



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali “all-electric” nel settore residenziale: analisi delle prestazioni in casi studio

G. Cavazzini, A. Benato, G. Pavesi, G. Ardizzon, A. Stoppatò



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali "all-electric" nel settore residenziale: analisi delle prestazioni in casi studio

G. Cavazzini, A. Benato, G. Pavesi, G. Ardizzon, A. Stoppato (Università Degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Con il contributo di: Gallio Ennio (Università degli Studi di Padova)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità
Obiettivo: N. 1 - *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

Work package 3: *Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici*

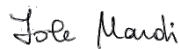
Linea di attività 3.27: *Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali "all-electric" nel settore residenziale: analisi dei dati*

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi - ENEA

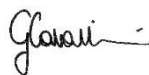
Responsabile del Work package: Ing. Biagio Di Pietra - ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali "all-electric" nel settore residenziale"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Iole Nardi



Responsabile scientifico UNIPD: Prof.ssa Giovanna Cavazzini



Si ringrazia per la collaborazione ed il supporto nell'identificazione dei casi studio l'ing. S. Faganello (Exrg), il Presidente Provinciale di ANACI (dott. Michele Ischia), AGSM Verona s.p.a. (ing. Marco Giusti), Alperia Bartucci s.p.a. (ing. Serena Bari)

Indice

1 Sommario

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 CASO STUDIO 1	8
2.1 PRESTAZIONI DI TARGA DELL'AGGREGATO COMPATTO COMPACT P	12
2.2 ANDAMENTO ANNUALE DEI CONSUMI	13
2.3 SVILUPPO DEL MODELLO DI SIMULAZIONE PER L'ANALISI DELLE PRESTAZIONI	15
2.3.1 <i>Il recuperatore passivo</i>	19
2.4 PRESTAZIONI REALI E NOMINALI DELL'UNITÀ DI RISCALDAMENTO	21
2.4.1 <i>Prestazioni in fase di riscaldamento</i>	21
2.4.2 <i>Prestazioni in fase di raffrescamento</i>	25
2.5 CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI CON E SENZA SCAMBIATORE GEOTERMICO	28
2.5.1 <i>Curve di funzionamento utilizzate per simulare le prestazioni</i>	29
2.5.2 <i>Confronto tra prestazioni e consumi in presenza ed in assenza dello scambiatore geotermico</i>	29
2.6 CONFRONTO ECONOMICO CON UNA SOLUZIONE TRADIZIONALE	34
3 CASO STUDIO 2	37
3.1 STRUTTURA DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO E RELATIVO SISTEMA DI MONITORAGGIO	38
3.2 DAL DESIGN OF EXPERIMENT ALLA MISURA IN CAMPO.....	42
3.2.1 <i>Cronistoria della fase di collaudo del sistema di monitoraggio</i>	42
3.3 ANALISI DELLE PRESTAZIONI NELLA STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO.....	44
3.3.1 <i>Periodo 1 - 24 luglio</i>	44
3.3.2 <i>Periodo 5 agosto – 20 ottobre</i>	49
3.4 ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN FASE DI RISCALDAMENTO	55
3.4.1 <i>Struttura della centrale termica e logica di controllo della valvola a tre vie dell'impianto</i>	55
3.4.2 <i>Operatività delle caldaie e potenze in gioco nel circuito primario</i>	57
3.4.3 <i>Risultati mensili</i>	60
3.4.4 <i>Prestazioni delle pompe di calore in condizioni di riscaldamento</i>	62
4 CONCLUSIONI	65
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	69

Sommario

Ai settori residenziale e terziario è imputabile il principale aggregato dei consumi settoriali, pari al 42% dei consumi totali, di cui gran parte dovuti alle necessità di climatizzazione degli edifici. Una soluzione per ridurre questi consumi è sicuramente rappresentata dai sistemi di climatizzazione a pompa di calore elettrica (PdC) che garantiscono notevoli vantaggi rispetto ai sistemi tradizionali ma risultano essere caratterizzati da una modesta capacità di penetrazione a causa principalmente della mancanza di dati prestazioni in condizioni operative reali. In tale contesto assume un ruolo di primaria importanza la presenza di sistemi di monitoraggio adeguati in grado non solo di valutare le prestazioni dell'impianto, ma anche ai fini diagnostici per evidenziare anomalie di funzionamento e necessità di manutenzione.

In questa seconda annualità si sono elaborati i dati acquisiti dai sistemi di monitoraggio presenti o installati nei due casi studi, identificati durante la prima annualità:

1. una villetta monofamiliare, con caratteristiche di casa passiva, dotata di impianto compatto a pompa di calore integrato con scambiatore geotermico e già dotata di adeguato sistema di monitoraggio.
2. Due condomini da circa 60 unità abitative, perfettamente speculari ma dotati di impiantistica differente: il primo è dotato di pompe di calore per il riscaldamento/raffrescamento con caldaia a gas naturale a supporto per condizioni climatiche particolarmente rigide; il secondo con caldaia a gas naturale per il riscaldamento (identica a quella del primo condominio) e gruppi ad assorbimento per il raffrescamento. Per questi due condomini, il sistema di monitoraggio è stato progettato ed installato durante la prima annualità.

I due casi studio, sebbene diversi per caratteristiche (villetta vs. condominio) e per tipologia di impianto e sua gestione, hanno consentito di trarre conclusioni estremamente interessanti.

Nel primo caso studio, la presenza di un monitoraggio adeguato e la facile interazione con il proprietario dell'abitazione e gli ingegneri progettisti hanno consentito di effettuare una modellazione dettagliata dell'impianto ed un'analisi approfondita delle prestazioni della pompa di calore in condizioni operative reali, definendo e valutando adeguati indici di prestazione e offrendo anche l'opportunità di valutazioni tecniche (rilevanza della presenza di uno scambiatore geotermico e sua influenza sulle prestazioni) nonché economiche (convenienza rispetto ad impianti con caldaia a condensazione e condizionatore tradizionale).

Nel secondo caso studio, l'unicità era rappresentata dalla possibilità di confrontare tra loro una tecnologia a pompa di calore e una tradizionale con caldaia a gas in condizioni operative reali esattamente analoghe. Il contesto diverso di questo secondo caso studio rispetto al primo ha portato alla luce problematiche di varia natura. In primo luogo, la fase di collaudo e taratura del sistema di monitoraggio e di acquisizione si è rivelata più lunga e complicata del previsto per una serie di fermi tecnici dovuti a guasti inattesi, di lacune strumentali (non precedentemente note) e di complessità di intervento in un contesto condominiale. Inoltre, sono emerse anche barriere di tipo sociale che hanno portato al fermo della tecnologia a pompa di calore a partire dal mese di Ottobre 2021 per il disturbo (vibrazioni e rumore), arrecato dalla ventilazione delle pompe di calore.

Nonostante queste difficoltà, sono emersi comunque i vantaggi e le peculiarità legate alla presenza del sistema di monitoraggio. In primo luogo, si è potuto, anche in questo caso, andare a definire e valutare opportuni indici prestazionali di tutte le tecnologie presenti, riuscendo a effettuare confronti tecnico-economici tra i due condomini. Tali indici hanno anche consentito di effettuare considerazioni sulla validità delle logiche di controllo in atto nelle varie situazioni.

In secondo luogo, si è dimostrata la valenza a fini diagnostici del monitoraggio, che ha consentito di rilevare in tempo reale prima l'insorgere ed il confermarsi di un malfunzionamento di sistema grazie allo scostamento dei parametri di monitoraggio dai valori di normale operatività dello stesso.

1 Introduzione

Il mercato delle pompe di calore ha evidenziato una crescita negli ultimi anni piuttosto evidente che è riassunto nella Figura 1-1.

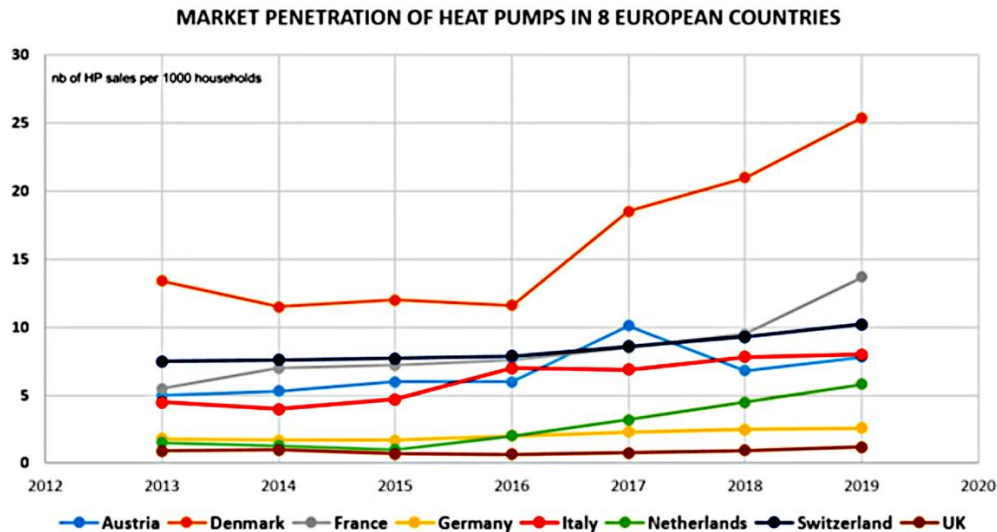


Figura 1-1 Andamento vendite pompe di calore ogni 1000 famiglie per 8 Paesi europei (Fonte [1] e [2])

Ciò nonostante, la capacità di penetrazione di tale tecnologia è ancora al di sotto delle sue potenzialità, come emerge chiaramente da un'elaborazione di Amici della Terra, su dati ISTAT 2011, per il contesto italiano (Figura 1-2).

Abitazioni occupate da residenti per impianto principale di riscaldamento						
	Centralizzato	Autonomo		Centralizzato	Autonomo	
Gas naturale	3.111.861	13.657.742	16.769.604	13,2%	57,9%	71,1%
Gasolio	430.759	466.900	897.659	1,8%	2,0%	3,8%
GPL	92.836	907.537	1.000.373	0,4%	3,8%	4,2%
Biomasse	25.994	3.403.615	3.429.609	0,1%	14,4%	14,5%
Pompa di calore	51.988	629.419	681.408	0,2%	2,7%	2,9%
Rete TLR	795.000		795.000	3,4%	0,0%	3,4%
	4.508.438	19.065.214	23.573.652	19,1%	80,9%	100,0%

Fonte elaborazioni Amici della Terra su dati Istat

Figura 1-2 Tipologia di impianto in funzione della sorgente (Fonte [3])

I dati riportati in Figura 1-2 evidenziano come la tecnologia di riscaldamento principale sia ancora quella a gas naturale (71.1%) con una penetrazione delle pompe di calore pari solo al 2.9%.

La motivazione principale di una così bassa percentuale può essere ricercata anche nella limitata disponibilità di dati relativi alle prestazioni di tali macchine in contesti operativi reali che impedisce:

- di valutare correttamente le prestazioni e l'influenza di fattori esterni (condizioni climatiche, caratteristiche dell'edificio, ecc...) sulle prestazioni della macchina, con analisi di letteratura che evidenziano scostamenti anche importanti rispetto alle prestazioni di targa, solitamente riferite a ben definite condizioni climatiche ed operative (Fonte [4] e [5]).
- di effettuare approfondite analisi tecno-economiche di sostenibilità a supporto di investimenti in tal senso che valorizzino i benefici economici ottenibili a fronte di altre tecnologie più consolidate nel settore residenziale.

E' evidente che tale carenza di dati è legata alla scarsa diffusione, soprattutto nel settore residenziale e ancor più con riferimento ai condomini, di sistemi di monitoraggio non solo in edifici obsoleti ma anche in edifici di nuova costruzione. Tale scarsa diffusione è dovuta a varie motivazioni tra cui: (i) la mancanza di sensibilità nei confronti di una tecnologia "a supporto" e apparentemente non necessaria alle funzioni

primarie dell'edificio; (ii) la scarsa propensione all'investimento per l'acquisizione di un sistema di monitoraggio; (iii) la mancata valorizzazione economica dei benefici derivanti dall'utilizzo di un sistema di monitoraggio, soprattutto in ambito residenziale.

E' in questo contesto che si inserisce la linea di attività "Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali "all-electric" nel settore residenziale" all'interno del Work package: "Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici".

Obiettivo principale della linea di attività è quello di dimostrare i benefici derivanti dall'installazione di un sistema di monitoraggio in ambito residenziale, in termini di:

- valutazione delle prestazioni energetiche delle tecnologie monitorate e di definizione di indici di riferimento;
- valorizzazione, tecnica ed economica, dei benefici derivanti dall'utilizzo di una tecnologia ad alta efficienza.

Per raggiungere questo scopo, nella prima annualità, ci si è concentrati sulla ricerca di casi studio con caratteristiche adeguate agli obiettivi.

La ricerca è stata estesa a tutto il Nord Italia e ha visto il coinvolgimento - a supporto - di numerosi "attori" coinvolti nella filiera del residenziale (amministratori di condominio, progettisti, certificatori, fornitori e distributori di energia elettrica, EsCo).

Nonostante la rete di contatti attivata, solo un numero limitato di edifici è risultato possedere caratteristiche sufficientemente in linea con le necessità del progetto. Due sono risultate essere le motivazioni principali:

- limitata percentuale di edifici residenziali full-electric (principalmente di nuova costruzione) a causa di una scarsa tendenza alla riqualificazione energetica (meno del 3% secondo un'analisi ISTAT);
- predominanza di soluzioni impiantistiche in cui ogni singola unità abitativa è dotata di impianto a pompa di calore dedicato. La motivazione principale è di tipo sociale: l'impianto asservito alla singola unità abitativa garantisce autonomia di gestione e indipendenza totale dalle altre unità abitative.

Tra i casi individuati, si sono quindi scelti 2 casi studio, diversi tra loro e con caratteristiche in linea con gli obiettivi della ricerca.

Il primo caso studio è una villetta monofamiliare, con caratteristiche di casa passiva, dotata di impianto compatto a pompa di calore integrato con scambiatore geotermico e già dotata di sistema di monitoraggio. La presenza del sistema di monitoraggio e le caratteristiche dell'edificio, progettato e costruito in un'ottica di attenzione estrema alla richiesta energetica, rappresentavano un'occasione estremamente interessante per valorizzare il sistema di monitoraggio come strumento per valutare le prestazioni reali di una tecnologia in un contesto di efficientamento energetico spinto con la possibilità di valutazioni economiche di confronto rispetto a soluzioni impiantistiche più tradizionali.

Il secondo caso studio è rappresentato invece da due condomini da circa 60 unità abitative, perfettamente speculari ma dotati di impiantistica differente. A causa infatti della rottura del gruppo frigo ad assorbimento, uno dei due condomini (Corte Veronica) è stato oggetto di riqualificazione energetica, con installazione di un sistema a pompe di calore al fine di coprire sia la richiesta di riscaldamento che quella di raffrescamento del condominio. La caldaia a gas, originariamente presente in entrambi i condomini, subentra per il riscaldamento alla pompa di calore quando le temperature esterne si abbassano sotto un valore di soglia ma senza una logica di controllo ottimizzata. L'altro condominio (Corte Sara) è rimasto invece nella configurazione originaria, ovvero è dotato di caldaia alimentata a gas e gruppi assorbitori. Entrambi i condomini risultavano privi di sistema di monitoraggio.

Questo secondo caso studio rappresentava invece un'opportunità unica nel suo genere in quanto avrebbe consentito di confrontare soluzioni impiantistiche diverse a parità dei principali fattori esterni di influenza: caratteristiche dell'edificio, condizioni climatiche e richiesta termica. Rispetto al precedente caso studio, il secondo evidenziava sicuramente una minore sensibilità verso aspetti di efficientamento energetico, testimoniata dall'assenza di monitoraggio, utile anche a definire logiche di controllo ottimizzate per

l'impianto ibrido, e dalla scelta di mantenere la soluzione con caldaia a gas nel condominio Corte Sara, rinunciando ai potenziali (ma poco noti e quantificabili) benefici di una soluzione a pompa di calore.

A ciò si aggiunga anche la maggiore complessità sociale del secondo caso studio, dovuta alla necessità di interagire con un'assemblea di condominio (invece che con singoli proprietari), rappresentativa di sensibilità ed interessi diversi e con tempistiche di reazione a richieste ed eventi inattesi molto più lunghe e complesse.

Ovviamente nel caso dei due condomini, è stato necessario progettare ed installare un sistema di monitoraggio che consentisse di analizzare le prestazioni degli impianti e effettuare così opportuni confronti non solo a livello impiantistico ma anche a livello economico e sociale rispetto al primo caso studio.

Nei capitoli a seguire, si illustreranno in dettaglio i risultati delle modellazioni e delle analisi svolte relativamente ai due casi studio (Capitolo 2 e 3). Seguirà infine un capitolo conclusivo (capitolo 4) per un confronto più ampio e su vari livelli tra i due casi studio considerati all'interno degli obiettivi della ricerca.

2 Caso studio 1

L'edificio selezionato come caso studio è una casa passiva situata in provincia di Sondrio e così caratterizzata:

- Volume netto riscaldato/raffrescato: 392 m³
- Superficie utile riscaldata/raffrescata: 140 m²
- Struttura Xlam di spessore 10 cm
- Isolamento in lana di roccia con spessore di 24 cm
- Tetto in legno ventilato con isolamento in lana di roccia di spessore pari a 30 cm.



Figura 2-1 Caso studio 1: vista d'insieme e dettagli della fase di costruzione

La casa è stata progettata dall'arch. Ettore Pedrini (strutture) e dall'ing. Paolo Lazzarini (impianti). Si ricorda che l'etichetta di "casa passiva" impone che il fabbisogno energetico della casa sia inferiore a 15 kWh/m² annui.

La tecnologia oggetto di analisi in questo primo caso studio è rappresentata dall'aggregato compatto Compact P, il quale svolge tutte le funzioni di trattamento dell'aria per le stagioni di riscaldamento e raffreddamento.

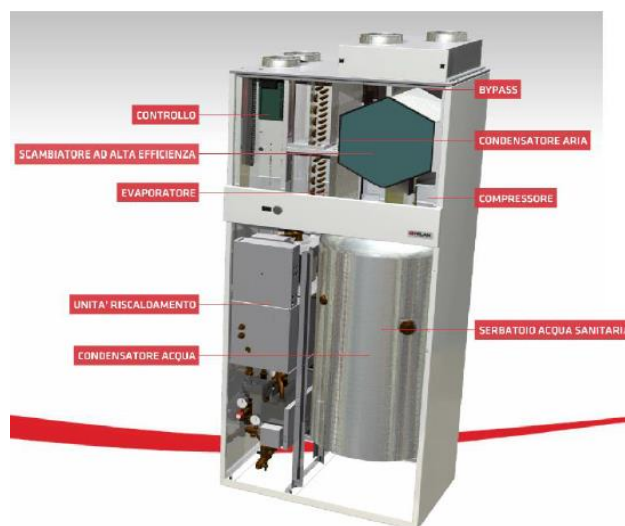


Figura 2-2 Dettaglio dei componenti costituenti l'unità Compact P

La particolarità dell'aggregato compatto è quella di consentire diverse modalità di funzionamento grazie alla presenza delle valvole di bypass e all'invertibilità degli scambiatori di calore lato aria, che consentono il

funzionamento da condensatore nel periodo di riscaldamento invernale e da evaporatore nel periodo di raffrescamento estivo (Figura 2-3).

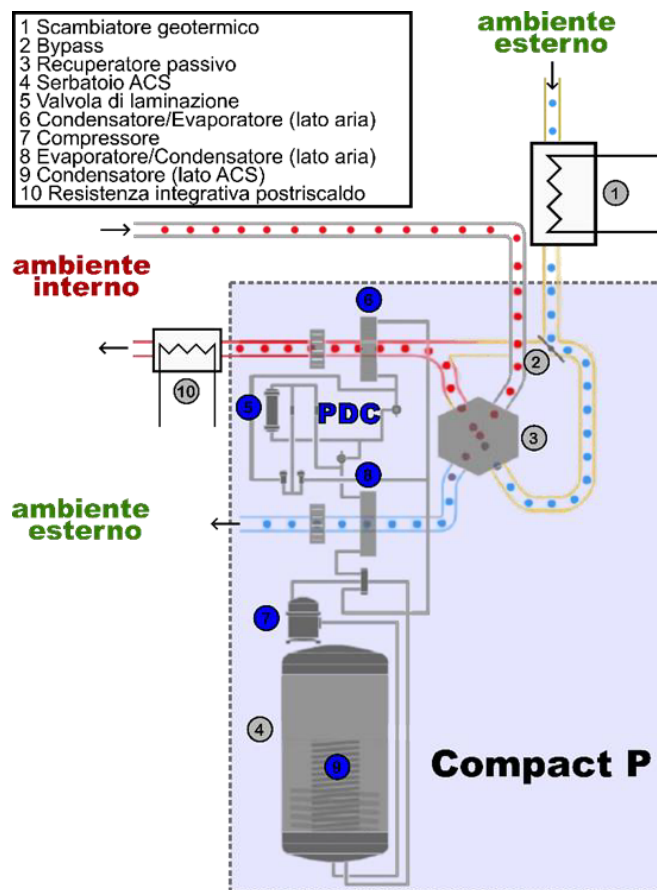


Figura 2-3 Schema di dettaglio dei componenti interni del Compact P

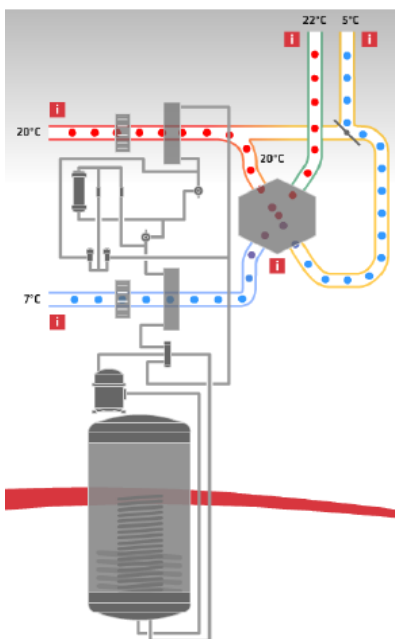
Tali modalità, che consentono all'impianto di ottimizzare le prestazioni in relazione alle condizioni climatiche esterne e all'utilizzo da parte dell'utenza, sono descritte brevemente in seguito.

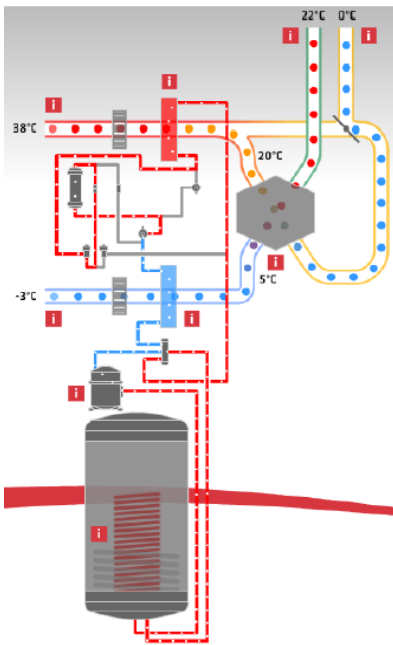
a) Recupero passivo del calore

L'aria esausta proveniente dagli ambienti e l'aria esterna di rinnovo vengono introdotte nel recuperatore passivo.

L'aria esausta più calda cede calore all'aria esterna di rinnovo. Il livello termico dell'aria di rinnovo in uscita dal recuperatore è già sufficiente per soddisfare i fabbisogni dell'abitazione, per cui il compressore non si attiva.

In questa modalità operativa, i consumi dell'unità Compact P si attestano a poche decine di Watt poiché imputabili al solo funzionamento dei ventilatori.





b) Recupero attivo del calore

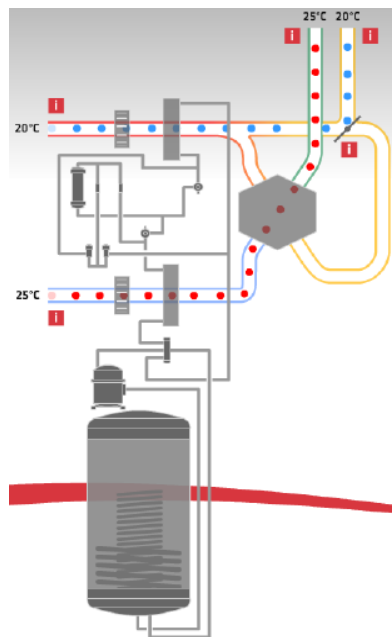
Quando il livello termico dell'aria di rinnovo in uscita dal recuperatore passivo non è sufficiente a soddisfare il fabbisogno dell'abitazione, diviene necessario attivare il recupero attivo in pompa di calore.

L'aria esausta in uscita dal recuperatore possiede infatti ancora del calore, il quale viene sfruttato per evaporare il fluido frigorifero.

Lo stesso fluido viene quindi inviato al compressore. Esso, quindi, cede calore prima al serbatoio dell'Acqua Calda Sanitaria (ACS) e, poi, all'aria in immissione, per mezzo del condensatore.

Il consumo elettrico massimo in questa modalità operativa è inferiore ai 500 Watt (funzione delle reali condizioni al contorno).

Nelle stagioni intermedie, quando superiore a quella esterna, si può rinnovare per il mantenimento delle. Viene infatti attivato il bypass, dell'aria di rinnovo nella stessa direttamente in. L'aria esausta attraversa il unici assorbimenti di potenza della ventilatore che, anche in questo Watt.

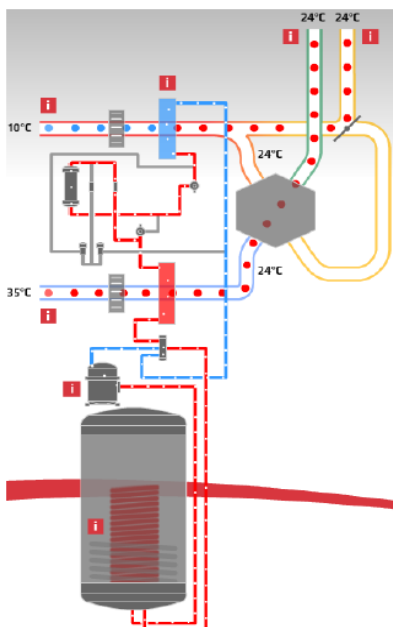


c) Bypass

la temperatura negli ambienti è sfruttare direttamente l'aria di condizioni di comfort in ambiente.

grazie al quale si evita il passaggio recuperatore passivo, immettendo ambiente.

recuperatore e viene espulsa. Gli macchina sono imputabili al caso, si attestano a poche decine di



d) Raffrescamento attivo

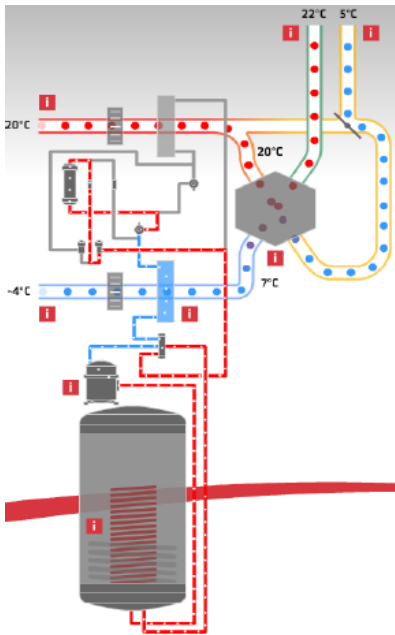
L'aria esterna di rinnovo può scambiare calore con l'aria esausta nel recuperatore passivo o, in alternativa, sfruttare il bypass (come riportato in figura).

Se l'aria di rinnovo è a temperatura troppo alta per poter soddisfare le esigenze di raffrescamento, si attiva il compressore, l'aria cede parte del suo calore al fluido frigorifero nell'evaporatore e viene quindi immessa in ambiente.

Dall'evaporatore il fluido frigorifero viene inviato prima al compressore e, successivamente, nel serbatoio ACS a cui cede calore (funzionamento a recupero totale).

L'eventuale calore residuo viene, infine, ceduto all'aria di espulsione nel condensatore.

Il raffrescamento estivo, abbinato alla funzionalità di recupero totale, consente di raggiungere i valori più elevati di Coefficient of Performance (COP). Si ottiene in questi casi, infatti, un doppio effetto utile nonostante il consumo elettrico massimo si attesti a circa 500 W. Watt.



e) Produzione di acqua calda sanitaria

Quando il livello termico dell'aria di rinnovo in uscita dal recuperatore passivo è già sufficiente per il mantenimento delle condizioni di comfort in ambiente, si può sfruttare il contenuto energetico ancora presente nell'aria esausta per alimentare il serbatoio di acqua calda sanitaria.

Il fluido frigorifero prima evapora grazie al flusso d'aria esausta, viene quindi inviato al compressore e, infine, condensa completamente nel serpentino interno al serbatoio ACS.

Quando la modalità di riscaldamento è attiva, il reintegro del serbatoio viene velocizzato.

Il convogliamento del calore può comunque sempre essere prioritariamente deviato sul serbatoio ACS, escludendo parzialmente la cessione di calore sull'aria di rinnovo attraverso il condensatore (funzione impostabile da pannello di controllo CTS700).

Come si evince dalla Figura 2-3, l'impianto è integrato anche con una resistenza integrativa di post riscaldamento (elemento n. 10). Tale resistenza, con potenza di picco poco superiore ai 1000 W, è installata sul condotto di immissione ed entra in funzione nei periodi di picco, durante gli sbrinamenti oppure durante la produzione prioritaria di ACS, ossia quando il Compact P non riesce a sopperire al carico termico invernale e alla produzione contestuale di acqua calda sanitaria.

Nel caso in esame, il sistema viene integrato con uno scambiatore geotermico con funzioni di pre-temperamento dell'aria in ingresso all'aggregato compatto.

L'aggregato compatto presenta inoltre un sistema di monitoraggio di cui si richiamano di seguito le grandezze misurate e la relativa frequenza di acquisizione. In Figura 2-4, si riporta uno schema del sistema in oggetto, identificando inoltre i punti di misura.

- Con un intervallo di campionamento di 1 minuto si acquisisce:
 - La temperatura dell'aria esterna;
 - La temperatura dell'aria dopo lo scambiatore geotermico;
 - La temperatura di immissione dell'aria in ambiente;
 - La temperatura dell'aria esausta espulsa dall'ambiente;
 - L'umidità relativa esterna.
- Con un intervallo di campionamento pari a 5 minuti, si acquisisce invece:
 - La potenza assorbita dal Compact P;
 - La potenza assorbita dalla resistenza integrativa di post-riscaldamento;
 - L'energia assorbita dal Compact P;
 - L'energia assorbita dalla resistenza integrativa di post-riscaldamento;
 - La velocità percentuale di funzionamento dei ventilatori lato immissione e lato espulsione;
 - L'umidità relativa interna.

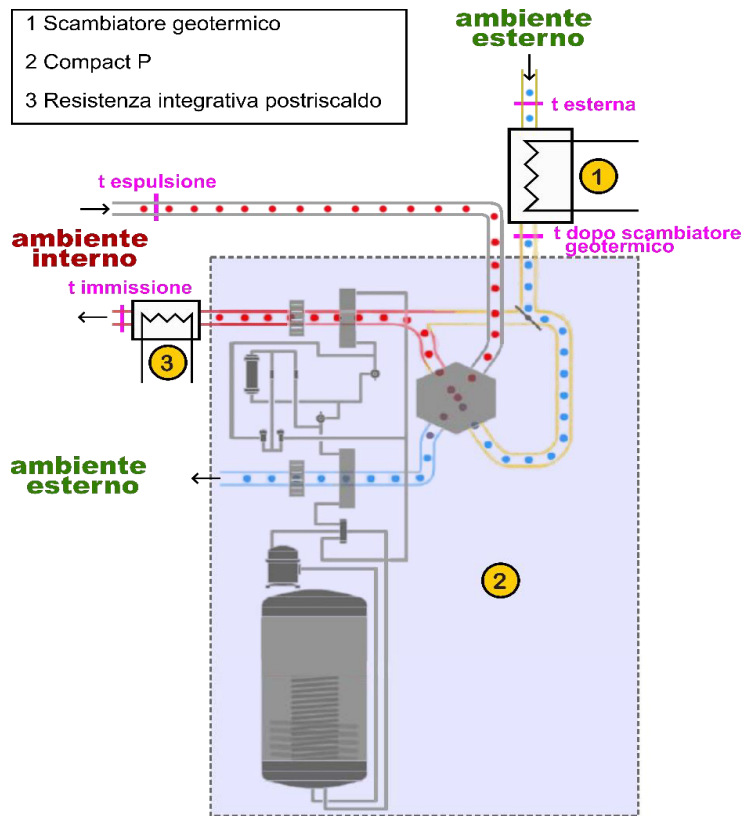


Figura 2-4 Schema impiantistico in cui sono evidenziati i punti in cui vengono misurate le temperature

Le prestazioni della macchina vengono valutate utilizzando i dati reali acquisiti dal sistema di monitoraggio nel corso dell'intero anno 2019, ad esclusione dei periodi in cui il sistema non ha funzionato. I periodi di inattività dell'aggregato compatto sono quantificabili percentualmente con un valore pari al 12.6% delle ore totali annue, ovvero, in circa 1100 ore su 8760.

2.1 Prestazioni di targa dell'aggregato compatto Compact P

Scopo del presente studio è l'analisi delle prestazioni della pompa di calore in condizioni operative reali al fine di individuare potenziali fattori negativi/positivi di influenza.

Le prestazioni dichiarate dal costruttore in riscaldamento e raffreddamento sono riportate in Tabella 2.1 e in Tabella 2.2.

