

# Ricerca di Sistema elettrico



Risultati dei test per la validazione sperimentale dei risultati  
delle simulazioni numeriche relative alla linea di attività LA5.2  
(LA5.3)

L. Mongibello, A. Borriello

Risultati dei test per la validazione sperimentale dei risultati delle simulazioni numeriche relative alla linea di attività LA5.2 (LA5.3)

L. Mongibello (ENEA), A. Borriello (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 5.3

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Luigi Mongibello, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

## Indice

1	Risultati attesi .....	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi .....	6
4	Prodotti sviluppati .....	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte .....	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Validazione sperimentale del modello di calcolo dinamico sviluppato nella LA 5.2 ..	10
7.2	Upgrade della rete termica a bassa temperatura .....	12
7.3	Simulazione sperimentale di una strategia di flessibilità energetica .....	14
7.3.1	Caso senza accumulo.....	18
7.3.2	Caso con accumulo .....	20
7.3.3	Risultati a confronto.....	23
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	28
9	Pubblicazioni scientifiche.....	29
10	Eventi di disseminazione .....	30

## Indice delle figure

Figura 1. Layout semplificato della rete termica relativo al funzionamento estivo. ....	11
Figura 2. Dettaglio collegamento tra dry cooler e recuperatore nel funzionamento estivo. ....	11
Figura 3. By-pass con valvola a 3 vie. ....	12
Figura 4. Circuiti idraulici realizzati con: (a) tubazione d'acciaio corrugata isolata; (b) tubazione liscia multistrato isolata. ....	13
Figura 5. Misuratori di portata elettromagnetici: (a) modelli Flow 38 della COMAC CAL; (b) misuratore Rosemount 8705. ....	14
Figura 6. Scambiatori di calore aria-acqua (dry coller) : (a) mod. alfablue junior; (b) mod. XDHL1F-1115 L. ....	14
Figura 7. Carico termico normalizzato senza accumulo termico. ....	16
Figura 8. Carico termico normalizzato con accumulo termico. ....	16
Figura 9. Dettaglio collegamento tra dry cooler e recuperatore nel funzionamento invernale. ....	17
Figura 10. By-pass nel caso di impianto in modalità invernale. ....	17
Figura 11. Temperature caratteristiche della PDC user. ....	18
Figura 12. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC user. ....	19
Figura 13. Potenze scambiate al condensatore e all'evaporatore della PDC user. ....	19
Figura 14. Temperature caratteristiche della PDC network. ....	20
Figura 15. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC network. ....	20
Figura 16. Temperature caratteristiche della PDC user. ....	21
Figura 17. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC user. ....	21
Figura 18. Potenze scambiate al condensatore e all'evaporatore della PDC user. ....	22
Figura 19. Temperature caratteristiche della PDC network. ....	22
Figura 20. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC network. ....	23
Figura 21. Potenza elettrica assorbita dalla PDC user nel caso senza accumulo. ....	24
Figura 22. Energia elettrica impiegata dalla PDC user nel caso senza accumulo. ....	24
Figura 23. Potenza elettrica assorbita dalla PDC user nel caso con accumulo. ....	25
Figura 24. Energia elettrica impiegata dalla PDC user nel caso con accumulo. ....	25
Figura 25. Energia termica prodotta dalla PDC user (scambiata al condensatore) su base oraria nel caso senza accumulo. ....	26
Figura 26. Energia termica prodotta PDC user (scambiata al condensatore) su base oraria nel caso con accumulo. ....	26
Figura 27. COP orario nel caso senza accumulo. ....	27
Figura 28. COP orario nel caso con accumulo. ....	27

# 1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi:

- Validazione sperimentale dei modelli per le simulazioni numeriche sviluppati e implementati nella linea di attività LA 5.2;
- Analisi sperimentale di soluzioni ottimizzate risultanti dall'implementazione dei modelli per la simulazione numerica e l'ottimizzazione di reti termiche a bassa temperatura sviluppati nella LA 5.2.

## 2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti:

- Validazione sperimentale dei modelli per le simulazioni numeriche sviluppati e implementati nella linea di attività LA 5.2;
- Upgrade componentistica hardware rete termica
- Upgrade sensoristica e automazione rete termica;
- Analisi sperimentale di soluzioni ottimizzate risultanti dall'implementazione dei modelli per la simulazione numerica e l'ottimizzazione di reti termiche a bassa temperatura sviluppati nella LA 5.2.

### 3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico "Risultati dei test per la validazione sperimentale dei risultati delle simulazioni numeriche relative alla linea di attività LA 5.2"

## 4 Prodotti sviluppati

Rapporto tecnico "Risultati dei test per la validazione sperimentale dei risultati delle simulazioni numeriche relative alla linea di attività LA 5.2"

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la presente linea di attività, il capitolato prevedeva la realizzazione di un upgrade della rete termica a bassa temperatura per minimizzare le perdite di carico della rete, mediante la completa sostituzione delle tubazioni inox corrugate con tubazioni e raccordi in multistrato isolato. Tale sostituzione è stata effettuata solo in parte. Difatti, le tubazioni lisce in multistrato non hanno comportato una diminuzione sensibile delle perdite di carico totali rispetto alle tubazioni corrugate già presenti, sia a causa della presenza di molteplici raccordi di collegamento tra i sensori e gli attuatori presenti sui circuiti, normalmente non presenti nei circuiti non destinati ad attività di ricerca, sia a causa delle perdite di carico concentrate nei vari gomiti impiegati per realizzare i circuiti idraulici, questi ultimi non presenti con le tubazioni corrugate preesistenti, che si possono curvare all'occorrenza grazie alla loro flessibilità. Invero, dopo aver sostituito i corrugati inox con le tubazioni in multistrato sia sul circuito utenza che su quello sorgente di una delle pompe di calore, e verificato, successivamente, che non comportavano alcun beneficio in termini di diminuzione delle perdite di carico, la sostituzione delle tubazioni sulle altre pompe di calore utenze non è stata effettuata.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Nella prima parte delle attività, la rete termica a bassa temperatura è stata utilizzata per caratterizzare sperimentalmente il comportamento di componenti reali di reti termiche a bassa temperatura, per fornire al co-beneficiario UNINA\_DII\_2 dati sperimentali per poter validare i modelli sviluppati per simulare il comportamento dinamico dei componenti della rete, nell'ambito della LA 5.2. In parallelo e anche successivamente rispetto alla caratterizzazione sperimentale dei componenti, sono state finalizzate tutte le attività relative all'acquisto di componentistica inventariale e consumabile per effettuare l'upgrade della rete termica a bassa temperatura, volto innanzitutto a migliorare le caratteristiche di automazione della rete (aggiornamento pannello di comando e controllori PID, valvole elettriche modulanti, e misuratori di portata di altissima precisione, installazione nuovo dry-cooler). Inoltre, come già anticipato nella sezione 5, è stata effettuata l'installazione di tubazioni in multistrato, ma soltanto sui circuiti utenza e sorgente di una delle pompe di calore.

Infine, vengono mostrati i risultati sperimentali di uno dei vari test condotti per simulare sperimentalmente le strategie di flessibilità energetica sviluppate e implementate mediante simulazione numerica nel corso della LA 5.2, ovvero quella che vede l'impiego di un accumulo termico durante la stagione invernale, che è possibile implementare nell'ambito di un programma di demand response tra consumatori e operatore di rete.

Nel seguito non saranno riportati i dettagli delle varie configurazioni implementate nelle simulazioni sperimentali effettuate con la rete termica a bassa temperatura nel corso della LA 5.3. Tali dettagli sono riportati nel report tecnico relativo alla LA 5.1, presentato al SAL 1.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Validazione sperimentale del modello di calcolo dinamico sviluppato nella LA 5.2

In questa sezione si riporta una descrizione sintetica di una delle prove effettuate per caratterizzare sperimentalmente i componenti della rete termica. In particolare, si riporta quella che ha prodotto i dati sperimentali inseriti dal co-beneficiario UNINA\_DII\_2 nel report relativo alla LA 5.2, nel paragrafo sulla validazione sperimentale del modello in modalità di raffrescamento. In Figura 1 è mostrato il layout della rete termica a bassa temperatura nella configurazione estiva, ovvero con le pompe di calore (PDC) "user" che raffreddano l'acqua nel circuito utenza (anche detto circuito carico o impianto), e di conseguenza la riscaldano nel circuito sorgente. L'acqua raffreddata dalle 8 pompe di calore user viene inviata al recuperatore di calore, mentre l'acqua calda viene immessa nella rete termica, collegata al circuito utenza della pompa di calore di rete "network", anch'essa in modalità estiva, che serve per simulare sperimentalmente una sorgente "fredda", come ad esempio un sistema geotermico per il raffrescamento. Pertanto, l'acqua calda immessa in rete dalle PDC user viene raffreddata dalla PDC network, per poi tornare alle PDC user e ripetere il ciclo. Relativamente all'acqua fredda prodotta dalle PDC user nei rami utenze, questa confluisce nel secondario del recuperatore di calore, mentre nel primario fluisce l'acqua calda proveniente dal ramo sorgente della PDC network, dopo aver attraversato il dry-cooler, come si può evincere dalla Figura 2, che mostra qualche dettaglio in più sul collegamento della rete termica con il dry cooler e il recuperatore di calore. Si può notare un by-pass con una valvola a 3 vie nel circuito che collega i rami utenze delle PDC user al recuperatore, che fa parte dei nuovi componenti installati sulla rete nel corso della presente linea di attività. La Figura 3 mostra una foto del by-pass, realizzato utilizzando una tubazione flessibile da 2", e regolato tramite un attuatore modulante montato sul corpo valvola della valvola a tre vie. Questo serve per regolare indirettamente la media delle temperature di mandata delle PDC user. Invero, il carico di raffrescamento relativo alle PDC user viene simulato controllando opportunamente la temperatura di mandata e le singole portate nei rami utenze delle PDC user. La dissipazione di energia termica nel dry cooler serve essenzialmente per bilanciare la frazione di energia termica introdotta nella rete per effetto dell'assorbimento di energia elettrica da parte delle PDC e degli altri componenti elettrici della rete, al netto dell'energia recuperata nel recuperatore e delle perdite termiche nei circuiti che compongono la rete, questi ultimi di entità trascurabile lavorando la rete a bassa temperatura.

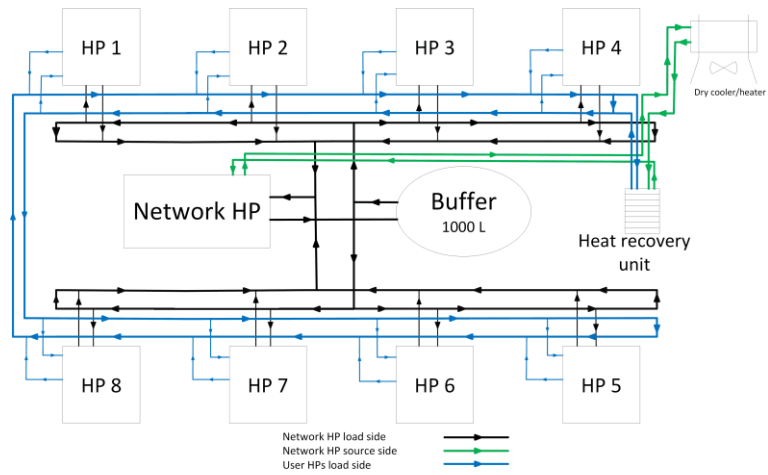


Figura 1. Layout semplificato della rete termica relativo al funzionamento estivo.

