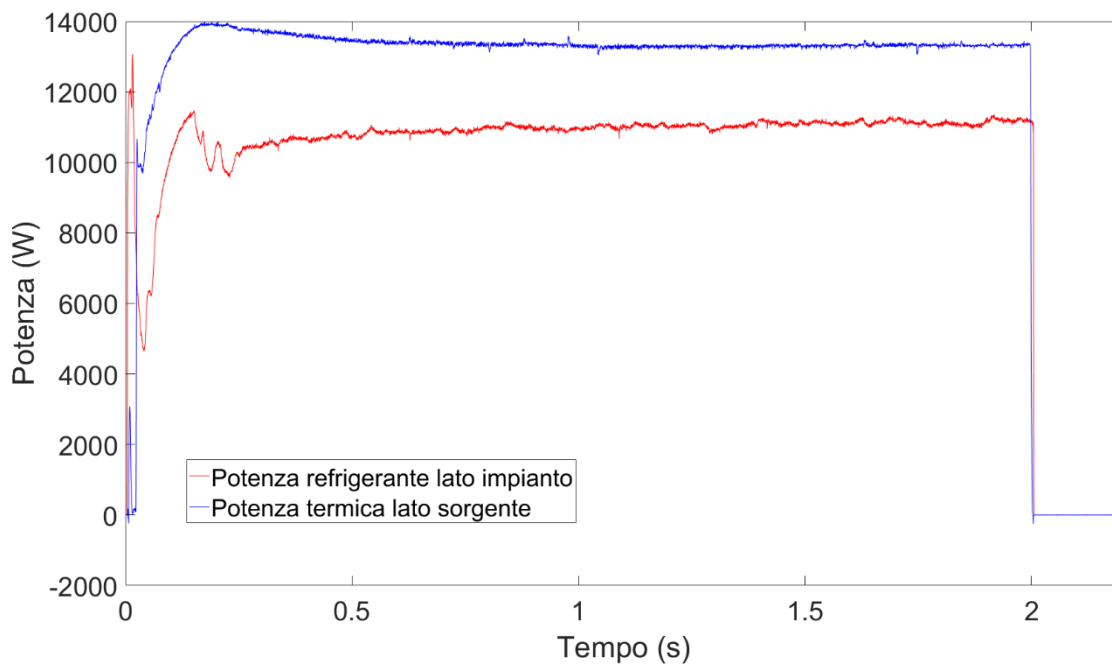


Figura 25. Potenze PDC utenza.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non erano previste consulenze per la presente linea di attività.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Per questa linea di attività non era prevista la realizzazione di pubblicazioni scientifiche.

## 10 Eventi di disseminazione

Per questa linea di attività non era prevista l'organizzazione/partecipazione a eventi di disseminazione.