Tabella 2.1 Prestazioni dichiarate dal costruttore dell'aggregato compatto in modalità riscaldamento attivo

DATI PRESTAZIONALI IN MODALITA' RISCALDAMENTO													
COMPACT P	Portata d'aria [m ³ /h]	100				180				220			
	Temperatura ambiente [°C]	20				20				20			
	Umidità relativa ambiente [%]	45				45				45			
	Temperatura esterna [°C]	12	7	2	-7	12	7	2	-7	12	7	2	-7
	Umidità relativa esterna [%]	70				70				70			
	Potenza scambiatore passivo [kW]	0,234	0,350	0,510	0,720	0,352	0,640	0,910	1,430	0,542	0,830	1,220	1,730
	Potenza scambiatore attivo [kW]	0,720	0,672	0,609	0,511	1,060	0,921	0,773	0,519	1,232	1,052	0,883	0,547
	Potenza totale [kW]	0,954	1,017	1,114	1,226	1,414	1,561	1,682	1,949	1,775	1,884	2,095	2,283
	Temperatura mandata ambiente [°C]	45,62	42,6	39,0	33,6	39,1	35,5	32,6	26,1	36,2	32,6	30,3	23,8
	Potenza assorbita compressore [kW]	0,319	0,302	0,283	0,251	0,318	0,297	0,279	0,241	0,306	0,291	0,275	0,249
COP complessivo unità	2,63	3,10	3,61	4,45	3,67	4,59	5,22	6,90	4,53	5,17	5,99	7,13	

Riscaldamento EN14511_3

Tabella 2.2 Prestazioni dichiarate dal costruttore dell'aggregato compatto in modalità raffrescamento attivo

DATI PRESTAZIONALI IN MODALITA' RAFFRESCAMENTO										
COMPACT P	Portata d'aria [m ³ /h]	180			220			320		
	Temperatura ambiente [°C]	24			24			24		
	Umidità relativa ambiente [%]	50			50			50		
	Temperatura esterna [°C]	40	35	30	40	35	30	40	35	30
	Umidità relativa esterna [%]	60			60			60		
	Potenza scambiatore passivo [kW]	0,90	0,60	0,33	1,10	0,73	0,34	1,59	1,05	0,36
	Potenza scambiatore attivo [kW]	0,95	1,00	1,01	1,09	1,13	1,28	1,15	1,19	1,32
	Potenza totale [kW]	1,85	1,64	1,34	2,19	1,86	1,52	2,74	2,24	1,68
	Temperatura mandata ambiente [°C]	23,90	21,10	16,90	26,10	21,60	17,60	27,70	24,50	22,80
	Potenza assorbita compressore [kW]	0,42	0,40	0,38	0,42	0,40	0,38	0,42	0,40	0,38
EER unità completa	4,40	4,10	3,53	5,21	4,65	4,00	6,50	5,60	4,42	

È importante sottolineare che tali prestazioni considerano il prelievo di aria dell'ambiente esterno senza alcun tipo di recupero termico, a differenza invece del caso studio in cui vi è lo scambiatore geotermico. Come si avrà modo di dimostrare in seguito, lo scambiatore geotermico riveste un ruolo di primaria importanza nella definizione delle prestazioni dell'unità Compact P in quanto le consente di operare in condizioni operative standard, minimizzando quindi l'influenza della temperatura esterna sulle prestazioni della pompa di calore. In particolare, grazie allo scambiatore geotermico, la temperatura dell'aria in ingresso alla pompa di calore non risulta mai inferiore ai 9°C durante la fase di riscaldamento e non supera mai i 21.5°C durante la fase di raffrescamento. Per corroborare l'importanza dello scambiatore geotermico, si riporta in Figura 2-5 sia l'andamento della temperatura esterna che quello della temperatura dell'aria dopo lo scambiatore geotermico.

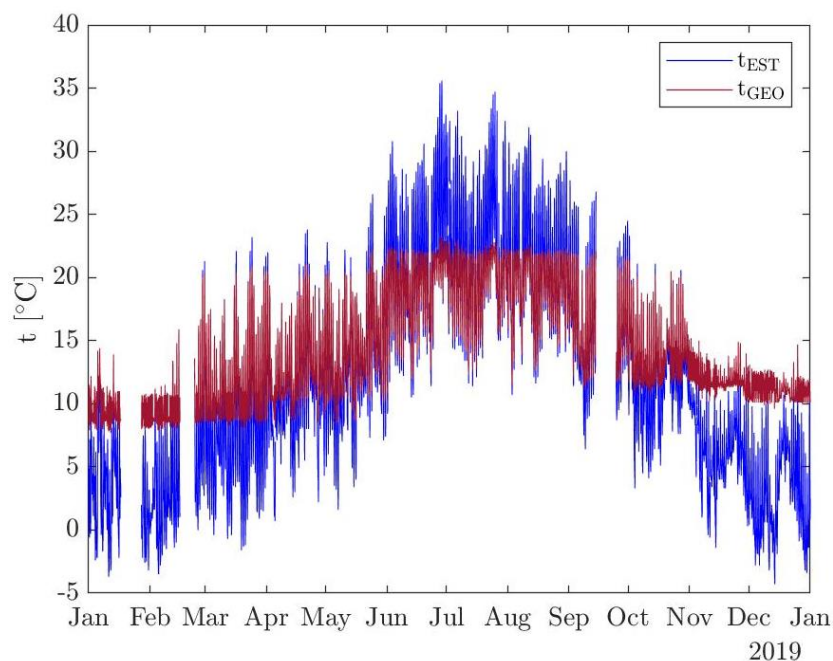


Figura 2-5 Andamento della temperatura esterna e a valle dello scambiatore geotermico nell'anno 2019

2.2 Andamento annuale dei consumi

In Figura 2-6, si riporta sia l'andamento dei consumi energetici giornalieri da parte del Compact P, sia quelli della resistenza di post riscaldamento. I giorni in cui i consumi del Compact P risultano essere maggiori sono relativi alla stagione estiva, in relazione all'attivazione continuativa in situazioni di elevata necessità di raffrescamento. La logica di attivazione della resistenza integrativa di post-riscaldamento viene confermata

in quanto si attiva nei mesi invernali, e quindi nelle situazioni di elevata richiesta di potenza termica o in cui vi è produzione prioritaria di acqua calda sanitaria.

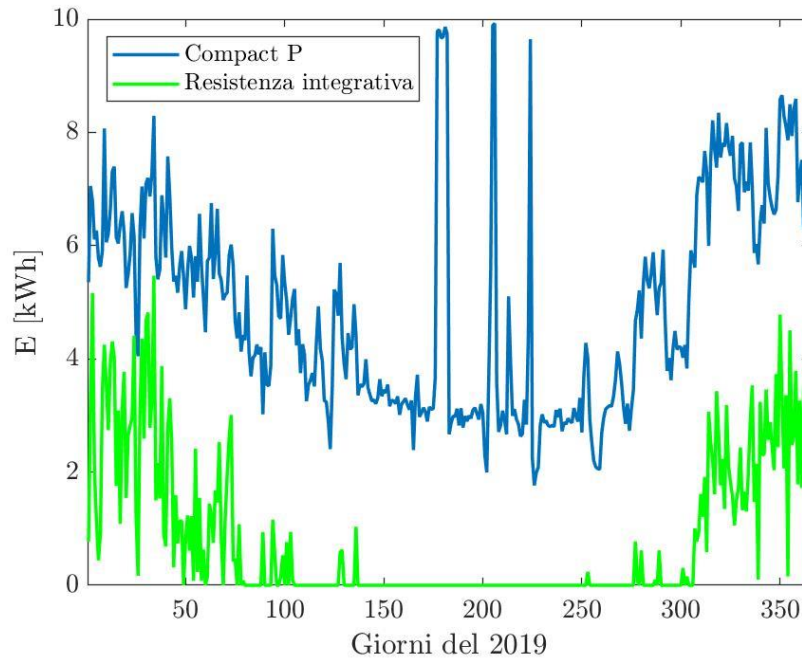


Figura 2-6 Energia consumata giornalmente nel 2019

In Figura 2-7 si riportano invece i consumi energetici a livello mensile, dai quali si osserva che la richiesta maggiore di energia si concentra nella stagione di riscaldamento, più precisamente nei mesi di gennaio, novembre e dicembre. In tali mesi, come richiamato in precedenza, si verifica il maggior ricorso alla resistenza integrativa.

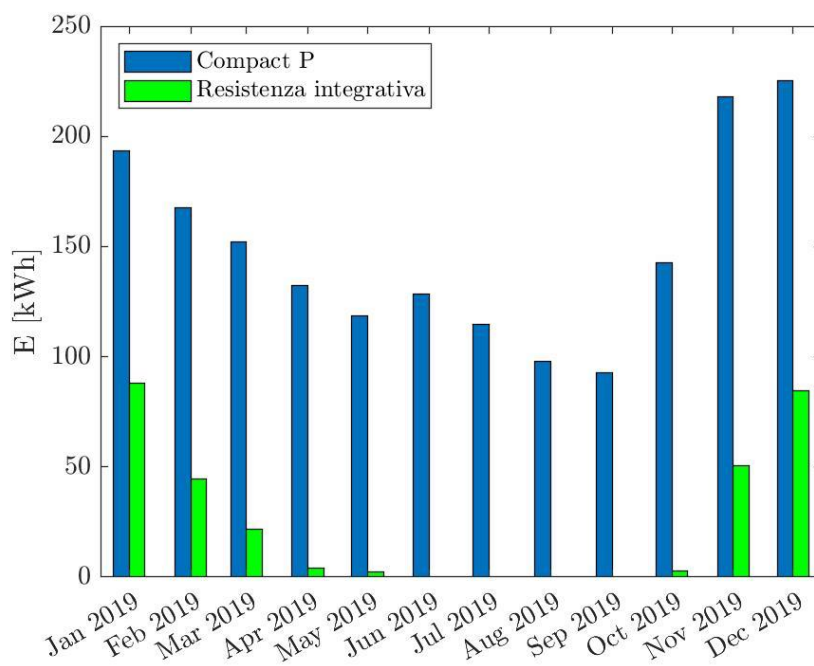


Figura 2-7 Energia consumata mensilmente nel 2019 dall'aggregato compatto

Analisi ancor più interessante è mostrata considerando le curve di durata della potenza del Compact P e della resistenza elettrica (Figura 2-8), che mostrano come la resistenza integrativa funzioni per un periodo limitato (concentrato nella stagione invernale). L'aggregato compatto invece sembra funzionare per circa metà anno in modalità attiva (Potenza superiore a 200 W), ovvero funzionamento da pompa di calore, mentre per più di metà dell'anno sembra essere sufficiente il funzionamento in recupero passivo del calore, i cui consumi sono imputabili alla sola ventilazione meccanica (Potenza inferiore a 100 W).

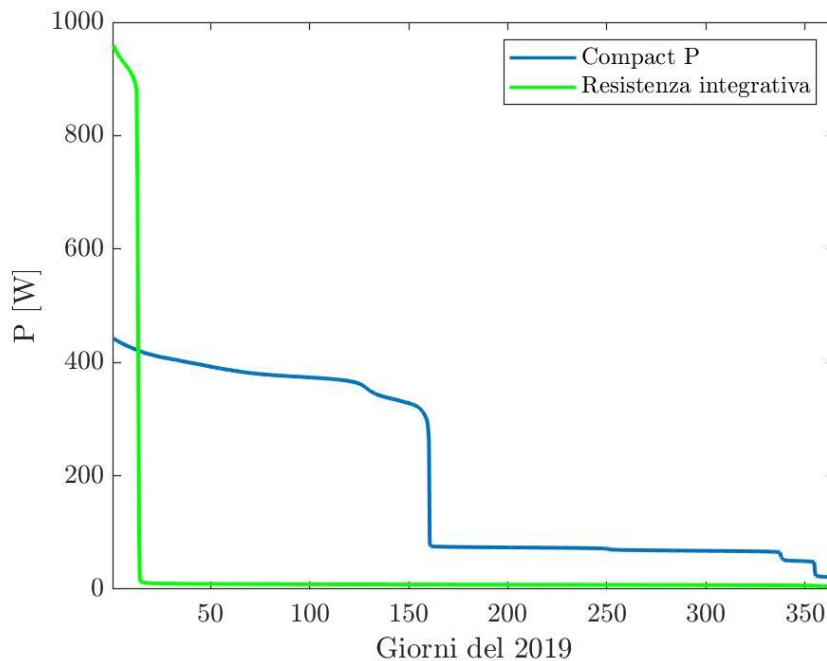


Figura 2-8 Curve di durata delle potenze nel 2019

2.3 Sviluppo del modello di simulazione per l'analisi delle prestazioni

Le prestazioni dell'unità Compact P dipendono dai dati di targa, dalla portata d'aria e da altri parametri, come la temperatura esterna e la temperatura nell'ambiente di mandata.

I dati messi a disposizione dal sistema di monitoraggio non prevedono però la misura in tempo reale della portata d'aria né l'indicazione della modalità di funzionamento. Per poter valutare le prestazioni reali della pompa di calore rispetto a quelle attese di targa, si è quindi reso necessario analizzare in dettaglio i dati acquisiti mediante il sistema di monitoraggio.

In primo luogo, si è provveduto ad individuare gli istanti in cui il compressore risulta operativo e quelli in cui l'unità funziona solo in modalità di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC) a partire dall'analisi della potenza elettrica assorbita dell'aggregato compatto (Figura 2-9).

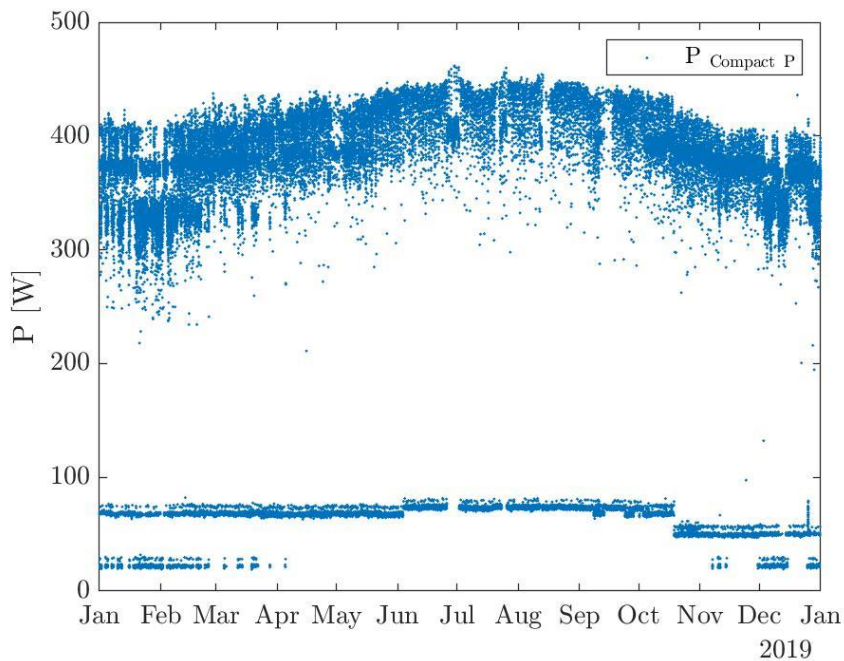


Figura 2-9 Potenza elettrica assorbita dall'aggregato compatto durante il 2019

L'unità può operare con diversi valori di portata d'aria e, in particolare, le prestazioni fornite a catalogo sono riferite a tre diversi valori della stessa. Tali valori cambiano in base alla modalità operativa, ovvero raffrescamento o riscaldamento.

È evidente dall'analisi dei dati che, nei periodi di consumo inferiore a 100 W, la potenza elettrica assorbita è attribuibile al funzionamento dei soli ventilatori (modalità VMC).

Tale condizione operativa ben si presta all'individuazione delle portate di funzionamento dei ventilatori in quanto consente di associare i dati relativi al consumo di potenza dei ventilatori (pari a quelli dell'intera unità) con le percentuali di velocità di rotazione dei ventilatori stessi, disponibili da monitoraggio.

La regolazione, infatti, della portata di un ventilatore può avvenire con una valvola a farfalla posta alla mandata oppure, per eliminare le dissipazioni di energia che questo sistema di regolazione comporta, mediante sistemi di azionamento a velocità variabile.

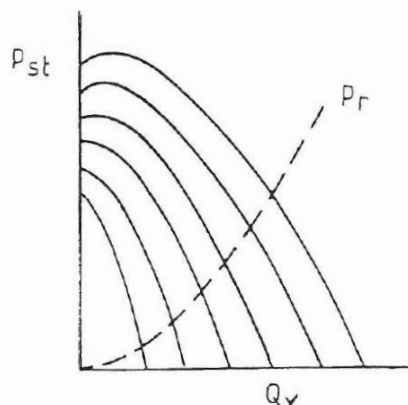


Figura 2-10 Esempio di curve caratteristiche del ventilatore al variare della velocità di rotazione dello stesso

Per chiarire tale modalità di regolazione, si riporta in Figura 2-10 un esempio di curve caratteristiche (incremento di pressione statica, p_{st} , al variare della portata volumetrica, Q_v) di un ventilatore per diversi valori del regime di rotazione (linee continue in Figura 2-10). La modalità di regolazione tramite valvola comporta una riduzione della portata a parità di regime di rotazione, con spostamento lungo la corrispondente curva caratteristica ottenuto aumentando la richiesta di energia tramite l'aumento di

perdite di carico attraverso la valvola. Quando invece la regolazione viene effettuata variando il regime di rotazione, la riduzione della portata viene ottenuta seguendo la parabola tratteggiata e denominata p_r visibile in Figura 2-10, riducendo la richiesta di energia grazie alla riduzione delle perdite di carico nell'impianto per effetto della riduzione della velocità del fluido.

Per modellizzare tale modalità di regolazione, è necessario rifarsi alle leggi della similitudine meccanica. In particolare, nel caso dei ventilatori, è possibile semplificare l'analisi facendo riferimento alle leggi definite per i fluidi incomprimibili. Si può infatti dimostrare che, per bassi valori del rapporto di compressione ($p_{out}^0/p_{in}^0 < 1.1$), l'errore che si commette considerando la densità dell'aria costante e quindi approssimando lo scambio energetico di una macchina per fluidi comprimibili:

$$\Delta H_{is}^0 = c_p T_i^0 \left[\left(\frac{p_{out}^0}{p_{in}^0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (1)$$

con quello di una macchina per fluidi incomprimibili:

$$gh = \frac{p_{out}^0 - p_{in}^0}{\rho} \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (2)$$

è inferiore al 3%.

In queste ipotesi semplificative, è possibile correlare tra loro due punti di funzionamento 1 e 2 del ventilatore a diverse velocità di rotazione n tramite le leggi di affinità:

$$Q_{v2} = Q_{v1} \frac{n_2}{n_1} \quad h_2 = h_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (3)$$

dove Q_v [m^3/s] è la portata volumetrica elaborata dal ventilatore e h [m] è lo scambio energetico espresso in metri. La relazione tra scambio energetico e portata si ricava direttamente dalle due leggi sopraccitate, ottenendo:

$$h_2 = \left(\frac{h_1}{Q_{v1}^2} \right) Q_{v2}^2 \quad (4)$$

legge che consente di approssimare la curva di regolazione a regime di rotazione variabile riportata in Figura 2-10.

Per il caso in esame, le relazioni qui riportate hanno permesso di stimare la potenza assorbita dai ventilatori così da poterla sottrarre alla potenza complessivamente assorbita dalla pompa di calore, arrivando così ad una stima sufficientemente accurata dell'assorbimento dei compressori della pompa di calore e, quindi, dell'efficienza complessiva dell'impianto.

In particolare, il sistema di monitoraggio forniva i valori di velocità percentuale dei ventilatori di immissione ed estrazione. Data la relazione lineare tra portata e regime di rotazione (eq. 3), a partire dalle percentuali di velocità si sono determinati i valori delle portate di immissione ed estrazione e, quindi, i valori di stima della potenza assorbita dai ventilatori:

$$P_{ass} = \frac{\Delta p \cdot Q_v}{\eta(Q_v)} \quad (5)$$

dove Δp [Pa] rappresenta le perdite di carico attraverso l'impianto di ventilazione, assunte pari a 600 Pa, Q_v [m^3/s] è la portata volumetrica dell'aria e η è il rendimento del ventilatore, che dipende a sua volta dalla portata volumetrica. In particolare, per il rendimento si è definita una legge quadratica in funzione della portata elaborata, ipotizzando un rendimento massimo dell'80%, raggiunto in corrispondenza della velocità percentuale di 75% e 65% rispettivamente per espulsione e immissione.

L'analisi delle potenze di ventilazione così condotta ha consentito di identificare tre diverse fasce di potenza assorbita, considerando il consumo dell'unità in standby pari a circa 9 W:

- Potenza assorbita tra 10 e 15 W. Questa condizione viene registrata unicamente nella stagione invernale e tipicamente quando la temperatura esterna scende al di sotto dei 2°C (Figura 2-5). È associata a questa condizione la portata minima elaborata dal sistema, pari a circa 129 m^3/h (Tabella 2.1), con compressore attivo, o pari a 92 m^3/h se il compressore risulta spento. In questa condizione le velocità percentuali di rotazione del ventilatore sono risultate essere contenute (38%

- 35% e 35% - 25%, a compressore acceso o spento per i ventilatori di espulsione – immissione) in quanto risulta più conveniente ridurre la portata di ventilazione ai fini del mantenimento della temperatura di comfort richiesta dall'utente.
- Potenza assorbita tra 35 e 45 W. Si tratta di una condizione di funzionamento riscontrata unicamente nell'ultima parte dell'anno, dal mese di ottobre in poi, con temperature esterne comprese tra 2 e 10°C. A tale condizione è stata associata la portata d'aria di rinnovo di circa 202 m³/h relativa ad una velocità percentuale del 55% per il ventilatore di immissione (65% per quello di espulsione).
- Potenza assorbita tra 55 e 65 W. Questa condizione prevale nell'arco dell'anno sia durante la stagione estiva che durante quella invernale ed è relativa alla condizione di progetto. Tale assorbimento viene associato alla portata d'aria di rinnovo di 239 m³/h comune ad entrambe le modalità (raffrescamento e riscaldamento) (velocità percentuale 65% per il ventilatore di immissione e 75% per quello di espulsione).

A partire quindi da queste stime, si è calcolato il consumo elettrico per la ventilazione meccanica in base alla velocità di rotazione. Successivamente è stato quindi possibile separare la potenza elettrica assorbita per la ventilazione da quella necessaria al funzionamento del compressore, anche nel caso in cui il compressore fosse attivo.

Questa analisi delle modalità di funzionamento viene confermata se si confrontano alcuni dati relativi alla portata d'aria media oraria stimata in relazione alle temperature registrate all'esterno e dopo lo scambiatore geotermico. Si precisa che, per motivi di qualità di lettura, in alcuni dei grafici a seguire si riporteranno i dati acquisiti e/o elaborati con riferimento ad un periodo limitato di una settimana, prendendo a confronto il mese di gennaio e di febbraio. Tali settimane vengono riportate a titolo esemplificativo e ben rappresentano il comportamento evidenziato dalla macchina anche in altri periodi dell'anno.

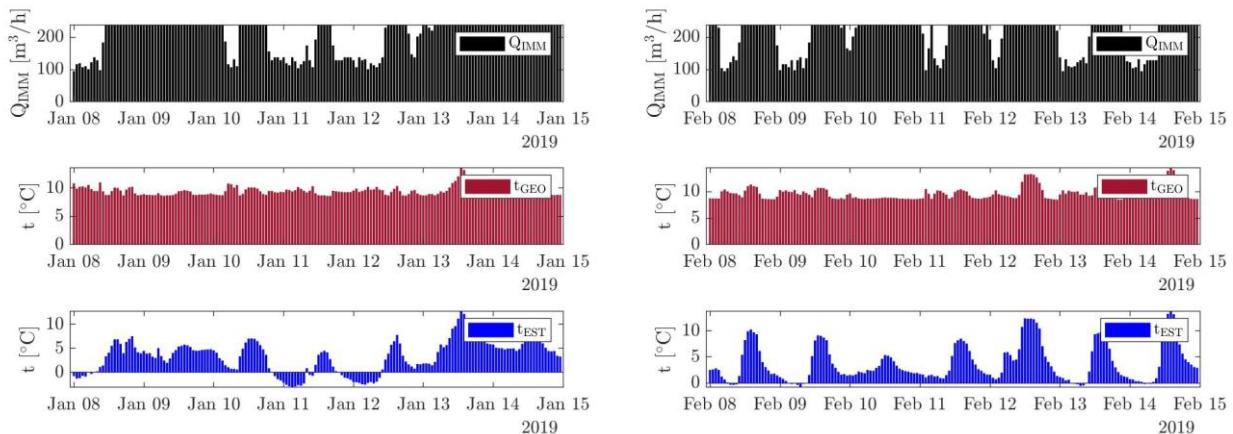


Figura 2-11 Valori medi orari della portata, della temperatura esterna e della temperatura dopo lo scambiatore geotermico nella seconda settimana di gennaio (sinistra) e nella seconda settimana di febbraio (destra).

Dai grafici riportati in Figura 2-11 è possibile osservare che i valori di portata media oraria più bassi si riscontrano quando la temperatura esterna scende al di sotto dei 2°C, aspetto questo confermato anche dall'andamento dei consumi del Compact P (Figura 2-12). Le velocità di rotazione più basse, associate alla portata minima e alla potenza minima assorbita dai ventilatori, si riscontrano quando la temperatura esterna risulta al di sotto di circa 1°C.

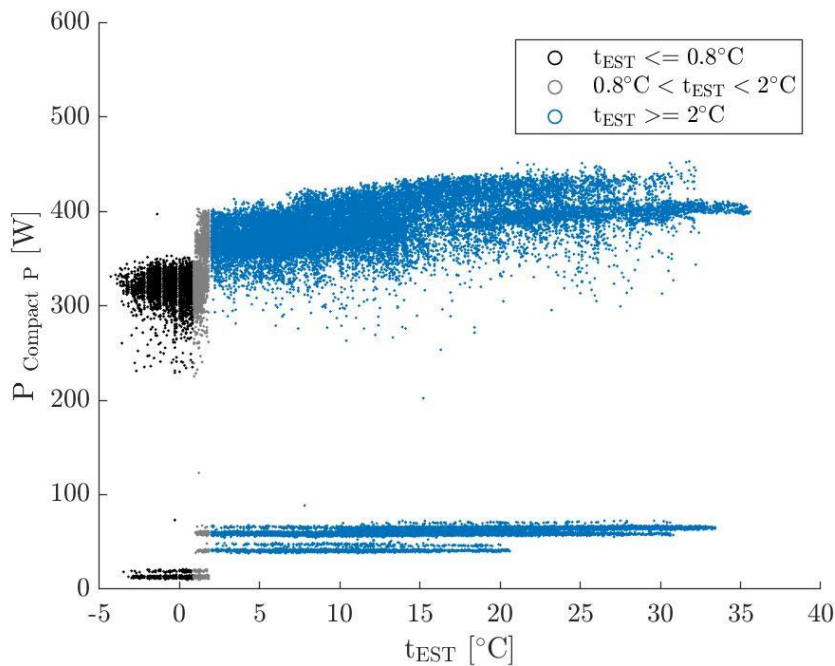


Figura 2-12 Potenza assorbita dall'unità in relazione a vari range di temperatura esterna

Una volta identificata la portata d'aria elaborata per ogni istante di acquisizione dei dati, si è costruito un modello in ambiente Matlab in grado di calcolare le temperature dell'aria in ogni punto utile dell'impianto (nel caso non fossero già disponibili da monitoraggio), così da poter calcolare le potenze termiche scambiate nei vari componenti a partire dalla portata d'aria.

Per ottenere un modello in grado di riconoscere e simulare tutte le possibili condizioni di funzionamento della macchina, data la complessità dello stesso, si è reso necessario eseguire analisi dei vari componenti al fine di definire e calcolare correttamente tutti i parametri operativi e prestazionali.

2.3.1 Il recuperatore passivo

Nel caso studio considerato, il recuperatore passivo riceve in ingresso l'aria proveniente da uno scambiatore geotermico e non direttamente l'aria prelevata dall'ambiente esterno (Figura 2-4).

L'efficienza attesa, secondo la scheda tecnica, è pari all'80% con un picco massimo del 95% in particolari condizioni.

Per stimare l'effettivo rendimento in fase di riscaldamento, si è identificato e analizzato un periodo di funzionamento in cui fosse attivo il recupero passivo del calore, ma non quello attivo in pompa di calore.

In prima battuta si è ipotizzato che la temperatura di immissione, t_{IMM} , fosse coincidente con quella all'uscita dello scambiatore passivo, t_{PASS} , determinando quindi l'efficienza di tale elemento mediante la relazione:

$$\varepsilon = \frac{t_{IMM} - t_{GEO}}{t_{AMB} - t_{GEO}} \quad (6)$$

dove:

- t_{IMM} è la temperatura di immissione;
- t_{GEO} è la temperatura dell'aria di rinnovo proveniente dallo scambiatore geotermico. Non si deve infatti dimenticare che nel caso in esame l'aria in ingresso al recuperatore non proviene direttamente dall'ambiente esterno ma passa attraverso uno scambiatore geotermico. In assenza di scambiatore, nell'eq. 6 la temperatura t_{GEO} dovrebbe essere sostituita dalla temperatura esterna, t_{EST}
- t_{AMB} è la temperatura dell'aria esausta che viene espulsa dall'ambiente (Figura 2-4).

Tramite questo approccio si riesce a stimare, per la stagione invernale, una serie di valori di efficienza del recuperatore passivo sempre superiori al 90%, superiori ai valori più generali e cautelativi riportati nella scheda tecnica.

Tuttavia, l'ipotesi fatta in merito alla temperatura a valle del recuperatore passivo è risultata non essere del tutto accurata in quanto i dati relativi alla stagione estiva hanno consentito di evidenziare uno scostamento tra la temperatura a valle dello scambiatore geotermico, t_{GEO} , e quella di immissione, t_{IMM} . In situazioni di valvola di by-pass attiva, si è infatti osservato un incremento di temperatura di circa 2°C nel tratto terminale dell'impianto, che porta ad un incremento di temperatura di immissione (Figura 2-13).

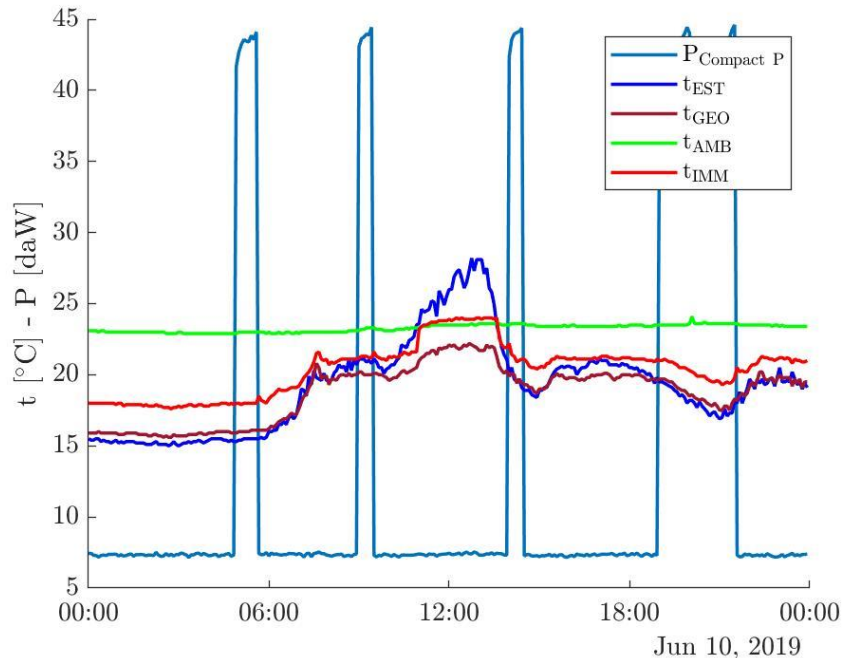


Figura 2-13 Potenza elettrica assorbita dal Compact P in daWatt e temperature monitorate. A titolo esemplificativo si riportano i dati relativi al 10 giugno 2019

Tale incremento di temperatura si è ipotizzato dovuto all'assorbimento passivo di calore nell'impianto ed è stato quindi assunto come valore medio di riferimento per tutta la stagione di raffrescamento, anche in condizioni di raffrescamento attivo.

Alla luce di tale risultato, anche nella stagione invernale, è stata rivista l'ipotesi di $t_{IMM} = t_{PASS}$ e si è assunta una riduzione della temperatura pari a 1°C (compatibile con le diverse condizioni presenti nella stagione invernale).

Considerando questa riduzione, l'efficienza del recuperatore in fase di riscaldamento si è leggermente ridotta, riportandosi perfettamente in linea con i dati di targa del recuperatore. La Figura 2-14 riporta gli andamenti dei rendimenti ottenuti tramite fitting polinomiale di secondo grado in fase di riscaldamento per una temperatura esterna variabile in assenza di scambiatore geotermico, confermando valori in linea con i dati medi riportati nella scheda tecnica. Tuttavia, se l'aggregato compatto Compact P viene abbinato ad uno scambiatore geotermico, come nel caso in esame, la temperatura esterna è da sostituire con la temperatura di uscita dallo scambiatore geotermico. Dal momento che i dati sperimentali evidenziano una temperatura costante di circa 9°C, nel modello per studiare le prestazioni del Compact P si è inserito solamente il valore di efficienza in riscaldamento relativo ad una temperatura di ingresso pari a 9°C.

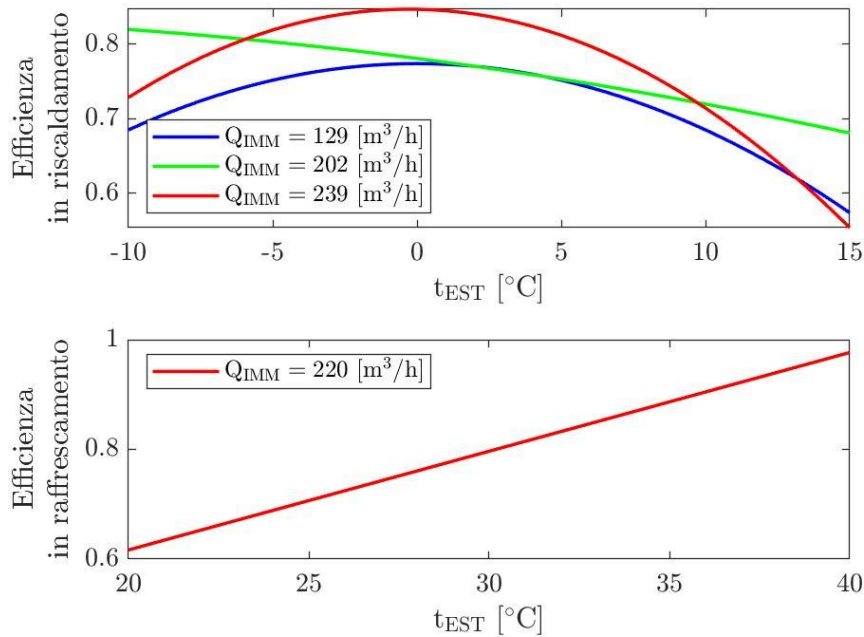


Figura 2-14 Efficienza del recuperatore passivo di calore in funzione delle condizioni esterne.