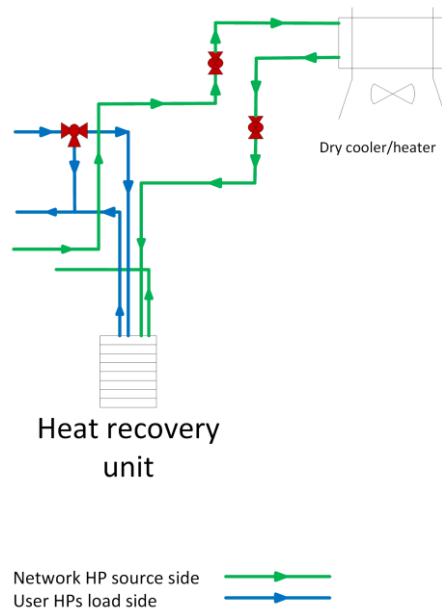


Figura 2. Dettaglio collegamento tra dry cooler e recuperatore nel funzionamento estivo.



Figura 3. By-pass con valvola a 3 vie.

Infine, relativamente alla prova in modalità estiva che ha prodotto i dati sperimentali riportati nel report della LA 5.2, il setpoint della T di uscita lato carico (impianto) della PDC network è stato fissato a 20°C; il setpoint delle T di uscita lato utenza delle 8 PDC user è stato fissato a 10°C, ma queste temperature sono controllate a 12,5°C tramite la portata del circuito sorgente della PDC network; il setpoint della portata totale lato carico della PDC network a 20 m<sup>3</sup>/h, che si divide equamente nei due rami con quattro PDC user, grazie a due valvole modulanti controllate da controllori PID; setpoint portate lato utenza delle 8 PDC user a 1,3 m<sup>3</sup>/h; il setpoint della portate lato sorgente delle PDC user a 1 m<sup>3</sup>/h. Le curve sperimentali non vengono riportate perché già presenti nel report relativo alla linea di attività 5.2.

## 7.2 Upgrade della rete termica a bassa temperatura

Oltre all'aggiunta del by-pass mostrato in Figura 3, l'upgrade della rete termica è consistito nella sostituzione delle tubazioni corrugate in acciaio con tubazioni lisce multistrato, modifica questa che ha riguardato il circuito utenza e quello sorgente di soltanto una delle pompe di calore user, per le motivazioni espresse nella sezione 5; la sostituzione dei misuratori di portata con misuratori di portata molto più precisi; infine la sostituzione della coppia di scambiatori calore del dry-cooler del circuito di dissipazione con altrettanti scambiatori di calore di potenza superiore. Chiaramente, la sostituzione dei suddetti componenti idraulici/meccanici e dei sensori ha comportato nella maggioranza dei casi la riconfigurazione degli schemi idraulici, di quelli elettrici, e lo spostamento e/o la sostituzione dei supporti meccanici. In alcuni casi, oltre al cablaggio dei nuovi componenti, è stato necessario adeguare i quadri elettrici a causa delle diverse tensioni di alimentazione, come nel caso della sostituzione del dry-cooler.

In Figura 4, l'immagine (a) mostra i circuiti di una delle PDC user realizzati con le tubazioni corrugate, mentre la (b) mostra gli stessi circuiti dove le tubazioni corrugate sono state sostituite da tubi lisci multistrato. Come si può notare, a differenza delle tubazioni multistrato,

per le tubazioni corrugate, grazie alla loro flessibilità, non è stato necessario utilizzare curve a gomito di 90° per il collegamento dei vari componenti del circuito. Questo aspetto, considerando anche che, per le finalità del progetto di ricerca, nei circuiti sono presenti molti attuatori e molti sensori, e di conseguenza un notevole numero di raccordi a gomito nel caso di utilizzo del multistrato con le annesse perdite di carico concentrate, ha annullato i benefici in termini di perdite di carico distribuite nel caso di utilizzo del multistrato liscio rispetto al corrugato.

In Figura 5, l'immagine (a) mostra i misuratori di portata Flow 38 della COMAC CAL, acquistati dalla società Precision Fluid Controls s.r.l., che sono stati sostituiti con i misuratori Rosemount 8705 della Emerson, di cui si mostra una foto nell'immagine (b) della stessa figura, molto più accurati e precisi, e dimensionati considerando le affettive portate massiche di lavoro nei circuiti delle PDC user.

Infine, in Figura 6, l'immagine (a) mostra i due scambiatori di calore della LUVE mod. alfablee junior che compongono il sistema di dissipazione (dry cooler), che sono stati sostituiti con i due scambiatori di calore mostrati nell'immagine (b), di potenza quasi doppia rispetto agli alfablee junior. Questa sostituzione si è resa necessaria perché i due scambiatori junior hanno mostrato grossi limiti durante la stagione estiva nel dissipare l'energia termica proveniente dal condensatore della PDC network, ovviamente soprattutto durante il giorno nelle giornate molto calde. Si fa notare che, ovviamente, il sito di installazione degli scambiatori non corrisponde a quello della rete termica, quest'ultima situata nella hall tecnologica al piano terra dell'edificio 1 del C.R. ENEA Portici. Infatti, il sistema dry-cooler è situato in uno dei locali tecnici esterni adiacenti (in pianta) rispetto alla suddetta hall tecnologica, posto al piano interrato.

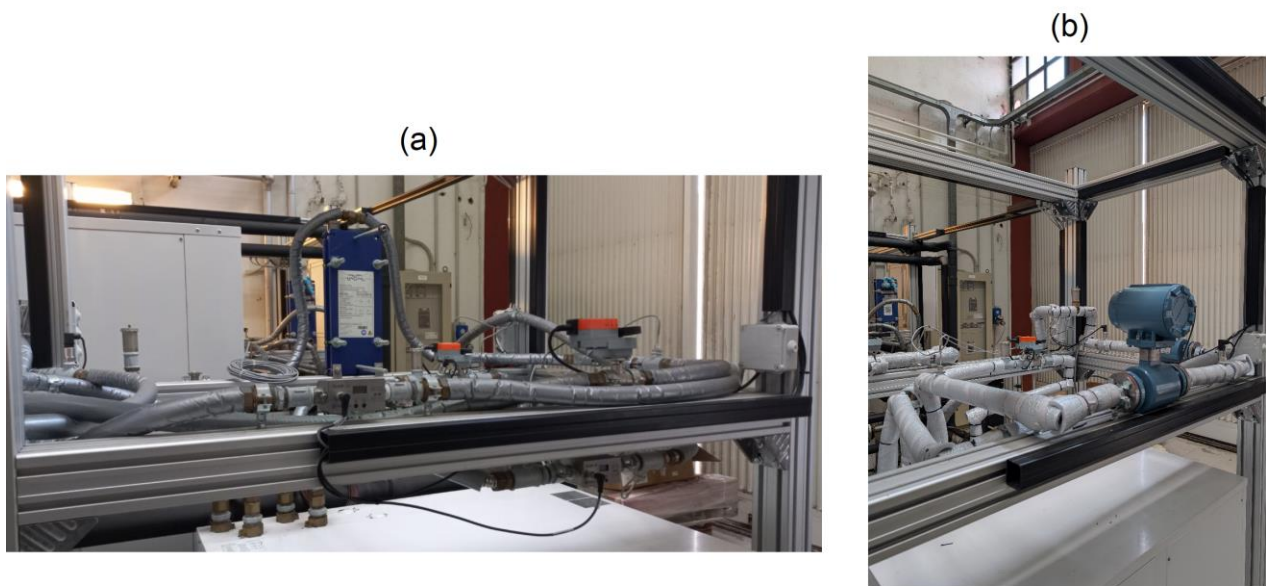


Figura 4. Circuiti idraulici realizzati con: (a) tubazione d'acciaio corrugata isolata; (b) tubazione liscia multistrato isolata.

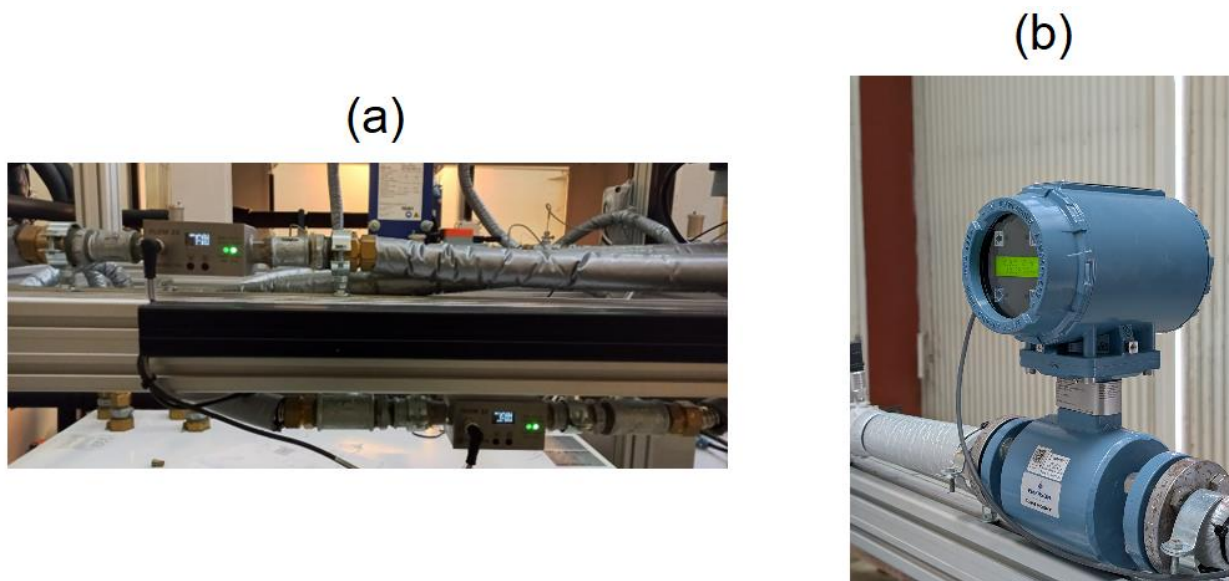


Figura 5. Misuratori di portata elettromagnetici: (a) modelli Flow 38 della COMAC CAL; (b) misuratore Rosemount 8705.

