



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione e realizzazione sistema di controllo per test sperimentali del tipo “hardware-in-the-loop” su impianti in Pompa di Calore

G.L. Morini, C. Naldi, P. Valdiserri, C. Biserni,
E. Rossi di Schio, G.P. Fabbri



PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE SISTEMA DI CONTROLLO PER TEST SPERIMENTALI DEL TIPO “HARDWARE-IN-THE-LOOP” SU IMPIANTI IN POMPA DI CALORE

G.L. Morini, C. Naldi, P. Valdiserri, C. Biserni, E. Rossi di Schio, G.P. Fabbri (Dipartimento di Ingegneria Industriale, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Pompe di calore

Linea di attività: *Sistemi complessi di PdC integrate: Progettazione e realizzazione sistema di controllo per test sperimentali del tipo “hardware-in-the-loop”*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “*Integrazione delle Pompe di Calore in sistemi di condizionamento complessi*”

Responsabile scientifico ENEA: Francesco D’Annibale

Responsabile scientifico UNIBOLOGNA : Gian Luca Morini

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	8
2.1 L'IMPIANTO HARDWARE-IN-THE-LOOP (HiL) DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	8
2.2 IL SISTEMA DI CONTROLLO DELL'IMPIANTO HiL	16
2.2.1 <i>Linea di collegamento Pompa di calore-Accumulo caldo</i>	17
2.2.2 <i>Accumulo caldo</i>	17
2.2.3 <i>Aerotermini interni alla camera climatica</i>	18
2.2.4 <i>Aerotermini esterni</i>	19
2.2.5 <i>Collegamento tra accumulo caldo-accumulo freddo</i>	20
2.2.6 <i>Collegamento tra accumulo freddo e chiller esterno</i>	21
2.2.7 <i>Linea circuito geotermico</i>	21
2.2.8 <i>Monitoraggio pompa di calore</i>	21
2.2.9 <i>Monitoraggio condizioni esterne</i>	22
2.2.10 <i>Monitoraggio condizioni aria all'interno della camera climatica</i>	22
2.3 LA LOGICA DI CONTROLLO	22
2.3.1 <i>Test su pompe di calore GSHP</i>	23
2.3.2 <i>Test su pompe di calore ASHP</i>	24
2.3.3 <i>Test su pompe di calore DSHP</i>	25
2.4 VALUTAZIONI PRELIMINARI SULLA LOGICA DI CONTROLLO	25
3 CONCLUSIONI.....	27
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	29

Sommario

Le pompe di calore durante la loro vita operativa lavorano per moltissime ore in condizioni anche molto diverse da quelle nominali a cui vengono testate dai costruttori. Per comprendere il loro funzionamento ai carichi parziali ed in condizioni di lavoro non stazionarie è necessario definire nuove prove sperimentali in cui le pompe di calore si trovino a lavorare in condizioni simili a quelle reali. Sono per questo state proposte procedure di test basate su circuiti Hardware-in-the-loop (HiL), che permettano di sottoporre le pompe di calore a verifiche sperimentali volte ad accertare le loro prestazioni nelle fasi non stazionarie ritenute maggiormente critiche. A questo scopo è stato messo a punto presso il Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna un circuito HiL per pompe di calore ad aria, geotermiche o dual source in cui possono essere testate pompe di calore di potenza termica nominale inferiore a 15 kW termici. In questa relazione viene descritto il Circuito HiL e, in particolare, il nuovo sistema di controllo, realizzato in LabView, con cui si comandano i diversi sottosistemi che lo compongono. L'aspetto maggiormente innovativo del sistema descritto è la possibilità di accoppiare un simulatore dinamico (ad es. TRNSYS) all'impianto, al fine di simulare il comportamento della pompa di calore accoppiandola "virtualmente" a qualsiasi edificio, con qualsiasi terminale, in qualunque località. Il sistema si presta a definire nuove logiche di controllo ottimali per la massimizzazione delle prestazioni energetiche degli impianti a pompa di calore in funzione delle tipologie di edificio e di terminali utilizzati. E' inoltre uno strumento utile al fine di mettere a punto prove rapide per la stima delle prestazioni stagionali delle pompe di calore. Infine, questo tipo di test permette di ottenere una "copia digitale" della pompa di calore che simuli perfettamente il suo funzionamento reale (Digital Twin). Tale "copia digitale" può permettere di rilevare in anticipo guasti e malfunzionamenti delle pompe di calore installate riducendo sprechi economici ed energetici.

1 Introduzione

In Europa, il patrimonio edilizio è responsabile di circa il 36% di tutte le emissioni di anidride carbonica [1]. Per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂ decisi a livello europeo, l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili (FER) ha un ruolo decisivo. La Direttiva Europea 2018/2001 [2] afferma che la quota di energia rinnovabile nel consumo finale lordo europeo di energia deve raggiungere il 32% entro il 2030 e identifica l'energia aerotermica, geotermica e idrotermica come FER.