Per quanto riguarda la valutazione dell'efficienza nel periodo di raffreddamento o stagione estiva, l'eq. 6 necessita di essere rivista per evitare di dover considerare l'eventuale processo di deumidificazione che potrebbe avvenire nel recuperatore. Si è quindi sviluppato ed adottato il procedimento di seguito descritto per valutare le prestazioni del sistema.

In primo luogo, nota la temperatura dell'aria espulsa dall'ambiente interno, t_{AMB} , e quella esterna di riferimento, t_{EST} , si è ricavata la densità media dell'aria trattata nello scambiatore passivo, $\overline{\rho_{EST-AMB}}$. Quindi, a partire dall'entalpia dell'aria nelle condizioni esterne, h_{EST} , nota la portata d'aria elaborata, Q_v , e nota la potenza termica dello scambiatore passivo, P_{PASS} , dai dati di targa, è ricavabile l'entalpia dell'aria h_{ESP} all'uscita di tale componente:

$$h_{ESP} = h_{AMB} + \frac{P_{PASS}}{\overline{\rho_{EST-AMB}} \cdot Q_v}$$

Dall'entalpia dell'aria in uscita, h_{ESP} , si può risalire quindi alla temperatura t_{ESP} in tali condizioni, e quindi si può stimare l'efficienza del recuperatore passivo con la seguente relazione:

$$\varepsilon^* = \frac{t_{ESP} - t_{EST}}{t_{AMB} - t_{EST}} \quad (7)$$

Dai valori di efficienza così calcolati si è ricavata la curva di fitting polinomiale di secondo grado che consente di stimare l'efficienza a partire da un ingresso di temperatura esterna (Figura 2-14).

Nel caso estivo in esame, invece, lo scambiatore passivo non è risultato mai essere operativo (condizioni di funzionamento in by-pass).

Gli andamenti riportati in Figura 2-14 sono stati utilizzati in un'analisi di confronto, che verrà presentata a seguire, finalizzata a studiare le prestazioni della macchina in assenza dello scambiatore geotermico.

2.4 Prestazioni reali e nominali dell'unità di riscaldamento

2.4.1 Prestazioni in fase di riscaldamento

Il modello numerico costruito elabora i dati di monitoraggio disponibili e, a partire dai risultati delle analisi preliminari (sez. 1.3), consente di determinare le reali prestazioni della pompa di calore nelle varie modalità di funzionamento ed al variare delle condizioni operative (portata di rinnovo, temperatura esterna, presenza dello scambiatore geotermico, ecc..).

Le prestazioni dell'unità in fase di riscaldamento sono infatti influenzate dalla portata d'aria di rinnovo elaborata, variabile in funzione della modalità operativa e della temperatura esterna (Figura 2-11), e dalla presenza dello scambiatore geotermico. Come si può infatti osservare in Figura 2-15, lo scambiatore geotermico garantisce in ingresso al Compact P una temperatura dell'aria mai inferiore ai 9°C. Nonostante queste condizioni di temperatura di ingresso pressoché costanti, il COP presenta una variabilità nel tempo, principalmente dovuta alla variazione della portata di rinnovo.

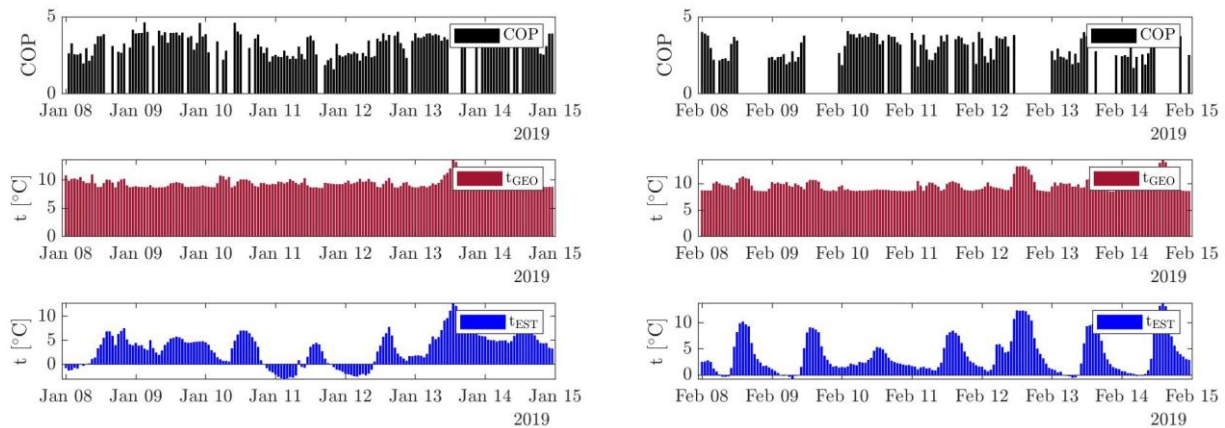
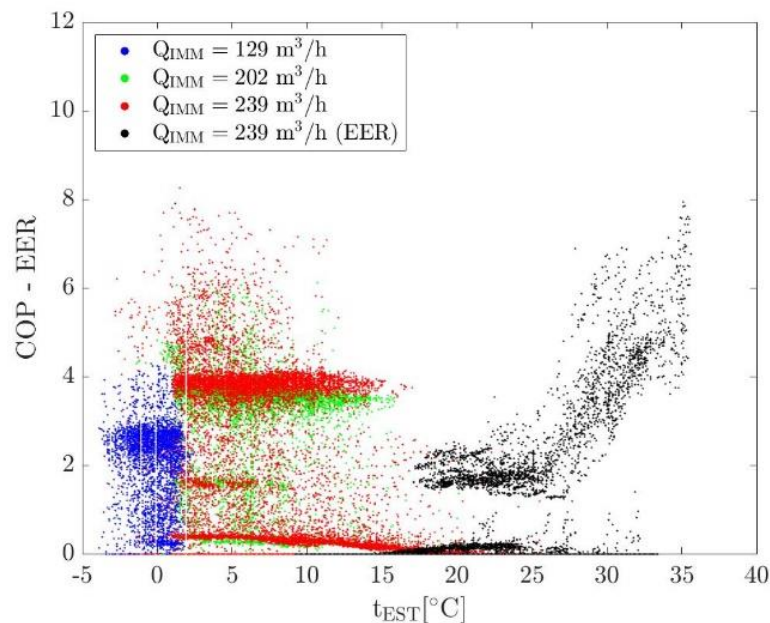


Figura 2-15 COP, temperatura esterna e temperatura a valle dello scambiatore geotermico: seconda settimana di gennaio (sinistra) – seconda settimana di febbraio (destra)

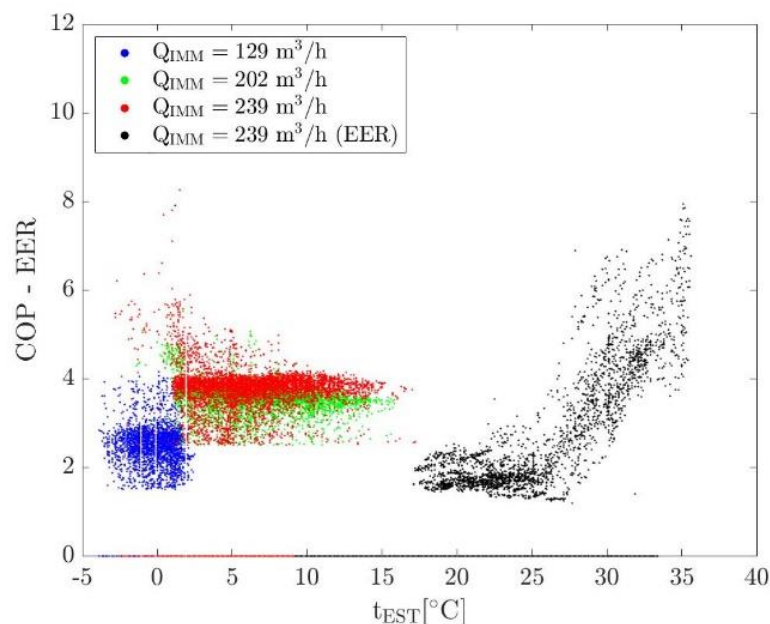
In Figura 2-15 è possibile notare come i valori medi orari del COP risultino circa pari a 2.5 per bassi valori della temperatura esterna, associati principalmente alla minima portata d'aria in ingresso pari a circa 129 m³/h.

Come descritto nella modalità di funzionamento, le prestazioni in modalità “recupero attivo del calore” risultano di complessa stima, in quanto parte del calore destinato al riscaldamento dell'aria di rinnovo risulta destinato al mantenimento dell'acqua calda sanitaria. Non essendo possibile scorporare con precisione il calore ceduto all'acqua calda sanitaria, si è assunto cautelativamente che tale calore fosse trascurabile rispetto alla quota ceduta all'aria. Inoltre, si sono definite delle soglie minime di riferimento per il COP, al di sotto delle quali il consumo elettrico dell'unità è stato interamente attribuito alla produzione di acqua calda sanitaria. In particolare, dopo un'analisi dei risultati ottenuti, si è fissata una soglia di COP pari a 1.5 per le condizioni di funzionamento a portata minima e di 2.5 per le condizioni di portata elevata. Questa ipotesi è valida anche per alcuni transitori di breve durata in cui l'aria viene scaldata per inerzia dal calore residuo nei condotti dopo un periodo di operatività della macchina. Nel caso estivo, una soglia limite per l'Energy Efficiency Ratio (EER) è stata fissata pari a 1, i cui risultati però verranno discussi nella sezione 1.4.2.

A questo proposito, la Figura 2-16 mostra i risultati ottenuti prima (a) e dopo (b) l'applicazione del criterio di filtro sopra proposto e relativo all'ACS. È evidente come il criterio consenta di identificare con sufficiente precisione i punti operativi in cui il consumo elettrico è effettivamente imputabile al riscaldamento (COP) o al raffrescamento (EER).



a)



b)

Figura 2-16 Andamenti del COP e dell'EER (valori con risoluzione 5 minuti) al variare della temperatura esterna: per tutti i punti operativi campionati (a) e senza i punti operativi di produzione di ACS filtrati secondo il criterio di soglia proposto (b)

Un'ulteriore difficoltà per l'analisi dei dati è costituita dalla natura fluttuante del dato di potenza elettrica consumata dalla resistenza di post-riscaldamento. Come si può infatti osservare in Figura 2-16, alcuni punti operativi presentano un COP superiore a 4 e sono risultati essere associati a variazioni significative del consumo della resistenza termica da un campionamento al successivo. Infatti, nel caso di attivazione della resistenza elettrica, il suo consumo viene registrato dal sistema di misura. Tuttavia, quando la resistenza viene spenta, il suo apporto energetico continua a manifestarsi per effetto del transitorio di raffreddamento. Pertanto, nell'intervallo di campionamento del sistema di monitoraggio, pari a 5 minuti, la resistenza termica (seppur spenta) risulta essere caratterizzata da tale transitorio di cui bisogna tenere conto per evitare di attribuire erroneamente alla pompa di calore il calore da essa ceduto. È stato quindi necessario impostare un controllo per tali valori e attribuire parte della potenza termica fornita all'aria, alla

resistenza di post-riscaldamento. In particolare, è stato attribuito un consumo della resistenza pari al massimo tra il valore di consumo precedente e il successivo nell'intervallo di tempo pari a 5 minuti.

Si riportano quindi in Tabella 3 i risultati finali dell'analisi delle prestazioni del Compact P durante la stagione invernale, confrontati con quelli disponibili nella scheda tecnica fornita dal produttore. I valori reali sono stati ottenuti mediando i risultati di Figura 2-16 a parità di portata operativa. Si sottolineano alcune differenze di condizioni operative:

- i valori di portata delle tre condizioni di funzionamento non coincidono esattamente con quelli della scheda tecnica;
- per la presenza dello scambiatore geotermico, la temperatura esterna t_{EST} da catalogo corrisponde invece nel caso studio alla temperatura a valle dello scambiatore t_{GEO} , prossima ma non uguale ad una delle temperature di catalogo (7 vs. 9°C);
- nelle prestazioni a catalogo si prende a riferimento una temperatura ambiente pari a 21°C, mentre nel caso studio, la temperatura ambiente t_{AMB} non è costante nel tempo ma varia nell'intorno del set-point richiesto dall'utente (21.5°C).

Tabella 3 Confronto tra le prestazioni media reali (in blu) e le prestazioni di targa (in nero) dell'unità Compact P durante la stagione invernale.

Q	[m ³ /h]	100			180			220		
t_{AMB}	[°C]	21			21			21		
t_{EST}	[°C]	7	2	-7	7	2	-7	7	2	-7
COP targa		2.23	2.16	2.04	3.10	2.77	2.15	3.62	3.21	2.20

Q	[m ³ /h]	129			202			239		
t_{AMB}	[°C]	21.5			21.5			21.5		
t_{GEO}	[°C]	9	-	-	9	-	-	9	-	-
COP		2.51	-	-	3.56	-	-	3.74	-	-

Un primo confronto tra i dati reali (in blu in Tabella 3) e quelli di targa (in nero in Tabella 3) evidenzia una sostanziale aderenza delle prestazioni reali con quelle attese. Al fine di verificare una possibile influenza della diversa portata di funzionamento sull'accuratezza del confronto, si sono analizzati i valori reali e di targa in funzione della portata, riportandoli nel grafico di Figura 2-17.

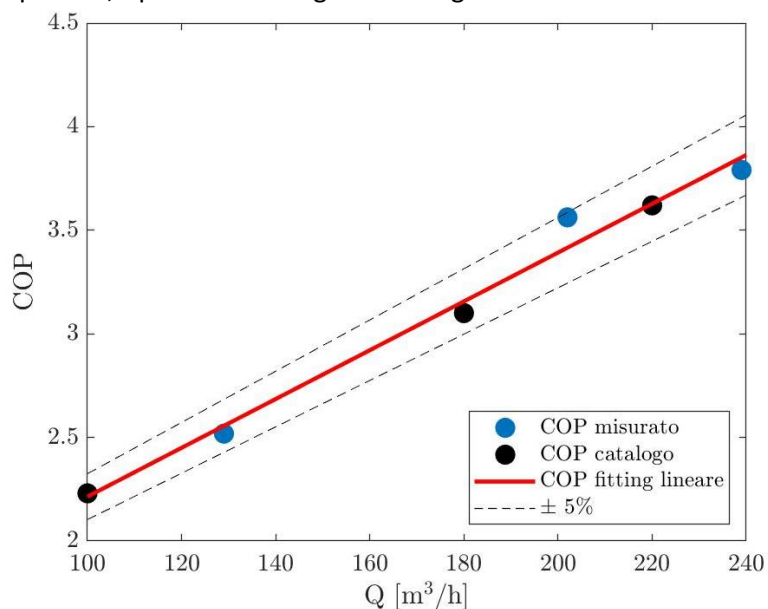


Figura 2-17 Andamento COP di targa e misurato in funzione della portata.

I valori di COP, determinati a partire dai dati di monitoraggio, non si discostano più del 5% dal riferimento rappresentato dai dati di targa e, alla luce delle ipotesi necessarie per la modellazione, confermano le prestazioni di targa.

E' comunque interessante osservare come la presenza del sistema di monitoraggio abbia consentito da un lato di determinare valori adeguati degli indici prestazionali della macchina in condizioni operative reali e dall'altro di apprezzare come la variabilità di alcune condizioni operative (ad esempio le portate di funzionamento) possa influenzare tali indici prestazionali. Nonostante, infatti, la presenza dello scambiatore geotermico consenta di annullare molti fattori variabili di influenza (primo fra tutti la temperatura esterna), l'operatività di una macchina in condizioni reali presenta sempre una certa variabilità che può essere ben catturata da un sistema di monitoraggio, aspetto questo che emergerà in modo ancora più evidente nei risultati in fase di raffrescamento.

2.4.2 Prestazioni in fase di raffrescamento

Nella stagione estiva, ovvero a partire dal mese di giugno fino ad agosto, non è più presente l'accoppiamento con il mantenimento di ACS in quanto la modalità di raffrescamento prevede sempre un doppio effetto utile, ma separato tra condensatore ed evaporatore. Soltanto in caso di produzione prioritaria di ACS, l'unità è funzionante senza produrre effetto raffrescante nei confronti dell'aria. Per identificare questa situazione, in analogia a quanto fatto per la fase di riscaldamento, si è imposto un criterio di soglia di EER pari a 1: al di sotto di tale soglia, la potenza elettrica consumata dal Compact P è attribuita alla produzione prioritaria di ACS. Al contrario della situazione di riscaldamento, il regime di ventilazione è unico e pari a quello massimo con portata d'aria di rinnovo che si attesta attorno ai 239 m³/h. Risulta quindi un unico possibile scenario di comparazione con le prestazioni di targa (Tabella 4).

Il confronto ha però evidenziato fin da subito due problematiche. In primo luogo, i valori di targa fanno riferimento a condizioni di temperatura esterna $t_{EST} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ decisamente diverse rispetto a quelle del caso studio, in cui, grazie alla presenza dello scambiatore geotermico, l'aria in ingresso al Compact P ha sempre una temperatura inferiore ai 24°C (Figura 2-5). In secondo luogo, si è riscontrata una notevole influenza dell'umidità relativa UR, che nei dati di targa è pari al 60% (Tabella 4).

Tabella 4 Prestazioni di targa dell'aggregato compatto durante la stagione estiva

Q	[m ³ /h]	180			220			320		
t_{AMB}	[°C]	24			24			24		
UR	[%]	60			60			60		
t_{EST}	[°C]	40	35	30	40	35	30	40	35	30
EER targa		2.26	2.50	2.66	2.60	2.83	3.37	2.74	2.98	3.47

Ne consegue che il dato medio di EER (2.70 per una portata pari a 239 m³/h, ottenuto come media complessiva dei dati con risoluzione di 5 minuti), determinato senza tenere conto dell'umidità relativa UR effettiva in condizioni di immissione e della minore temperatura dell'aria all'ingresso del compact P in presenza dello scambiatore, non può essere direttamente confrontato con i dati di targa. Si è quindi resa necessaria un'ulteriore analisi dei dati disponibili per riuscire a valutare in modo più corretto le prestazioni e, quindi, poterle comparare a quelle dichiarate dal produttore dell'unità.

Il sistema di monitoraggio del caso studio fornisce, come unico parametro di umidità, i valori di umidità relativa esterna, ma per valutare correttamente le prestazioni si rende necessario tenere conto dell'azione deumidificante dei vari componenti attraverso cui l'aria esterna fluisce prima della sua immissione nell'ambiente interno.

Per fare questo, le temperature nei vari punti del ciclo sono state confrontate con quella di rugiada di riferimento (ad ogni step di calcolo dell'algoritmo, per i mesi estivi), adottando nell'analisi il seguente criterio: se la temperatura in esame risulta inferiore a quella di rugiada, l'umidità relativa viene imposta pari al 99%, ovvero si ipotizza che l'aria sia quasi in condizioni di saturazione. È quindi possibile determinare

l'azione deumidificante di ciascun componente per differenza di umidità assoluta tra le rispettive condizioni di ingresso e uscita.

Si è proceduto quindi a verificare l'umidità relativa dell'aria immessa nelle condizioni riportate nei dati di targa. Per fare questo, a partire dalla temperatura di riferimento ambiente (24°C in Tabella 4), dal dato fornito di potenza termica del recuperatore passivo e dalla temperatura esterna di riferimento, si stima la temperatura dell'aria t_{ESP} all'uscita del recuperatore passivo, una volta ricavata la relativa entalpia h_{ESP} come segue:

$$h_{ESP} = h_{AMB} + \frac{P_{PASS}}{\rho_{EST-AMB} \cdot Q}$$

Si può di conseguenza stimare l'efficienza del recuperatore:

$$\varepsilon^* = \frac{t_{ESP} - t_{AMB}}{t_{EST} - t_{AMB}}$$

Noto il valore di efficienza, si determina la temperatura dell'aria di rinnovo, dopo il passaggio nello scambiatore passivo:

$$t_{PASS} = \varepsilon^*(t_{AMB} - t_{EST}) + t_{EST}$$

Tale valore non deve risultare inferiore alla temperatura di rugiada per poter essere realistico e, quindi, in tale situazione, si confermerebbe la necessità di imporre all'aria condizioni di saturazione. In questo caso, a partire dall'entalpia dell'aria di rinnovo dopo il passaggio nel recuperatore, ottenuta come:

$$h_{PASS} = h_{EST} - \frac{P_{PASS}}{\rho_{EST-AMB} Q_{IMM}}$$

e ipotizzando UR pari al 99%, si ricava la temperatura dell'aria di rinnovo.

La potenza termica dello scambiatore passivo è determinabile lato espulsione in quanto non è presente deumidificazione, sempre tramite il valore dell'efficienza stimata da scheda tecnica.

Tale procedura, applicata ai dati di targa, ha confermato condizioni di aria satura immessa nell'ambiente.

Questa procedura viene utilizzata anche per simulare l'azione dello scambiatore passivo nel caso senza scambiatore geotermico, analisi riportata in seguito (sezione 2.5).

Nell'ottica di effettuare un confronto tra le prestazioni di targa e quelle reali, grazie all'analisi precedentemente descritta risulta possibile valutare l'azione deumidificante dei vari componenti della macchina. È importante a questo proposito ricordare che la presenza dello scambiatore geotermico complica il confronto, in quanto nella stagione estiva garantisce una temperatura dell'aria di rinnovo che non richiede mai l'operatività del recuperatore passivo.

Si riportano in Figura 2-18a i valori di EER determinati per i vari punti operativi misurati durante la stagione estiva, in funzione dell'umidità specifica x_{GEO} [kg_v/kg_a] dell'aria a valle dello scambiatore geotermico.

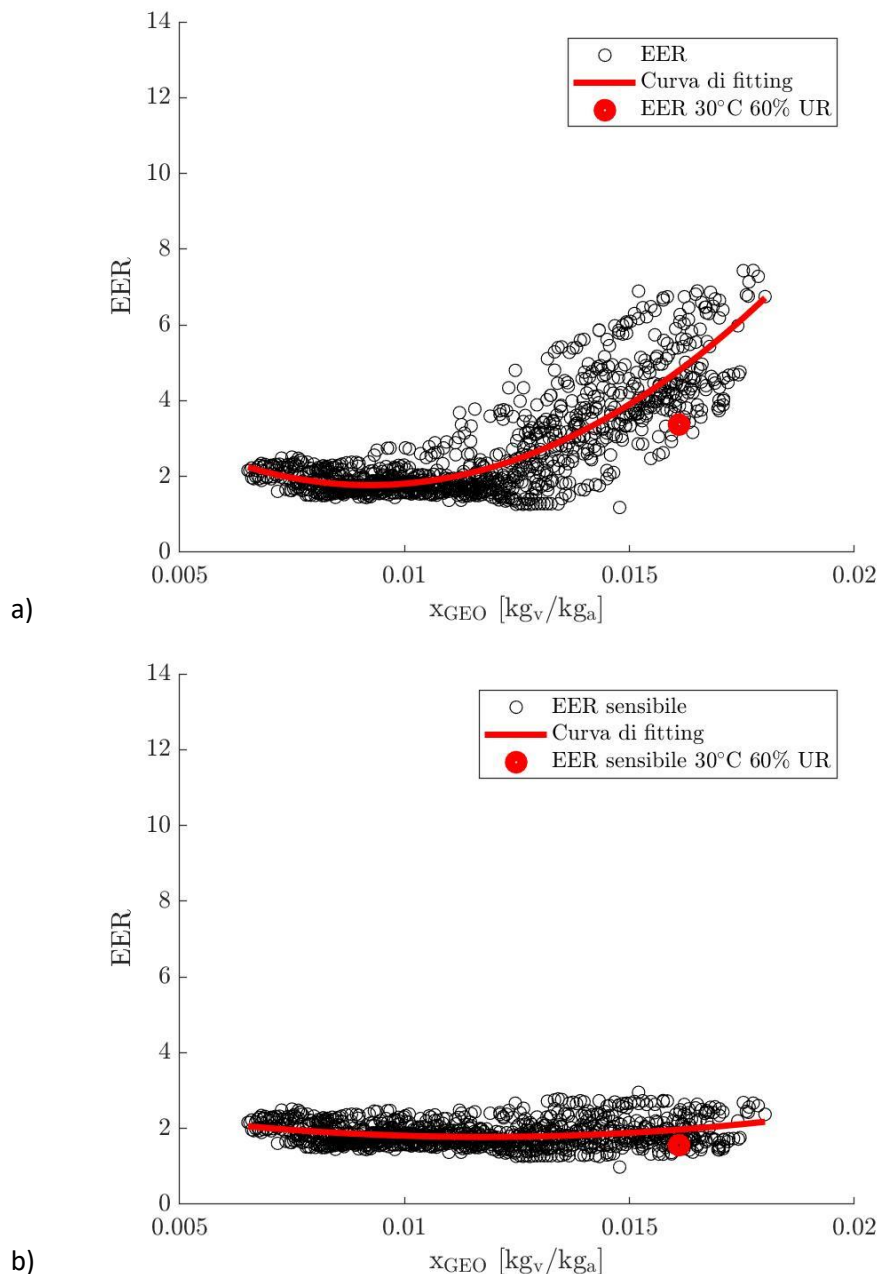


Figura 2-18 EER dei vari punti operativi della stagione estiva in funzione dell'umidità specifica a valle dello scambiatore geotermico. In rosso è riportata la curva di fitting polinomiale del secondo ordine e il punto relativo alle prestazioni di targa (temperatura esterna di 30°C ed umidità relativa del 60%): a) EER complessivo; b) EER sensibile (senza il contributo di calore latente di deumidificazione)

L'analisi condotta evidenzia una chiara dipendenza dell'EER dalle condizioni di umidità dell'aria, oltre che, in misura minore, dalla temperatura esterna. La conferma di tale influenza si può vedere in Figura 2-18b, che presenta i valori di EER calcolati trascurando il contributo di calore latente legato al processo di deumidificazione.

Il confronto tra i due grafici relativi all'EER (Figura 2-18) consente alcune considerazioni.

In primo luogo, si può osservare come la banda di dispersione dei dati si riduce quando si decurta il contributo del calore latente (EER vs. EER sensibile). La motivazione principale è rappresentata dall'incertezza relativa all'analisi del processo di deumidificazione nei vari componenti, incertezza che viene ridotta considerando il solo contributo di asportazione di calore sensibile.

Nonostante la dispersione dei dati, si può comunque osservare una chiara dipendenza dell'EER dall'umidità specifica ed in particolare per valori di umidità specifica superiori a $0.012 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$ con una tendenza approssimata tramite una curva polinomiale di secondo grado (curva rossa in Figura 2-18).

Una volta evidenziata la dipendenza dell'EER dall'umidità, diventa possibile effettuare un confronto tra le prestazioni reali e quelle di targa dell'aggregato compatto.

In particolare, in Figura 2-18a, viene riportato in rosso il dato di targa relativo alle condizioni più prossime a quelle in esame (EER=3.37 per temperatura esterna di 30°C ed umidità relativa del 60%). Il dato si trova nella banda di dispersione dei valori reali ed in particolare nella zona di valori di EER più bassi della curva di fitting (a cui corrisponde un EER pari a 4). La differenza tra il valore sperimentale e quello di targa è imputabile alla diversa temperatura di riferimento all'ingresso dell'aggregato compatto. Nel caso infatti delle prestazioni di targa si considera una temperatura dell'ambiente esterno pari a 30°C, mentre nel caso studio, la presenza dello scambiatore geotermico limita il valore di temperatura di ingresso a valori mai superiori a 24-25°C. Interpolando i dati di targa al variare della temperatura esterna, si può osservare come l'EER aumenta progressivamente al diminuire della temperatura esterna e che per una temperatura di 25°C sono attesi valori dell'EER superiori a 4 (Figura 2-19).

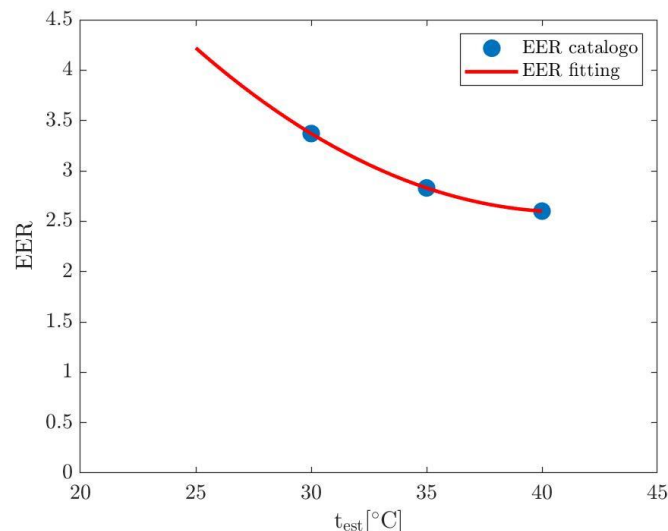


Figura 2-19 Andamento delle prestazioni di targa (EER) dell'aggregato compatto al variare della temperatura esterna

Sebbene quindi il caso studio operi in una zona climatica non particolarmente sollecitata in fase di raffrescamento, è comunque possibile dimostrare come, anche in questa fase, le prestazioni dichiarate dal produttore dell'aggregato compatto siano in linea con quelle effettivamente misurate in condizioni operative reali.

2.5 Confronto delle prestazioni con e senza scambiatore geotermico

L'analisi effettuata nel caso studio in esame ha evidenziato un'ottima aderenza delle prestazioni in condizioni operative reali con quelle di targa. Si è avuto tuttavia modo di sottolineare più volte come lo scambiatore geotermico posto a monte della macchina giochi un ruolo fondamentale nell'ottimizzare le prestazioni della stessa. Tale scambiatore, infatti, garantisce una temperatura dell'aria pressoché costante all'ingresso dell'aggregato compatto consentendogli di operare in condizioni prossime a quelle ottimali. Pur essendo evidente il contributo benefico di tale componente, la sua presenza non consente di valutare l'influenza di condizioni esterne (normalmente, variabili) sulle prestazioni del Compact P.

Per valutare tale influenza non solo sulle prestazioni della macchina ma anche sul computo complessivo dei consumi di tutto l'impianto di trattamento dell'aria e produzione di acqua calda sanitaria, si sono implementati dei modelli in grado di simulare il comportamento dell'impianto in assenza di tale componente. Nel caso senza scambiatore geotermico, l'analisi viene condotta allo stesso modo, bypassando tale componente, ovvero considerando l'aria esterna come condizione di ingresso nel

recuperatore passivo (senza by-pass). Nel paragrafo che segue (2.5.1) vengono illustrate le curve utilizzate per stimare le prestazioni istantanee dei componenti. L'analisi viene realizzata calcolando ogni 5 minuti ogni parametro di funzionamento del sistema, utilizzando le equazioni per il calcolo delle potenze, le curve di fitting e le stime per quanto riguarda la deumidificazione, come descritto in precedenza.

2.5.1 Curve di funzionamento utilizzate per simulare le prestazioni

Dopo aver confrontato i risultati ottenuti dall'analisi dei dati reali con quelli di targa, vengono ricavati gli andamenti tipici della potenza del compressore, del COP e dell'efficienza del recuperatore in funzione delle condizioni esterne. I valori di COP vengono opportunamente corretti in base alla differenza tra i valori medi misurati per ciascun regime di portata e il dato di targa, in modo da ottenere una stima più accurata possibile a quella in condizioni reali. In particolare, i trend di COP per le portate pari a 100, 180 e 220 m³/h vengono adattati ai valori di portata del caso studio in esame, pari a 129, 202 e 239 m³/h.

Si riportano in Figura 2-20 le curve interpolanti utilizzate per simulare le condizioni operative in assenza dello scambiatore geotermico, in funzione della temperatura esterna, come precedentemente descritto per l'efficienza del recuperatore. In questo caso i dati sono già riportati nella scheda tecnica e vengono utilizzati solamente per ricavare la curva di fitting polinomiale del primo ordine, a cui – nel caso del COP – è stato applicato un fattore correttivo pari alla differenza del COP medio misurato e quello di targa, per tenere conto delle condizioni di portata operative reali diverse da quelle di catalogo.

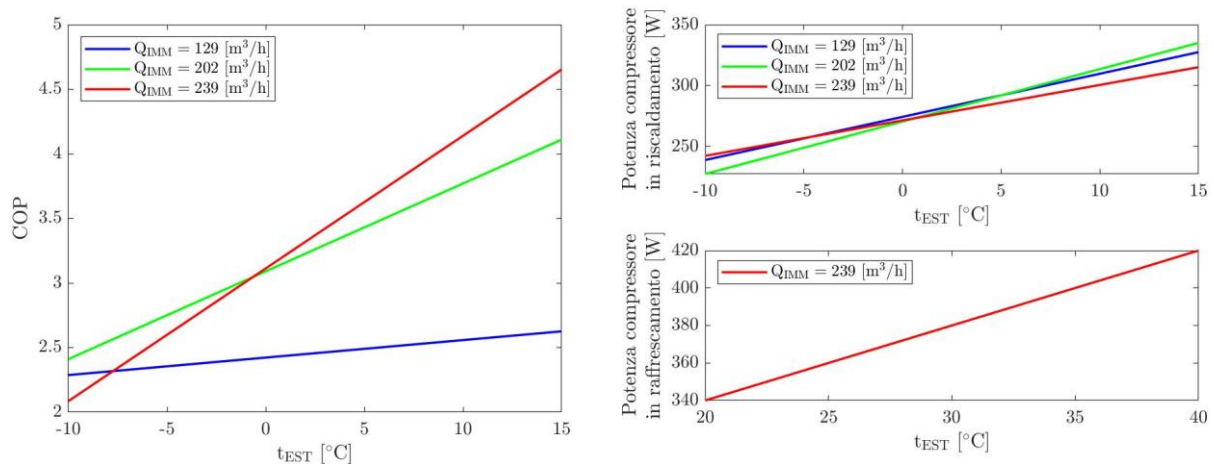


Figura 2-20 COP e potenza assorbita dal compressore in condizioni di riscaldamento e raffreddamento al variare della portata: andamenti ricavati dai dati di targa opportunamente corretti per tenere conto delle diverse portate di funzionamento

L'efficienza del recuperatore passivo è ricavata in accordo con gli andamenti riportati in Figura 2-14.

L'EER invece risulta di una più complessa interpolazione che segue la curva di fitting riportata nella Figura 2-18, relativa al grafico di sinistra. A partire dall'input di umidità assoluta si può ricavare una stima dell'EER in base alle condizioni esterne. La dipendenza dalla temperatura in questo caso viene meno, ma essendo molto ampia la banda di incertezza relativa alla deumidificazione ed essendo poco descritto il funzionamento nel range di temperature effettive del caso presente, risulta preferibile un approccio di simulazione che preveda la possibile azione deumidificante della macchina.