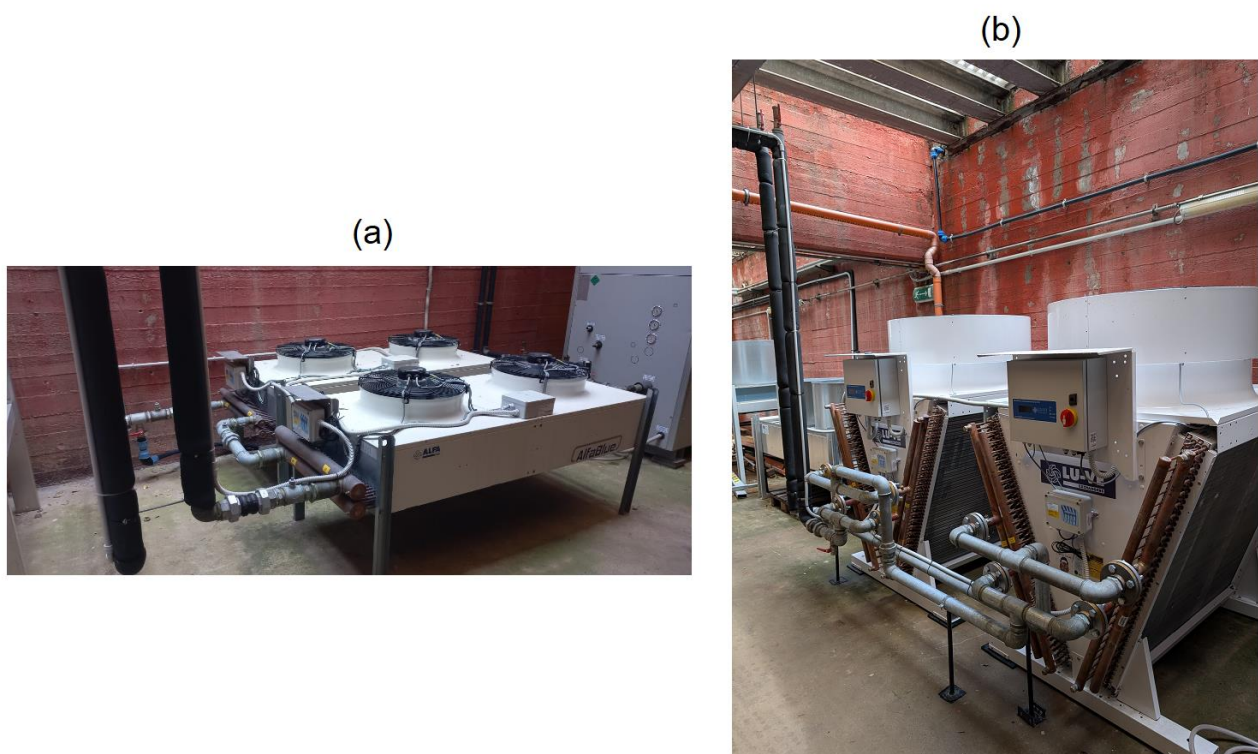


Figura 6. Scambiatori di calore aria-acqua (dry cooler) : (a) mod. alfablue junior; (b) mod. XDHL1F-1115 L.

riportate perché già presenti nel report relativo alla linea di attività 5.2.

### 7.3 Simulazione sperimentale di una strategia di flessibilità energetica

In questo paragrafo sono mostrati i risultati sperimentali di uno dei casi considerati per simulare sperimentalmente le strategie di flessibilità energetica sviluppate e implementate mediante simulazione numerica nel corso della LA 5.2. In particolare, i risultati mostrati in questo capitolo fanno riferimento al caso che vede l'impiego di un accumulo termico durante

la stagione invernale, che è possibile implementare nell'ambito di un programma di demand response tra consumatori e operatore di rete.

In questo caso sono state effettuate due simulazioni sperimentali: la prima relativa a utenze residenziali servite da pompe di calore collegate a una rete termica a bassa temperatura, quindi condensate ad acqua, senza accumulo termico; la seconda in cui in vengono simulate sperimentalmente le stesse utenze ma considerando un accumulo termico collegato ad ognuna delle pompe di calore. Per ognuna delle due simulazioni sperimentali, sono stati simulati più giorni in modo da raggiungere condizioni periodiche. Per evitare inutili ripetizioni, nel seguito sono mostrati i risultati relativi al funzionamento di solamente una delle pompe di calore user della rete termica a bassa temperatura, e i risultati mostrati si riferiscono alle condizioni periodiche, che vengono raggiunte già dopo al secondo giorno.

Gli andamenti dei carichi termici per una singola utenza nei casi senza e con accumulo termico implementati sperimentalmente sono stati derivati a partire da quelli calcolati nella LA 5.2, e in particolare da quelli mostrati nella Figura 11 del relativo report. Tuttavia, sono stati utilizzati diversi carichi di picco, ovvero  $11.5 \text{ kWh}_t$  (su base oraria) nel caso senza accumulo, e  $12.5 \text{ kWh}_t$  nel caso con accumulo, mantenendo le medesime proporzioni rispetto al caso simulato, e in modo da avere dei periodi di accensione dei compressori delle PDC user più lunghi e meglio apprezzabili graficamente. La Figura 7 e la Figura 8 mostrano rispettivamente l'andamento orario del carico termico giornaliero, normalizzato rispetto al carico di picco con accumulo termico, nei casi senza e con accumulo termico. Si può notare che, rispetto al carico termico senza accumulo, nel caso con accumulo si ha un carico più basso dall'ora 15 alla 21, che corrisponde all'intervallo di flessibilità implementato nella LA 5.2. Infatti, in tale intervallo la produzione termica viene integrata sfruttando l'energia termica accumulata nelle prime ore del giorno. Le perdite termiche relative all'accumulo sono state trascurate, anche in virtù delle basse temperature in gioco, per cui la somma dei carichi orari nei due casi produce lo stesso risultato. Per quanto riguarda la simulazione sperimentale dei carichi termici, la Figura 9 mostra uno schema semplificato dei collegamenti idraulici al recuperatore e al dry cooler nella configurazione invernale. Considerando quanto emerso nel corso della linea di attività LA 5.1, dove si è constatato 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, 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 user una volta raggiunto il carico termico in termini di energia termica trasferita all'utenza, su base oraria. Pur senza modulazione della potenza, questo approccio permette comunque di simulare in maniera abbastanza realistica il funzionamento di un controller domestico per pompe di calore.

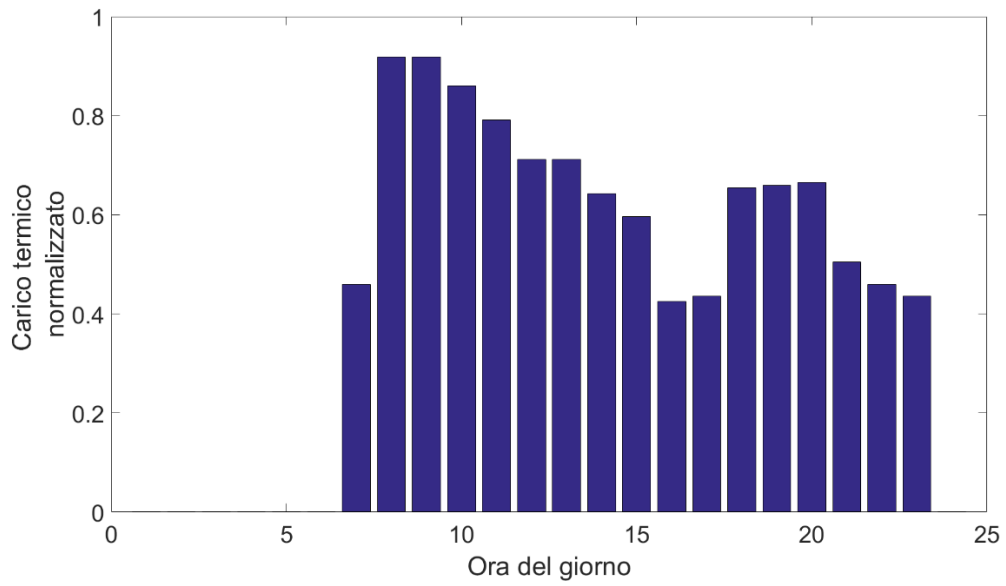


Figura 7. Carico termico normalizzato senza accumulo termico.

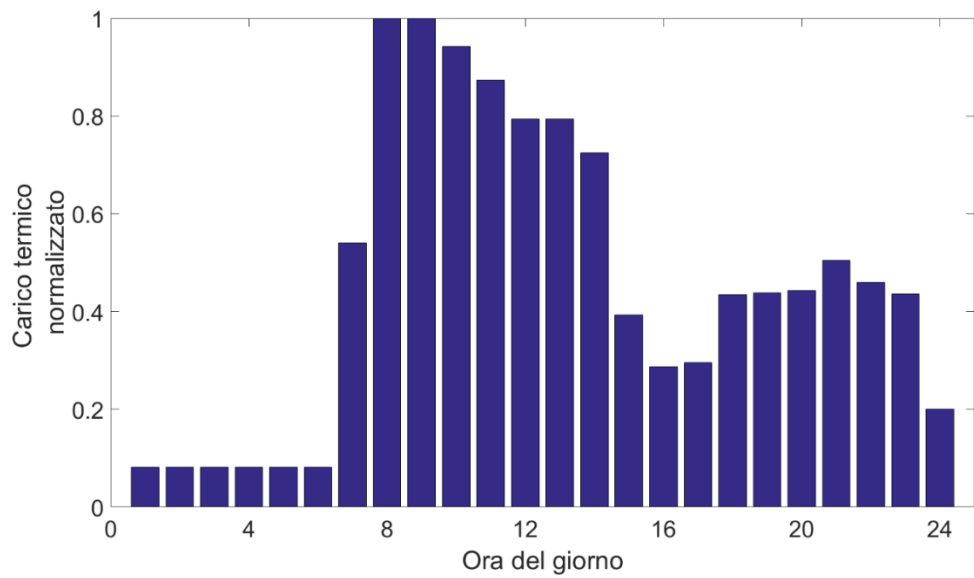


Figura 8. Carico termico normalizzato con accumulo termico.

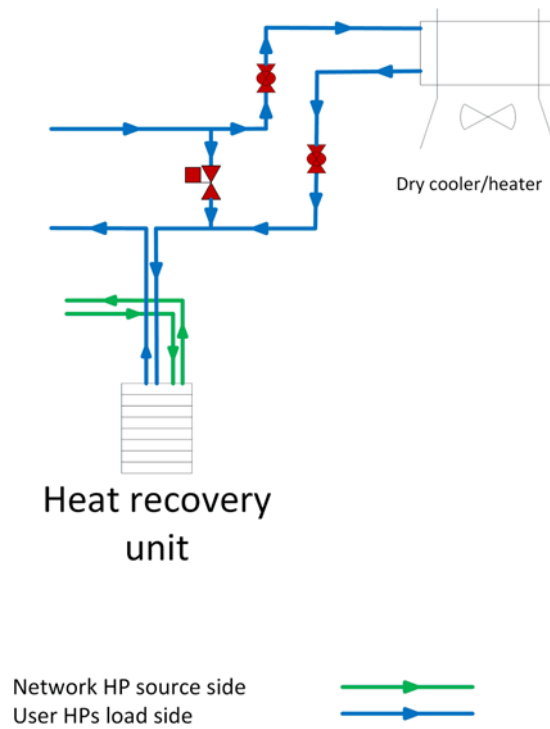


Figura 9. Dettaglio collegamento tra dry cooler e recuperatore nel funzionamento invernale.



Figura 10. By-pass nel caso di impianto in modalità invernale.