In questo quadro, le pompe di calore diventano le principali candidate alla progressiva sostituzione dei generatori di calore tradizionali (caldaie) negli impianti di riscaldamento a servizio degli edifici, permettendo di ottimizzare lo sfruttamento delle energie rinnovabili legate all'aria, al suolo o all'acqua [3,4]. In Europa, la tipologia più diffusa di pompa di calore utilizzata negli impianti di condizionamento domestici è rappresentata dalla pompa di calore aerotermica (ASHP), come evidenziato dai dati di mercato [5]. Le ASHP, rispetto alle pompe di calore geotermiche (GSHP), sono più economiche e semplici da installare, sebbene presentino alcuni svantaggi da tenere in conto in fase di progettazione. Innanzitutto, le prestazioni di una pompa ASHP calano quando la temperatura esterna diminuisce, mentre aumenta il fabbisogno energetico dell'edificio. Per questo motivo, in molti casi si accoppia alla pompa ASHP un sistema di generazione di riserva o backup. Dongellini et al. [6] hanno studiato l'importanza del corretto dimensionamento delle pompe di calore ad aria in presenza di resistenze elettriche di back-up per ottenere un'elevata efficienza stagionale. Bagarella et al. [7] hanno dimostrato come il dimensionamento della pompa di calore ad aria influenzi le prestazioni annuali del sistema di riscaldamento nei sistemi ibridi quando una caldaia a gas viene utilizzata come sistema di integrazione. Inoltre, gli stessi autori hanno dimostrato che il dimensionamento dell'accumulo termico ed i fenomeni transitori legati all'avviamento della pompa di calore possono influenzare le prestazioni annuali del sistema.

Il rischio di formazione di brina, in particolare nei climi invernali caratterizzati da elevati valori di umidità relativa (>50%) e temperature non troppo rigide (0-6°C), è un ulteriore problema per le pompe di calore che usano l'aria come serbatoio termico esterno [8]. I cicli di sbrinamento vengono normalmente attivati durante il periodo invernale quando la temperatura esterna scende sotto i 6 °C e l'umidità relativa dell'aria è maggiore del 50%; lo sbrinamento riduce le prestazioni energetiche dell'impianto di riscaldamento nonché il comfort termico in ambienti riscaldati, come sottolineato da Vocale et al. [9], arrivando a penalizzare fino al 15% il valore stagionale di efficienza della pompa di calore (SCOP). Al contrario, le pompe di calore geotermiche (GSHP) sono mediamente più efficienti delle pompe ASHP perché sono in grado di utilizzare un serbatoio termico esterno (il suolo) che è termicamente più stabile dell'aria durante la stagione invernale [10]. Gli impianti basati su pompe GSHP sono però più costosi di quelli basati su ASHP, poiché vedono la pompa di calore accoppiata ad uno scambiatore di calore geotermico a pozzo (BHE) dedicato. Come sottolineato da You et al. [11], le prestazioni energetiche delle pompe GSHP diminuiscono notevolmente in presenza di edifici con carichi termici sbilanciati tra l'inverno e l'estate. Infatti, in caso di predominanza dei carichi termici invernali rispetto a quelli estivi e con un dimensionamento non ottimizzato dello scambiatore geotermico, la temperatura del terreno può diminuire di anno in anno portando, di fatto, ad un deterioramento dell'efficienza stagionale della pompa di calore. Ciò introduce il rischio di arrivare al blocco per guasto della pompa [11]. Le differenze di prestazioni tra ASHP e GSHP sono state recentemente mostrate da Safa et al. [12] in uno studio comparativo sperimentale e numerico e da Self et al. [13].

Una possibile soluzione agli svantaggi elencati sia delle pompe ASHP che delle pompe GSHP può essere quella di realizzare pompe di calore in grado di valorizzare più serbatoi termici esterni: i sistemi ibridi. Questi sistemi possono essere suddivisi in due categorie: (i) sistemi ibridi composti da più generatori o (ii) sistemi ibridi basati su un unico generatore ma in grado di sfruttare diversi serbatoi termici (ad esempio aria e terreno). Quest'ultimo caso può essere ottenuto adottando una pompa di calore dual-source (DSHP) aria-terreno. La definizione di "pompa di calore dual-source" è stata utilizzata anche per indicare sistemi ibridi basati su più generatori, come descritto da Lazzarin [14]. L'autore definisce un sistema di riscaldamento a pompa di calore a doppia sorgente basato sia su ASHP e collettore solare termico o GSHP e