2.5.2 Confronto tra prestazioni e consumi in presenza ed in assenza dello scambiatore geotermico

Al fine di condurre un'analisi realistica di confronto tra le due situazioni in esame, si rende necessario attuare alcune ipotesi ed assunzioni relative alle condizioni operative di funzionamento della macchina e alle condizioni dell'ambiente.

In primo luogo, le condizioni di immissione vengono assunte inalterate rispetto ai dati forniti dal sistema di monitoraggio, in modo tale da avere la certezza che le condizioni interne dell'ambiente e quindi di comfort

risultassero le medesime in entrambi i casi. Questa scelta dipende anche dal fatto che le condizioni interne e, quindi, di espulsione dell'aria esausta influenzano significativamente le prestazioni della macchina, soprattutto se si pensa al funzionamento in recupero passivo del calore. L'unico parametro lasciato libero è l'umidità assoluta in ingresso durante la stagione estiva, vista la mancanza di una misura.

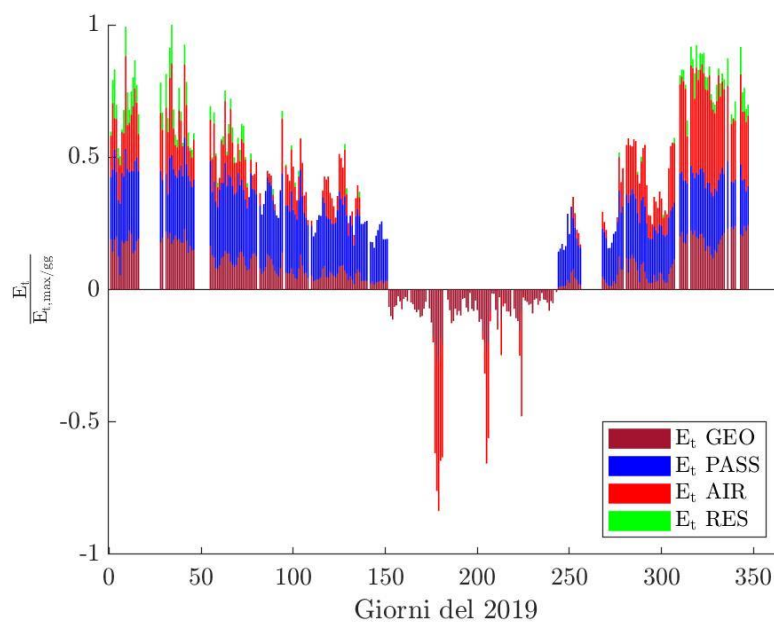
Per effettuare il confronto, nel caso di simulazione senza scambiatore geotermico, i dati, relativi all'anno monitorato, vengono analizzati utilizzando lo stesso modello del caso con scambiatore ma imponendo, come temperatura e umidità dell'aria all'ingresso della macchina, le condizioni esterne al posto di quelle in uscita dallo scambiatore geotermico.

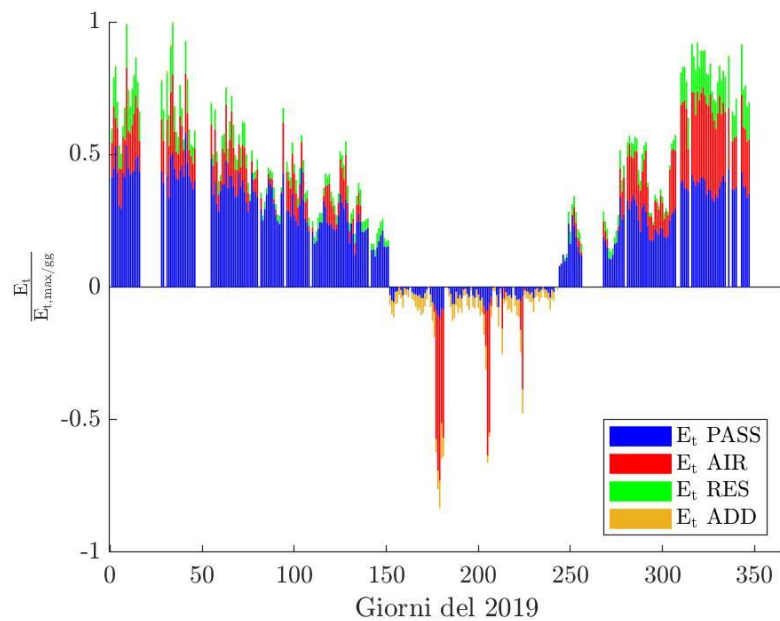
In relazione alla temperatura dell'aria esterna si calcolano quindi tutti i parametri di funzionamento descritti in precedenza, quali: COP in fase di riscaldamento, EER in fase di raffreddamento, potenza elettrica consumata dal compressore e efficienza del recuperatore passivo.

Per definire i momenti di intervento della resistenza elettrica di post riscaldamento, si fissa un valore di soglia pari a 200 W di potenza assorbita dal compressore. Per valori di potenza assorbita inferiori a tale soglia, si esclude il funzionamento attivo della macchina e si attribuisce il soddisfacimento di quel fabbisogno alla sola resistenza elettrica di post riscaldamento nella fase invernale. Durante la fase estiva invece, nel caso in cui la potenza della resistenza non risulti sufficiente a coprire la richiesta, si ipotizza la presenza di una generica potenza termica aggiuntiva.

Il consumo elettrico dovuto alla ventilazione meccanica controllata e alla produzione di acqua calda sanitaria viene imposto uguale in entrambe le condizioni, ovvero ammettendo anche lo stesso regime in termini di portata d'aria di rinnovo. Questa scelta garantisce le medesime condizioni in ingresso, dal momento che variare la portata d'aria comporterebbe la modifica delle condizioni ambientali e risulterebbe difficile tenerne conto. La parte relativa al consumo di fondo della resistenza elettrica (che varia tra 8 e 10 W) viene sottratta in entrambi i casi, per non essere contata nell'effetto riscaldante. Questo consumo, a livello annuale si attesta attorno ai 35 kWh (sempre considerando i giorni analizzabili), e andrebbe quindi aggiunto in entrambi i casi al totale consumo elettrico finale.

La Figura 2-21 riporta l'energia termica (valori positivi) e frigorifera (valori negativi) giornaliera prodotta nel 2019 e rapportata al valore massimo giornaliero. Così facendo, l'energia viene adimensionalizzata. In particolare, in figura si evidenziano i vari contributi di energia termica fornita dai vari componenti, considerando lo scambiatore geotermico nel caso reale in esame (Figura 2-21a) ed ipotizzando invece la presenza di un elemento integrativo aggiunto (ADD) nel caso senza scambiatore geotermico (Figura 2-21b).





b)
Figura 2-21 Andamento giornaliero dell'energia termica (valori positivi) e frigorifera (valori negativi) nel corso del 2019: caso reale con scambiatore (a); caso simulato senza scambiatore (b). L'energia è stata adimensionalizzata rispetto al valore massimo di energia giornaliera prodotta nel 2019 e suddivisa in funzione dei vari contributi.

Come si evince dalle Figura 2-21, la richiesta di potenza termica è nettamente superiore nei mesi di riscaldamento rispetto a quelli di raffreddamento, anche se alcuni picchi giornalieri di richiesta nella stagione estiva tendono quasi ad eguagliare i giorni di maggior richiesta in fase di riscaldamento.

Il recuperatore passivo svolge un'azione molto efficace, soprattutto nella stagione invernale, quando le temperature della zona climatica in esame rendono favorevole questo tipo di funzionamento. Il ruolo del recuperatore passivo diventa chiave nel caso senza scambiatore geotermico, in quanto una buona parte del carico aggiuntivo viene ad essere gestito a livello di recuperatore passivo (a destra in Figura 2-21).

Si può anche notare il maggior contributo fornito dalla resistenza elettrica nei giorni invernali, necessaria per aiutare la macchina a coprire i picchi di richiesta, ma anche l'evidente necessità di una potenza termica aggiuntiva nella stagione estiva, per sopperire le richieste dell'utenza. Nella stagione estiva, infatti, il recupero passivo non è sempre sufficiente a garantire le condizioni di immissione richieste, evidenziando la necessità di una potenza termica aggiuntiva per arrivare a soddisfare tali condizioni.

È interessante poi effettuare anche un'analisi di confronto tra i consumi elettrici giornalieri nei due casi (Figura 2-22). Si ricorda che i contributi di VMC e ACS vengono assunti costanti nei due casi.

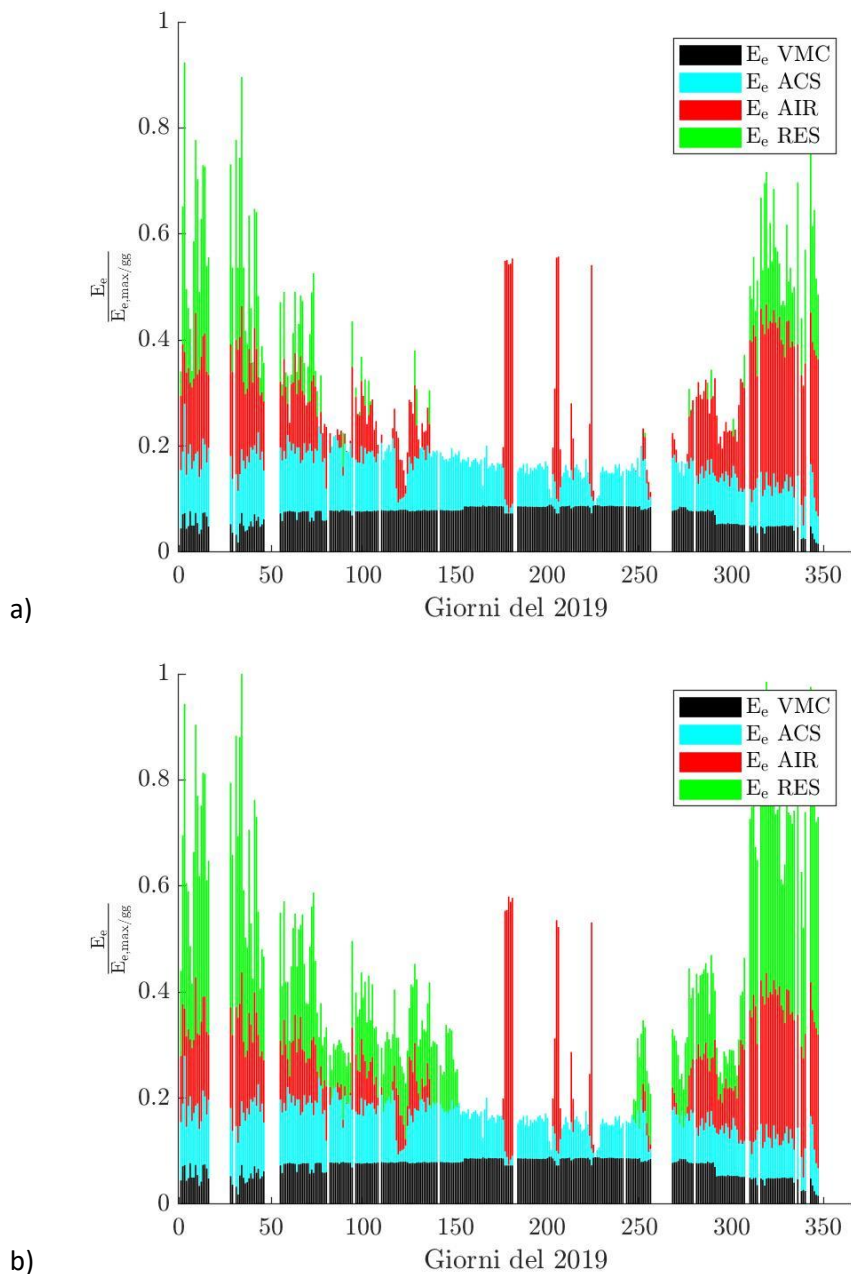


Figura 2-22 Consumo elettrico giornaliero normalizzato suddiviso per tipologia di consumo: caso con scambiatore geotermico (a) vs. caso senza scambiatore (b). I consumi sono stati adimensionalizzati rispetto al valore massimo di consumo giornaliero nel 2019 e suddivisi in funzione dei vari contributi.

Nonostante il notevole contributo di energia termica fornito dal recuperatore passivo (Figura 2-21), i consumi elettrici nella fase di riscaldamento risultano comunque molto superiori nel caso senza scambiatore geotermico e sono imputabili alla resistenza di post-riscaldamento, costretta ad intervenire con maggiore frequenza rispetto al caso con scambiatore.

Nella stagione estiva, i consumi in termini di resistenza non aumentano significativamente. Tuttavia, si sottolinea che non si sono conteggiati i consumi ulteriori derivanti dalla potenza termica aggiuntiva, necessaria al raggiungimento delle condizioni di comfort. Per sopperire a tale necessità, si sarebbe dovuta adottare, nel caso senza scambiatore, una logica di attivazione dell'aggregato compatto più frequente al fine di garantire il mantenimento delle condizioni di comfort, evitando picchi di richiesta. Tale logica avrebbe comunque dato origine ad un aumento complessivo dei consumi, sebbene con una curva più

livellata rispetto all'attuale. Non si è implementata tale logica nel modello per evitare di sfalsare il confronto a seguito della variazione delle condizioni ambiente nelle varie giornate. Le considerazioni sopra riportate sono riassunte in Figura 2-23 e Figura 2-24 dove si riportano i contributi percentuali su base annua rispettivamente delle produzioni termiche e dei consumi elettrici per l'anno 2019 (Tabella 5).

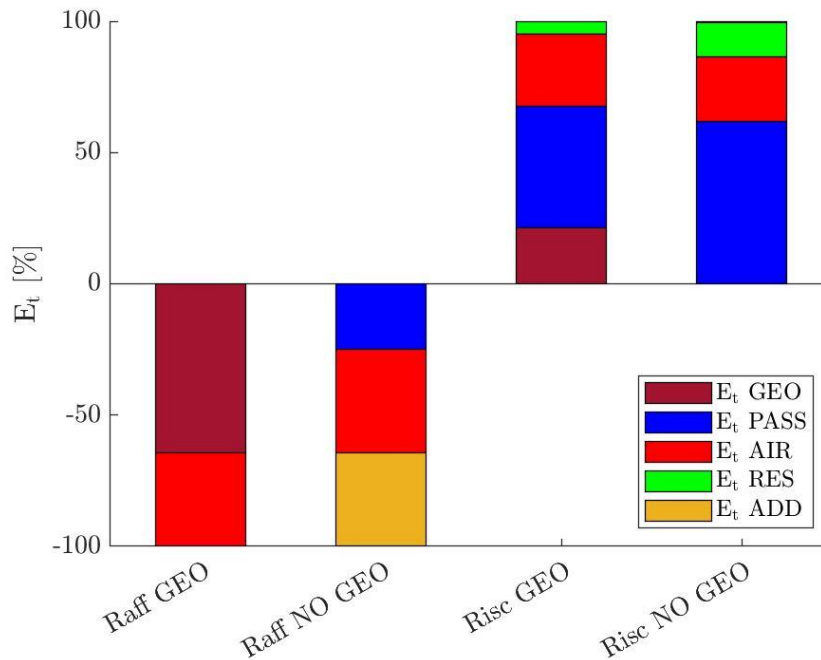


Figura 2-23 Contributi percentuali di energia nelle stagioni di riscaldamento e raffrescamento, con e senza scambiatore geotermico.

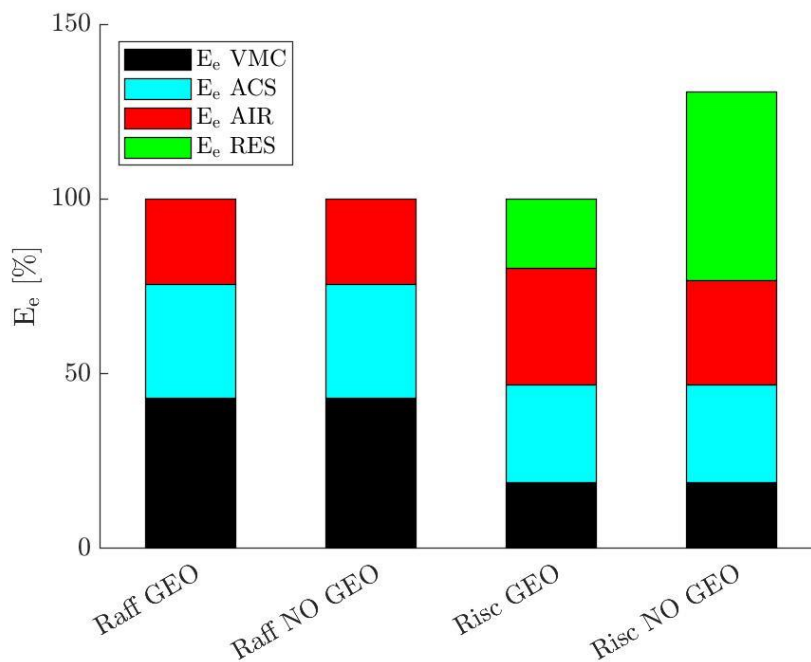


Figura 2-24 Contributi percentuali di consumo elettrico nelle stagioni invernale ed estiva, con e senza lo scambiatore geotermico. Il consumo elettrico è adimensionalizzato rispetto al consumo elettrico totale con scambiatore geotermico.

Tabella 5 Energia termica totale prodotta e energia elettrica consumata nel 2019 suddivisa in contributi percentuali

		Risc. GEO	Risc. NO GEO	Raff. GEO	Raff. NO GEO
$E_{th,TOT}$	[kWh]	5401	5401	-579	-579
$E_{th,GEO} / E_{th,TOT}$	[%]	21.2	-	64.2	-
$E_{th,PASS} / E_{th,TOT}$	[%]	46.4	61.7	0	24.8
$E_{th,AIR} / E_{th,TOT}$	[%]	27.7	24.6	35.8	39.7
$E_{th,RES} / E_{th,TOT}$	[%]	4.7	13.0	0	0
$E_{th,ADD} / E_{th,TOT}$	[%]	-	0.7	0	35.5
$E_{el,TOT}$	[kWh]	1297	1693	307	307
$E_{el,VM} / E_{el,TOT,GEO}$	[%]	19.0	19.0	43.0	43.0
$E_{el,ACS} / E_{el,TOT,GEO}$	[%]	27.8	27.8	32.4	32.4
$E_{el,AIR} / E_{el,TOT,GEO}$	[%]	33.5	29.8	24.6	24.7
$E_{el,RES} / E_{el,TOT,GEO}$	[%]	19.7	54.0	0	0

Il consumo elettrico nella stagione invernale, in assenza dello scambiatore geotermico, aumenterebbe circa del 30%, da 1297 kWh a 1693 kWh. Nella stagione estiva i consumi risultano sostanzialmente inalterati ma non comprendono la quota di consumo imputabile alla quota di energia termica mancante.

Anche se i dati riportati non si riferiscono al totale, in quanto un 12.6% dei dati è risultato impossibile da analizzare a causa di malfunzionamento del sistema di monitoraggio, i consumi nel caso senza scambiatore geotermico porterebbero l'abitazione ad oltrepassare la soglia massima per la certificazione di casa passiva nell'ipotesi di medesima soluzione impiantistica e assenza di generico assorbimento elettrico per la produzione di energia termica di raffrescamento.

2.6 Confronto economico con una soluzione tradizionale

Un interessante confronto in termini puramente economici può emergere analizzando la spesa da sostenere nel caso in cui il sistema di condizionamento dell'aria sia tradizionale, ovvero costituito da una caldaia a condensazione per il riscaldamento e da un climatizzatore per il raffrescamento estivo.

Come riferimento si può prendere una caldaia con rendimento a potenza nominale pari a 0.914, e un climatizzatore il cui EER sia pari a 3.22. Assunto un potere calorifico superiore del gas naturale di 39.5 MJ/Sm³, nota la richiesta termica dell'abitazione dai dati di monitoraggio, si può stimare quale siano il consumo di gas e il consumo di energia elettrica atti a soddisfare il carico richiesto. Una volta stimati i consumi, tramite i prezzi riportati in Tabella 6, risulta possibile comparare le diverse soluzioni dal punto di vista economico.

Tabella 6 Prezzo dell'energia elettrica e del gas naturale ogni trimestre del 2019, utilizzato per effettuare le valutazioni economiche (valori da <https://www.arera.it/it/dati/aggtrim.htm>).

		Gen-Feb-Mar	Apr-Mag-Giu	Lug-Ago-Set	Ott-Nov-Dic
Costo energia elettrica	[€/Sm ³]	0.2174	0.1990	0.2027	0.2081
Costo gas naturale	[€/kWh]	0.8495	0.7650	0.7122	0.7396

Il presente confronto ha coinvolto solo il trattamento dell'aria per il periodo di funzionamento del sistema di monitoraggio nel corso del 2019. I risultati presentati quindi non coinvolgono la produzione di ACS e non comprendono il 12.6% dei dati non completi relativi ai periodi di inattività dell'aggregato compatto.

A partire dal dato di potenza termica registrato per lo scambiatore geotermico, lo scambiatore passivo, il sistema attivo del Compact P e la resistenza elettrica di post-riscaldamento, si determina il fabbisogno di energia termica dell'abitazione per il trattamento dell'aria per ciascun mese dell'anno considerato. Il consumo di energia elettrica per il trattamento dell'aria viene calcolato mensilmente in maniera analoga dal dato di potenza elettrica assorbita.

Ricavato il fabbisogno termico, si procede al calcolo della quantità di gas naturale necessaria al riscaldamento per ogni mese, tramite la seguente relazione:

$$m_{gas} = \frac{E_t}{H \cdot \eta_{cald}}$$

dove m_{gas} è la quantità di gas necessaria, espressa in Sm^3 , E_t è l'energia termica richiesta (in kWh), H è il potere calorifico superiore del gas (in kWh/ Sm^3) e η_{cald} è il rendimento della caldaia a condensazione. Noto il consumo di gas, risulta quindi possibile risalire alla spesa complessiva mediante il costo specifico riportato precedentemente in Tabella 6.

Per quanto riguarda i consumi estivi, tramite la definizione di EER del climatizzatore si possono stimare i consumi di energia elettrica, E_e :

$$E_e = - \frac{E_t}{EER}$$

Noti tali consumi, sia per l'impianto reale che per l'ipotetico climatizzatore, la spesa di energia elettrica si ricava dai costi specifici bimestrali:

$$C_e = E_e \cdot c_e$$

dove E_e è l'energia elettrica consumata espressa in kWh e c_e risulta essere il costo specifico dell'energia elettrica stessa.

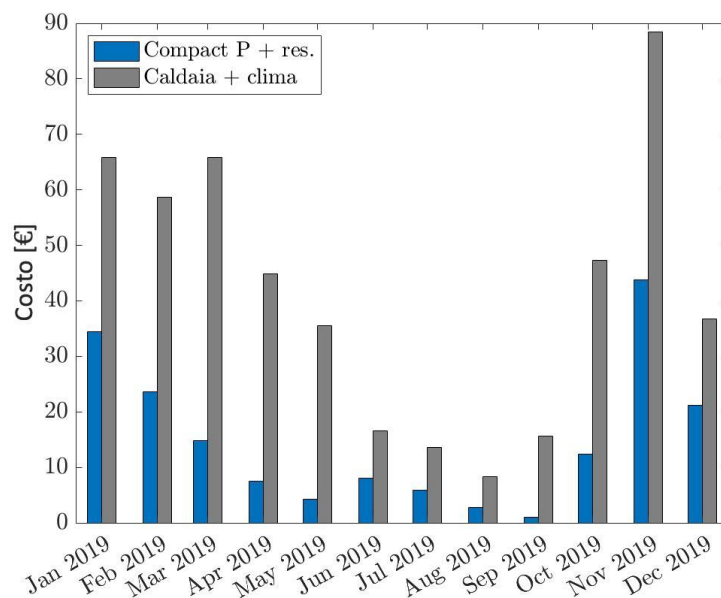


Figura 2-25 Confronto fra le soluzioni per il trattamento dell'aria in termini di costo mensile.

Figura 2-25 mostra come la soluzione tradizionale sia decisamente la più onerosa, sia per il periodo di riscaldamento che per quello di raffrescamento. Questo è dovuto sia alla maggiore efficienza del sistema studiato e installato nell'abitazione ma anche al costo del gas naturale, che nei mesi invernali risulta decisamente elevato. In termini di riscaldamento, il caso studio è sicuramente penalizzato dalla zona climatica, in cui il riscaldamento è necessario per la maggior parte dell'anno.

La presenza di elementi di recupero del calore quali lo scambiatore geotermico e il recuperatore passivo favoriscono ulteriormente l'attuale soluzione impiantistica anche dal punto di vista del risparmio di energia elettrica. I costi complessivi risultano essere pari a 497.33 €/anno per quanto riguarda il sistema tradizionale, mentre pari a 179.76 €/anno per il sistema Compact P con resistenza integrativa (con riferimento al solo trattamento dell'aria), quasi 3 volte inferiori quindi al sistema tradizionale considerato.

3 Caso studio 2

Il secondo caso studio preso in esame considera due edifici gemelli siti in provincia di Verona, località appartenente alla zona climatica E (2371 GG). I due edifici in origine appartenevano al complesso Corte Cavalli mentre oggi sono separati da una via e denominati rispettivamente Corte Veronica e Corte Sara (Figura 3-1).



Figura 3-1 A sinistra foto del complesso Corte Veronica, a destra foto del complesso Corte Sara

Entrambi gli edifici sono stati edificati nel 2008 e ospitano ciascuno 57 appartamenti disposti su 3 livelli e su 6 scale. La peculiarità del caso studio sta nel fatto che, a seguito del malfunzionamento del gruppo frigorifero dedicato alla climatizzazione estiva dell'edificio Corte Veronica, l'assemblea condominiale ha avallato la loro sostituzione con due pompe di calore. Tali unità, oltre ad asservire al raffrescamento estivo, sono abilitate a svolgere funzione di riscaldamento nel periodo invernale, sostituendo le caldaie quando la temperatura esterna risulti superiore ai 2°C; temperatura di soglia selezionata dai gestori dell'impianto in base sia ai dati tecnici delle macchine installate che le indicazioni fornite del produttore delle stesse. In entrambi gli edifici, la centrale frigorifera e quella termica sono collocate in posizioni separate su due torri dedicate come si mostra da Figura 3-2. Si precisa che la torre ospitante la centrale termica è chiusa ed accoglie le due caldaie a gas naturale ed i relativi sistemi di accumulo mentre, nella torre priva di copertura trovano alloggio le pompe di calore nel caso di Corte Veronica ed i gruppi frigoriferi nel caso di Corte Sara.



Figura 3-2 Sulla sinistra foto di una delle torri sulle quali sono situate le unità adibite al raffrescamento, sulla destra foto di una delle torri chiuse e contenenti la centrale termica.

L'adiacenza dei due edifici, la medesima destinazione d'uso e la presenza di impianti di riscaldamento speculari sono caratteristiche difficilmente riscontrabili in altre soluzioni abitative esistenti e, quindi, questo caso studio rappresenta una possibilità unica di porre a confronto i sistemi di riscaldamento e raffrescamento tradizionali e i sistemi full-electric (sebbene ibridati). Inoltre, il confronto tra le soluzioni impiantistiche disponibili in Corte Veronica con quelle di Corte Sara consente di valutare i reali vantaggi delle tecnologie installate sia nella fase di integrazione/supporto dell'unità caldaia che nella stagione di raffrescamento estivo unitamente a costituire un'opportunità di test di nuove strategie ottimizzate di gestione.

Ovviamente, essendo gli impianti in uso dal 2008, per consentire il monitoraggio dei parametri di impianto di entrambi gli edifici necessari per condurre l'analisi prestazionale, si è reso necessario progettare ed installare sull'impianto esiste un opportuno sistema di monitoraggio. In seguito, si riassume sia la struttura degli impianti dei due edifici che la strumentazione installata.

3.1 Struttura dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento e relativo sistema di monitoraggio

L'impianto di riscaldamento installato in Corte Veronica prevede il sistema di distribuzione di tipo idronico riportato in Figura 3-3.

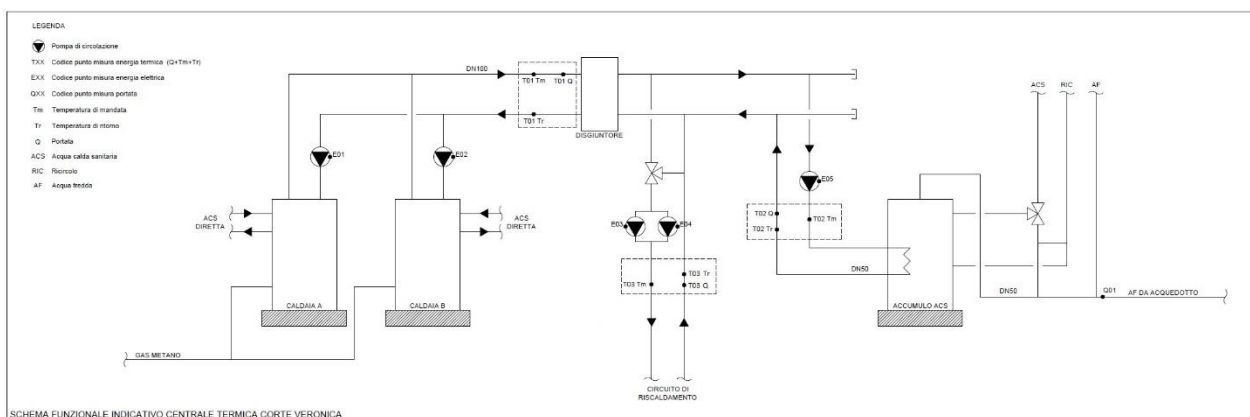


Figura 3-3 Schema funzionale dell'impianto di riscaldamento del condominio Corte Veronica

Come introdotto in precedenza, esso si compone di:

- 2 caldaie ACV da 218 kW ciascuna (Figura 3-4);
- 1 disgiuntore (Figura 3-4);
- 1 produttore sanitario rapido tank in tank ACV (capacità totale 800 L, capacità utile 263 L con superficie di scambio pari a 2.65 m²) (Figura 3-5).

Dal serbatoio si diparte il circuito di ACS e il ricircolo. L'acqua fredda proveniente dall'acquedotto viene quindi smistata tra serbatoio e distribuzione diretta. I circolatori presenti sono:

- un gruppo circolatore gemellare per il circuito di riscaldamento;
- un circolatore per lo scambio caldaia-bollitore;
- un circolatore per ricircolo sanitario;
- 2 circolatori primari per il circuito caldaia-disgiuntore.

Il sistema di produzione dell'acqua calda basato sul tandem di caldaie a gas naturale è stato successivamente integrato con 2 pompe di calore di tipo Daikin modello EWAYQ064CWP (Figura 3-5) caratterizzate da una potenza termica nominale pari a 64 kW ciascuna (Tabella 3.1). Le due pompe di calore sono posizionate sulla torretta aperta di Corte Veronica e si collegano all'impianto esistente mediante lo schema riportato in Figura 3-6.

Attualmente, le due pompe di calore forniscono il raffrescamento durante il periodo estivo ed il riscaldamento durante il periodo invernale. Le caldaie vengono considerate integrative e subentrano alle pompe di calore quando la temperatura esterna scende al di sotto di 2°C. La scelta della temperatura di “switch” tra i due sistemi di riscaldamento non è stata basata su considerazioni tecno-economiche ma semplicemente fissata basandosi su considerazioni pratiche disponibile nel manuale tecnico delle macchine e sulle indicazioni del produttore delle macchine.



Figura 3-4 A sinistra foto della caldaia ACV, a destra foto del disgiuntore



Figura 3-5 A sinistra foto del serbatoio tank in tank ACV, a destra foto di una delle due pompe di calore Daikin posizionate sulla torretta aperta

Tabella 3.1 Parametri prestazionali principali delle pompe di calore Daikin installate

DAIKIN				EWYQ064CAWP
Capacità di raffrescamento	Nom.	kW	63.3	
Capacità di riscaldamento	Nom.	kW	62.7	
Controllo della capacità	Metodo	Controllo ad Inverter		
	Capacità minima	%	25	
Potenza assorbita	Raffrescamento	Nom. kW	25.5	
	Riscaldamento	Nom. kW	21.4	
EER				2.48
COP				2.93
ESEER				4.05
Scambiatore di calore refrigerante/acqua	Tipo	Piastra saldobrasata		
	Portata acqua	Min.	l/min	72

	Volume acqua	l	9
Scambiatore calore aria	Tipo		Air cooled coil
Ventilatore	Pressione statica esterna	Max. Pa	78
Compressore	Quantità		6
	Tipo di compressore		Compressore ermetico Scroll
Refrigerante	Tipo		R-410A
	GWP		2,087.5

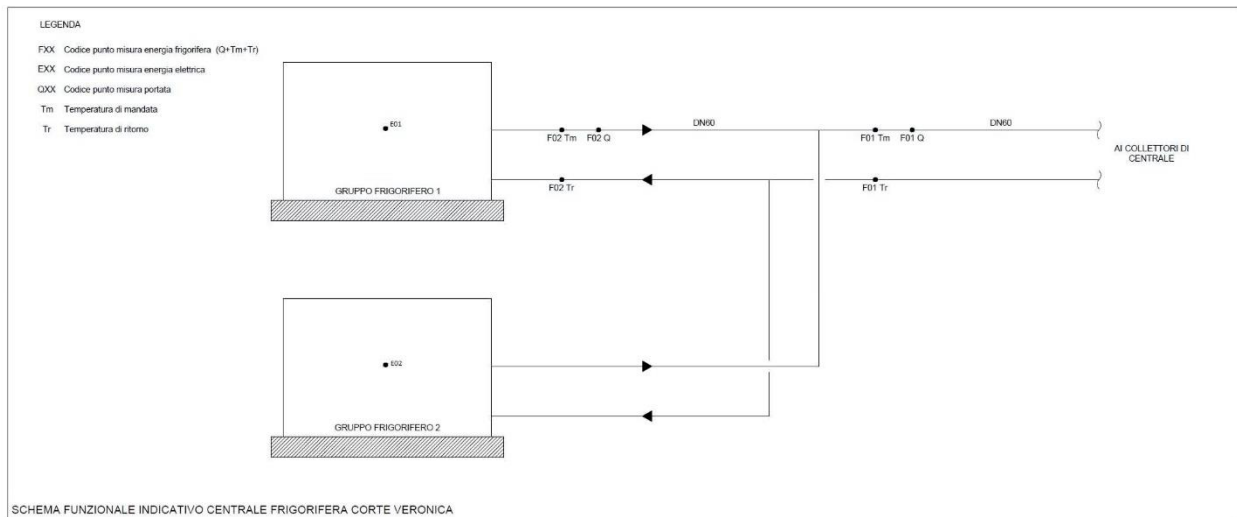


Figura 3-6 Schema funzionale della centrale frigorifera del condominio Corte Veronica

Con il fine di valutare in maniera accurata le prestazioni sia delle caldaie che delle pompe di calore installate presso Corte Veronica, si è deciso di monitorare, in primo luogo, i consumi di energia elettrica e la produzione di energia termica di ciascuna delle due pompe di calore. A questo scopo quindi si sono installati 2 contacalorie (F01 ed F02 di Figura 3-6) e 2 contaenergia elettrica (E01 ed E02 di Figura 3-6). A causa degli spazi ridotti della torretta si è scelto di monitorare l'energia termica della pompa di calore n. 1 e il complessivo così da determinare per differenza l'energia termica prodotta della pompa di calore n. 2. Dal momento che le caldaie a gas non vengono utilizzate solo per la produzione di acqua calda sanitaria ma intervengono anche a supporto delle pompe di calore nella fornitura di energia termica per il riscaldamento, si è dovuto prevedere un sistema di monitoraggio in grado di acquisire in modo dettagliata le seguenti grandezze:

- consumi di gas metano delle caldaie A e B (Figura 3-3) e la relativa produzione di energia termica (T01 di Figura 3-3). Note le caratteristiche tecniche delle caldaie, risulterà così possibile valutare: i) i consumi puntuali delle stesse, ii) i profili di funzionamento, iii) le prestazioni delle stesse poiché sono note sia le portate di metano che la potenza termica fornita al fluido grazie alle misure di portata e temperatura nei vari rami del circuito acqua.
- consumi di energia elettrica dei circolatori sia del circuito principale che dei circuiti secondari (E01-E05 di Figura 3-3) nonché le portate e temperature di mandata e ritorno dei circuiti secondari (T02 e T03 di Figura 3-3), per determinare il calore scambiato al passaggio nel circuito di riscaldamento e nel serbatoio di ACS. Tali misure consentono infatti di valutare da un lato le condizioni di funzionamento dei circolatori e di calcolare l'energia termica inviata alle utenze, determinando con precisione i profili di richiesta di energia per il riscaldamento e di acqua calda sanitaria.