Relativamente alle impostazioni delle pompe di calore nelle simulazioni sperimentali, i set-point delle temperature e delle portate utilizzati sono quelli risultanti dalla caratterizzazione

dei carichi termici simulabili effettuata nell'ambito della LA 5.1, e descritti nel relativo report. In particolare, per le PDC user, il set-point della temperatura di mandata sulle macchine è stato fissato a 45°C, anche se poi il controllo effettivo della temperatura di mandata è stato effettuato con un controllore PID alla valvola di bypass, con set-point effettivo posto a 37,5°C, mentre le portate ai circuiti utenze e a quelli sorgente sono state controllate tramite PID con set-point pari rispettivamente a 1 m<sup>3</sup>/h e 0.9 m<sup>3</sup>/h. Riguardo alla PDC network, la temperatura di set-point è stata fissata a 25°C durante le ore diurne e a 15°C durante le ore notturne, al fine di valutare l'incidenza della temperatura di rete sul funzionamento delle PDC user. Il set-point la portata utenza è stato fissato a 20 m<sup>3</sup>/h, divisa equamente in due tra i due rami della rete termica tramite 2 valvole controllate con PID, mentre il set-point della portata lato sorgente è stato fissato a 15 m<sup>3</sup>/h.

### 7.3.1 Caso senza accumulo

In questa sezione sono riportate le temperature e le portate misurate nei circuiti di una delle PDC user, e nei circuiti della PDC network, nel caso in cui i carichi sono quelli di Figura 7 e la Figura 8. Sono anche mostrate le potenze termiche scambiate ai condensatori e agli evaporatori delle pompe di calore, calcolate utilizzando le portate misurate, i delta di temperatura misurati tra ingressi e uscite, e valutando i calori specifici dell'acqua alle temperature medie tra ingressi e uscite. Come già anticipato precedentemente, Le PDC lavorano praticamente a punto fisso, seguendo le impostazioni del loro controller integrato. All'inizio di ogni ora, se il relativo carico orario è diverso da zero, i compressori delle PDC user si attivano e lavorano fino a che non viene soddisfatto il carico energetico orario, dopodiché i compressori e le pompe di circolazione dei circuiti sorgenti si spengono. Relativamente alla PDC network, il cui compito è simulare la rete termica a bassa temperatura, cui viene ceduta l'energia refrigerante prodotta agli evaporatori delle PDC user, questa funziona secondo le normali impostazioni del suo controller integrato, ad eccezione del fatto che entrambe le pompe di circolazione dell'acqua (circuiti utenze e sorgente) sono mantenute sempre in funzione per evitare problemi all'inizio di ogni ora.

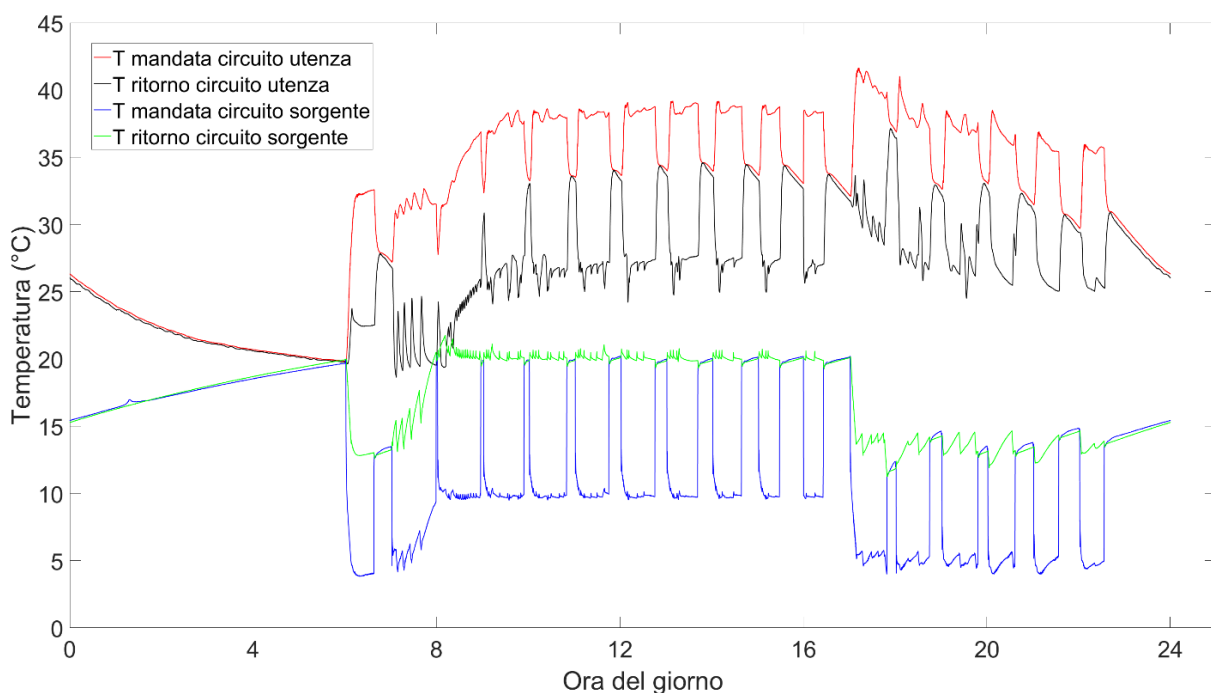


Figura 11. Temperature caratteristiche della PDC user.

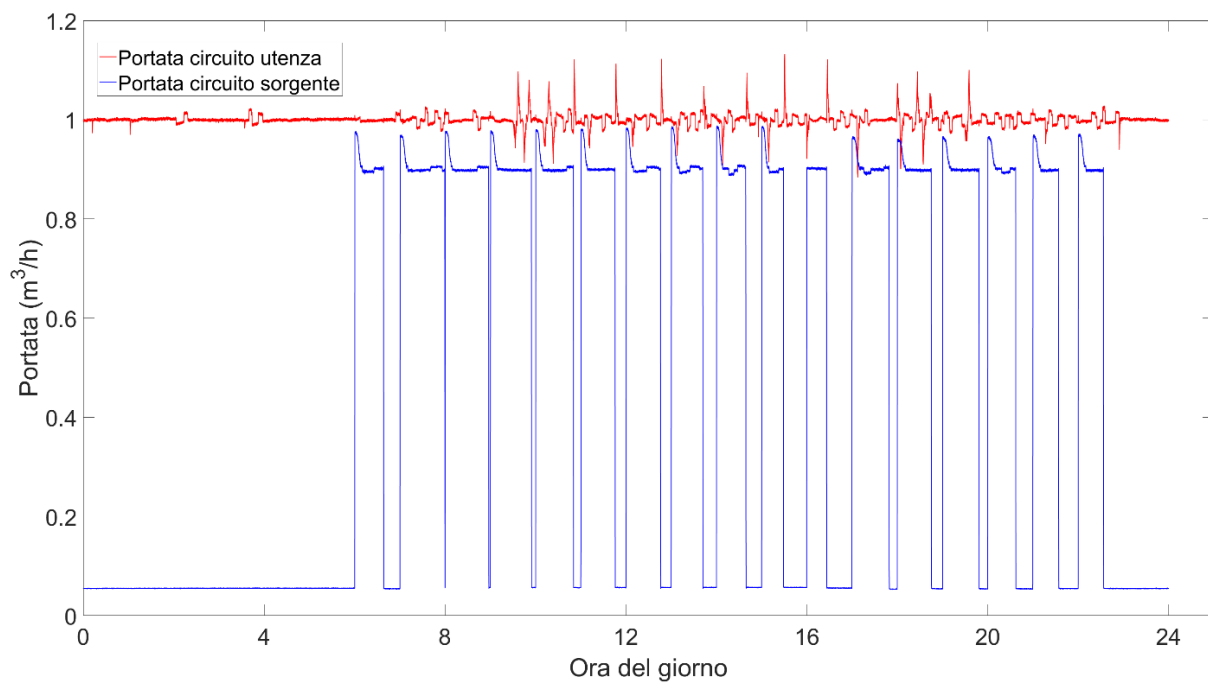


Figura 12. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC user.

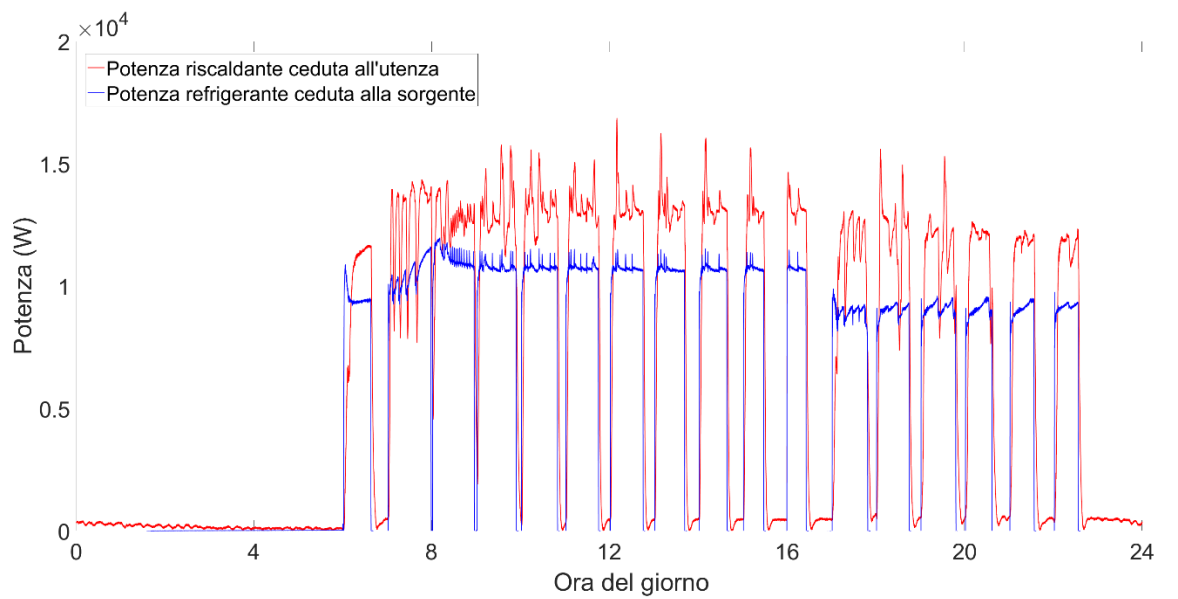


Figura 13. Potenze scambiate al condensatore e all'evaporatore della PDC user.