collettore solare termico. Al contrario, i dati sulle prestazioni di una pompa di calore in grado di sfruttare l'energia sia dell'aria che del suolo (qui denominata DSHP) sono ancora limitati. Grossi et al. [15] hanno analizzato le prestazioni energetiche stagionali e annuali di una pompa DSHP accoppiata ad una casa unifamiliare di un piano situata a Bologna. Gli autori hanno condotto una serie di prove sperimentali per ottenere le curve caratteristiche di un innovativo prototipo di DSHP e realizzato un modello TRNSYS per la valutazione della prestazione energetica variando le dimensioni del campo di sonde geotermiche accoppiato alla pompa. Gli indicatori di prestazione vengono confrontati con quelli ottenuti utilizzando la DSHP come pompa di calore completamente aerotermica (modalità aerotermica) o come pompa di calore completamente accoppiata al terreno (modalità geotermica) allo scopo di esplorare in quali condizioni una pompa di calore DSHP può essere competitiva rispetto ai sistemi monovalenti convenzionali basati su pompe di calore. E' stato dimostrato come le pompe DSHP possano ottimizzare le prestazioni stagionali dell'impianto di riscaldamento contribuendo a ridurre il fenomeno della deriva termica del terreno in caso di carichi invernali ed estivi sbilanciati e l'impatto dello sbrinamento sull'efficienza del sistema e sul comfort interno garantito nell'edificio servito dalla pompa di calore.

Il cambio di serbatoio esterno con cui interagire, il modo di regolare la potenza termica in funzione della richiesta dell'edificio, l'attivazione del sistema di back-up ed il controllo del defrosting richiedono sistemi di controllo ottimizzati che risulta difficile testare in campo.

Per lo studio approfondito di tali sistemi e la messa a punto di un sistema di controllo ottimizzato che permetta al sistema di lavorare con la massima efficienza può essere di grande aiuto l'utilizzo di simulazioni Hardware-in-the-Loop (HiL).

La tecnica HiL è molto diffusa nell'ambito controllistico, in particolare nel campo dell'automazione, ma si sta cominciando a diffondere anche nella termotecnica sperimentale per la caratterizzazione in laboratorio di sistemi di riscaldamento polivalenti, ovvero realizzati integrando sorgenti termiche differenti.

In particolare, negli articoli di Haves et al. [16], Lahrech et al [17] ed Anderson et al. [18] viene mostrato come sia possibile realizzare test di laboratorio di sistemi di riscaldamento anche complessi a partire dalla utilizzazione di camere climatiche in grado di simulare la condizione di carico termico reale e di clima esterno che il sistema si troverà a dover fronteggiare in un caso reale riprodotto attraverso l'uso di codici di simulazione dinamica. A titolo di esempio, Da Silva e Knabe [19] hanno applicato il metodo HiL utilizzando un sistema di simulazione ed emulazione dell'edificio accoppiato ad una macchina per la produzione di acqua calda sanitaria per la messa a punto di un sistema di regolazione ottimizzato per l'erogazione di ACS in presenza di profili di carico differenti. In Riederer et al. [20] viene invece utilizzato un metodo dinamico per testare sperimentalmente le prestazioni di pompe di calore geotermiche basate sui risultati della simulazione dinamica di un edificio e del terreno circostante.

Mediante test basati sulle simulazioni HiL che coinvolgano oltre al sistema di riscaldamento anche il sistema di accumulo termico eventualmente presente, sistemi di produzione e di conversione dell'energia e il sistema di distribuzione idraulico, si può valutare non solo il comportamento del controllo dei generatori ma far interagire tale controllo con l'intero sistema. Su questa idea sono basati i test WST (Whole System Testing).

Haller et al. [21] hanno descritto lo stato dell'arte attuale relativo ai test WST in un lavoro di review. In tale articolo si evidenzia come l'interazione tra i componenti ed il sistema di controllo giochi un ruolo di fondamentale importanza nella corretta valutazione delle prestazioni energetiche del sistema. Le prestazioni dei vari componenti dell'impianto (es. collettori solari, pompa di calore, etc.) sono generalmente note da test stazionari basati su norme come la EN 12975-2 per i collettori solari e la EN 14511-3 per le pompe di calore. Tuttavia, questo non è sufficiente poiché quando i diversi componenti vengono accoppiati all'interno di un sistema di riscaldamento nascono interazioni dinamiche tra le diverse parti del sistema che sono fortemente influenzate dal comportamento non stazionario dei singoli componenti. Mediante i test WST è possibile, in linea di principio, studiare sistemi di riscaldamento polivalenti in condizioni di funzionamento non stazionarie mettendo in evidenza comportamenti inaspettati

del sistema che non potevano essere determinati e previsti solo combinando i risultati ottenuti sui singoli componenti di impianto tramite test condotti in stato stazionario.