Il monitoraggio della centrale termica e delle pompe di calore così concepito consente di comprenderne i profili di funzionamento in relazione alla richiesta (scorporata tra acqua calda sanitaria e riscaldamento), di analizzare i consumi associati a tale funzionamento (essenziali per comprendere il contributo delle pompe di calore) nonché di valutare l'attuale logica di controllo del sistema ibrido e l'efficacia di potenziali nuove logiche.

L'impianto di riscaldamento installato in Corte Sara prevede anch'esso il sistema di distribuzione di tipo idronico riportato in Figura 3-7. Esso viene alimentato da due caldaie come nel caso di Corte Veronica ma, in questo caso, le due caldaie sono le uniche unità a soddisfare la richiesta termica e di acqua calda sanitaria vista l'assenza delle pompe di calore.

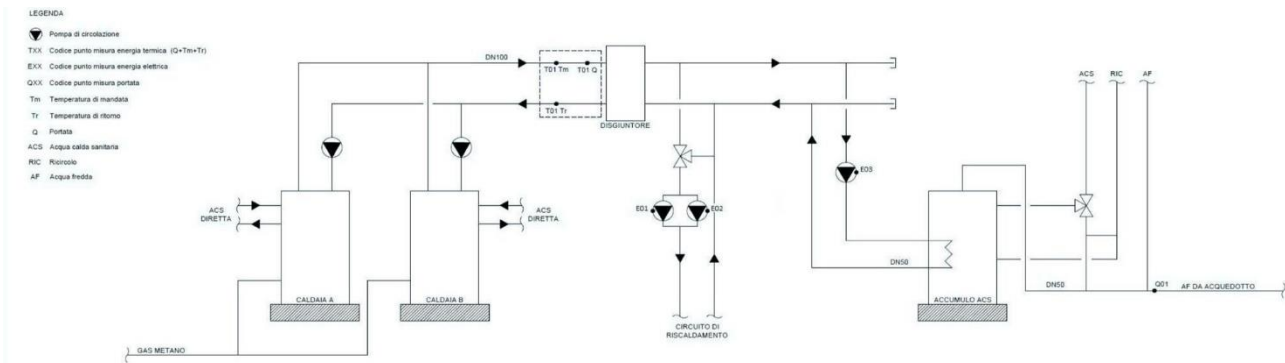


Figura 3-7 Schema funzionale della centrale termica del condominio Corte Sara

L'impianto di raffreddamento si compone invece di un gruppo frigorifero costituito da due chiller (Figura 3-8) sempre installati sulla torretta aperta.

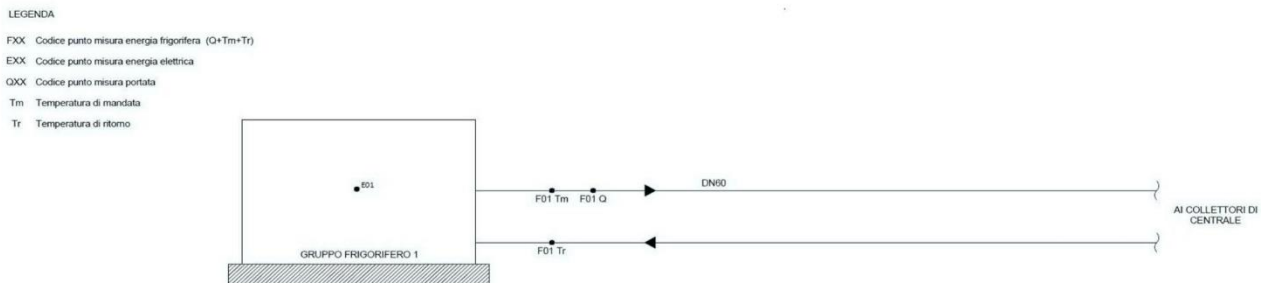


Figura 3-8 Schema funzionale della centrale frigorifera del condominio Corte Sara

Per quanto riguarda invece il sistema di monitoraggio installato presso gli impianti di Corte Sara, esso è stato limitato al minimo indispensabile ma, comunque, sufficiente alla determinazione delle prestazioni delle caldaie e dei gruppi ad assorbimento ai fini del confronto con Corte Veronica.

Si sono quindi installati i sensori che consentisse di misurare in tempo reale:

- i consumi elettrici del gruppo frigorifero (E01 di Figura 3-8) al fine di stimare le prestazioni del gruppo frigorifero in termini di raffreddamento e definire così un riferimento per il confronto;
- i consumi di gas metano delle caldaie A e B della centrale termica (Figura 3-7) e l'energia termica totale prodotta (T01 di Figura 3-7) al fine di stimare le prestazioni puntuali delle caldaie e definire così un riferimento per il confronto;
- i consumi elettrici dei circolatori dei circuiti secondari (E01-E03 di Figura 3-7) così da stimare, a partire dalle curve fornite dai produttori nonché dai dati sperimentali che saranno ottenuti nei circolatori gemelli di Corte Veronica, i punti di funzionamento dei circolatori e quindi i profili di richiesta di riscaldamento ed acqua calda sanitaria.

Tutti i sensori installati presso i due edifici, vengono interfacciati con un sistema di acquisizione e trasmissione dati che consente di registrare e successivamente rielaborare i dati acquisiti in modalità remota.

In termini di frequenza di campionamento, si è deciso di acquisire i dati dal sistema di monitoraggio ogni 5 minuti. Tale periodo di campionamento è stato ritenuto sufficiente a garantire un'accurata valutazione sia delle prestazioni dell'impianto nei transitori sia dell'efficacia di logiche di controllo alternative. In questo modo si è riusciti a garantire un ottimo compromesso tra le esigenze di analisi e la mole di dati da trasmettere, salvare ed elaborare.

Si ribadisce infine il fatto che, date le caratteristiche perfettamente speculari dal punto di vista costruttivo e climatico di Corte Veronica e Corte Sara, il caso studio offre l'opportunità unica di poter effettuare un confronto tra configurazioni impiantistiche diverse (tradizione e full-electric) in condizione operative reali.

3.2 Dal Design of Experiment alla misura in campo

Come spesso accade, realizzare un monitoraggio in situ comporta delle implicazioni di tipo operativo, legate alla scelta, approvvigionamento, installazione, taratura e start up della strumentazione di misura.

Tale caratteristica conferisce alle attività di ricerca un duplice aspetto: da un lato, pone delle sfide legate alla configurazione o scelta di specifici sistemi per andare incontro ad esempio alle esigenze impiantistiche, dall'altro comporta il rischio che vi possano essere slittamenti o imprevisti legati appunto alla natura di "prove sul campo".

In questo caso studio, ad esempio, l'aspetto sfidante è stato legato alle scelte delle tipologie di misuratori, in relazione al piping della centrale termica, che per via della sua ubicazione ha comportato delle scelte particolari nel sistema di misura e, di riflesso, nella tipologia e numero di sensori di cui dotarsi.

L'aspetto più aleatorio, invece, è stato legato alle difficoltà di approvvigionamento dei sistemi di misura e, soprattutto, nell'avvio della campagna di acquisizione, mostrando, laddove ci fosse bisogno di conferma, che il Design of Experiment (DOE) non sempre riesce a collimare con la realtà operativa delle prove in situ.

Come verrà chiarito nel seguito, le problematiche emerse nella fase di approvvigionamento della strumentazione (dovuta ai ritardi legati alla situazione pandemica del 2020), unitamente alle difficoltà di avvio della campagna di acquisizione, e nel confronto con gli occupanti dello stabile, hanno parzialmente limitato l'efficacia della campagna di monitoraggio, senza tuttavia pregiudicare la bontà delle evidenze emerse.

Per questo motivo, la campagna di monitoraggio del condominio ha subito delle modifiche in corso d'opera, permettendo tuttavia di giungere al monitoraggio di porzioni di stagioni di riscaldamento e raffrescamento che si possono ritenere significative dell'intera stagione. Pertanto, nel seguito, verranno riportati alcuni dei dati relativi a sotto-periodi di acquisizione, che tuttavia hanno condotto a risultati notevoli permettendo addirittura di offrire al condominio un'analisi dei consumi tale da orientare le future scelte impiantistiche e le priorità di intervento.

Questo aspetto è di particolare pregio, poiché implica che, in linea generale, il sistema di monitoraggio di un impianto, pur comportando delle spese di investimento iniziale, diviene uno strumento in mano al conduttore o manutentore, tale cioè da permettere:

- La diagnosi praticamente istantanea di guasti o malfunzionamenti. Questo implica che la rottura di un componente, quando rilevata in maniera rapida attraverso l'opportuna lettura dei dati di monitoraggio, permette di evitare il guasto di altri componenti, a monte o a valle del sistema. Ciò comporta la riduzione dei costi di manutenzione straordinaria, con evidente beneficio per l'utente finale;
- La possibilità di ridurre i fermi-impianto e, di conseguenza, il disagio per gli occupanti dello stabile. Tale aspetto risulta particolarmente rilevante specialmente nei contesti residenziali, ancor più se plurifamiliari come appunto i condomini;
- L'individuazione di logiche di regolazione di tipo tailored, in relazione alla località ed all'uso dell'impianto, che permettano anche di integrare l'aspetto economico che, ancora una volta, va a riflettersi nelle economie di più soggetti nel caso in cui ci si occupi di condomini;
- L'individuazione di priorità di spesa e di intervento, in seno alle consuete economie che caratterizzano i contesti condominiali. Anche in questo caso, l'esperienza maturata grazie al monitoraggio del Caso studio 2, e soprattutto il diretto confronto tra i due condomini gemelli in termini di spesa economica, ha permesso di fornire delle priorità di intervento per la risoluzione di alcune problematiche che, altrimenti, sarebbero diventate croniche.

3.2.1 Cronistoria della fase di collaudo del sistema di monitoraggio

La descrizione che segue vuole offrire una sorta di “diario di bordo” di quanto occorso nella fase di avvio della campagna di acquisizione, e costituire di fatto un insieme di “lessons learnt” sulla base proprio dell’esperienza maturata sul campo.

L’installazione, collaudo e connessione al portare remoto del sistema di monitoraggio di entrambi gli edifici stata eseguita da una ditta locale che, peraltro, era a conoscenza dei dettagli e della complessità impiantistica del caso studio.

Tutti i sensori sono stati installati secondo normativa e sono risultati operativi a partire dalla seconda settimana di maggio 2021, ad eccezione dei misuratori del gas naturale, che a causa di ritardi da parte dei fornitori legati alla pandemia da Covid-19, sono stati installati e connessi al sistema di telegestione solamente a fine giugno 2021.

Il sistema di acquisizione dati, basato sulla piattaforma IKON server, è stato abilitato e calibrato dopo diversi sopralluoghi in loco, ritarature degli strumenti installati e validazione dei dati acquisiti tramite un controllo incrociato.

Il sistema di acquisizione è risultato inizialmente sprovvisto di schede di memoria per il salvataggio dei dati acquisiti, utilizzando una visualizzazione soltanto in modalità aggregata (dato acquisito disponibile solo come media oraria, salvo i dati cumulativi). La risoluzione del problema relativo al salvataggio dei dati è stata completata soltanto il giorno 5 agosto, mentre la visualizzazione di dettaglio (compresi i dati di portata e temperature acquisiti dai contacalorie) è stata abilitata a partire da fine giugno per la sola centrale frigorifera di Corte Veronica.

La visualizzazione di dettaglio per ciascun dato è stata resa disponibile a partire dal 5 agosto, per tempistiche molto lunghe di programmazione e di organizzazione dei dati on-line da parte della ditta fornitrice.

Non appena i dati sono stati resi disponibili, si è potuto evidenziare un’anomalia nella misurazione della portata da parte del contacalorie del primario della centrale termica di Corte Veronica. Il problema, immediatamente segnalato, è stato però risolto solo a fine agosto a seguito di più interventi ad opera di addetti alla manutenzione dell’impianto svoltisi in base alla disponibilità dell’azienda manuttrice. Tale problema è risultato essere legato alla presenza di bolle d’aria nel circuito.

Oltre alle problematiche legate al sistema di acquisizione dati e alla presenza di problemi sull’impianto, durante la stagione estiva si sono registrati diversi malfunzionamenti ad una delle due pompe di calore installate in Corte Veronica, tra cui la rottura di uno dei compressori a seguito di un evento atmosferico di fortissima intensità che ha investito la città di Verona nell’agosto del 2021. Si ricorda infatti che il sistema a pompe di calore è stato aggiunto successivamente alla costruzione del condominio, inizialmente servito da un sistema tradizionale con caldaie. Le pompe di calore sono quindi state installate sulla sommità di una torretta (a cielo aperto) in sostituzione di vecchi gruppi di assorbimento, ancora presenti nel condominio gemello di corte Sara.

Tutti questi fattori hanno ridotto il numero di dati utilizzabili al fine di calcolare e comparare le prestazioni in fase di raffrescamento dei due impianti installati nei due edifici gemelli.

L’inversione dell’impianto da modalità di raffrescamento a quella di riscaldamento è stata effettuata ai primi di ottobre del 2021, in modo da poter andare incontro alla stagione di riscaldamento che, per legge, ha avvio il 15 di ottobre; ma, a seguito di problematiche acustiche e vibrazionali rilevate dagli inquilini di Corte Veronica residenti nelle unità abitative poste in prossimità del locale di posizionamento delle pompe di calore, si è reso necessario lo spegnimento di tali unità per un periodo prolungato.

La risoluzione di tali problematiche avrebbe potuto essere l’installazione di un sistema di canalizzazione dell’aria con aspirazione della stessa al di fuori della torretta in cui sono installate le pompe di calore. Tale soluzione avrebbe consentito l’allontanamento della fonte principale di rumore rispetto alle unità abitative interessate.

Purtroppo, le dinamiche nel settore residenziale sono influenzate in maniera preponderante dalle scelte individuali e, nei condomini, sono soggette alle delibere assembleari. In tale occasione, ad esempio, il Condominio non ha approvato la spesa correlata al sistema di canalizzazione, impedendo di fatto il

funzionamento delle pompe di calore nei mesi di riscaldamento e preferendo appoggiarsi alle caldaie presenti nella centrale termica, utilizzate unicamente a supporto fino a quel momento.

A causa di questa scelta, il condominio Corte Veronica è risultato operare in una modalità identica a quella di Corte Sara, ovvero, un sistema di riscaldamento basato sulla tecnologia tradizionale con caldaia.

Per ovviare al problema, si è scelto di integrare ulteriormente il sistema di acquisizione e monitoraggio, acquistando ed installando due schede di controllo da remoto delle pompe di calore che ne consentissero la gestione programmata e l'utilizzo quanto meno nelle ore diurne.

Tali schede sono risultate essere disponibili solo nella fase avanzata della stagione invernale, ma grazie ad esse si sono potute pianificare periodi di riaccensione delle macchine sufficienti per operare l'analisi delle prestazioni della pompa di calore e, soprattutto, il confronto con l'edificio gemello.

E' da sottolineare quindi come, ancora una volta, la sperimentazione nel settore residenziale (con particolare riferimento ai condomini) abbia evidenziato una forte resistenza sociale e una scarsa attenzione nei confronti di soluzioni tecnologiche foriere di risparmio energetico, con le relative ricadute in termini di riduzione della CO2 emessa in ambiente.

La priorità attribuita al comfort degli occupanti (che pure spinge, per quanto visto nel primo paragrafo, alla dotazione di impianti individuali) ha prevalso anche nel caso di impianto centralizzato rispetto ai benefici economici derivanti dall'utilizzo delle pompe di calore. Questa è indubbiamente una lezione appresa in fase di monitoraggio, che altrimenti non sarebbe emersa.

E' importante sottolineare comunque come i risultati dell'analisi riportata in questo report hanno portato i condomini a rivedere in ultima battuta la decisione iniziale di non procedere con la spesa di insonorizzazione: tale spesa è stata approvata dall'Amministratore e verrà ad essere effettuata nei mesi a venire consentendo quindi il riavvio dell'impianto.

3.3 Analisi delle prestazioni nella stagione di raffrescamento

Nonostante le difficoltà tecniche, sociali e burocratiche incontrate durante la fase di sperimentazione, il sistema di monitoraggio ha consentito di raccogliere dati analizzati nelle sezioni a seguire. Al fine di elaborare con elevato grado di dettaglio i dati misurati sugli impianti, le analisi sono state condotte sfruttando due periodi distinti, in cui la qualità dei dati è risultata essere adeguata. Il primo periodo è quello relativo al mese di luglio, con riferimento alla centrale frigorifera di Corte Veronica (Figura 3-6). Il secondo periodo ha inizio dal 5 agosto 2021, data in cui sono stati risolti i problemi di accuratezza dei dati monitorati e si è avuta la possibilità di disporre di dati dettagliati per ogni strumento per entrambi i condomini.

3.3.1 Periodo 1 - 24 luglio

Data l'assenza di sonde per la misura della temperatura esterna, per questo primo periodo di analisi, si sono presi a riferimento i dati meteo della stazione di Verona Golosine (situata nella zona Sud di Verona a meno di 8km di distanza e scelta per una risoluzione temporale dei dati abbastanza fine, i quali sono accessibili dalla pagina web: <http://meteoverona.altervista.org/>) dalla quale viene ricavata la temperatura con frequenza di aggiornamento pari a un minuto.

I dati dei sensori del sistema di monitoraggio sono acquisiti tramite la piattaforma IKON server, con frequenza di acquisizione disuniforme nel tempo: il sistema infatti garantisce una frequenza minima di acquisizione pari a un minuto ma rileva anche le variazioni valore avvenute all'interno del minuto, determinando così segnali, per i vari strumenti di misura, campionati in modo non uniforme e non sincronizzati nel tempo tra loro.

Al fine di uniformare i dati acquisiti e poterli dunque elaborare, si è operato un post-processing dei segnali così da averli sincronizzati e con una frequenza di campionamento pari ad 1 minuto. Per fare questo, nel caso di più valori acquisiti in modo disuniforme nell'arco di minuto, si è provveduto ad effettuare una media pesata sui secondi di intervallo tra un punto di misura ed il successivo. Ad esempio, se nell'arco del minuto analizzato si registra una potenza di 10 kW al secondo 0 e 20 kW al secondo 50, la media pesata dei valori, assegnata a quel minuto di segnale è pari a 11.67 kW.

I dati a disposizione per questa prima analisi sono le portate e le temperature (e quindi le potenze e le energie termiche) misurate dai contacalorie del circuito primario e del circuito pompa di calore 2, oltre che le misurazioni di assorbimento elettrico per le due unità presenti nella centrale frigorifera di Corte Veronica.

Le prestazioni vengono distinte quindi per le singole unità, oltre che per il complessivo ottenuto dalla centrale.

In particolare, si riporta in Figura 3-9 l'andamento della potenza elettrica assorbita dalle due unità nel periodo di riferimento. Per la maggior parte del tempo il carico è sotto la soglia minima per la quale si attiva la regolazione ad inverter. A metà mese, a seguito di alcuni eventi meteorologici estremi, si è riscontrato un malfunzionamento sia dei compressori che del sistema di controllo elettronico della pompa di calore 2 che hanno portato alla sospensione del funzionamento di tale unità come si evince da Figura 3-9.

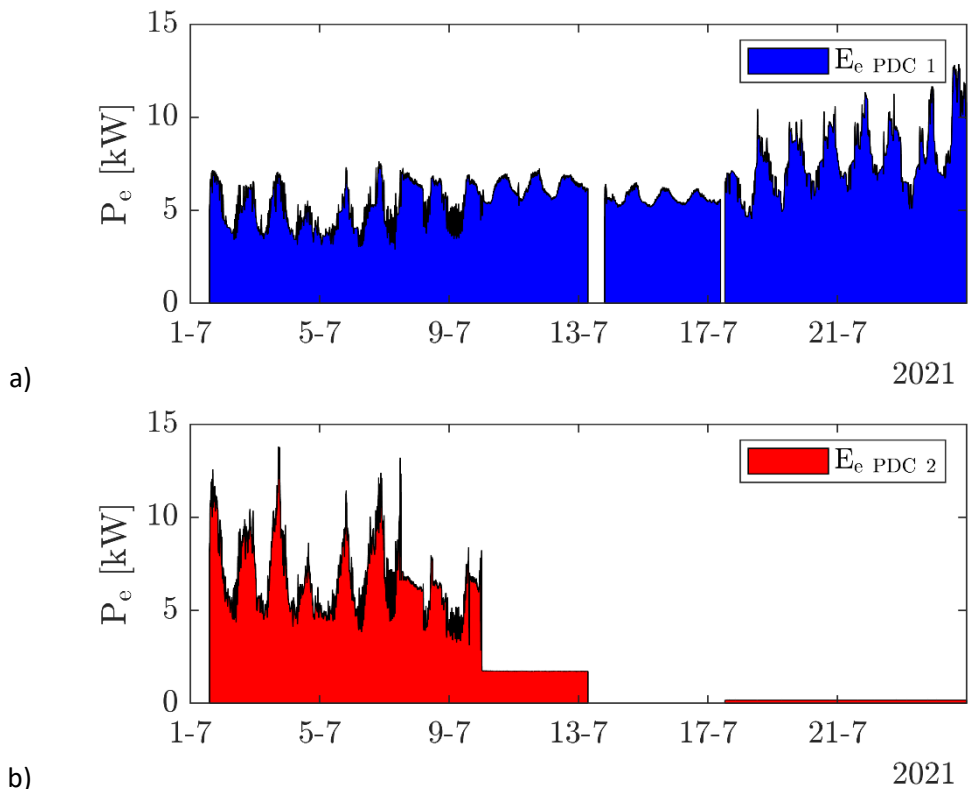


Figura 3-9 Andamento della potenza elettrica assorbita nel periodo analizzato da parte della pompa di calore numero 1 (a) e numero 2 (b)

E' interessante osservare come il malfunzionamento, pur avendo interrotto il monitoraggio dell'impianto, abbia consentito di identificare chiaramente sia il consumo elettrico in standby dell'unità (circa 0.19 kW) che la potenza richiesta dalle pompe di circolazione (circa a 1.6 kW), valore quest'ultimo in linea con i dati di targa dei circolatori (1.6 kW per una portata di 15 m³/h).

Per quanto riguarda invece l'andamento della potenza frigorifera, si riportano in Figura 3-10 gli andamenti della potenza termica della pompa di calore 1, dell'intero gruppo frigorifero e della pompa 2, valutata per differenza dalle altre due (Figura 3-6). Si può notare chiaramente l'insorgere dell'anomalia nel funzionamento riscontrata per la seconda unità a circa metà del mese.

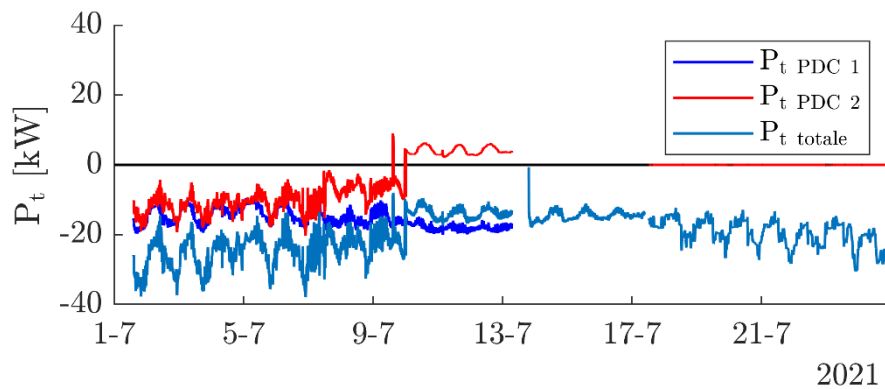


Figura 3-10 Potenza frigorifera prodotta dalle pompe di calore.

Nel periodo iniziale entrambe le unità contribuiscono al mantenimento dello stato di attività dell'impianto oltre che al soddisfacimento di una parte del carico frigorifero richiesto da parte di alcuni appartamenti. Nella seconda parte del mese, rimane operativa solo la prima unità, la cui produzione di potenza termica va a coincidere con il complessivo dell'intero gruppo frigorifero.

E' interessante osservare come la capacità installata di 128 kW totali (64 kW per ciascuna unità), sia chiaramente superiore alle necessità di raffreddamento del condominio e, a causa di ciò, le unità non risultano mai utilizzate al di sopra del 30% del loro carico nominale. La riprova è data dal fatto che, a seguito del venire meno dell'operatività di una delle due pompe di calore, il carico complessivo del condominio è stato comunque soddisfatto dall'unica pompa di calore funzionante.

Per analizzare le prestazioni e l'efficienza di funzionamento delle unità in tale periodo si è reso necessario relazionare il dato relativo all'EER con la temperatura esterna. Essendo le unità provviste dei circolatori utili alla distribuzione dell'acqua refrigerata nell'impianto, si analizzano le prestazioni al netto di tali componenti. Come spiegato sopra, grazie al malfunzionamento del sistema è stato possibile identificare con precisione i consumi in fase di pura circolazione, consentendo così la sottrazione di tale assorbimento da quello necessario al funzionamento dei compressori. La relazione utilizzata per stimare il coefficiente di prestazione, ad esempio della prima unità, risulta quindi essere:

$$EER_{PDC1} = \frac{P_{t,PDC1}}{P_{e,PDC1} - P_{e,circ.}}$$

La potenza termica della seconda unità viene invece ricavata come differenza fra quella misurata globalmente e quella della prima unità, in quanto il sistema di misura consente di misurare il dato globale e quello relativo ad una singola macchina a causa degli spazi limitati a disposizione nella torretta di installazione.

Per esprimere invece il coefficiente di prestazione complessivo delle due unità, viene quindi utilizzata la seguente relazione:

$$EER_{tot} = \frac{P_{t,tot}}{P_{e,PDC1} + P_{e,PDC2} - 2 \cdot P_{e,circ.}}$$

In Figura 3-11 si riporta il confronto di tali coefficienti in funzione della temperatura esterna rilevata dalla stazione Verona Golosine. La figura riporta gli EER delle due unità analizzati singolarmente e l'EER complessivo definito come valore intermedio fra i due.

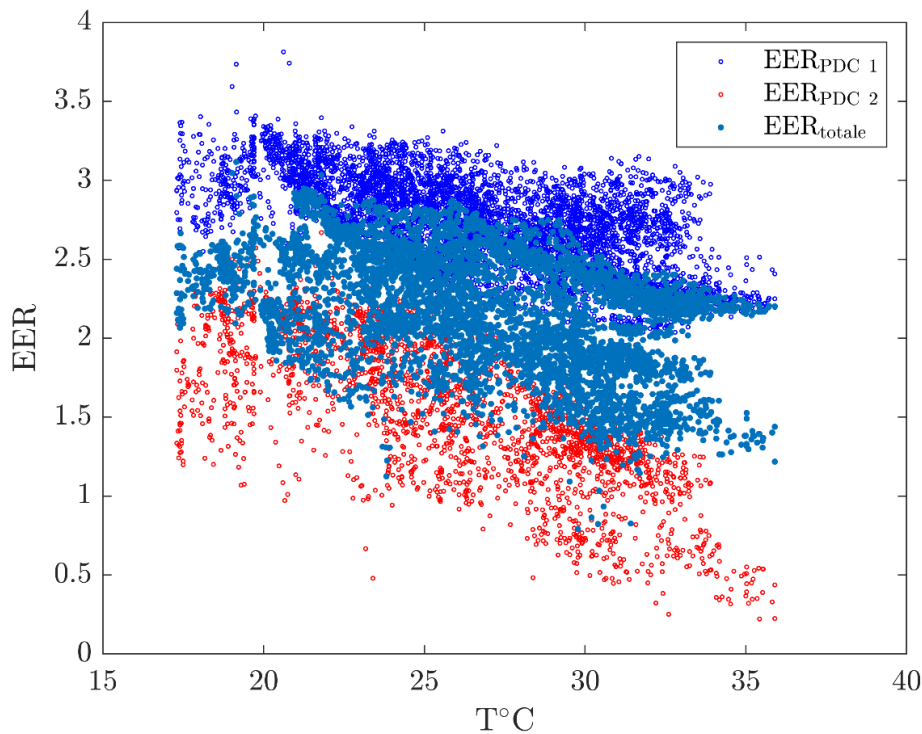


Figura 3-11 EER in funzione della temperatura esterna per le unità 1 e 2 oltre che complessivo.

Si può notare come, durante il periodo di operatività contemporanea delle due pompe di calore, la seconda unità abbia un'efficienza decisamente inferiore alla prima unità nonostante il carico termico sostanzialmente analogo (soprattutto nella prima parte del periodo di analisi). Nel periodo iniziale, infatti, si misurano picchi di potenza elettrica assorbita superiori per la seconda unità, per arrivare quasi alla stessa potenza frigorifera prodotta.

L'efficienza del sistema inoltre presenta una dipendenza abbastanza marcata dalla temperatura esterna ma non consente però di apprezzare l'influenza sull'EER del valore di potenza frigorifera prodotta e quindi dal carico a cui le pompe di calore lavorano.

Per poter meglio evidenziare questi aspetti, si è proposta una nuova definizione di efficienza (EER_{nor}) che consentisse di svincolare parzialmente l'EER dalla temperatura, pesando i valori ottenuti rispetto ad una temperatura media di riferimento fissata pari a 25°C. La relazione utilizzata per la stima di tale parametro è:

$$EER_{nor} = EER \cdot \frac{T}{T_{media}}$$

Per valutare la dipendenza dalla potenza frigorifera, si è quindi costruito un grafico che riportasse l' EER_{nor} in funzione del fattore di carico a cui erano sottoposte le due pompe di calore, valutato come:

$$FC = \frac{P_{t,PDC1}}{P_{t,nom}}, FC = \frac{P_{t,tot}}{2 \cdot P_{t,nom}}$$

Si riporta quindi in Figura 3-12 gli andamenti ottenuti, relativi all'EER totale (con entrambe le pompe di calore attive), all'EER con una sola pompa di calore attiva ed i valori di EER (punti in arancione) della seconda pompa di calore durante il suo periodo di malfunzionamento. E' evidente che questi ultimi valori, riportati per completezza, non sono stati considerati nell'analisi al fine di non falsare i risultati complessivo.

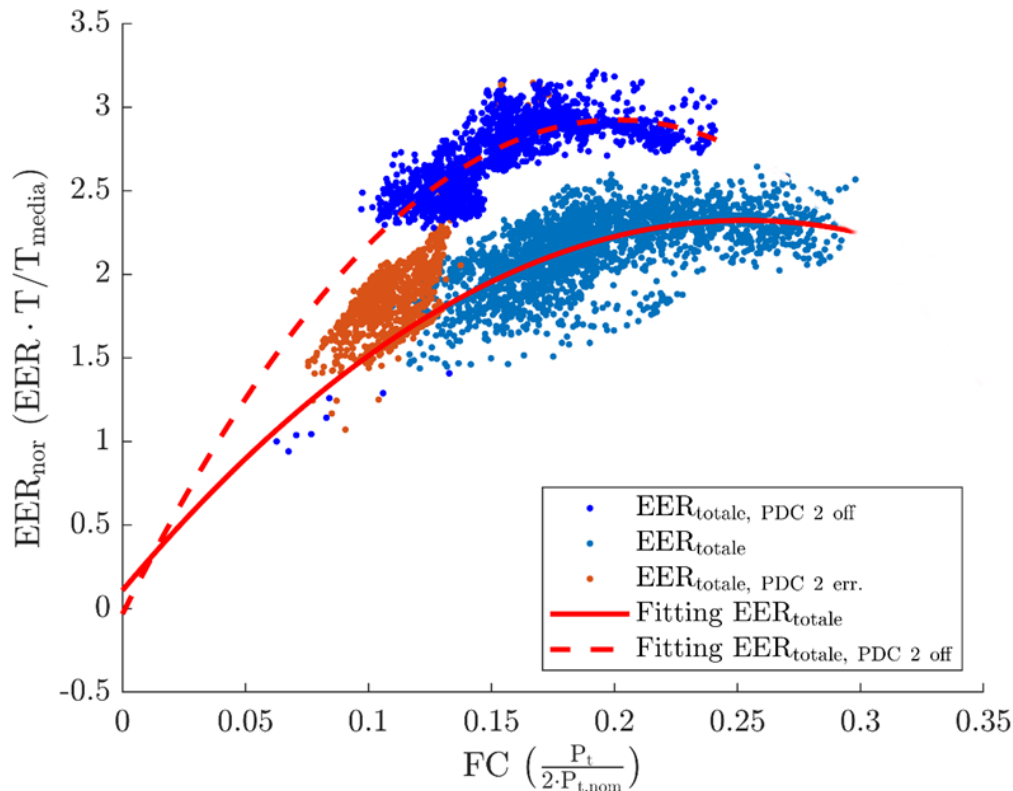


Figura 3-12 EER_{nor} in funzione del fattore di carico e curva di fitting nel caso di funzionamento combinato o della singola unità.