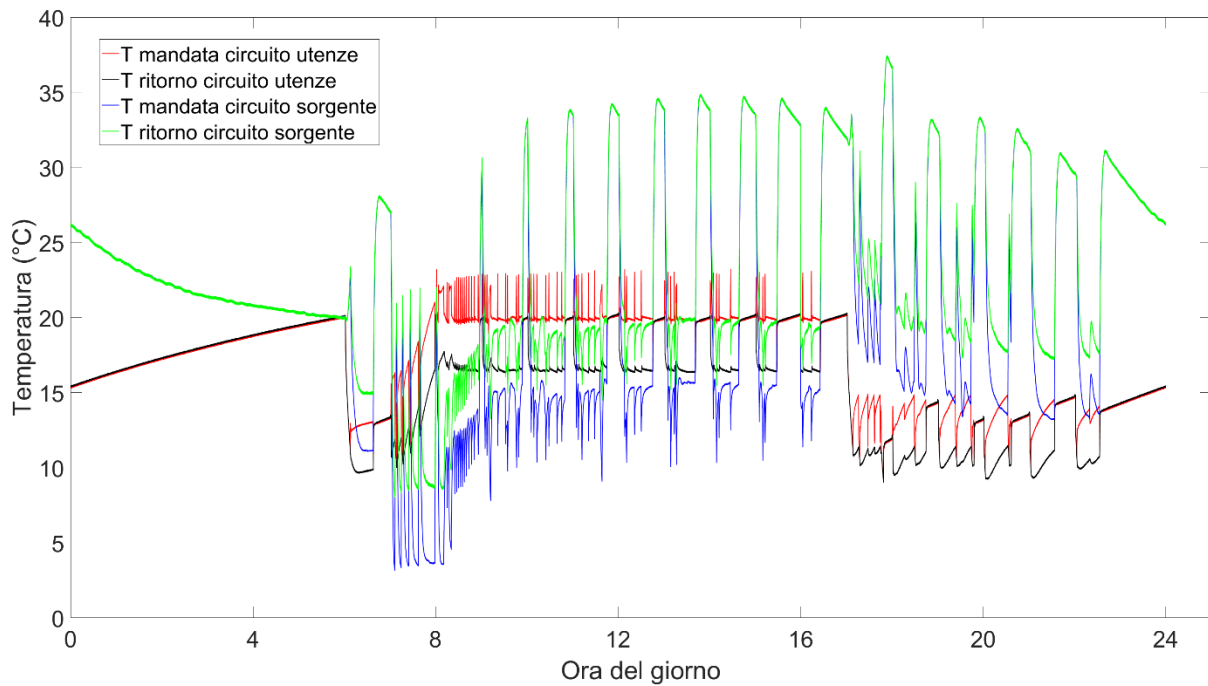


Figura 14. Temperature caratteristiche della PDC network.

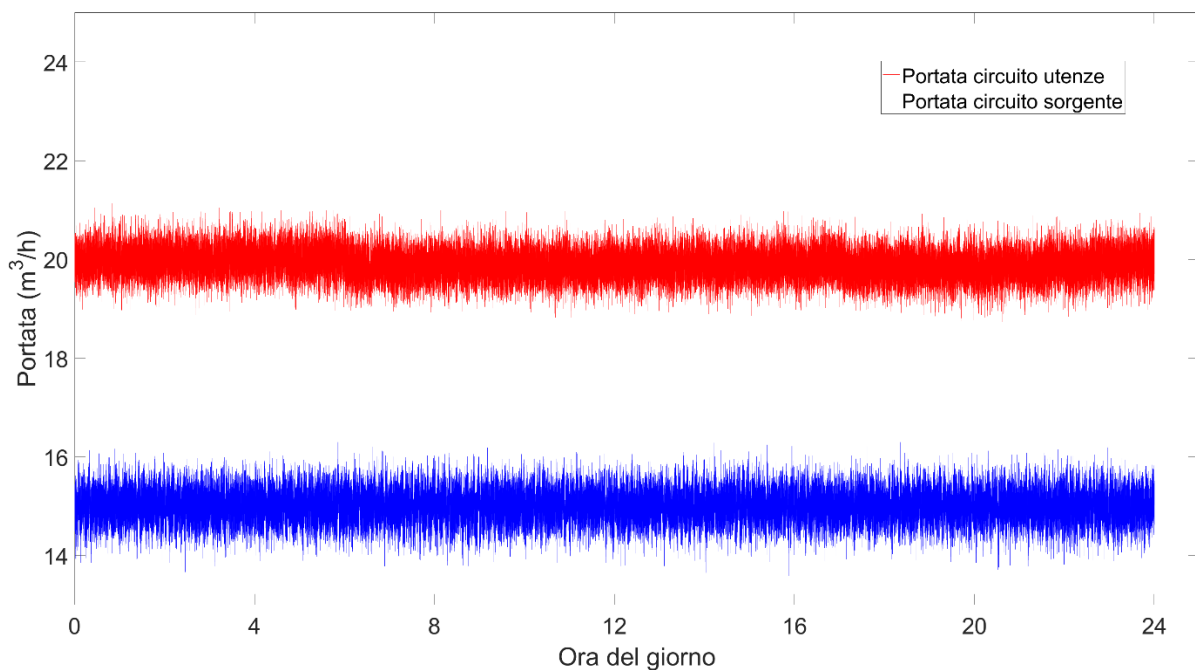


Figura 15. Portate circuiti utenze e sorgente della PDC network.

### 7.3.2 Caso con accumulo

In questa sezione sono riportate le temperature e le portate misurate nei circuiti di una delle PDC user, e nei circuiti della PDC network, nel caso in cui i carichi sono quelli di Figura 8. Invero, nell'impianto non sono fisicamente presenti i serbatoi di accumulo termico, ma questi vengono simulati sperimentalmente attraverso una variazione del carico delle utenze. Le impostazioni delle macchine sono del tutto analoghe a quelle presentate nel caso senza accumulo.

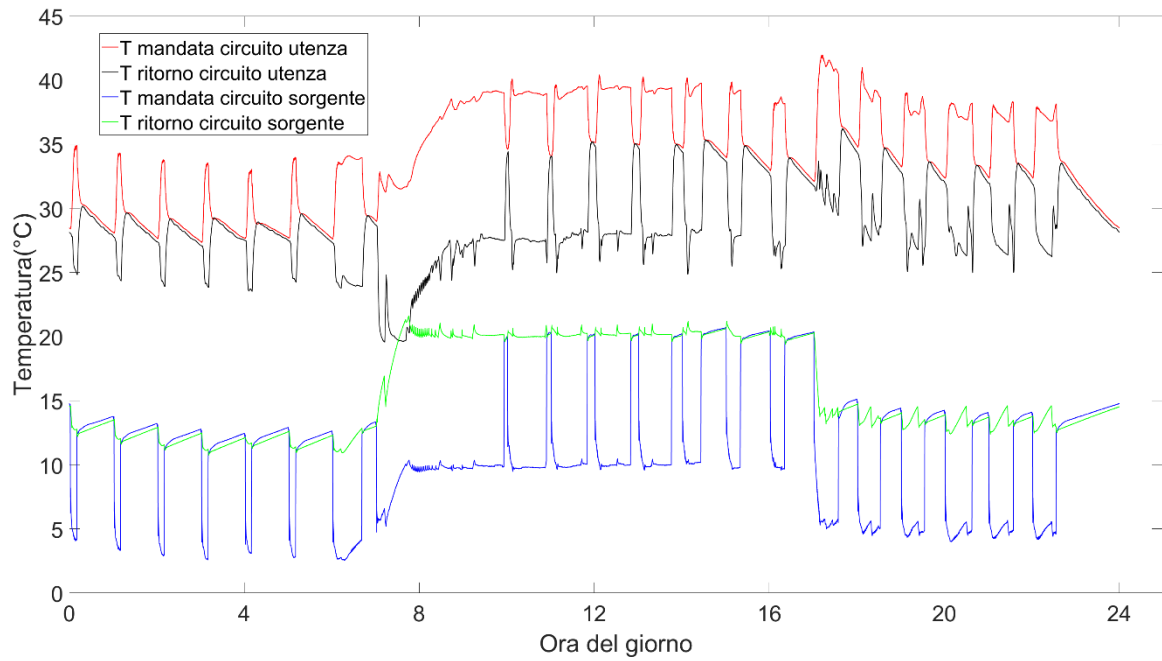


Figura 16. Temperature caratteristiche della PDC user.

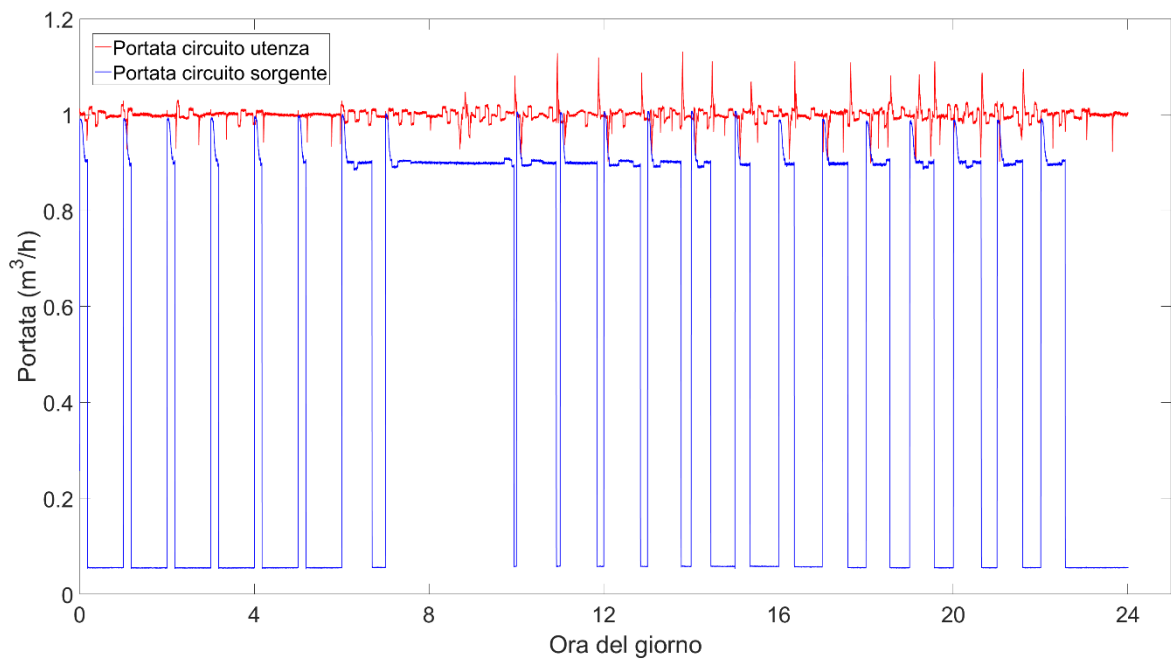


Figura 17. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC user.

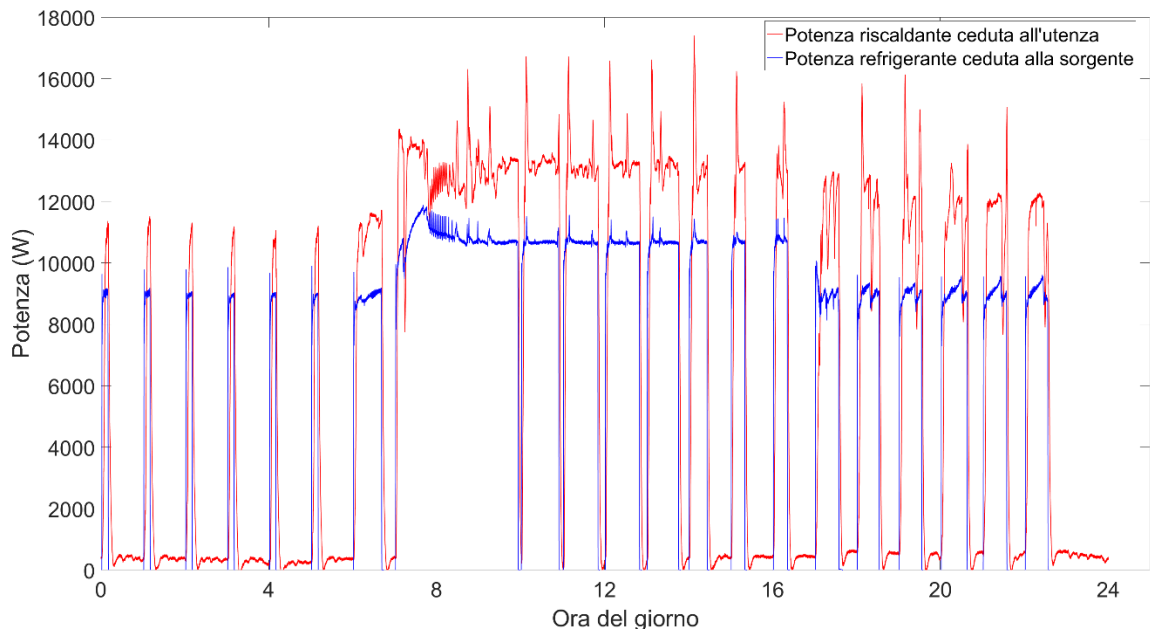


Figura 18. Potenze scambiate al condensatore e all'evaporatore della PDC user.