Le prove di laboratorio WST non sono ancora normate e per questo non è disponibile un protocollo standard che permetta alle prove sperimentali WST di essere realizzate in tutti i laboratori di ricerca. Al momento, come evidenziato da Haller et al. [21], i metodi WST sviluppati sono leggermente diversi tra loro ma hanno tutti lo stesso obiettivo: studiare il comportamento dinamico ed il consumo energetico dell'intero sistema nelle condizioni che si realizzano effettivamente in una serie di edifici durante una serie di giorni dell'anno scelti appositamente. Per fare ciò, vengono selezionati sei o dodici giorni-tipo (secondo il metodo) che risultino rappresentativi, per l'utenza in questione, dell'intero anno termico. La richiesta di riscaldamento dell'utenza viene quindi simulata ed emulata in quei giorni mediante codici di simulazione dinamica (ad es. TRNYS, ESP-r, Energy+, AlmaBuild) e anche la richiesta di acqua calda sanitaria oraria, la produzione di energia termica da collettori solari, celle fotovoltaiche etc. viene dedotta da simulazioni dinamiche. I dati di carico termico orario così ottenuti ed i dati climatici esterni relativi alla località in cui la macchina verrà installata vengono riprodotti in laboratorio attraverso l'uso di apposite camere climatiche (macchine ad aria) o circuiti idraulici termostatati (macchine idroniche). In questo modo viene studiato il comportamento dell'intero sistema di riscaldamento funzionante in condizioni dinamiche realistiche.

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di progettare e realizzare il sistema di controllo di una specifica camera climatica (CC) da utilizzare per testare le prestazioni energetiche di una pompa di calore sotto carichi dinamici simili a quelli reali. Il circuito sperimentale permette di testare prototipi di pompe di calore ad aria e geotermiche. Poiché gli esperimenti sul campo negli edifici reali occupati sono costosi e richiedono l'autorizzazione degli occupanti, la camera climatica proposta è una comoda possibilità per simulare e testare il comportamento di ASHP, GSHP e DSHP in condizioni esterne dinamiche reali. A tal fine, la CC è stata progettata al fine di controllare sia la temperatura dell'aria che la temperatura dell'acqua in ingresso alla pompa di calore utilizzando un approccio "Hardware-in-the-loop" (HiL).

De La Cruz et al. [22] hanno descritto l'implementazione di un banco di prova per la simulazione in tempo reale del tipo HiL per pompe di calore, dimostrando che questo approccio è adatto per testare logiche di controllo innovative per pompe di calore e per ridurre i costi e i tempi necessari per lo sviluppo di pompe di calore commerciali. Conti et al. [23] hanno dimostrato l'importanza di un'analisi dinamica del sistema HVAC-edificio e hanno mostrato il potenziale dell'approccio HiL nella valutazione delle prestazioni effettive della pompa di calore quando viene chiamata ad operare a carico parziale. Frison et al. [24] hanno testato un algoritmo di controllo predittivo del modello in un ambiente HiL. Seguendo l'approccio del concetto di hardware-in-the-loop, Mehrfeld et al. [25] hanno eseguito un round-robin test per verificare il processo sperimentale e i suoi risultati per tre sistemi di conversione dell'energia: pompa di calore ad aria, pompa di calore geotermica, micro cogeneratore.

La camera climatica (CC) realizzata presso il Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna è idonea a testare sia pompe di calore innovative (ad es. dual-source) sia a studiare pompe di calore mono-serbatoio esterno (pompe convenzionali ad aria o geotermiche) consentendo di testare l'efficienza di innovative logiche di controllo.

Il software dinamico, emulatore dell'edificio a cui la pompa di calore risulta accoppiata, consente di impostare sia il valore della temperatura e dell'umidità dell'aria esterna che viene riprodotta nella cella climatica, sia il valore della temperatura dell'acqua in ingresso alla pompa di calore (legata al carico termico istantaneo richiesto dall'edificio). I dati ottenuti dal software di simulazione energetica dinamica vengono utilizzati come controller del sistema HiL.

Il ruolo della simulazione energetica dinamica nella progettazione della camera climatica e del suo circuito idronico è molto importante. D'altra parte, l'utilizzo del software di simulazione dinamica può essere considerato uno strumento utile anche in fase di progettazione della camera climatica, per studiare il comportamento della camera e del suo circuito idronico in condizioni non stazionarie. In questo caso, Trnsys [26] e Simulink [27] sono stati selezionati per prevedere il comportamento del circuito idronico e della camera climatica durante i test sperimentali. Il circuito idronico e la camera climatica sono stati

modellati con entrambi i software. L'utilizzo dei due modelli ha consentito una previsione più precisa delle prestazioni del sistema. In questa relazione vengono presentati i principali componenti del sistema HiL e descritto il loro comportamento in condizioni di lavoro stazionarie e non stazionarie evidenziando le principali caratteristiche tecniche del sistema sperimentale e del suo sistema di controllo.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 L'impianto Hardware-in-the-Loop (HiL) dell'Università di Bologna

L'impianto Hardware-in-the-Loop (HiL) presente nel Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna si compone di:

- Una Camera Climatica (CC)
- Un circuito idronico (Hydraulic Loop, HL)
- Un simulatore software in grado di riprodurre il comportamento termico di un edificio, del circuito di distribuzione del fluido termovettore, del sistema di regolazione e degli emettitori termici installati nell'edificio (Building Emulator, BE) [28-29].