Per meglio apprezzare l'influenza del fattore di carico sull'efficienza complessiva del sistema, si sono costruite delle curve di fitting relative ai due casi sopra menzionati (EER totale delle due pompe ed EER della prima pompa in assenza della seconda per malfunzionamento).

L'analisi degli andamenti ottenuti nelle figure precedenti consente alcune considerazioni:

- Con riferimento alla pompa di calore 1, si può osservare una leggera dipendenza dell'efficienza della macchina dalla temperatura esterna con un trend in diminuzione all'aumentare della temperatura esterna (potenzialmente legato anche alla posizione di installazione della macchina sulla torretta in piena esposizione solare). Complessivamente l'ampia banda di valori che caratterizza il grafico in funzione della temperatura evidenzia però una maggiore dipendenza da altri fattori, nello specifico dal fattore di carico
- Come atteso infatti, entrambe le pompe di calore presentano una curva di efficienza chiaramente dipendente dal carico a cui le due macchine sono state sottoposte ed un'efficienza che complessivamente cresce all'aumentare del carico.
- La pompa di calore nella condizione di funzionamento a unità singola (pompa 1) presenta valori di EER complessivamente più elevati, confermando quanto precedentemente evidenziato ed i più elevati consumi elettrici della pompa di calore 2 che invece vanno a penalizzare l'EER totale del sistema nella condizione di funzionamento a due pompe di calore. Data la dipendenza dell'EER dal fattore di carico, è interessante sottolineare anche che, a causa del malfunzionamento della pompa di calore 2, la pompa 1 ha potuto operare a carichi più elevati che sicuramente ne hanno favorito un miglioramento delle prestazioni.
- Dal momento che la causa del malfunzionamento della pompa di calore con successivo fermo della stessa è risultata essere correlata al compressore, è lecito ipotizzare che la motivazione delle più basse prestazioni della pompa di calore 2 durante il funzionamento in parallelo fosse da imputarsi principalmente ad un calo delle prestazioni del compressore stesso, prima della rottura, con conseguente peggioramento dell'efficienza complessiva della pompa di calore 2.

3.3.2 Periodo 5 agosto – 20 ottobre

A partire dal 5 agosto 2021 è stato possibile monitorare con maggiore precisione il funzionamento della centrale frigorifera di Corte Veronica. I dati disponibili arrivano fino al 20 ottobre, giorno in cui è stata effettuata l'inversione degli impianti per la preparazione alla stagione invernale di riscaldamento.

In questo secondo periodo si è potuto usufruire dei dati meteo acquisiti dalla piattaforma Weather Underground (<https://www.wunderground.com>), utilizzando i dati relativi ad una stazione meteorologica situata nel Comune di Lavagno, a soli 5 km dal sito di installazione del caso studio in analisi.

I dati, anche in questo caso, sono stati elaborati creando una distribuzione con frequenza pari a 5 minuti e sono stati analizzati seguendo la metodologia adottata in precedenza.

In Figura 3-13, si riportano gli andamenti dell'assorbimento elettrico delle due unità nel periodo considerato.

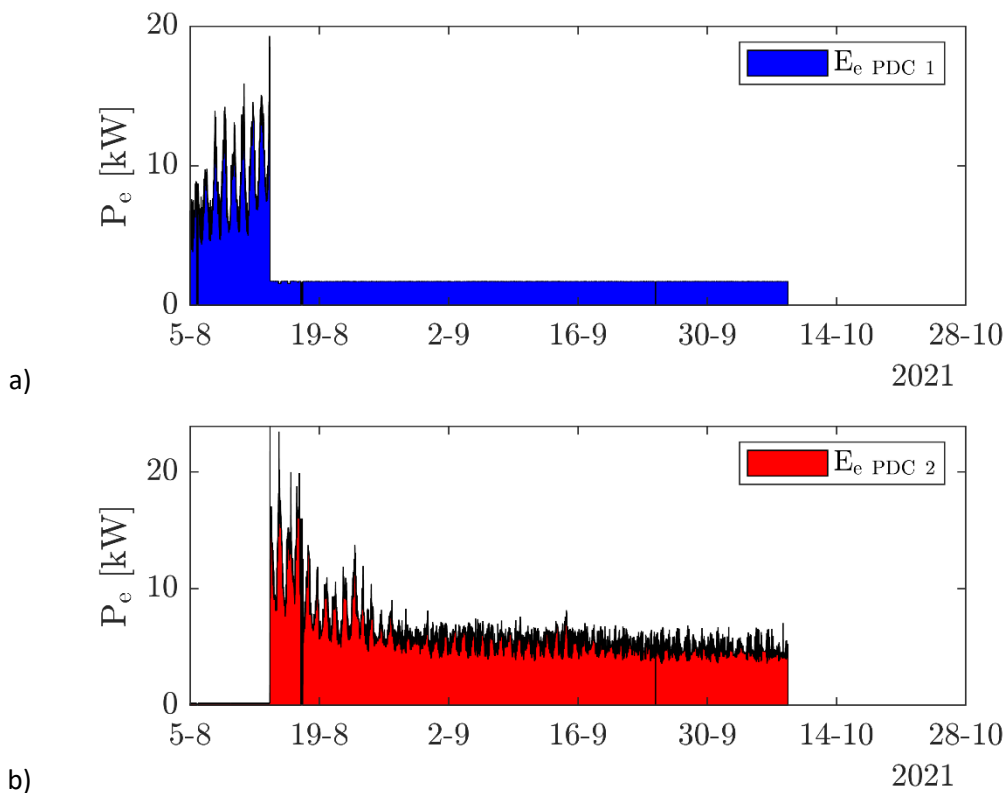


Figura 3-13 Andamento della potenza elettrica assorbita da parte della pompa di calore numero 1 (a) e della pompa di calore 2 (b) Dati relativi al periodo 5 agosto - 20 ottobre 2021.

Come già sottolineato precedentemente, a causa del malfunzionamento e dei ritardi nella sostituzione dei componenti e nella manutenzione, la seconda pompa di calore funziona a partire dalla metà del mese di agosto, e, per modalità di gestione dell'impianto dell'azienda manuttrice, dallo stesso momento, la prima unità inizia a seguire un funzionamento in sola circolazione, come risulta evidente dai grafici sopra riportati. Questa modalità di funzionamento con una pompa attiva ed una in sola modalità di circolazione ha consentito di studiare con maggiore precisione gli effetti di una logica di controllo diversa da quella precedentemente vista con le due pompe di calore in parallelo. In Figura 3-14 si riportano a titolo di confronto anche le potenze frigorifere prodotte dal sistema nel periodo in esame.

Il periodo di maggiore richiesta risulta essere proprio concentrato nel momento in cui le unità scambiano la modalità di operazione.

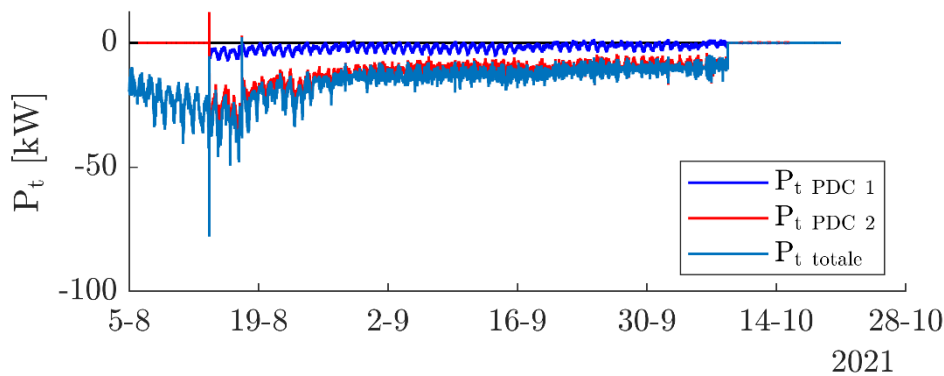


Figura 3-14 Potenza frigorifera prodotta nel periodo di riferimento.

La potenza termica prodotta rispecchia il maggiore consumo elettrico della metà di agosto, con l'unità 1 che sembra non influenzare le prestazioni pur funzionando in sola circolazione, nonostante la miscelazione. In merito a questo aspetto si avrà modo di ritornare successivamente durante l'analisi dell'EER.

Si può notare nella parte iniziale un contributo a tratti positivo anche della pompa 1 in termini di potenza frigorifera: tale contributo è dovuto all'inerzia termica dell'impianto che va diminuendo nel tempo e anche all'incertezza numerica degli strumenti di misura installati.

Anche in questo periodo si sono andate a valutare le prestazioni delle unità in funzione della temperatura esterna e del fattore di carico.

In particolare, in Figura 3-15 si riporta l'andamento dell'EER della pompa di calore 1 in modalità attiva ed in modalità di circolazione, della pompa di calore di calore 2 e del totale, valutato come precedentemente spiegato.

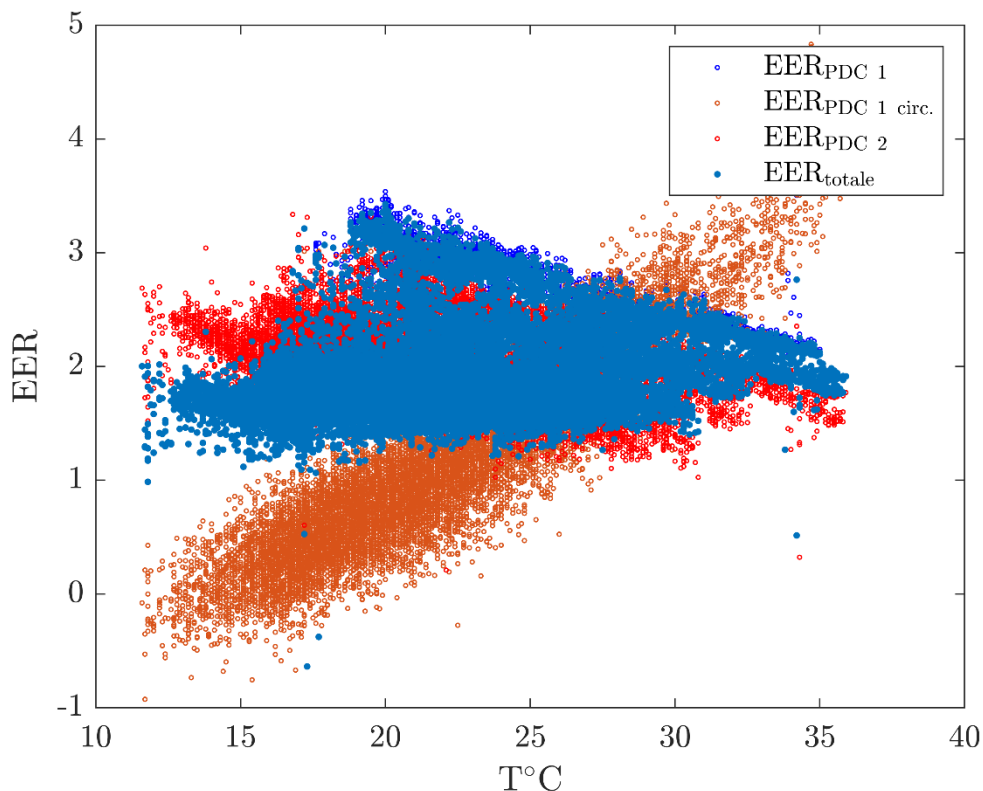


Figura 3-15 EER in funzione della temperatura esterna, nel periodo analizzato.

Un primo risultato ricavabile dalla figura è l'andamento dell'EER della pompa di calore numero 1 in sola circolazione in funzione della temperatura esterna. In Figura 3-15 è infatti visibile come l'efficienza della

prima unità (in arancione) risulti linearmente dipendente dalla temperatura, con valori anche al di sotto dell'unità.

Tuttavia, questo non è un valore che possa ritenersi rappresentativo del comportamento della pompa di calore, in quanto il funzionamento in circolazione implica che non vi sia un'efficienza in raffreddamento, ma tale dato fornisce alcune informazioni sulla differenza di potenza frigorifera fornita dalla seconda unità e quella totale effettivamente registrata dopo la miscelazione.

L'EER della seconda unità invece risulta avere la stessa dipendenza dalla temperatura esterna riscontrata anche per il mese di luglio. Quando si registrano bassi valori di temperature, l'efficienza della seconda unità viene penalizzata dal funzionamento in circolazione dell'unità 1. Al contrario, in caso di elevate temperature, l'effetto segue un andamento opposto. Questo comportamento sembra confermare il contributo dell'inerzia termica dell'impianto già evidenziato nell'analisi degli andamenti della potenza termica prodotta.

Anche in questo caso si è voluto valutare la dipendenza delle prestazioni del sistema, pesate sulle temperature come fatto nel primo periodo di analisi, al variare del fattore di carico. L'andamento ottenuto è stato confrontato in Figura 3-16 con la situazione relativa al funzionamento con una sola pompa di calore attiva.

Come infatti si poteva ipotizzare, la logica di funzionamento con una singola unità attiva (e l'altra spenta) risulta essere la migliore dal punto di vista dell'efficienza, come mostrato in Figura 3-16. Le prestazioni, infatti, risultano superiori nel caso in cui ci sia una sola unità attiva e non solo in confronto al funzionamento con un'unità in sola circolazione ma anche in caso di funzionamento combinato.

Le curve di fitting, così come per il mese di luglio, sono identificabili in polinomi di terzo grado che approssimano ai minimi quadrati i dati acquisiti durante la campagna di misura. Tali curve non sono da ritenersi complete in quanto il funzionamento non ha mai superato il 50% della capacità nominale per la singola unità; pertanto, vi è una mancanza di dati per quel che concerne il funzionamento a carichi elevati o in prossimità del nominale delle macchine installate.

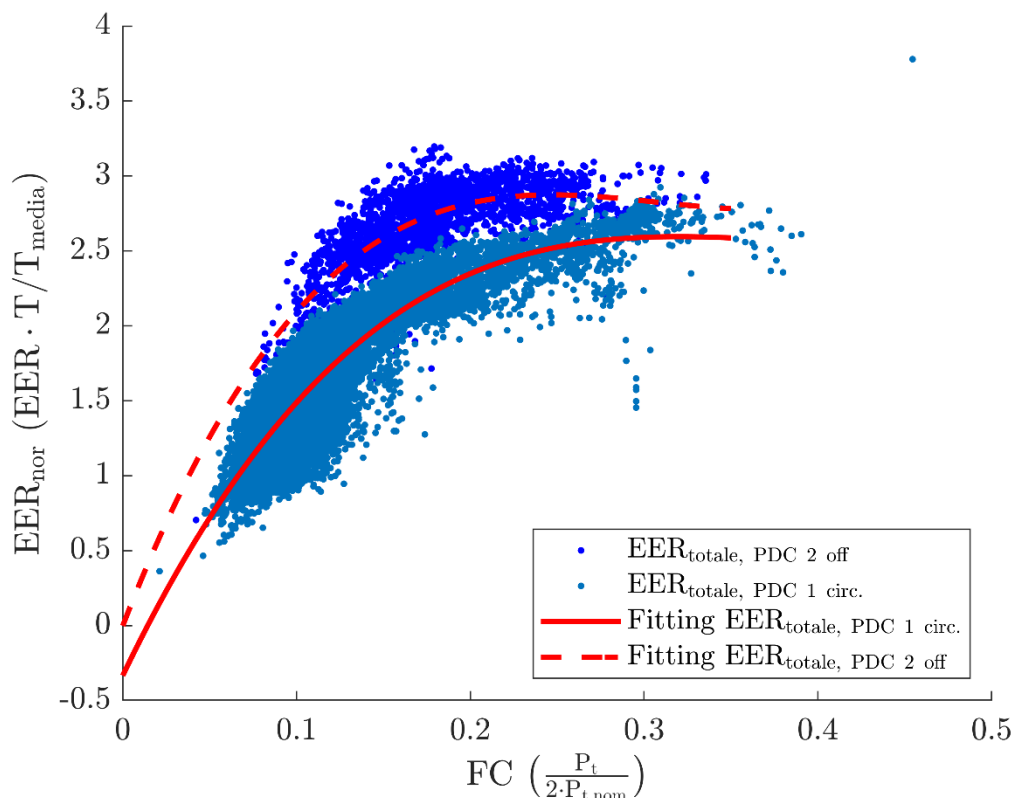


Figura 3-16 Andamento dell'EER_{nor} complessivo al variare del fattore di carico.

Il confronto tra le varie situazioni riscontrate sperimentalmente, relative a diverse possibili logiche di funzionamento ha consentito di arrivare quindi alle seguenti conclusioni:

- La logica di funzionamento del sistema con entrambe le pompe di calore attive non risulta essere in questo caso vincente in quanto l'impianto è chiaramente sovradimensionato e le pompe di calore lavorano ai carichi parziali con conseguente penalizzazione in termini di rendimento.
- La logica di funzionamento del sistema con entrambe le pompe di calore funzionanti ma con una delle due in modalità di sola circolazione migliora le prestazioni complessive del sistema rispetto alla logica di controllo con due pompe di calore in parallelo e attive (in quanto consente di far lavorare la singola pompa a carichi più elevati e quindi con maggiore rendimento) ma non risulta essere ottimale in quanto la miscelazione delle portate penalizza l'efficienza complessiva dell'impianto
- La logica di funzionamento con una sola pompa di calore attiva e la seconda non funzionante risulta essere sicuramente quella migliore in quanto consente alla pompa di attiva di lavorare in condizioni di carico più prossime al nominale con un beneficio complessivo in termini di prestazioni dell'impianto.

La disponibilità di dati relativi anche al condominio di Corte Sara ha consentito in questo periodo anche un confronto tra i due condomini, di cui si riportano in Figura 3-17 i consumi elettrici complessivi. La Figura 3-17a riporta la somma della potenza elettrica assorbita della prima e della seconda pompa di calore in Corte Veronica, mentre la Figura 3-17b fa riferimento alla potenza elettrica assorbita dai gruppi frigo di Corte Sara.

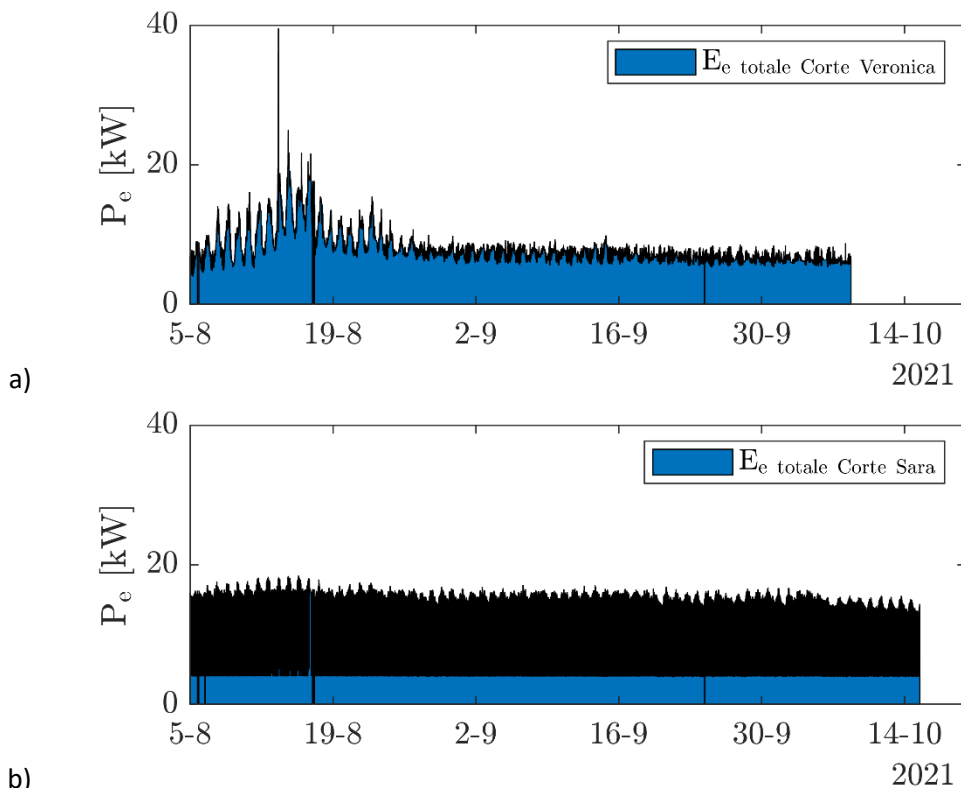


Figura 3-17 Consumo elettrico misurato dai contaenergia: (a) somma della potenza elettrica della prima e della seconda pompa di calore in Corte Veronica; (b) potenza elettrica assorbita dai gruppi frigo di Corte Sara.

Per le pompe di calore installate presso Corte Veronica il controllo mediante inverter garantisce una potenza di base di 6 kW con alcuni picchi nel caso di elevata richiesta e nelle ore centrali della giornata. La logica di funzionamento dei gruppi frigo di Corte Sara, invece, è di tipo on-off, in quanto la potenza di base

registrata si aggira nell'intorno dei 4 kW con alcuni picchi di durata in cui l'assorbimento di potenza raggiunge l'intorno dei 16 kW.

Se si considera come dato iniziale quello del 5 agosto, il contaenergia segna rispettivamente 16114 kWh per le pompe di calore di Corte Veronica, e 16239 kWh per i gruppi frigoriferi di Corte Sara.

L'inversione degli impianti è stata effettuata con uno scarto di alcuni giorni come si può vedere dagli andamenti riportati in figura.

Il consumo elettrico fino all'inversione del primo dei due impianti è pari a 12414 kWh per Corte Veronica e di 14006 kWh per Corte Sara. In termini percentuali il consumo elettrico nel periodo analizzato è risultato **maggiore dell'11.4%** per la fase di raffrescamento di Corte Sara, risultato questo che conferma la convenienza dell'installazione delle unità pompa di calore rispetto ai tradizionali sistemi di raffreddamento a compressione. A ciò si aggiunga anche la possibilità di incrementare ulteriormente il risparmio inserendo una logica di controllo programmata in funzione della temperatura che gestisca le pompe di calore anche in modalità di funzionamento a singola pompa per aumentarne l'efficienza. Purtroppo, la mancanza di schede per la gestione da remoto dell'impianto ha impedito un'ulteriore sperimentazione in tal senso. Tuttavia, nei mesi a venire, l'impianto verrà integrato con tali schede, consentendo ulteriori misure.

Per approfondire ulteriormente gli aspetti relativi al funzionamento con una sola pompa attiva e l'altra in modalità di ricircolo, è stata eseguita un'analisi di dettaglio delle grandezze monitorate dal sistema nei giorni dal 24 al 28 agosto 2021, ritenuti rappresentativi della stagione di raffrescamento. Si riportano in Figura 3-18, Figura 3-19 e Figura 3-20, i dati di monitoraggio relativi a questi giorni per la centrale frigorifera di Corte Veronica ed alcune grandezze risultanti dall'analisi effettuata a partire da questi dati e riassunta a seguire.

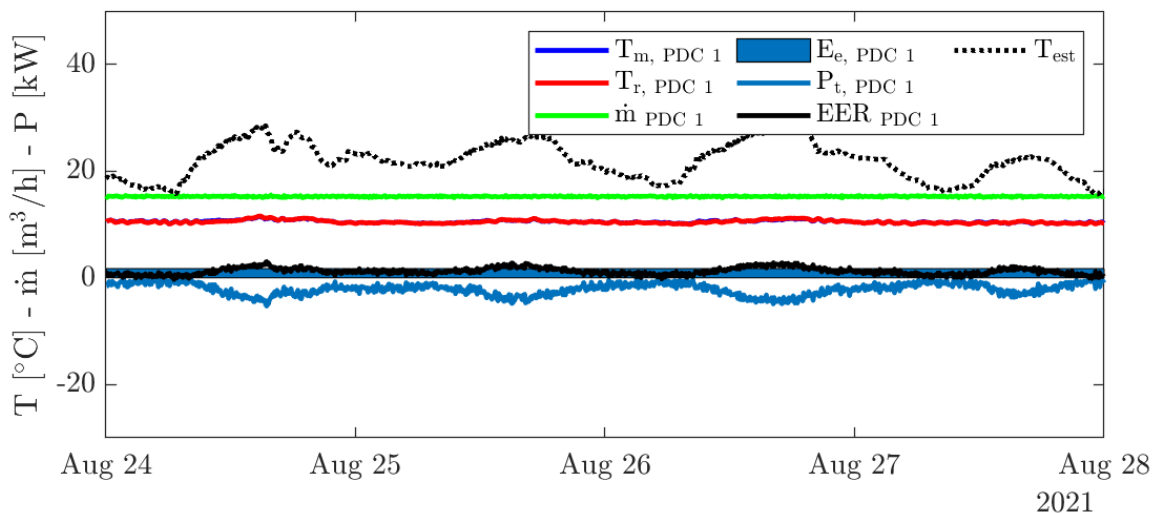


Figura 3-18 Andamento portata, temperatura e potenza per il circuito pompa di calore 1, nei giorni dal 24 al 28 agosto. Portata, temperatura e potenza termica sono ricavate per differenza tra quanto misurato dal circuito globale e circuito pompa di calore 2.

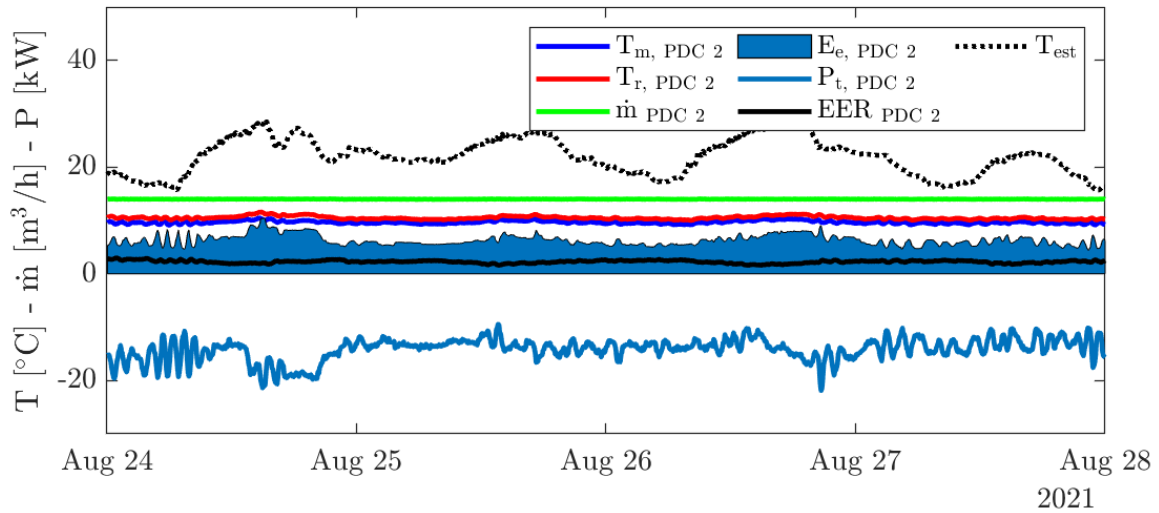


Figura 3-19 Andamento portata, temperatura e potenza per il circuito pompa di calore 2, nei giorni dal 24 al 28 agosto.

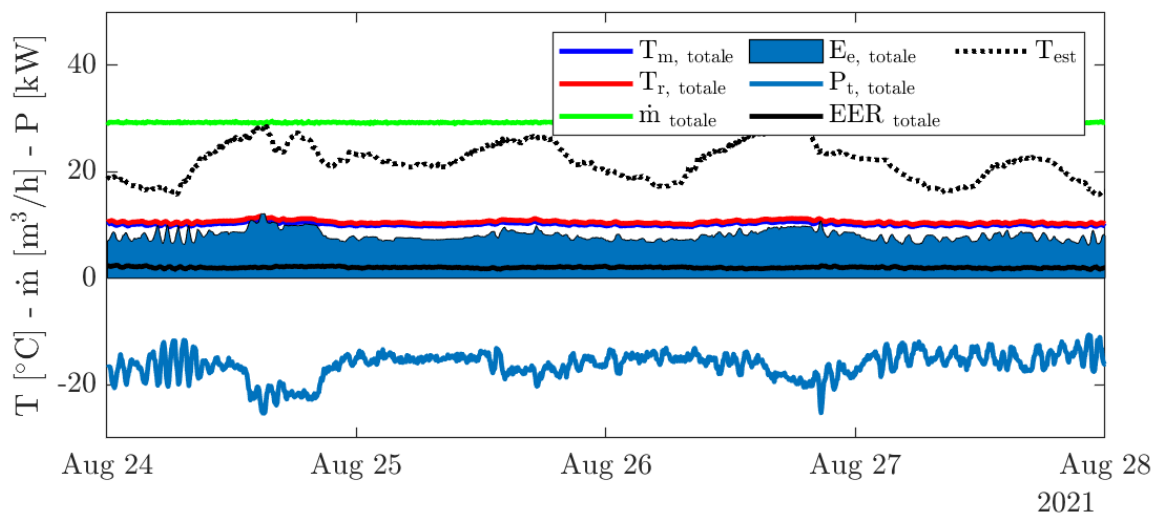


Figura 3-20 Andamento portata, temperatura e potenza per il circuito globale, nei giorni dal 24 al 28 agosto.

Il funzionamento in questi giorni è di sola circolazione per la prima unità, con la seconda unità che soddisfa il carico richiesto dalle unità abitative. La portata misurata del circuito globale si attesta attorno ai 29 m³/h, mentre la portata misurata dal contacalorie del circuito della pompa di calore 2 è intorno ai 14 m³/h, dati da cui è possibile desumere la portata del circuito 1 come differenza tra le due.

Nell'analisi svolta la temperatura di ritorno del circuito 1 è stata assunta identica a quella del globale, mentre la temperatura di mandata è stata ricavata dal bilancio energetico che descrive la miscelazione:

$$T_{m, PDC 1} = \frac{\dot{m}_{tot} \cdot T_{m, tot} - \dot{m}_{PDC 2} \cdot T_{m, PDC 2}}{\dot{m}_{tot} + \dot{m}_{PDC 2}}$$

Si può osservare che la variazione di temperatura per il circuito 1 è trascurabile, in quanto è al di sotto del range di sensibilità della strumentazione. Anche la differenza di potenza frigorifera e l'EER calcolato per la prima unità risultano poco significativi.

La dipendenza dell'EER dalla temperatura esterna invece si può chiaramente notare. Durante le ore centrali del giorno, le temperature sia di mandata che di ritorno subiscono un lieve innalzamento e l'assorbimento di potenza elettrica si intensifica.

Dalle potenze elettriche e termiche in gioco, oltre che la forte dipendenza dalle condizioni esterne per quanto riguarda il carico richiesto, si evince come la modalità di funzionamento riguardi il mantenimento dell'operatività dell'impianto.

3.4 Analisi delle prestazioni in fase di riscaldamento

La presente analisi si focalizza sulle prestazioni dell'impianto di riscaldamento dei due condomini. Come riportato in precedenza, la ferma opposizione di alcuni condomini al funzionamento delle pompe di calore a causa del rumore acustico emesso ha limitato l'acquisizione dei dati ma ha consentito comunque di trarre alcune conclusioni:

- la transizione energetica verso una società totalmente decarbonizzata non può prescindere dall'accettazione sociale delle tecnologie necessarie;
- per ottenere tale transizione, c'è ancora molto da fare in termini di sensibilizzazione della società soprattutto nel settore residenziale, dove la logica dell'indipendenza energetica (riscaldamento autonomo vs. distretto energetico) e del comfort personale (leggero disturbo sonoro vs. contributo positivo all'ambiente in termini di efficienza) continuano a vincere non solo rispetto agli evidenti benefici nei confronti dell'ambiente ma anche rispetto ai benefici economici derivanti dall'utilizzo di tecnologie più efficienti (-11.4% in fase di raffrescamento ottenuto senza logiche di controllo smart e in un limitato periodo di tempo);
- la sindrome "NIMBY" ha trovato una nuova declinazione legata specificatamente al settore residenziali e ai fattori di cui sopra.

Alla luce di queste problematiche, nei mesi invernali del 2021 le caldaie della vecchia centrale termica sono state quindi la soluzione privilegiata per soddisfare la richiesta termica di entrambi i complessi.

Si riportano a seguire alcuni dati raccolti dal sistema di monitoraggio a partire da metà settembre per verificare il comportamento degli impianti anche in caso di sola produzione di ACS, nonché i risultati dell'analisi di confronto tra i due condomini nelle varie soluzioni impiantistiche adottate.

3.4.1 Struttura della centrale termica e logica di controllo della valvola a tre vie dell'impianto

L'impianto di riscaldamento è costituito sia per Corte Veronica che per Corte Sara da due caldaie con circolatori propri, che costituiscono il circuito primario della centrale. Il circuito secondario è disaccoppiato dal primario grazie a un disgiuntore che consente una maggiore flessibilità di funzionamento.

Il circuito secondario è suddiviso in due rami: il primo porta al serbatoio di ACS mentre il secondo porta ad una valvola a tre vie, che regola il ricircolo di acqua nel circuito riscaldamento (Figura 3-23).

In base ai dati acquisiti, che comprendono nel caso di Corte Veronica tutte le portate elaborate dai circolatori (la complessiva circolante nel circuito primario), è possibile calcolare la portata drenata dalla valvola a tre vie per innalzare la temperatura di mandata nel circuito riscaldamento. Tramite il bilancio sulla valvola, è possibile esprimere la portata di ricircolo \dot{m}_{ric} necessaria con la seguente relazione semplificata:

$$\dot{m}_{ric} = \dot{m}_{risc} \cdot \frac{T_{m,risc} - T_{r,risc}}{T_{m,ACS} - T_{r,risc}}$$

dove \dot{m}_{risc} è la portata elaborata dal circolatore gemellare del circuito di riscaldamento, $T_{m,risc}$ e $T_{r,risc}$ sono rispettivamente le portate di mandata e di ritorno del circuito di riscaldamento, mentre $T_{m,ACS}$ è la temperatura di mandata lato ACS misurata dal rispettivo contacalorie. Tale scelta, è compatibile con il fatto che la temperatura in tale punto del circuito è la medesima del reintegro lato riscaldamento permesso dalla valvola a tre vie.