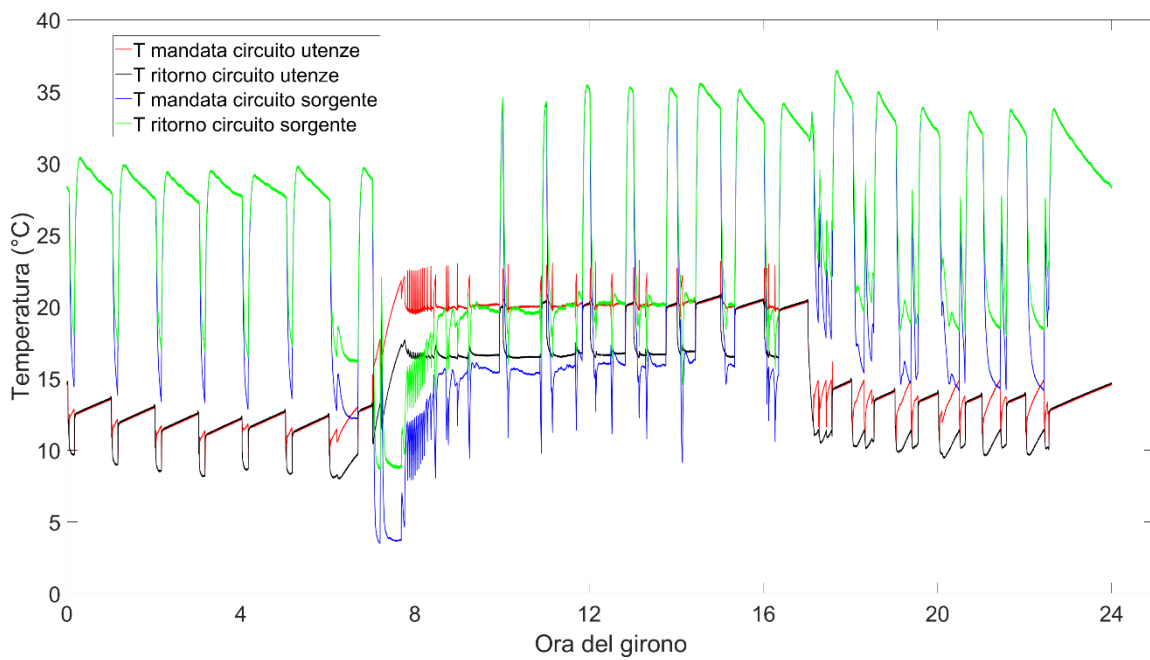


Figura 19. Temperature caratteristiche della PDC network.

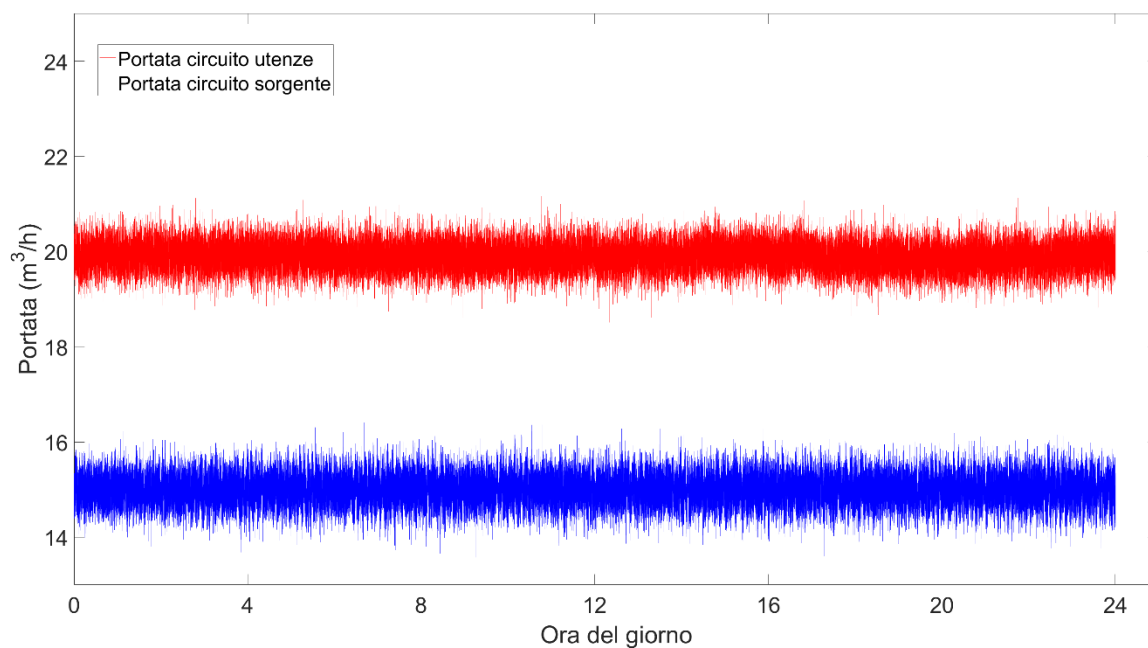


Figura 20. Portate circuiti utenza e sorgente della PDC network.

### 7.3.3 Risultati a confronto

La Figura 21 e la Figura 22 mostrano rispettivamente la potenza elettrica assorbita e l'energia elettrica consumata su base oraria dalla PDC user nel caso senza accumulo, nel corso della giornata simulata. La misura della potenza elettrica assorbita è stata effettuata con il misuratore SENE A S604 Power Meter, posto immediatamente a valle dell'interruttore della pompa di calore. Pertanto, le misure includono anche i consumi di tutti i componenti elettrici, compresi gli attuatori elettrici e i sensori, dei circuiti collegati alla pompa di calore. Mentre la Figura 23 e la Figura 24 mostrano rispettivamente la potenza elettrica assorbita e l'energia elettrica consumata su base oraria nel caso con accumulo. Come era prevedibile, si può notare che nell'intervallo di flessibilità, che va dall'ora 15 all'ora 21, il carico elettrico nel caso con accumulo è sensibilmente più basso rispetto al caso senza accumulo. Infine, la Figura 25 e la Figura 26 mostrano rispettivamente l'energia termica prodotta dalla PDC user su base oraria senza e con accumulo, mentre la Figura 27 e la Figura 28 mostrano rispettivamente i COP orari con e senza accumulo, calcolati come rapporto tra l'energia termica prodotta dalla PDC user nei due casi, riportate nella Figura 25 e nella Figura 26, e quelle elettriche riportate nella Figura 23 e nella Figura 24. Chiaramente, i COP sono stati calcolati soltanto nelle ore in cui la PDC user è attiva, e non tengono conto delle perdite termiche nei circuiti, che tuttavia possiamo ritenere di entità molto ridotta date le basse temperature. Possiamo notare che nel caso con accumulo il COP nelle prime ore del giorno è più basso rispetto al resto della giornata. Questo è dovuto al fatto che è stato fissato un set-point più basso alla temperatura di rete durante le ore notturne, per tener conto, in un certo modo, delle più basse temperature ambiente durante la notte. Pertanto, nel caso con accumulo abbiamo un COP medio giornaliero di 4.32, più basso rispetto al caso senza accumulo, che è 4.76. Ciò si riflette in un maggior consumo giornaliero di energia elettrica nel caso con accumulo, che è pari a 33,26 kWh, contro i 31,95 kWh nel caso senza accumulo, ovvero il 4,1% in più. L'opposto succede nel caso estivo con l'accumulo di energia refrigerante, poiché la produzione di energia refrigerante è più efficiente durante le ore notturne. Tornando al caso invernale, chiaramente, per la soluzione impiantistica con

accumulo termico, oltre ai costi di investimento relativi all'installazione di un sistema di accumulo termico, bisogna anche tenere conto dei maggiori consumi elettrici conseguenti alla erogazione di un servizio di flessibilità da parte dei consumatori, al fine di stabilire i parametri e gli incentivi negli accordi di demand response tra le utility di rete e i consumatori.

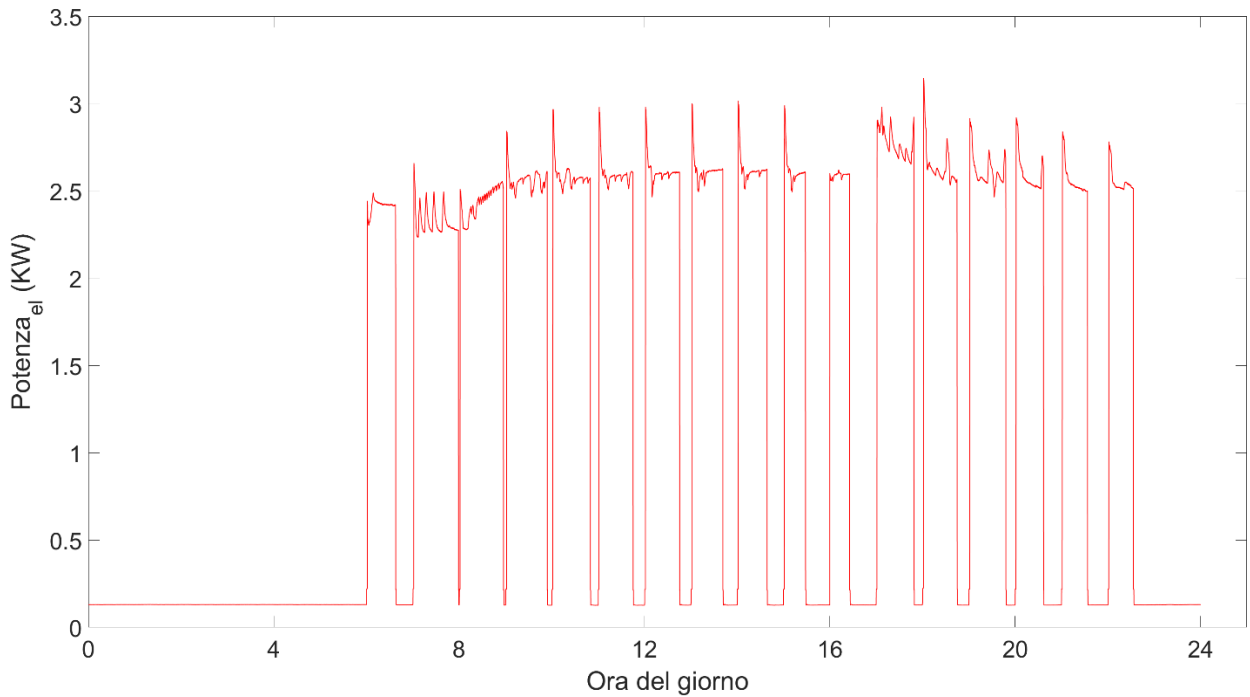


Figura 21. Potenza elettrica assorbita dalla PDC user nel caso senza accumulo.