La camera climatica (CC) occupa un locale avente un volume netto interno di 60 m^3 . La zona ha una lunghezza di 5 m e una larghezza di 4 m per una altezza netta di 3 m. Le superfici interne sono isolate termicamente da 0.35 m di polistirolo commerciale: la trasmittanza termica delle pareti laterali e del soffitto è pari a $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ e di $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il pavimento. Il coefficiente di trasmissione complessivo H della stanza è pari a circa 13 W/K .

La CC si trova all'interno del Laboratorio di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna ed è comandata mediante un simulatore dinamico che permette di emulare il comportamento termico dell'edificio a cui si pensa accoppiata la pompa di calore da testare.

In Figura 1 vengono rappresentati i sottosistemi di cui si compone la camera HiL.

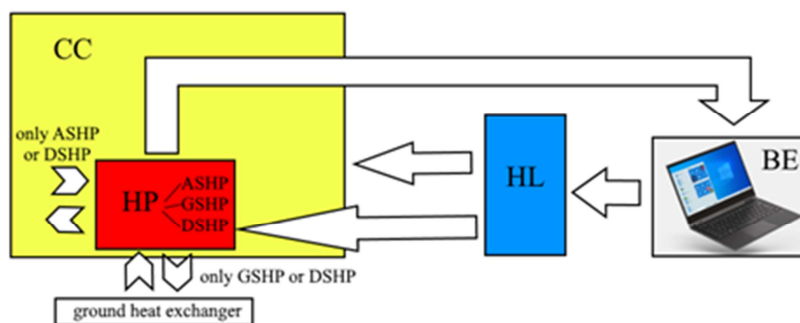


Figura 1. Schema di principio della camera HiL.

La CC permette di testare sia pompe di calore ad aria (ASHP) che pompe di calore geotermiche (GSHP). Inoltre, la CC può essere impiegata per valutare le prestazioni di pompe di calore dual-source (DSHP). In questo caso gli evaporatori sono accoppiati sia all'aria interna della CC che al terreno, utilizzando le sonde geotermiche presenti.

Lo schema completo del circuito idronico (HL) è mostrato in Figura 2.