Grazie all'analisi suddetta si è potuto determinare le portate circolanti nell'impianto di Corte Veronica per tutto il periodo analizzato, riportate in Figura 3-21.

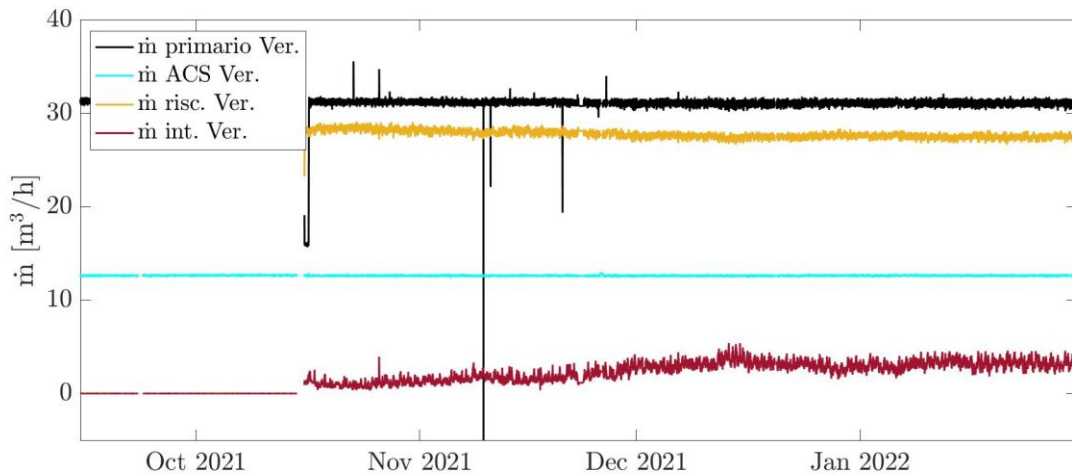


Figura 3-21 Portate volumetriche del circuito primario e secondario della centrale termica di Corte Veronica. I valori sono abbastanza costanti ad esclusione della portata di ricircolo valutata dal bilancio.

A meno di contenute oscillazioni (trascorrendo saltuari errori di lettura dei sensori installati, che costituiscono veri e propri outlier), le portate risultano essere pressoché costanti ad eccezione di quella drenata dalla valvola a tre vie, definita secondo una logica di controllo che si può desumere studiando le temperature di mandata e di ritorno del circuito di riscaldamento (Figura 3-22).

La logica di controllo dell'apertura della valvola è legata al mantenimento di una temperatura di mandata fissa al circuito di riscaldamento. Tuttavia, come è evidente dagli andamenti di temperatura riportati (Figura 3-22) l'avanzamento della stagione invernale, e quindi la maggiore richiesta di potenza termica, comporta una progressiva diminuzione della temperatura del ritorno dal circuito di riscaldamento che viene compensata aumentando progressivamente la portata di ricircolo per permettere il mantenimento del set-point di mandata.

Nel periodo antecedente l'avviamento del circuito, le temperature registrate sono strettamente dipendenti da quelle ambientali e le portate nulle, essendo i circolatori spenti.

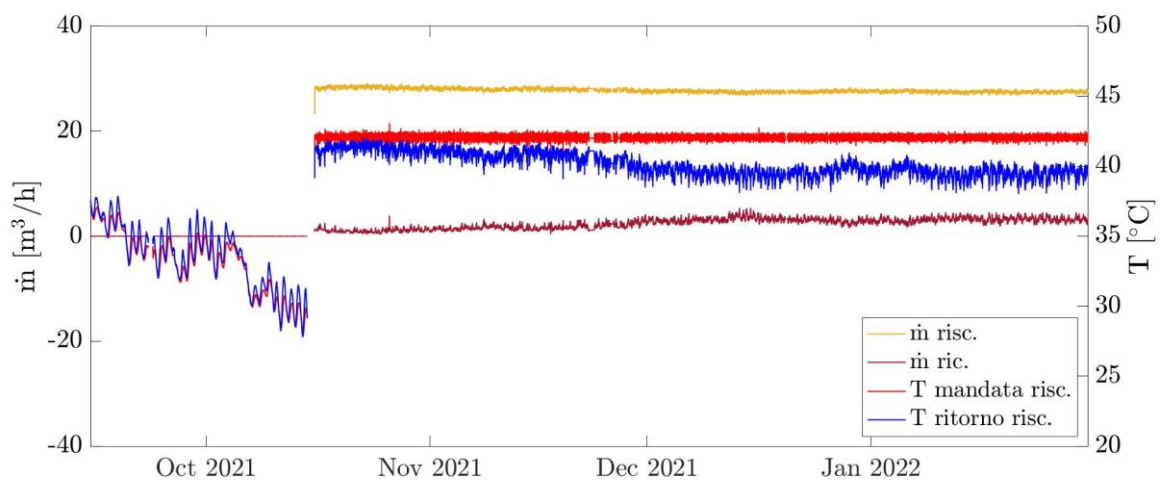


Figura 3-22 Portata del circuito riscaldamento e di ricircolo in Corte Veronica. Temperature di mandata e ritorno del circuito riscaldamento. La temperatura di mandata si mantiene in un range ristretto.

Queste considerazioni si basano sullo schema di centrale riportato in Figura 3-23, dove si evidenzia con il colore rosso il flusso relativo all'acqua alla temperatura di mandata proveniente dal circuito primario e con colori via via più chiari, fino al colore giallo, utilizzato per rappresentare il flusso a bassa temperatura relativo al ramo di ritorno lato riscaldamento.

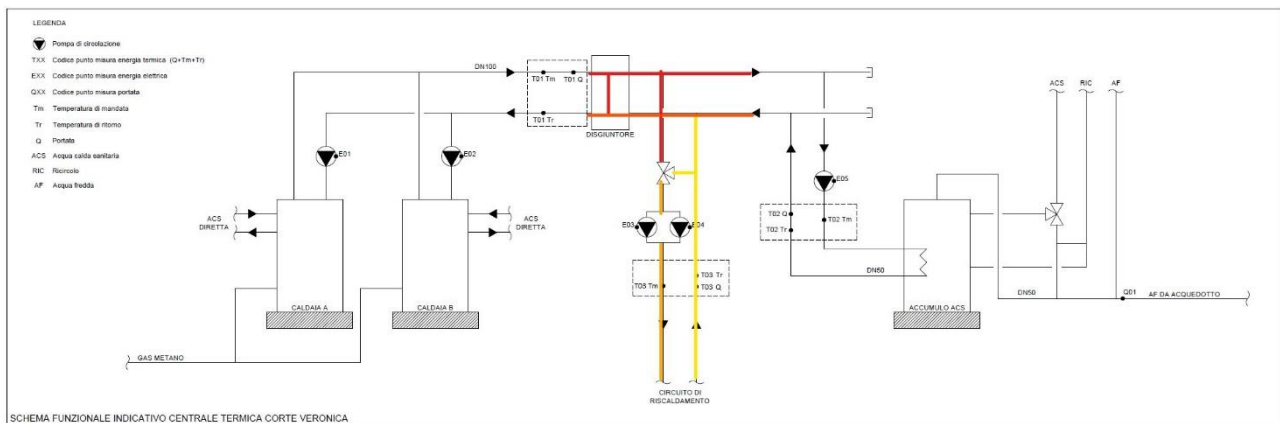


Figura 3-23 Schema aggiornato della centrale termica di Corte Veronica, dove si evidenzia con l'ausilio di colori la direzione dei flussi.

Il contacalorie del circuito di riscaldamento è posto a valle della pompa gemellare; pertanto, la temperatura di mandata è relativa alla già avvenuta miscelazione fra portata di ricircolo e portata di ritorno dal circuito di riscaldamento (che avviene tramite la valvola a tre vie). La temperatura dell'acqua di ritorno al primario subisce un incremento dopo il passaggio al disgiuntore data la differenza di portata fra primario e secondario.

3.4.2 Operatività delle caldaie e potenze in gioco nel circuito primario

In analogia a quanto già riscontrato per la fase di raffreddamento, anche nel caso del riscaldamento la richiesta di potenza termica risulta essere al di sotto della capacità dell'impianto.

Le caldaie operano con una potenza termica fornita inferiore a quella nominale (le caldaie presentano una potenza massima di 218 kW). Sia durante il funzionamento in sola produzione di ACS (fino a metà ottobre) che durante il funzionamento combinato in riscaldamento, le caldaie modulano la potenza in base alla richiesta. La temperatura minima del circuito primario in fase di sola produzione di ACS si attesta sui 60°C sia nel caso di Corte Veronica che Sara, con un massimo di poco superiore ai 65°C (Figura 3-24).

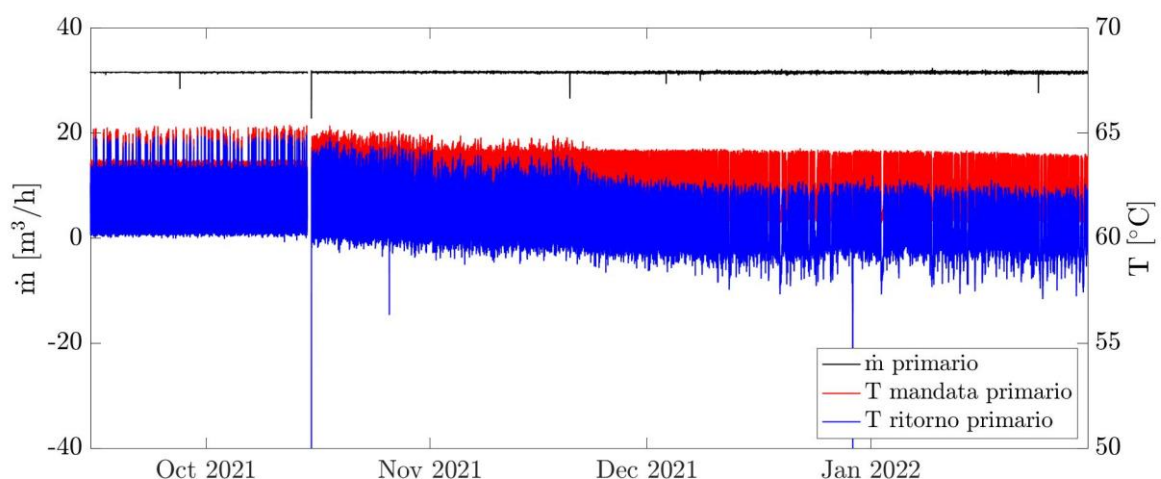


Figura 3-24 Temperature di mandata e ritorno e portata del circuito primario di Corte Sara.

Per quanto riguarda il primario di Corte Sara, gli andamenti di temperature e portata presenti in Figura 3-24 evidenziano una frequente regolazione della caldaia per mantenere la temperatura nel range impostato. A stagione inoltrata, la temperatura media scende e aumenta la differenza fra temperatura di mandata e ritorno, in seguito alla richiesta di potenza termica crescente da parte del circuito di riscaldamento.

La stessa dinamica riguarda anche Corte Veronica, con una regolazione meno frequente in quanto da metà alla fine del periodo analizzato le temperature si stabilizzano in un range molto più ristretto (Figura 3-25). I malfunzionamenti dell'impianto di Corte Veronica non hanno riguardato unicamente le due pompe di calore ma anche caratterizzato anche la vecchia centrale termica a caldaie. In Figura 3-25 viene evidenziato un crollo di temperatura dovuto al malfunzionamento di una delle due caldaie a metà dicembre.

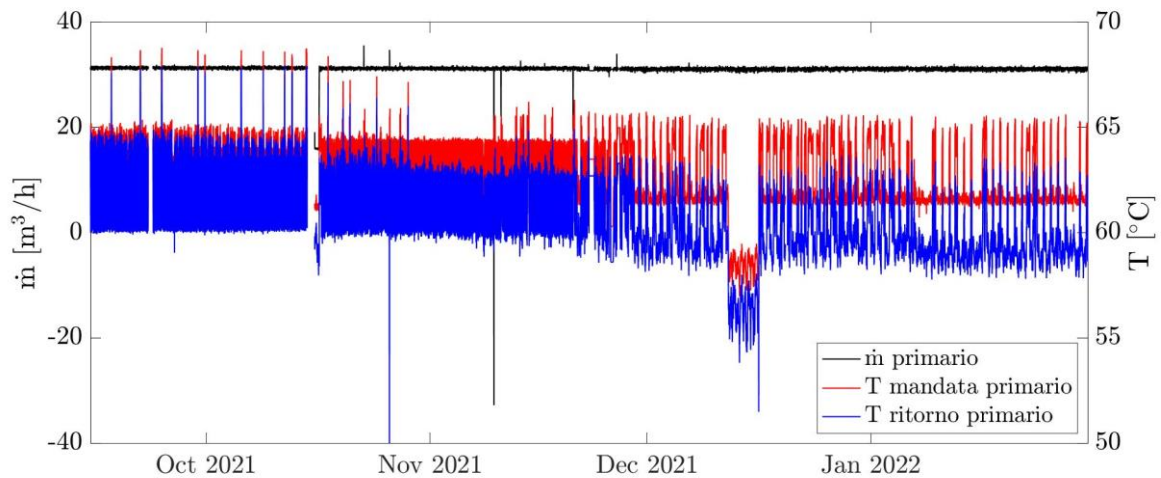


Figura 3-25 Temperature di mandata e ritorno e portata del circuito primario di Corte Veronica.

In quell'occasione le sonde di temperatura hanno riportato dei valori non affidabili, probabilmente in relazione alla non completa miscelazione delle portate provenienti dalle caldaie: la temperatura di mandata del primario risultava essere coincidente con quella di mandata lato ACS, condizione mai realizzata nel periodo.

E' interessante sottolineare come l'attento analisi dei dati di monitoraggio ha consentito di individuare l'anomalia nel sistema prima ancora di comunicazioni ufficiali della ditta manutentrice, che è stata anzi subito avvisata.

Questo aspetto sottolinea in maniera evidente l'importanza della presenza di un sistema di monitoraggio non solo ai fini di valutazioni tecno-economiche e prestazionali ma anche come utile strumento di diagnostica in tempo reale dell'impianto su cui basare anche strategie innovative di manutenzione programmata.

Pur con le limitazioni già menzionate, si è potuto sfruttare quanto acquisito dal sistema di monitoraggio in fase di riscaldamento per effettuare alcune considerazioni di confronto tra le logiche di funzionamento dei due condomini al variare della richiesta di potenza termica.

Per evidenziare meglio le differenze tra i due condomini, si sono presi in considerazione e messi a confronto i comportamenti dell'impianto in due giorni in cui la richiesta termica è risultata essere abbastanza differente. In particolare, si sono presi come riferimenti il 23 dicembre 2021 come giorno caratterizzato da un'elevata richiesta termica e il 1° novembre 2021 come condizione di carico meno gravosa.

Prendendo in considerazione i dati di monitoraggio riportati in Figura 3-26, si può notare come entrambi i circuiti primari operino a pari portata (circa 30 m³/h, dati dai 15 m³/h elaborati dal circolatore di ciascuna caldaia) e tale portata rimane costante per tutto il periodo analizzato. In particolare, per il giorno 23 dicembre si può notare come la temperatura di mandata e ritorno del primario di Corte Veronica sia mantenuta quasi costante per l'intero arco della giornata, come da logica di controllo precedentemente descritta.

Nel caso invece di Corte Sara, la temperatura di mandata e di ritorno del primario viene mantenuta pressoché costante per un periodo di tempo limitato, che va dalle 7 del mattino fino alle 14. Nelle restanti ore le temperature oscillano con una frequenza prossima ai 30 minuti, tra il picco massimo e il minimo.

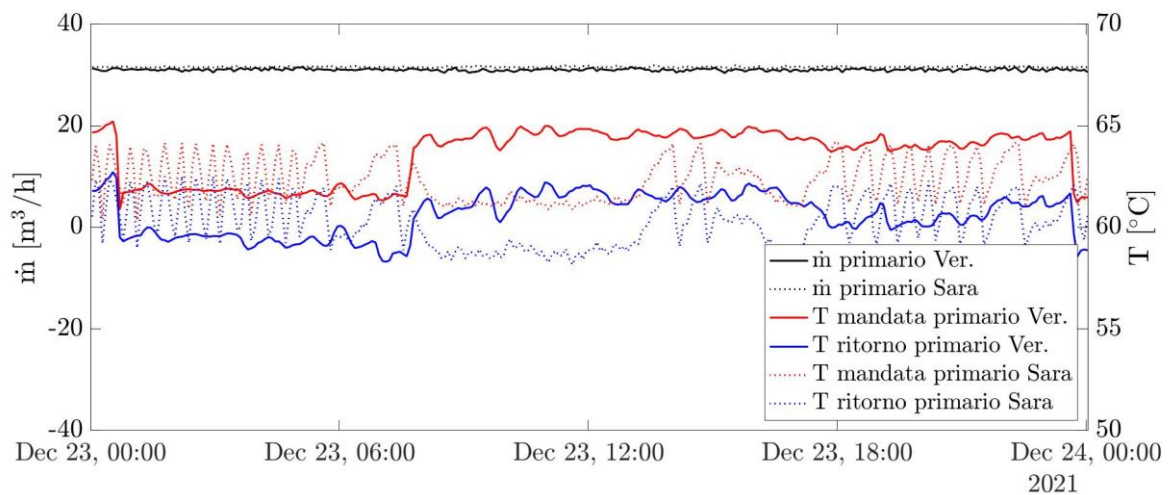


Figura 3-26 Temperature di mandata e ritorno e portate dei due circuiti primari il 23 dicembre 2021. In un giorno di elevata richiesta termica è evidente la differente gestione delle caldaie di ciascun complesso.

Se si effettua lo stesso confronto in un giorno di richiesta termica meno gravosa, ovvero il 1° novembre (Figura 3-27), si osserva come la variazione periodica delle temperature venga registrata sostanzialmente durante tutto il giorno ma soprattutto caratterizzi entrambe le centrali termiche.

La differenza di temperatura fra mandata e ritorno risulta abbastanza contenuta, così come è possibile notare nel periodo estivo, in cui l'unica richiesta di potenza termica è legata alla produzione e al mantenimento dell'ACS.

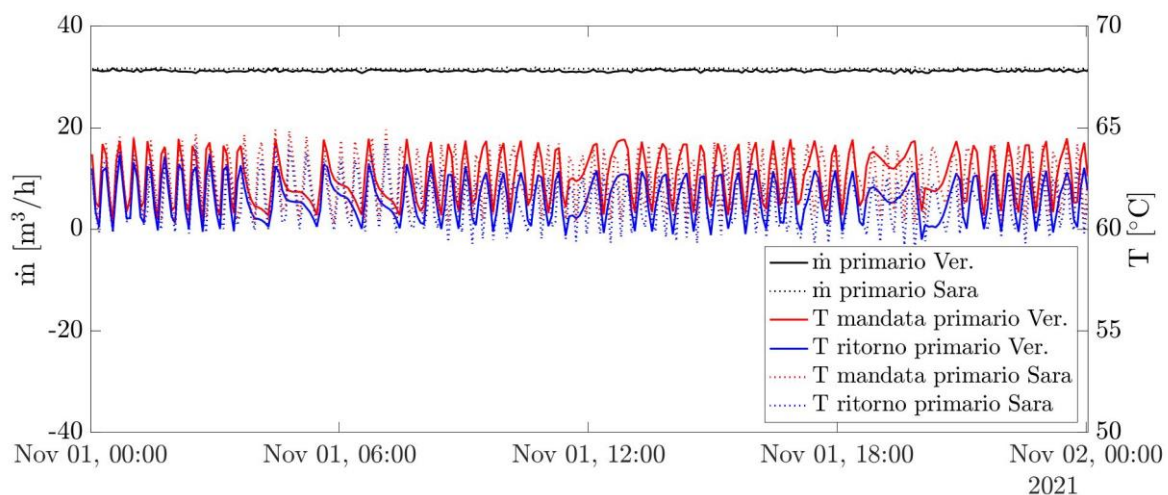


Figura 3-27 Temperature di mandata e ritorno e portate dei due circuiti primari il primo di novembre 2021. In un giorno a inizio periodo di riscaldamento la gestione delle caldaie di ciascun complesso risulta essere piuttosto simile.

La motivazione principale di questo diverso funzionamento tra i due condomini è imputabile alla diversa richiesta di potenza termica, come evidenziano gli andamenti in Figura 3-28 e Figura 3-29. La richiesta di potenza termica il 23 dicembre per Corte Veronica risulta sempre superiore agli 80 kW, anche durante la notte, fatta eccezione di un ristretto periodo intorno alle ore 1. In quel momento, le temperature medie del primario scendono per poi risalire nuovamente in funzione della potenza termica richiesta. Il picco massimo risulta essere nell'intorno dei 140 kW alle 18.

Per Corte Sara invece la potenza termica supera gli 80 kW soltanto nella parte centrale della giornata e non arriva mai a superare i 100kW.

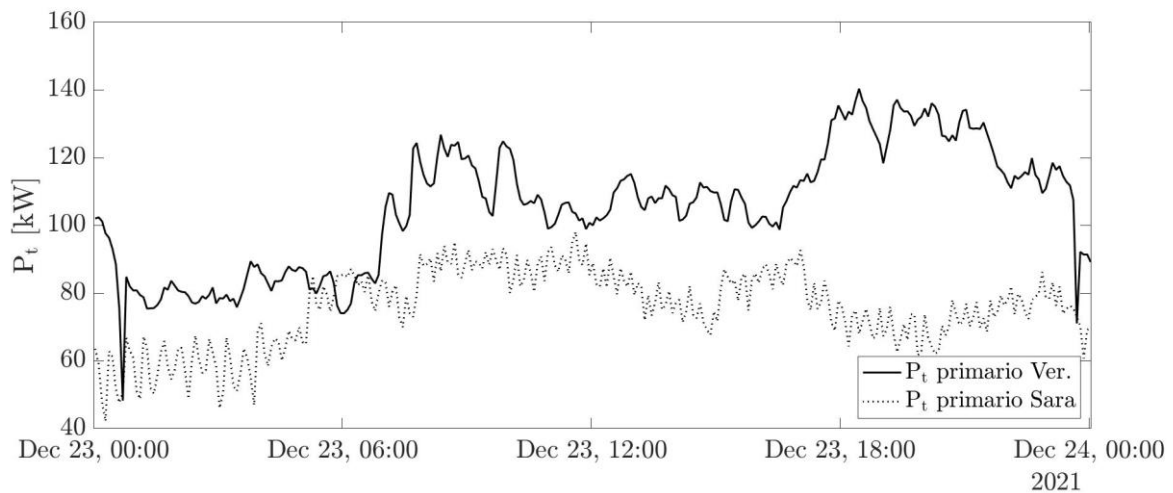


Figura 3-28 Potenza termica dei due circuiti primari il 23 dicembre 2021. La richiesta di potenza termica è superiore per l'intero arco della giornata in Corte Veronica.

Nel giorno invece di inferiore richiesta termica, l'andamento è oscillante e compatibile con una regolazione del bruciatore per soddisfare una richiesta di potenza assai contenuta. Da questo deriva l'oscillazione delle temperature di mandata e ritorno del primario evidenziato in precedenza.

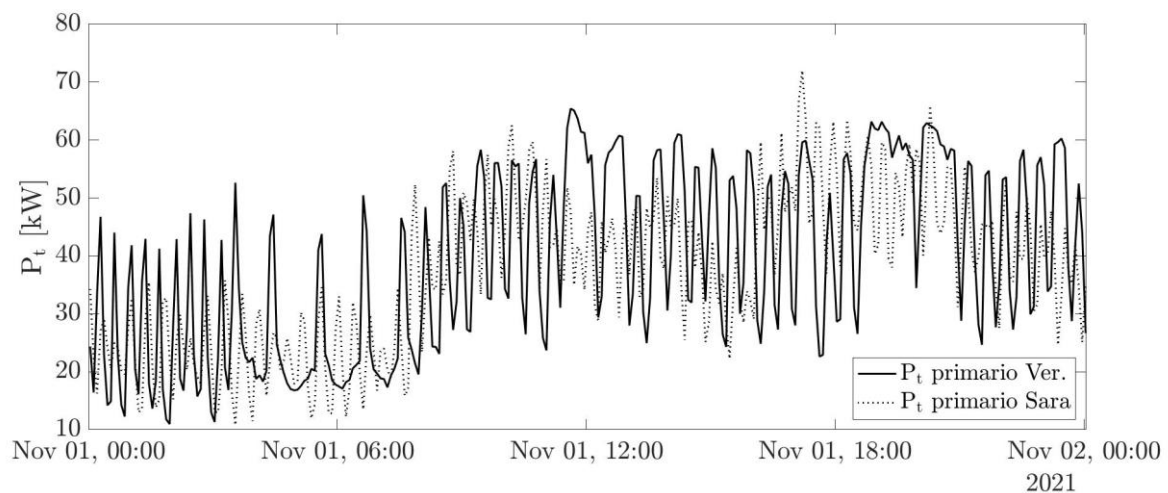


Figura 3-29 Potenza termica dei due circuiti primari il primo di novembre 2021. La richiesta di potenza termica risulta essere simile.

Dal momento che i due condomini sono gemelli e quindi caratterizzati da cubature complessivamente simili, la diversa richiesta di potenza termica non può essere semplicemente giustificata da diverse esigenze in termini di riscaldamento.

E' più logico ipotizzare che un fattore di influenza sia legato al diverso settaggio delle centrali termiche nei due impianti, settaggio pensato per due modalità di funzionamento diverse.

Nel condominio Corte Veronica, la gestione della centrale termica veniva effettuata in funzione di un contributo tutt'altro che trascurabile delle pompe di calore e settata sulla temperatura di ritorno del sistema (ACS + riscaldamento). A seguito dell'interruzione dell'operatività delle pompe di calore, è ragionevole pensare che non si sia provveduto ad una ri-taratura del sistema di gestione delle centrali termiche che non tenesse conto del venire meno di tale contributo e questo abbia portato ad alzare la potenza termica prodotta dalla centrale nelle giornate di maggiore richiesta, giustificando così le differenze con Corte Sara riscontrate nei grafici sopra riportati.

3.4.3 Risultati mensili

Si riporta in questa sezione un'analisi di confronto tra i due condomini a livello mensile per il periodo di riscaldamento, al quale viene aggiunto il mese di settembre 2021 come confronto con un mese di sola produzione di ACS. In Figura 3-30 si riporta il consumo di energia termica nel corso dei mesi invernali per entrambi gli edifici, oltre che un focus sui consumi specifici in Corte Veronica essendo installati i contacalorie per i circuiti specifici.

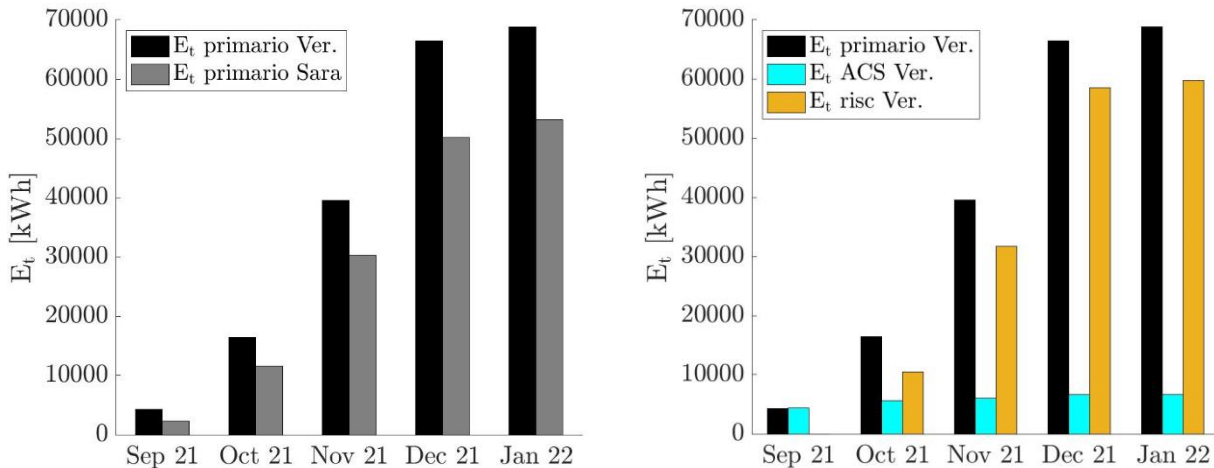


Figura 3-30 A sinistra confronto fra energia termica richiesta dai due edifici. A destra focus dettagliato sull'energia termica richiesta da Corte Veronica per le funzioni specifiche di produzione e mantenimento di ACS e riscaldamento.

I consumi di Corte Sara sono circa il 70% rispetto a quelli di Corte Veronica, in tutti i mesi analizzati. Come precisato nella sezione precedente, tale differenza può solo parzialmente essere giustificata da una minore occupazione dell'edificio e/o da abitudini differenti degli inquilini. E' molto più probabile che tale differenza sia invece da imputare al mancato ri-settaggio della logica di controllo della centrale termica di Corte Veronica al venir meno dell'apporto significativo delle pompe di calore. A dimostrazione di ciò, si può anche osservare come, a Corte Veronica, l'energia termica relativa alla produzione di ACS subisca solo un lieve incremento nei mesi, e che la maggior parte dell'energia richiesta sia strettamente legata al riscaldamento.

Per il mese di settembre si nota come l'energia termica del circuito globale sia lievemente inferiore a quella richiesta per la produzione di ACS, condizione impossibile in quanto l'energia termica fornita del circuito primario dovrebbe essere superiore o al più pari (in caso di perdite nulle). Tale errore è strettamente legato alla problematica della presenza di bolle d'aria, che falsavano la misurazione della portata. A partire da metà settembre l'impianto è stato completamente spurgato e ciò ha consentito una corretta misura della potenza termica del primario.

Tramite l'utilizzo dei contatori del gas è inoltre possibile valutare il consumo di ciascuna caldaia per entrambi i complessi. Una volta noto il consumo, si è stimata l'energia termica producibile tramite il potere calorifico del gas H , il cui valore è stato assunto pari a 10.98 kWh/sm^3 , e quindi l'efficienza complessiva delle caldaie η , definita come:

$$\eta = \frac{E_t}{m_{gas} \cdot H}$$

dove E_t è l'energia termica complessiva (misurata dal contacalorie del primario), ed m_{gas} è il consumo di gas complessivo di entrambe le caldaie.

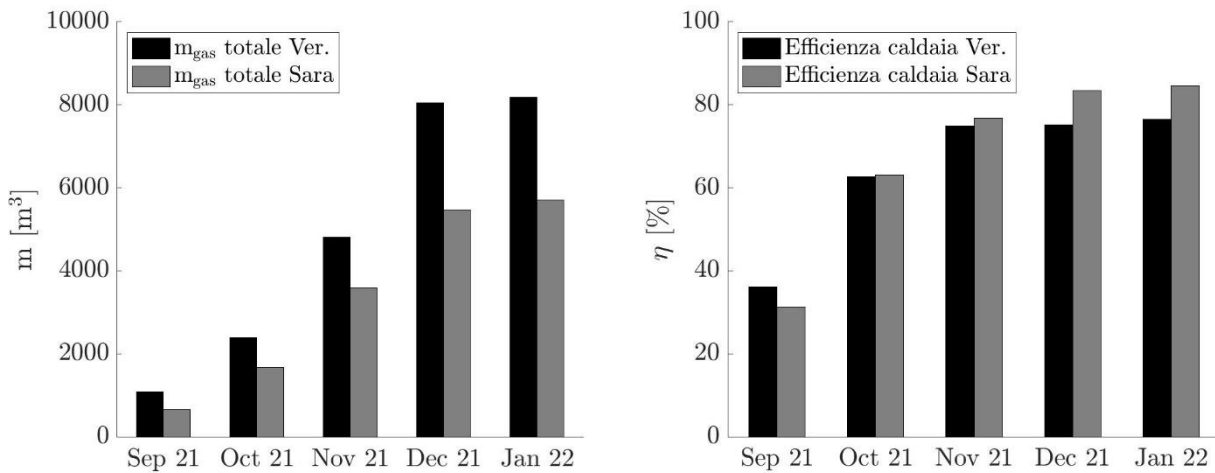


Figura 3-31 A sinistra consumo cumulativo di gas da parte delle caldaie di entrambi i condomini. A destra efficienza complessiva totale del gruppo caldaie.

Come si può osservare in Figura 3-31, i consumi di gas complessivi da parte delle caldaie nei due condomini rispecchiano l'andamento della potenza termica e risultano essere crescenti nei mesi.

E' interessante anche osservare come la diversa logica di controllo delle caldaie abbiamo portato il condominio Corte Sara a consumare, nei mesi di Dicembre 2021 e Gennaio 2022, oltre 4'000 m³ di gas in più, che con i prezzi attuali di mercato corrispondono ad una spesa in bolletta superiore di oltre 2'000€/mese considerando un prezzo medio degli ultimi anni di 1.00€/ m³, prezzo che potrebbe aumentare alla luce dell'evoluzione della situazione politica internazionale.

A ciò si aggiungano i mancanti risparmi ottenibili con il funzionamento a pompa di calore e la differenza tra i due condomini diventa economicamente ancora più rilevante.

Per quanto riguarda invece l'efficienza complessiva delle caldaie, si deve tenere conto che i valori riportati in figura risultano comprensivi del rendimento di caldaia, ma anche di eventuali fattori di perdita dell'impianto.

In questi termini sembra che il gruppo caldaie in Corte Sara risulti mediamente più efficiente rispetto a quello installato in Corte Veronica, e che l'efficienza sia molto bassa in condizioni di sola produzione di ACS. In aggiunta a questo valore sono da considerare eventuali perdite termiche dei vari circuiti, che porterebbero l'energia termica disponibile per ACS e riscaldamento ad essere ancora inferiore.

3.4.4 Prestazioni delle pompe di calore in condizioni di riscaldamento

Il riavvio delle pompe di calore per la stagione di riscaldamento è stato possibile solamente nelle ore diurne grazie all'utilizzo di schede di controllo da remoto che ne consentivano la programmazione pianificata.

Si riportano a seguire alcuni dei dati acquisiti ed in particolare la Figura 3-32 riporta l'andamento delle potenze termiche ed elettriche per la pompa di calore 2 e per il complessivo, così come fornito dagli strumenti di misura.