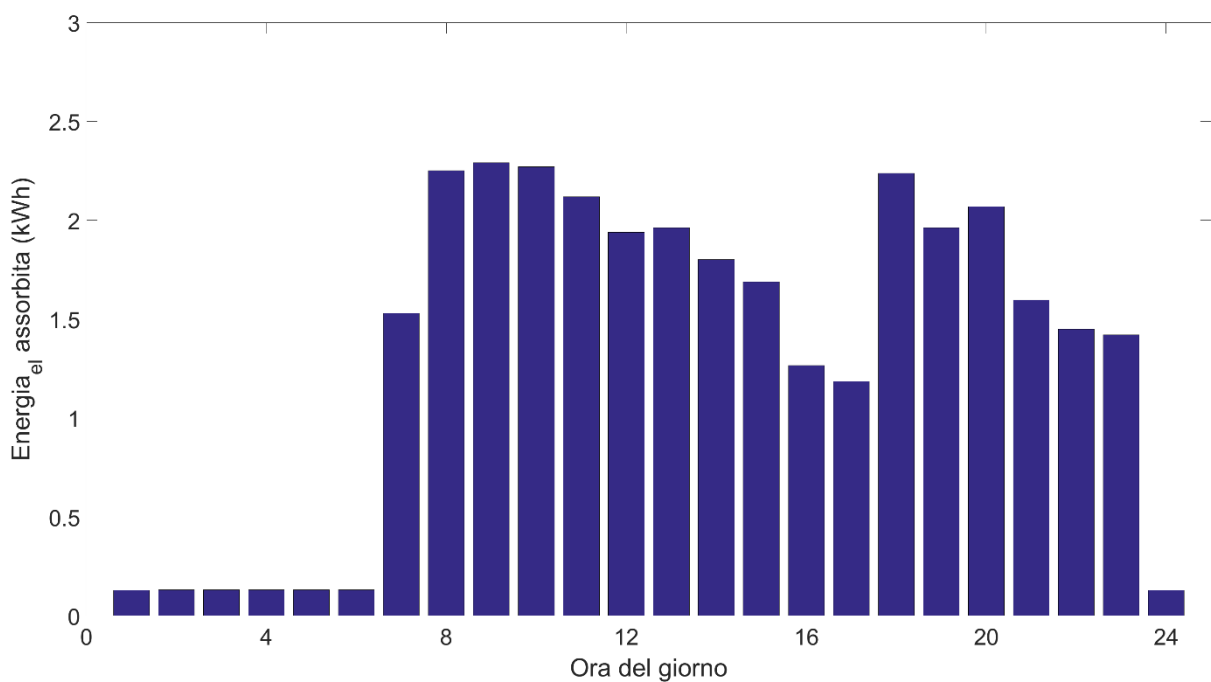


Figura 22. Energia elettrica impiegata dalla PDC user nel caso senza accumulo.

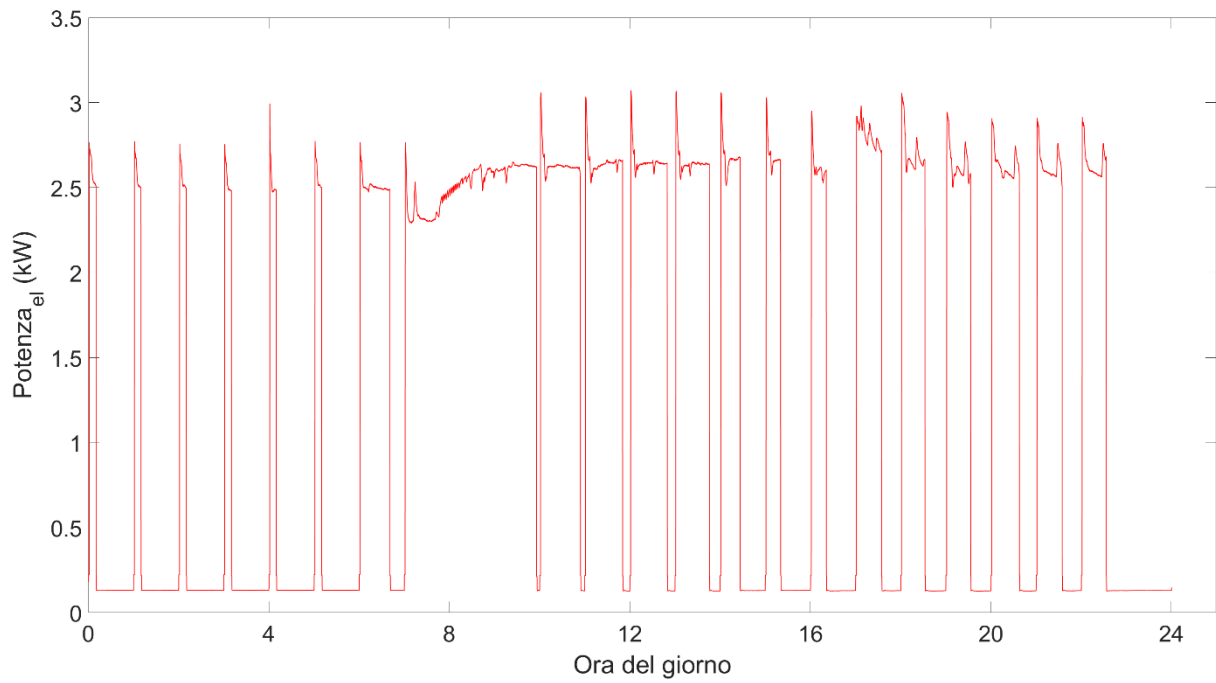


Figura 23. Potenza elettrica assorbita dalla PDC user nel caso con accumulo.

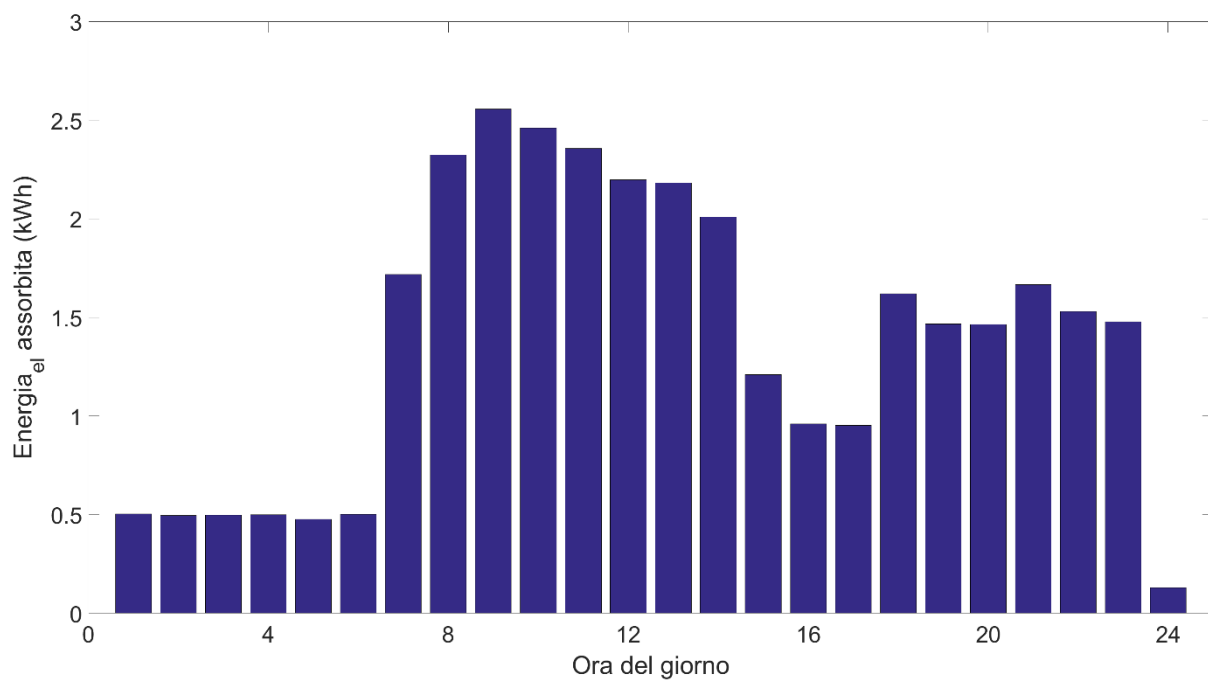


Figura 24. Energia elettrica impiegata dalla PDC user nel caso con accumulo accumulato.

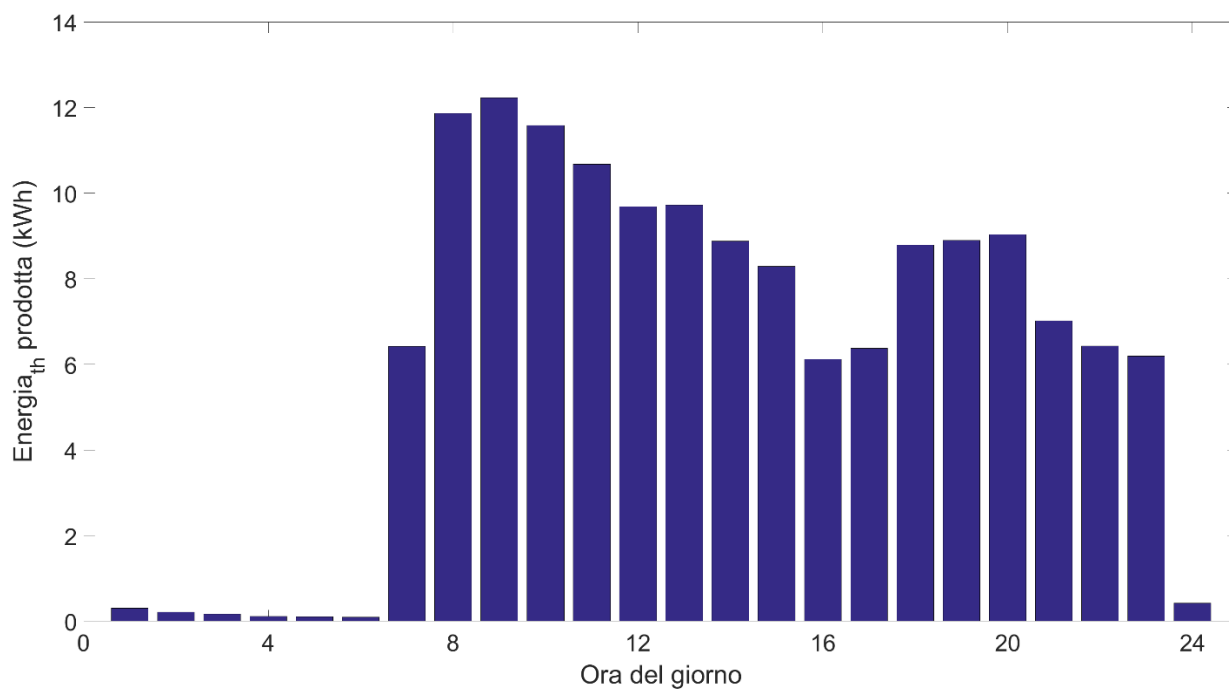


Figura 25. Energia termica prodotta dalla PDC user (scambiata al condensatore) su base oraria nel caso senza accumulo.