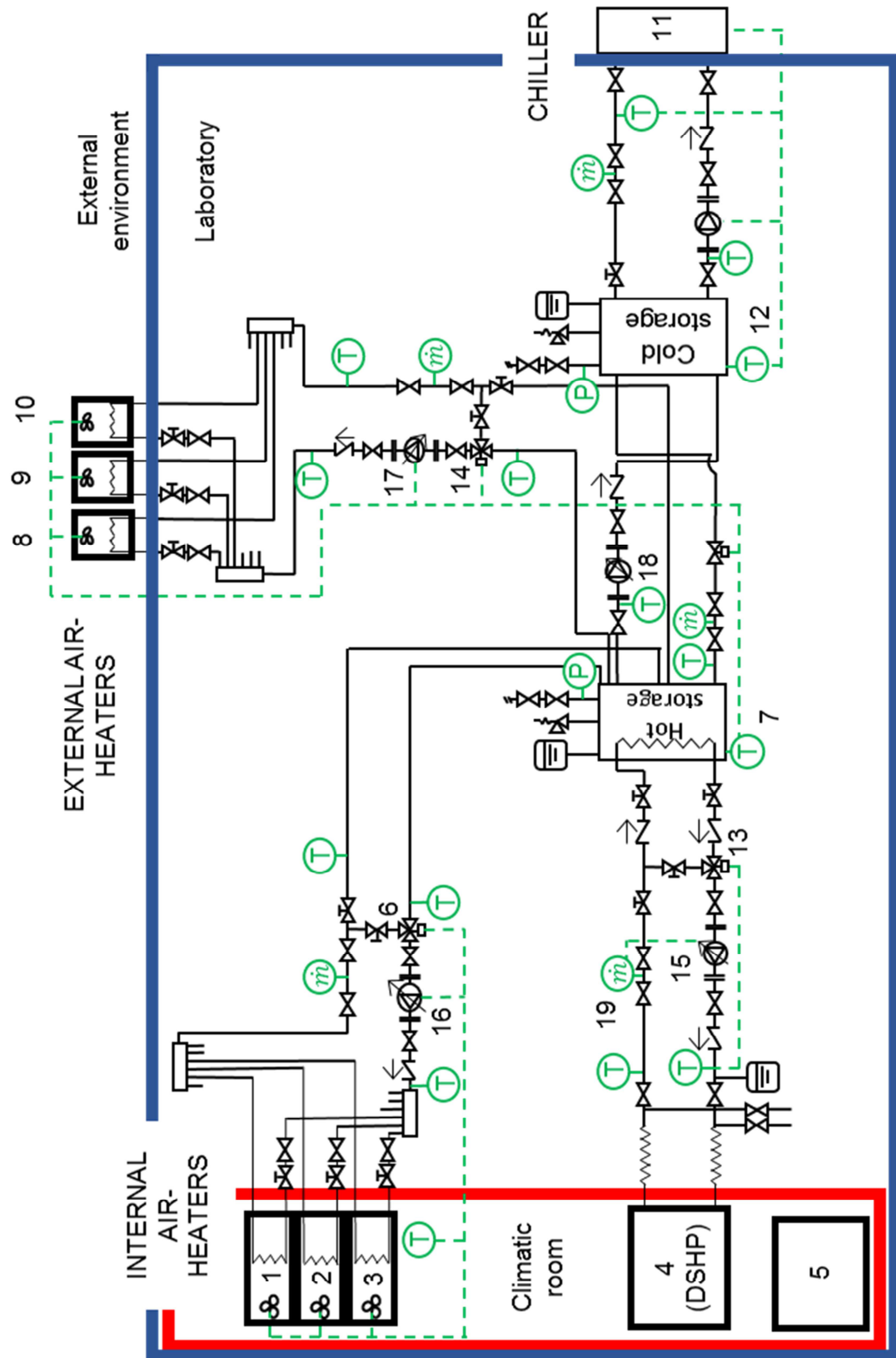


Figura 2. Lay-out del circuito idronico a servizio della camera climatica.

Quando la CC viene utilizzata per testare una pompa ASHP la temperatura dell'aria esterna viene riprodotta all'interno della CC, mentre nel caso di una pompa GSHP la pompa viene accoppiata agli scambiatori geotermici verticali presenti all'esterno del Laboratorio. Sono infatti presenti quattro sonde verticali, due lunghe 100 m e due lunghe 60 m, che possono essere utilizzate combinandole opportunamente sulla base della potenza termica della pompa di calore testata.

La massima potenza termica scambiabile con il terreno attraverso le 4 sonde è pari a 16 kW.

All'interno della CC sono installati tre aerotermini (Figura 3a), le cui specifiche tecniche sono riportate nella Tabella 1, e una sezione di umidificazione (componenti 1, 2, 3 e 5, rispettivamente, in Figura 2). Gli aerotermini hanno diverse potenze termiche nominali e ciascuno di essi è dotato di un ventilatore comandato da inverter. La portata d'aria che i tre generatori d'aria possono gestire è compresa tra 150 e 12100 m³/h. La sezione di umidificazione (Figura 3b) si compone di tre umidificatori ad elettrodi immersi (humiSteam Basic prodotti dalla Carel) che vengono attivati in cascata per ottenere l'umidità all'interno della camera pari al valore imposto dal sistema di regolazione. Durante i test la pompa di calore in esame (componente 4 in Figura 2) è posta all'interno della camera climatica. Se la pompa di calore da testare è una pompa ad aria, attraverso gli aerotermini e la sezione di umidificazione si riproducono nella camera le condizioni termo-igrometriche dell'aria esterna. Quando viene testata una pompa ASHP, la temperatura dell'aria all'interno della CC si abbassa per effetto dell'assorbimento di calore dall'aria della camera che avviene a livello dell'evaporatore. Come conseguenza della riduzione della temperatura in CC, l'umidità relativa tende ad aumentare. Per mantenere la temperatura all'interno della CC al valore desiderato, si utilizza il calore fornito dal condensatore della pompa di calore. L'acqua calda prodotta dalla pompa di calore viene infatti utilizzata per alimentare gli aerotermini posti all'interno della CC grazie al circuito idronico mostrato in Figura 2. In questo modo la temperatura dell'aria in CC è il risultato del bilancio termico tra il calore sottratto dalla pompa di calore all'aria e il calore ceduto all'aria dagli aerotermini. La velocità con cui la temperatura aumenta o diminuisce all'interno della CC dipende dalla differenza esistente tra la potenza termica istantanea assorbita dall'evaporatore della pompa di calore e la potenza termica fornita all'aria della CC dagli aerotermini.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche degli aerotermini interni ed esterni.