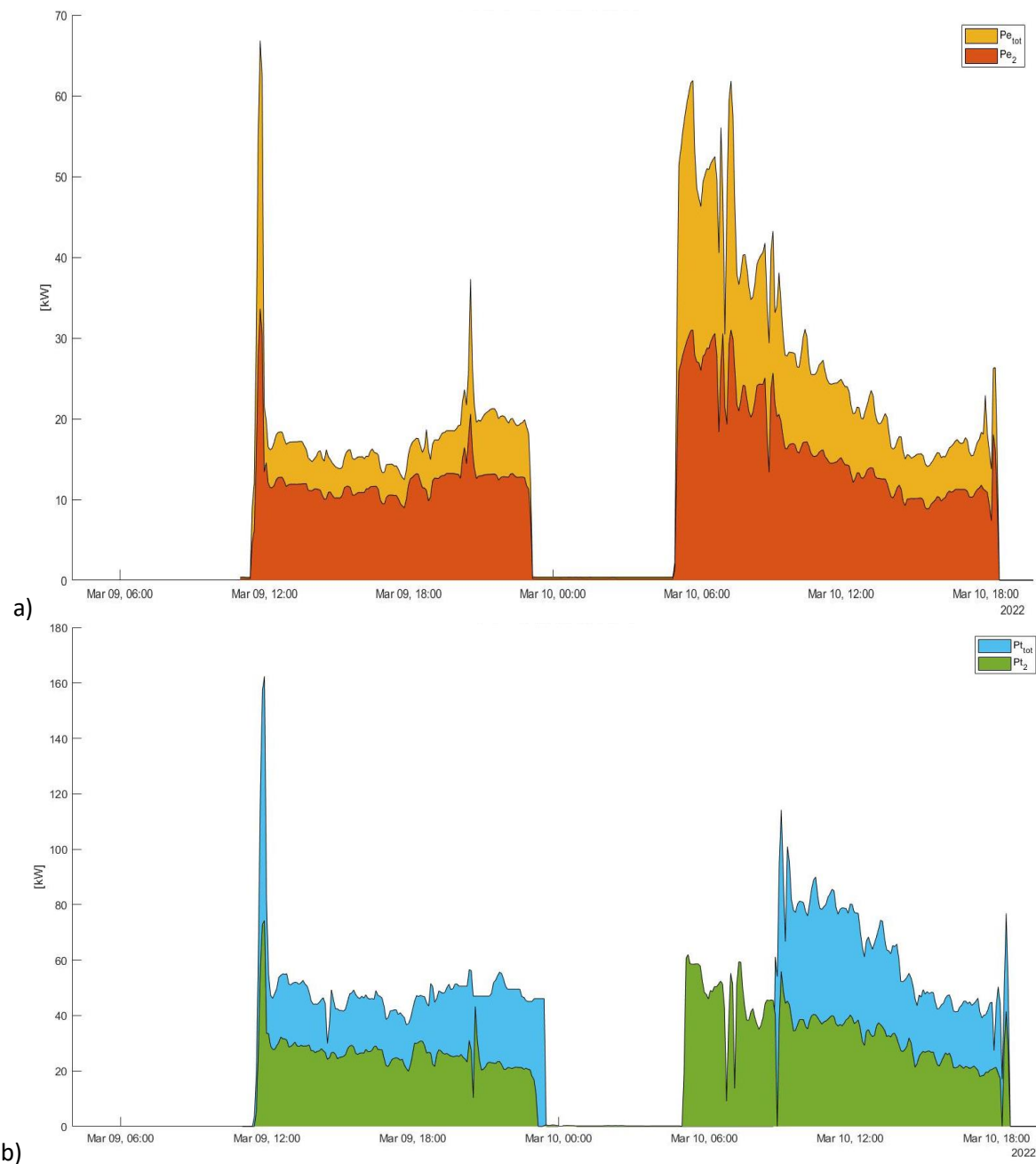


Figura 3-32 Andamento delle potenze elettriche (a) e termiche (b) nei giorni 9 e 10 marzo 2022 per la pompa di calore 2 ed il complessivo

Entrambe le pompe di calore sono in funzione con una portata media distribuita di circa 15 m³/h e vengono fatte operare con una logica di controllo che distribuisce il carico tra le due, come si evince anche dagli andamenti delle temperature di mandata e ritorno riportati in Figura 3-33.

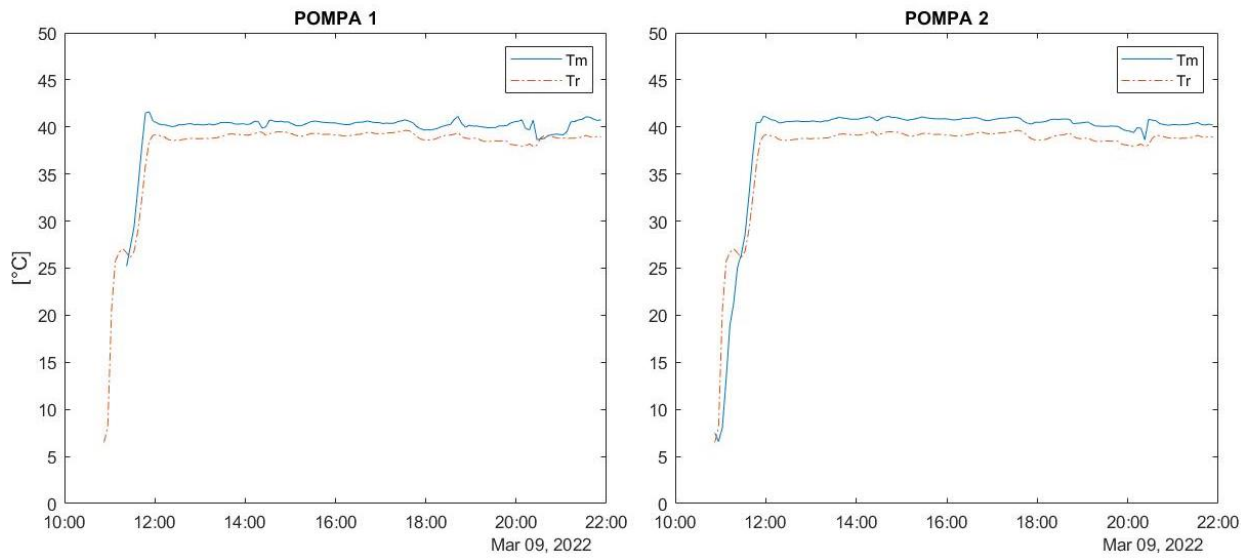


Figura 3-33 Andamento delle temperature di mandata e ritorno nel giorno 9 marzo 2022 per la pompa di calore 1 e 2

Come già evidenziato durante la stagione estiva, questo tipo di logica di controllo penalizza le prestazioni complessive dell’impianto con un COP che si assesta intorno ad un valore medio pari a 3.

La penalizzazione derivante dalla logica di controllo limita l’impatto della temperatura esterna sulle prestazioni finali dell’impianto, come si può osservare in Figura 3-34, in cui si vede un trend leggermente crescente con la temperatura esterna.

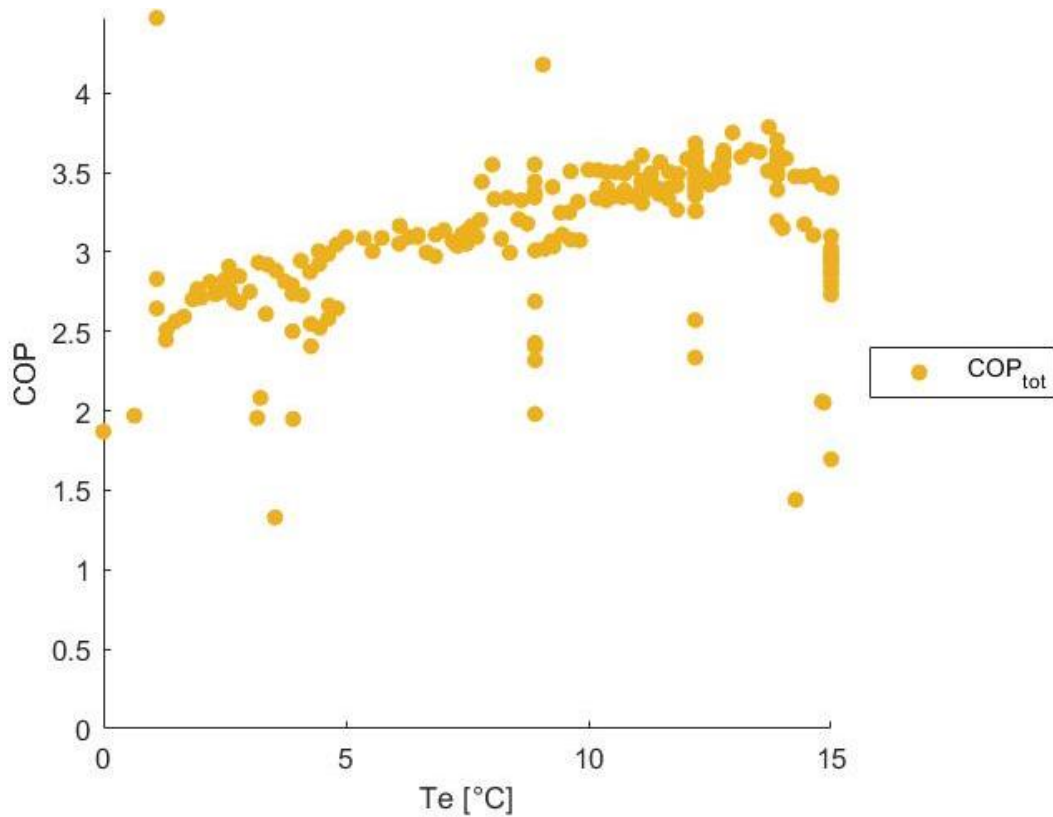


Figura 3-34 Andamento del COP dell’impianto complessivo al variare della temperatura esterna

4 Conclusioni

L'attività di modellazione ed analisi dei dati relativi a due casi studio si inserisce all'interno di una linea di attività il cui obiettivo principale è quello di dimostrare come l'introduzione di sistemi di monitoraggio rappresenti un valore aggiunto anche nel settore residenziale e possa svolgere un ruolo estremamente importante al fine di supportare dal punto di vista tecno-economico scelte tecnologiche innovative necessarie per la transizione energetica della società, con particolare riferimento alle tecnologie ad alta efficienza per la climatizzazione degli edifici.

I due casi studio, scelti appositamente con caratteristiche differenti sia dal punto di vista delle soluzioni impiantistiche sia dal punto di vista della tipologia (villetta monofamiliare vs. condominio), hanno consentito di portare avanti la ricerca su più livelli: oltre, infatti, agli aspetti prestazionali ed economici relativi alle tecnologie studiate, sono emersi in maniera preponderante anche gli aspetti sociali, tutt'altro che trascurabili. Ed è proprio da questi **aspetti sociali** che si ritiene opportuno partire nel trarre le opportune conclusioni riassuntive in merito alle attività di ricerca svolte.

La centralità del ruolo svolto dal fattore umano e dalla società pubblica in genere nella messa in atto della transizione energetica è un concetto che sta emergendo in maniera evidente negli ultimi anni. A tal proposito merita di essere citato il recente rapporto dell'associazione EERA (European Energy Research Alliance) "Clean Energy Transition: from Vision to Reality" [6], dove si sottolinea come la principale barriera alla transizione energetica è rappresentata dalla società che deve essere educata e sensibilizzata nei confronti delle nuove tecnologie e dei nuovi stili di vita che la transizione impone ed imporrà a tutti.

A questo proposito il White Paper introduce il concetto di "Clean Energy Narrative", cioè la necessità di definire un approccio basato sullo "story-telling" che coinvolga la società e la responsabilizzi, assegnandole un ruolo attivo e non semplicemente quello passivo di fruitore di tecnologie.

L'esempio più lampante dei rischi a cui si va incontro se non si sensibilizza la società è la cosiddetta sindrome "NIMBY" (Not In My Back Yard) che ha posto non poche barriere all'installazione di impianti a fonti rinnovabili (ad es. le turbine eoliche), riuscendo in alcuni casi a bloccare progetti ormai approvati.

Il ruolo fondamentale della società è emerso in modo evidente anche in questo progetto a vari livelli.

In primo luogo, si è potuta evidenziare fin da subito l'influenza della società civile sulle strategie costruttive del settore residenziale italiano ma anche europeo.

La ricerca condotta a livello nazionale ha infatti evidenziato, come fattore predominante, la necessità di indipendenza energetica del singolo di fronte ad ogni altra esigenza (economica e/o ambientale): gli impianti di riscaldamento nella maggior parte dei nuovi condomini vedono soluzioni innovative installate a livello di singola unità abitativa e praticamente mai a livello di condominio. Gli unici edifici caratterizzati da pompa di calore "condominiale" sono risultati essere edifici oggetto di riqualificazione energetica con caldaia a gas sostituita/integrata con una pompa di calore. E' evidente come questo trend costruttivo/impiantistico del settore residenziale sia assolutamente in contraddizione con le logiche attualmente proposte in termini di efficientamento energetico, che suggeriscono non solo l'aggregazione a livello di singolo edificio, ma addirittura l'aggregazione a livello di distretto (district heating).

Un altro aspetto sociale di assoluto rilievo che è emerso nel confronto tra i due casi studio, è la diversa possibilità di interazione e dialogo.

Nel caso della villetta monofamiliare, il dialogo con il proprietario e gli ingegneri progettisti è stato estremamente facile e rapido. La sensibilità verso le tematiche energetiche, evidente da parte di un proprietario di una casa passiva, ha consentito un'immediata comprensione delle finalità della ricerca nonché un veloce scambio di informazioni e dati. Anche nel caso dei condomini, la sensibilità verso le tematiche energetiche del singolo individuo è risultata essere fondamentale, questa volta nella figura dell'amministratore di condominio: consapevole della valenza scientifica dell'attività di ricerca e dei potenziali benefici derivanti dall'installazione di un sistema di monitoraggio, si è speso per ottenere l'approvazione del condominio all'avvio delle attività di progettazione ed installazione del sistema nonché alla possibilità di utilizzare i dati ai fini della ricerca. Tuttavia, durante lo svolgimento delle attività, ci si è dovuti scontrare con la difficoltà di dialogo e di interazione con i condòmini, portatori di sensibilità e di interessi spesso divergenti, e con tempistiche decisionali non in linea con le esigenze di attività di ricerca.

Questa difficoltà si potrebbe definire una delle “lessons learnt”, nonostante i negativi risvolti che hanno portato alle difficoltà evidenziate nell’avanzamento delle attività.

Da ultimo, ma non per questo meno importante, tra gli aspetti di indagine sociale, merita di essere segnalata la rilevanza dell’**aspetto educativo** nei confronti delle tematiche energetiche.

Nel primo caso studio, come già sottolineato, si è potuto apprezzare l’influenza che un’“educazione” energetica può avere nel percorso di transizione della società. La sensibilità del proprietario la si trova non solo nelle scelte costruttive ed impiantistiche, guidate dal principio dell’efficienza energetica, ma anche nella disponibilità dimostrata nei confronti dello svolgimento di attività di ricerca in ambito energetico. Nel secondo caso studio, in analogia a quanto già evidenziato a livello di società, è invece prevalsa la logica dell’interesse del singolo, a discapito di evidenti benefici ambientali ed economici derivanti dall’utilizzo di tecnologie più efficienti (-11.4% in fase di raffrescamento ottenuto senza logiche di controllo smart e in un limitato periodo di tempo). A questo proposito, si sottolinea il ruolo negativo giocato dall’emergenza COVID-19 che, unito alla difficoltà di interazione già menzionate, ha impedito l’organizzazione di assemblee condominiali nel 2020 e nel 2021, assemblee in cui si sarebbe potuto provare a sensibilizzare di più i condòmini per ottenere il riavvio dell’impianto stesso. Tuttavia, le bollette estremamente elevate ricevute dal condominio in marzo, unite ai risultati dell’analisi fatta grazie al sistema di monitoraggio, hanno convinto l’amministratore ad inserire tra le priorità di spesa l’insonorizzazione dell’impianto al fine di accelerare il suo riavvio.

Oltre agli aspetti sociali dell’analisi, è poi importante andare anche a valutare e confrontare gli **aspetti tecnologici ed economici** delle analisi condotte nei due casi studio.

Come già sottolineato, i due casi studio sono rappresentativi di due soluzioni costruttive quasi agli antipodi. Da un lato la villetta mono-familiare, il cui edificio è stato costruito adottando moderne soluzioni in termini di efficientamento e dotato di un impianto di climatizzazione efficiente con soluzioni avanzate, come la presenza dello scambiatore geotermico a monte della pompa di calore. Il tutto per ottenere un edificio con richieste minime di energia. Dall’altro due condomini caratterizzati da soluzioni costruttive standard e da impianti progettati in prima battuta secondo logiche tradizionali (caldaia a gas) e parzialmente rinnovati a seguito di un guasto (impianto ibrido).

La possibilità di disporre di un sistema di monitoraggio in entrambi questi casi ha consentito di condurre diverse tipologie di analisi tecno-economiche, sfruttando le peculiarità sopra descritte dei due casi studio, e andando a definire opportuni indici prestazionali tecnici ed economici e, laddove possibile, best-practises per edifici full-electric.

Complessivamente, l’attività di monitoraggio ha condotto a delle **analisi energetiche** di grande interesse, e caratterizzanti soluzioni costruttive tipiche del patrimonio costruito italiano.

Il primo caso studio ha permesso il confronto tra le prestazioni di targa di un aggregato compatto (Nilan Compact P) e le prestazioni determinate a partire dai dati forniti dal sistema di monitoraggio. L’analisi dei dati ha complessivamente confermato una più che buona aderenza delle prestazioni in condizioni operative reali con quelle di targa, consentendo inoltre alcune considerazioni estremamente importanti. In primo luogo, si è evidenziata l’influenza delle condizioni di umidità dell’aria in ingresso sulla valutazione degli indici prestazionali e l’importanza di considerare correttamente i processi di de-umidificazione dei singoli componenti della macchina al fine di stimare correttamente le prestazioni complessive.

In secondo luogo, il caso studio della villetta mono-familiare ha evidenziato l’influenza estremamente positiva della presenza di uno scambiatore geotermico a monte della pompa di calore. Grazie al sistema di monitoraggio, si è evidenziato come tale scambiatore garantisca – all’ingresso della macchina - condizioni operative pressoché costanti ed indipendenti dalla temperatura esterna, consentendo prestazioni ottimali della macchina. L’assenza di tale scambiatore comporterebbe un significativo incremento dei consumi, con conseguente sfioramento dei limiti imposti dalla normativa per la certificazione di “casa passiva”. Tale aumento dei consumi è da imputarsi principalmente alla maggiore richiesta di energia termica a cui la macchina, sotto-dimensionata nella configurazione in assenza di scambiatore, sopperisce tramite la

resistenza elettrica di post-riscaldamento. Fattore però non trascurabile è risultato anche essere lo spostamento del punto operativo della macchina che risente dell'influenza non trascurabile della temperatura esterna e vede ridurre i suoi indici prestazionali. L'abbinamento di una pompa di calore con scambiatore geotermico è quindi da considerarsi una "best-practise" nel settore residenziale con indici di sostenibilità economica che sono risultati essere assolutamente favorevoli e con consumi e costi di molto inferiori ad impianti con caldaia a condensazione e condizionatore tradizionale.

Il secondo caso studio ha offerto invece la possibilità di studiare, grazie all'installazione del sistema di monitoraggio, le prestazioni della stessa tecnologia a pompa di calore, inserita però in un impianto non ottimizzato in un'ottica di efficientamento energetico. Dopo aver modellato il sistema e definito opportuni indici prestazionali di tutte le tecnologie presenti (pompe di calore, caldaie tradizionali e gruppi di assorbimento) si sono effettuati confronti tecnici ed economici tra le tecnologie presenti nei due condomini e tra diverse logiche di gestione.

In particolare, nel caso specifico, i dati acquisiti tramite il sistema di monitoraggio hanno consentito di evidenziare:

- La conferma della dipendenza attesa in termini di efficienza rispetto alla temperatura esterna;
- L'importanza del corretto dimensionamento dell'impianto rispetto alla richiesta dell'utenza. Nel caso di Corte Veronica, le pompe di calore, fatte solitamente operare in parallelo, sono risultate funzionare ai carichi parziali in tutti i periodi analizzati con una conseguente penalizzazione del sistema in termini di efficienza;
- L'importanza di una logica di controllo ottimizzata. Nel confronto tra le tre diverse logiche di gestione delle due pompe di calore, monitorate in fase di raffrescamento, è risultata essere vincente, come atteso per i motivi suddetti, la configurazione ad una sola pompa di calore attiva rispetto sia alla configurazione con due pompe in parallelo. Si è però potuto anche dimostrare come sia opportuno spegnere la seconda pompa di calore e non mantenerla in sola ricircolazione, come invece viene ad essere solitamente fatto presso il condominio di Corte Veronica.
- Nonostante le logiche di controllo non ottimizzate, i gruppi di raffrescamento a pompe di calore hanno evidenziato comunque minori consumi complessivi di energia (-11.4% nel secondo periodo di riferimento), confermando la maggiore efficienza del sistema a pompe di calore rispetto ai gruppi di assorbimento tradizionali;
- Sempre con riferimento alle logiche di controllo, si è anche potuto analizzare l'impatto energetico ed economico di una modifica di impianto (da riscaldamento ibrido a sola caldaia tradizionale) non accompagnata da una revisione della logica di gestione dell'impianto stesso. Questo ha comportato una maggiore richiesta di energia termica (+30%) del condominio Corte Veronica rispetto all'omologo Corte Sara (in cui la logica di gestione era pensata per la sola caldaia) con un consumo di gas di circa 2000 m³/mese superiore a Corte Sara nei mesi più freddi (Dicembre 2021 e Gennaio 2022). Questo si rifletterà in un incremento della spesa energetica di oltre 2000€/mese, senza considerare i mancati risparmi energetici ed economici che si sarebbero potuti ottenere mantenendo in funzione le pompe di calore.

Complessivamente, quindi, i due casi studio hanno dimostrato come la presenza di un sistema di monitoraggio sia di fondamentale importanza per i seguenti motivi:

- **Tecnici:** consente di monitorare opportuni indici prestazionali del sistema, evidenziando gli aspetti positivi (es. scambiatore geotermico) o negativi (logiche di controllo non ottimizzate) di funzionamento delle tecnologie monitorate, con possibilità anche di individuare opportune "best-practices"
- **Diagnostici:** grazie al monitoraggio dei parametri e degli indici prestazionali, il sistema di monitoraggio ha anche consentito di evidenziare in tempo reale anomalie di funzionamento dell'impianto, a seguito di scostamento dei parametri monitorati dai valori attesi, anomalie che sono sfociate in guasti e fermi di impianto (nei due condomini). E' emersa quindi in modo evidente

la valenza del monitoraggio anche come sistema diagnostico a supporto dell'attività di manutenzione, anche in un'ottica futura di aumentare la manutenzione smart e/o predittiva (se abbinato ad esempio a digital twin).

- **Economici:** i dati forniti dal sistema di monitoraggio consentono importanti valutazioni tecnico-economiche che diventano fondamentali ai fini di scelte decisionali di investimento non solo per il caso specifico ma anche come riferimento per edifici con caratteristiche costruttive e contesti climatici simili.
- **Educativi:** alla luce delle barriere sociali e dell'evidente necessità di educazione e sensibilizzazione nel settore residenziale, l'installazione del monitoraggio riveste un ruolo di primaria importanza perché consente di dimostrare e valorizzare i benefici derivanti da alcune soluzioni tecnologiche.

Alla luce delle motivazioni suddette, è importante sottolineare come i condomini di Corte Veronica e Corte Sara rappresentino un vero e proprio "unicum" a livello scientifico non solo nazionale ma anche internazionale in quanto si tratta di edifici reali che possiedono tutte le caratteristiche (gemelli dal punto di vista costruttivo e situati in condizioni climatiche identiche) per consentire un confronto puntuale e preciso tra tecnologie (pompe di calore vs. caldaia/gruppi assorbimento) in ambito residenziale ed in condizioni operative reali.

Per tale motivo, l'installazione di un sistema di monitoraggio degli impianti presso questi edifici ha rappresentato e continuerà a rappresentare un enorme valore aggiunto non solo per il presente progetto di ricerca ma più in generale per tutta la ricerca scientifica nell'ambito delle tecnologie per il condizionamento degli ambienti in ambito residenziale, sebbene tale impianto di monitoraggio ad oggi non è stato sfruttato nel pieno delle sue potenzialità.

Per questo motivo, è obiettivo dell'Università di Padova, in collaborazione con ENEA, quello di cercare di proseguire la sperimentazione, possibilità resa ancora più concreta dalla recente decisione dell'Amministratore di condominio – e grazie all'evidenze portate da queste attività di ricerca- di inserire l'intervento di insonorizzazione tra le priorità del condominio.

Possibili obiettivi di indagine ulteriore potrebbero essere:

- Ampliare l'analisi ed il confronto tra le tecnologie così da raccogliere più dati a supporto della convenienza energetica ed economica delle tecnologie ad alta efficienza;
- Ottimizzare la logica di gestione dell'impianto ibridato, verificando sia sperimentalmente che tramite modellazioni ad hoc, se è possibile anche escludere completamente le caldaie a gas, ad esempio tramite l'opportuno inserimento di accumuli termici;
- Combinare i dati di prestazione degli impianti con la situazione di comfort reale (temperature misurate nelle abitazioni) o percepita (interviste) in funzione della posizione dell'unità abitativa del condominio e della sua esposizione;
- Definire nuove logiche di controllo ottimizzate in funzione dei parametri di comfort delle abitazioni e non di parametri generali dell'intero condominio;
- Sperimentare, tramite i dati acquisiti dal sistema di monitoraggio e le analisi condotte (tecnologiche, economiche, diagnostiche, di comfort), innovative attività di sensibilizzazione nel settore residenziale finalizzate a valorizzare i benefici derivanti dall'utilizzo di tecnologie ad alta efficienza;
- Analizzare le attuali strategie di manutenzione degli impianti e confrontarle secondo parametri tecnici ed economici con strategie ottimizzate basate sui dati forniti dal sistema di monitoraggio, eventualmente esteso alle unità abitative

5 Riferimenti bibliografici

1. EHPA I., “Mercato europeo delle pompe di calore e statistiche” (2018)
URL http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards/
2. O. Cauret, “Heat pumps in multi-family buildings, drivers and barriers”, Heat Pumping Technologies Magazine, 39 (2021), pp. 15-17, <https://doi.org/10.23697/eaz5-wx31>
3. Amici della Terra – Assoclimate, “La pompa di calore – Una tecnologia chiave per gli obiettivi 2030”, Report, (2019), URL https://www.assoclimate.it/media/files/1686_rapporto_pompedicalore_2019.pdf
4. O. Ruhnau, L. Hirth, A. Praktinjo, “Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modelling”, Scientific Data, 6 (2019), 1-10, URL <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0199-y>
5. D. Fischer, T. Wolf, J. Wapler, R. Hollinger, H. Madani, “Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool”, Energy, 118 (2017), pp. 853–864
6. EERA (2021) Clean Energy Transition: from Vision to Reality. White paper

Prof.ssa Giovanna Cavazzini, PhD, è professoressa associata, titolare del corso di Macchine 1 per la laurea in Ingegneria Meccanica, del corso di Motori a Combustione Interna per la laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica all'Università di Padova e del corso di Renewable Energy Technologies per la laurea Magistrale in Sustainable Chemistry & Technologies for Circular Economy. Responsabile scientifico del Museo di Macchine "Enrico Bernardi" dell'Università degli Studi di Padova, è autrice di oltre 100 pubblicazioni scientifiche la maggior parte delle quali su riviste internazionali dotate di Impact Factor e su congressi internazionali, nell'ambito dei quali ha ricevuto 5 Best Paper Award.

Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca ricoprendo in molti il ruolo di coordinamento. Ha ricevuto il premio come miglior progetto di ricerca presentato nell'ambito del bando FSE 2016 della Regione Veneto in collaborazione con l'Università di Verona sull'efficientamento e la gestione ottimizzata di reti idriche.

Ha partecipato a numerosi contratti di ricerca con società industriali, nella maggior parte dei quali con il ruolo di Responsabile Scientifico.

E' membro del management board del Joint Program Energy Storage dell'European Energy Research Alliance (EERA), e ha organizzato 5 workshop internazionali sugli impianti ibridi di produzione e stoccaggio dell'energia. Ha numerose collaborazioni scientifiche con enti di ricerca nazionali ed internazionali e con numerose aziende (es. General Electric, Electrolux, ENEL).

E' stata revisore nell'ambito di programmi nazionali (VQR 2011-2014, PRIN 2016) ed internazionali (Horizon 2020, Innovation Fund, Horizon Europe) e svolge attività di revisione per numerose riviste internazionali.

La sua attività di ricerca è incentrata sull'analisi ed ottimizzazione di cicli Rankine organici per il recupero di calore a bassa temperatura, sull'analisi di fattibilità tecno-economica relativamente all'implementazione di tecnologie innovative ad alta efficienza in processi industriali, sulla progettazione ed ottimizzazione di macchine a fluido e sulla gestione ottimizzata di impianti idroelettrici di accumulo. In particolare, ha posto l'attenzione sullo sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione delle prestazioni delle macchine, degli impianti per la conversione di energia e dei processi produttivi.

Prof.ssa Anna Stoppato, PhD, è professoressa associata di Macchine a fluido presso il dipartimento di Ingegneria industriale dell'Università di Padova ed è docente nel corso di laurea in Ingegneria dell'energia e nei corsi di laurea magistrale in Energy Engineering e in Sustainable Chemistry & Technologies for Circular Economy. Si occupa di temi legati all'efficientamento energetico, in particolare in ambito industriale, di impianti energetici poligenerativi e di sistemi energetici complessi, di stoccaggio dell'energia, di produzione, stoccaggio, trasporto e uso di idrogeno, di cavitazione idrodinamica. E' esperta di LCA.

L'attività è documentata da 130 pubblicazioni, di cui oltre 40 su riviste con referee. H-index: 24 (Scopus)- 21 (WOS), 2165 citazioni (Scopus)-1672(WOS). Secondo lo Stanford Index - Scopus Anna Stoppato è considerata tra gli scienziati di maggior impatto scientifico a livello mondiale sia nel 2020 che nel 2021.

Prof. G. Ardizzone, professore ordinario, titolare dei corsi di Macchine 1 e Macchine 2 per i corsi di laurea triennale e magistrale in Ingegneria Meccanica all'Università di Padova, è autore di più di 120 pubblicazioni scientifiche, la maggior parte delle quali su riviste internazionali dotate di Impact Factor e su congressi internazionali. E' stato Direttore del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, membro della Commissione Tecnica UNI "Pompe e Piccole Turbine Idrauliche", nonché revisore nell'ambito di programmi nazionali (VQR 2004-2010, PRIN, Futuro in Ricerca) e di progetti di ricerca finanziati da fondazioni private. Ha svolto attività di peer-review per diverse riviste e congressi internazionali. E' stato responsabile scientifico di diversi contratti di ricerca nell'ambito della progettazione ottimizzata di macchine a fluido finanziati da società industriali. E' stato membro del Comitato Scientifico del Congresso Internazionale ECOS 2007.

La sua attività di ricerca è incentrata sulla progettazione ed ottimizzazione di macchine a fluido, sulla gestione ottimizzata di impianti idroelettrici, sullo sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione delle prestazioni delle macchine e degli impianti per la conversione di energia.

Prof. G. Pavesi, PhD, professore associato, titolare del corso di Macchine per il corso di laurea triennale in Ingegneria dell'Energia e del corso di "Macchine per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili" per il corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica all'Università di Padova, è autore di più di 120 pubblicazioni

scientifiche, la maggior parte delle quali su riviste internazionali dotate di Impact Factor e su congressi internazionali. È stato visiting professor presso l'Università di Duisburg-Essen-Germania (2008, 2010, 2012), presso la Jiangsu University-Cina (2012-2013-2015) e presso il Von Karman Institute (2006). È membro di due Commissioni IEC (International Electromechanical Commission), dell'Editorial Board di tre riviste internazionali e di numerosi Comitati Scientifici di congressi internazionali. È Reviewer Organizer per il congresso ETC (European Turbomachinery Conference) dal 2009.

Svolge il ruolo di Delegato del Rettore per gli esami di ingresso ed è stato Presidente del Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia. È delegato italiano dell'International Electrotechnical Commission IEC (Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Cavitation pitting evaluation Machines and Hydraulic Machines, Radial and Axial – Performance Conversion Method from Model to Prototype) e membro del Direttivo dell'AIMSEA.

La sua attività di ricerca è incentrata sulla progettazione ed ottimizzazione di macchine a fluido, sull'ottimizzazione della gestione e delle prestazioni di impianti idroelettrici e di accumulo dell'energia e sull'analisi dell'instabilità operative nelle pompe-turbine.

Ing. Alberto Benato, PhD, è professore a contratto del corso di Macchine con Laboratorio della laurea in Ingegneria Meccanica presso l'Università di Padova, dove ha conseguito la laurea triennale in Ingegneria Energetica e la laurea magistrale in Ingegneria Energetica. Nel 2011 entra a far parte in qualità di borsista di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Padova mentre, nel 2012, inizia il dottorato di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale sempre dell'Università degli Studi di Padova. Nel 2015 consegue il dottorato di ricerca con la Menzione di "DOCTOR EUROPAEUS". Dal 2015 al 2018 svolge le sue ricerche nel campo delle Macchine a Fluido e dei Sistemi Energetici in qualità di Post-doc presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. Sempre presso la medesima istituzione, dal 2018 al 2021, ricopre il ruolo di ricercatore universitario di tipo A mentre, dal dicembre 2021 è ricercatore universitario di tipo B.

Ad oggi, è autore di 52 contributi in rivista peer-review internazionale, 40 contributi in atti di convegno nazionale ed internazionale, 4 capitoli di libro (internazionale) e 9 pubblicazioni di report tecnici. È inoltre possessore di un brevetto italiano relativo ad un sistema di accumulo dell'energia elettrica sotto forma termica.

Le sue ricerche vertono su sistemi di produzione dell'energia elettrica e termica alimentati sia da fonti fossili che rinnovabili, sistemi di stoccaggio dell'energia di tipo meccanico e termico, unità di recupero del calore di scarto, ottimizzazione del design e della strategia di gestione di sistemi ibridi di generazione e stoccaggio dell'energia e valutazione delle performance dei sistemi di generazione elettrica e termica installati presso edifici o gruppi di essi.