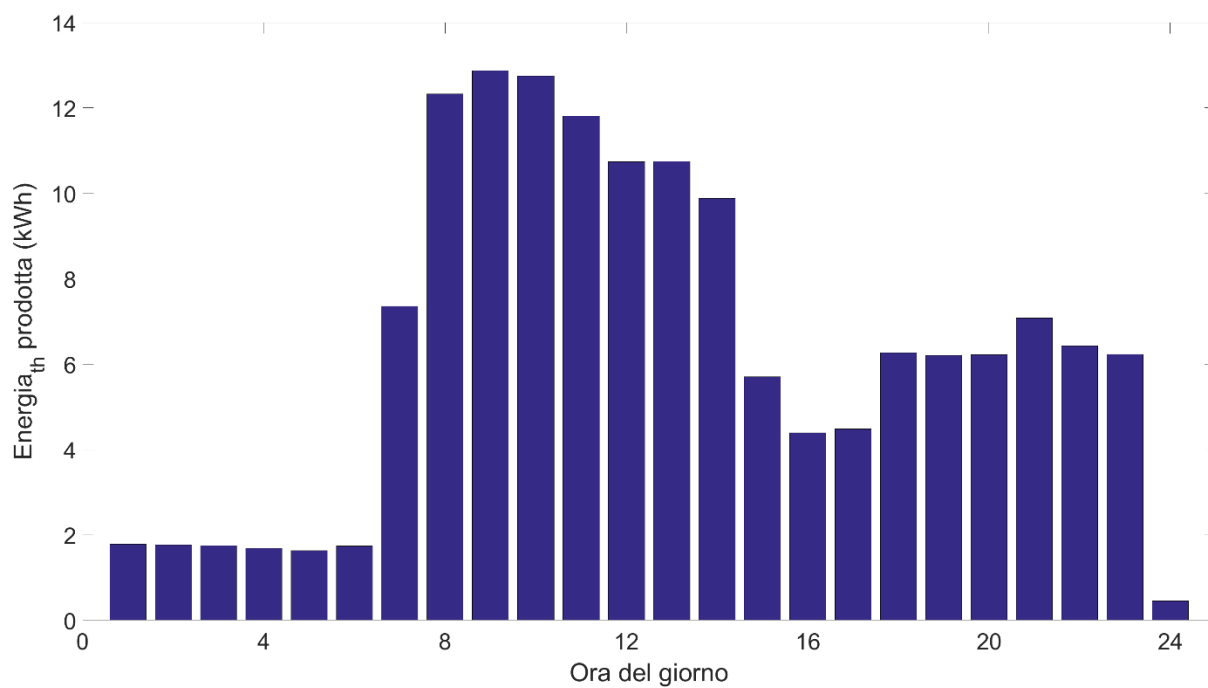


Figura 26. Energia termica prodotta PDC user (scambiata al condensatore) su base oraria nel caso con accumulo.

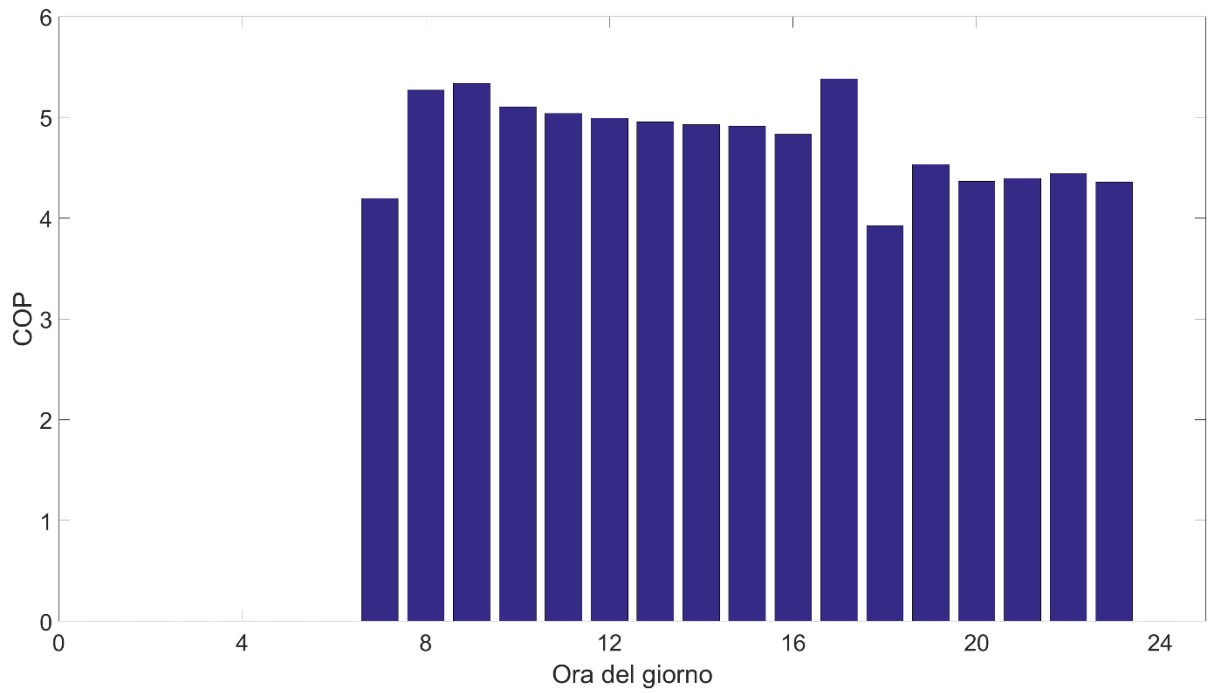


Figura 27. COP orario nel caso senza accumulo.

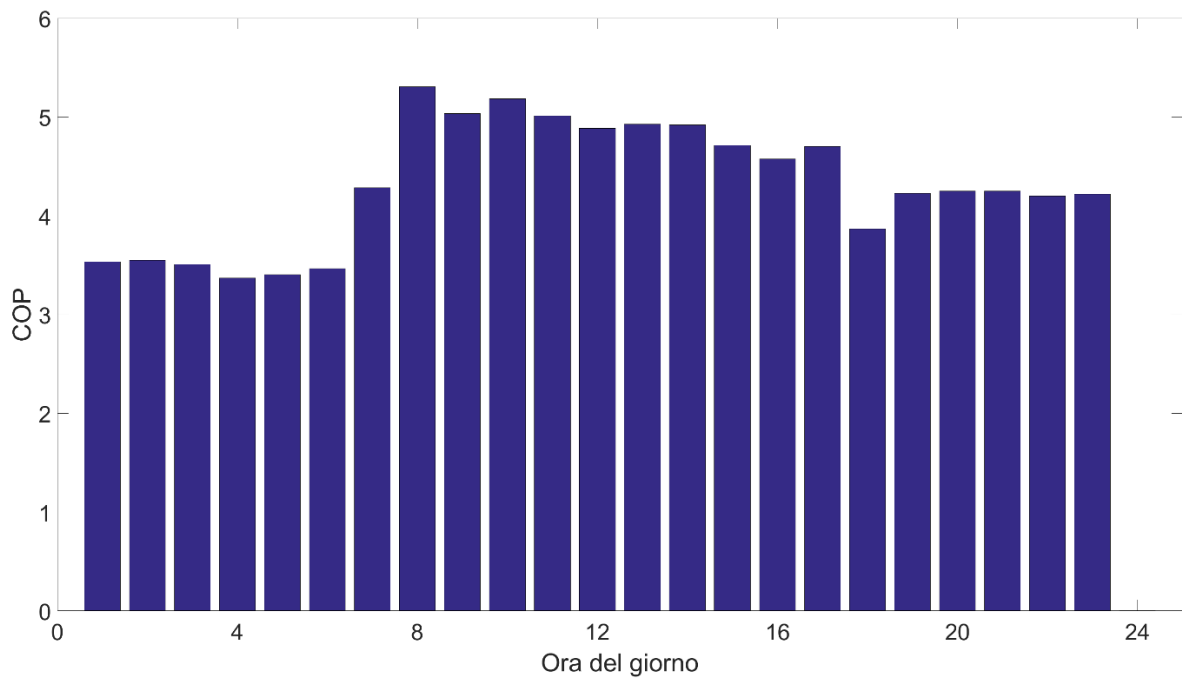


Figura 28. COP orario nel caso con accumulo.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze

## 9 Pubblicazioni scientifiche

- Bianco, N.; Di Somma, M.; Graditi, G.; and Mongibello, L. Experimental Validation of a Tool for the Economic Operation Optimization of a Hybrid Energy System, *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 11(12):3251–3258 (2024)
- Bianco, N.; Di Somma, M.; Graditi, G.; and Mongibello, L. Optimal design of thermal storage in hybrid energy systems: application to a laboratory-scale case study with experimental validation, 2025 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2940 012020

## 10 Eventi di disseminazione

- Le attività e gli impianti realizzati nell'ambito del PTR 22-24 relativamente allo studio delle reti termiche a bassa temperatura sono state presentati al pubblico in occasione della Notte Europea dei Ricercatori e delle Ricercatrici 2024, presso il C.R. ENEA Portici.
- La rete termica a bassa temperatura di ENEA Portici è stata presentata in occasione dell'evento "Presentazione Banca Dati Matrics - MANAGEMENT del PATRIMONIO INTELLETTUALE e delle COMPETENZE SPECIALISTICHE" organizzato dall'ENEA, e inserita nella banca dati, come si può evincere dalla figura seguente

The screenshot shows the ENEA MATRICS web application. The header includes the ENEA logo and 'MATRICS' text. The user is logged in as 'MONGIBELLO LUIGI (TUTENTE)'. The page title is 'MATRICS - MANAGEMENT del PATRIMONIO INTELLETTUALE e delle COMPETENZE SPECIALISTICHE ENEA - ELENCO SCHEDE'. Below the header, there are search filters and a table of records. The table has columns for 'Stato Scheda', 'Proprietario/Resp. Scientifico', 'Data Ric.', 'Data Im.', 'Data App.', 'Offerta Tecnologica', and 'Titolo Scheda'. The first record is visible with the date '12-12-2024' and the title 'IMPIANTI+INFRASTRUTTURE'. The footer contains contact information and an accessibility link.

- Il lavoro dal titolo "Experimental Validation of a Tool for the Economic Operation Optimization of a Hybrid Energy System", con autori Nicola Bianco, Marialaura Di Somma, Giorgio Graditi, e Luigi Mongibello, è stato presentato alla conferenza "The 9th AIGE/IIETA International Conference and the 19th AIGE 2024 Conference", tenutasi a Caserta dal 3 al 5 Giugno 2024.
- Il lavoro dal titolo "Optimal design of thermal storage in hybrid energy systems: application to a laboratory-scale case study with experimental validation", con autori Nicola Bianco, Marialaura Di Somma, Giorgio Graditi, e Luigi Mongibello, è stato presentato alla conferenza "41st UIT International Heat Transfer Conference", tenutasi a Napoli dal 19 al 21 Giugno 2024.