	Temp. aria ingresso [°C]	Temp. acqua ingresso [°C]	Portata acqua nominale [kg/h]	Potenza termica nominale [W]	Modello	Posizione
Aerotermino 1	7	30	600	3300	Galletti AREO12M0ECC0	CC
Aerotermino 2	7	30	1500	5890	Galletti AREO22M0ECC0	CC
Aerotermino 3	7	30	3300	19600	Galletti AREO43T0ECC0	CC
Aerotermino 8	7	30	600	3300	Galletti AREO12M0ECC0	Esterno
Aerotermino 9	7	30	1500	5890	Galletti AREO22M0ECC0	Esterno
Aerotermino 10	7	30	3300	19600	Galletti AREO43T0ECC0	Esterno

Al fine di stabilizzare il comportamento termico dell'impianto, nel circuito idronico tra la pompa di calore e gli aerotermini è presente un accumulo termico caldo (componente 7 in Figura 2). L'accumulo ha un volume di 0.5 m³ (Figura 3c). L'acqua calda prodotta dalla pompa di calore scorre in una serpentina interna, immersa nell'acqua dell'accumulo, avente una superficie esterna totale pari a 6 m² ed una lunghezza lineare di 60 m. La presenza dello scambiatore a serpentino permette di separare il fluido (acqua) fluente da/verso il prototipo di pompa di calore e l'acqua tecnica del resto del circuito idronico. L'accumulo è dotato di una resistenza elettrica (6 kW) per fornire energia extra quando il calore erogato dalla pompa di

calore non è sufficiente a portare la temperatura dell'aria all'interno della CC al valore richiesto. La resistenza elettrica viene inoltre utilizzata per riscaldare l'acqua del circuito idronico in particolari condizioni di lavoro. L'inerzia termica dell'acqua calda dell'accumulo garantisce una temperatura stabile all'ingresso degli aerotermi contenuti in CC anche in condizioni di lavoro della pompa di calore non-stazionarie. Quando è richiesta una riduzione della temperatura dell'aria all'interno della CC, il calore prodotto dalla pompa di calore viene invece dissipato all'esterno per mezzo di tre aerotermi (componenti 8, 9, 10 in Figura 2). Le specifiche tecniche di questi aerotermi sono riportate in Tabella 1. Quando le condizioni esterne (temperatura e umidità) non possono garantire la dissipazione del calore prodotto dalla pompa di calore, viene utilizzato un chiller (componente 11 in Figura 2) le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 2.

Il chiller è collegato ad un accumulo di acqua fredda da 0.5 m³ (componente 12 in Figura 1). L'accumulo freddo (Figura 3c) garantisce la stabilità della temperatura dell'acqua fredda scambiata con l'accumulo caldo anche quando il chiller funziona effettuando cicli on-off (ovvero quando è necessaria una bassa potenza frigorifera). Inoltre, l'accumulo freddo permette di ottenere una temperatura dell'acqua stabile all'ingresso del chiller durante il funzionamento dello stesso.

La temperatura di entrambi i serbatoi di accumulo (caldo e freddo) rimane pressoché costante in tutte le condizioni di lavoro.

(a)



(b)



(c)

Figura 3. a) Aerotermi interni alla camera climatica; b) sezione di umidificazione ad elettrodi immersi; c) circuito idronico a servizio della camera climatica.

Sensori di pressione, sensori di temperatura e misuratori di portata di tipo elettromagnetico sono inseriti all'interno del circuito idronico (Figura 3c) per monitorare il funzionamento ed il bilanciamento del sistema. Un misuratore elettromagnetico di portata in massa (Siemens Sitrans FM MAG1100 + MAG6000, componente 19 in Figura 2) e una serie di sensori NTC vengono utilizzati per misurare la portata dell'acqua e la temperatura sia in ingresso che in uscita dai diversi componenti (pompa di calore, aerotermi, accumuli).

Tabella 2. Caratteristiche tecniche nominali del chiller.

	Temp. aria ingresso [°C]	Temp. nom. acqua ingresso [°C]	Temp. nom. acqua uscita [°C]	Pot. Termica nom. [W]	Modello	Posizione
Chiller	35	12	7	18200	Galletti MPIDC018C0 AC	Esterno

In Figura 4 viene mostrato il chiller installato all'esterno del Laboratorio collegato con l'accumulo freddo del circuito HiL.



Figura 4. Chiller esterno avente una potenza frigorifera nominale di 18.2 kW.

In Figura 5a viene mostrato uno dei 6 misuratori di portata Siemens utilizzati nel circuito idraulico HiL.



(a)



(b)

Figura 5. a) Misuratore elettromagnetico di portata in massa (Siemens Sitrans FM MAG1100+MAG6000); b) aerotermini esterni.

Quando si vuole testare una pompa GSHP o DSHP (funzionante in modalità geotermica), tutta la potenza termica fornita dalla pompa di calore viene dissipata all'esterno grazie agli aerotermini esterni (Figura 5b). In questa modalità di funzionamento non è necessario controllare le condizioni termogrometriche interne della CC.

In Figura 6a sono visibili le teste dei pozzetti relativi alle quattro sonde geotermiche verticali e in Figura 6b il collettore che raccoglie le tubazioni provenienti dai quattro scambiatori geotermici. Lo scambiatore a terreno è realizzato con tubazione in polietilene affogata in una malta ad alta conducibilità termica. Una sonda verticale da 100 m ed una sonda da 60 m sono strumentate mediante fibra ottica (Smartec) per la misura della temperatura media dell'acqua contenuta nella sonda. In questo modo è possibile ricostruire l'andamento della temperatura dell'acqua lungo tutta la sonda durante il funzionamento della pompa di calore. La fibra ottica restituisce un valore di temperatura media ogni 2 metri di sonda. Il tempo di campionamento minimo è di 1 s.



Figura 6. a) Uscita delle sonde geotermiche verticali; b) collettore delle sonde geotermiche.

Attraverso il software di simulazione dinamica (TRNSYS o AlmaBuild) è possibile calcolare i carichi termici istantanei associati ad uno specifico edificio installato in una determinata località. Edificio e località possono essere scelti liberamente dall'operatore al fine di simulare una precisa condizione operativa. Viene inoltre fissato il circuito di distribuzione presente all'interno dell'edificio per la circolazione del fluido termovettore e la tipologia di terminale adottata.

Il simulatore fornisce la temperatura e la portata in massa con cui l'acqua dell'impianto ritorna istantaneamente alla pompa di calore sulla base del carico termico istantaneo calcolato. Il sistema di controllo del circuito idronico si incarica di far tornare alla pompa di calore esattamente la portata in massa calcolata dal simulatore alla temperatura di ritorno indicata dal simulatore.

Perché il sistema sia in grado di controllare la temperatura e la portata dell'acqua che ritorna alla pompa di calore è stato utilizzato un sistema di controllo ridondante in grado di controllare con precisione la portata e la temperatura dell'acqua in ingresso in ogni componente del circuito (pompa di calore, aerotermini interni ed esterni).

La potenza termica scambiata dagli aerotermini posizionati all'esterno e/o all'interno della camera climatica può essere controllata lato aria sia con logica on-off, sia agendo sugli inverter dei rispettivi ventilatori. Inoltre è possibile ottenere una regolazione più fine della potenza termica scambiata dagli aerotermini intervenendo lato acqua mediante un circolatore a velocità variabile (Wilo Stratos 40/1-12, componenti 16 e 17 in Figura 2 e Figura 7a) con il quale si modifica la portata d'acqua in ingresso e/o mediante l'azionamento di una valvola a tre vie (Siemens VVG41.25, componenti 6 e 14 in Figura 2 e Figura 7b) in miscelazione che permette di variare la temperatura dell'acqua in ingresso agli aerotermini.



(a)



(b)

Figura 7. a) Circolatore a velocità variabile; b) valvola a tre vie motorizzata.

Quando viene rilevata una differenza tra la temperatura dell'aria all'interno della CC ed il set point desiderato (fornito dal simulatore dinamico), il sistema contrasta la differenza mediante l'attivazione della modulazione della velocità del ventilatore e/o della velocità del circolatore e/o dell'attuatore della valvola a tre vie.

Analoga logica di controllo viene adottata per gli aerotermini installati all'esterno; l'unica differenza è che in quest'ultimo caso la variabile controllata è la temperatura dell'acqua nell'accumulo caldo.

Il circuito idronico è progettato per testare pompe di calore aventi una potenza termica nominale massima di 12 kW alle condizioni di lavoro nominali (temperatura esterna: 7 °C; temperatura acqua in uscita: 35 °C).

Il sistema è progettato per funzionare quando la temperatura dell'aria esterna è compresa tra -5 °C e 40 °C ed è in grado di mantenere la temperatura dell'aria all'interno della camera climatica CC tra 0 °C e 16 °C.

Il range di temperatura permette di testare le pompe di calore DSHP in diverse condizioni di lavoro quando il dispositivo sta funzionando in modalità riscaldamento. In ogni condizione di lavoro, la temperatura del fluido (acqua) all'interno dell'accumulo caldo varierà tra 20 e 60 °C e tra 10 e 18 °C per l'accumulo freddo.

2.2 Il sistema di controllo dell'impianto HiL

Il sistema di controllo dell'impianto HiL descritto nella precedente sezione è stato realizzato con la consulenza di IRS, fornitore National Instruments per il Nord Italia.

Il sistema si basa su un sistema di acquisizione realizzato tramite moduli National Instruments per la lettura dei sensori di temperatura e pressione e dei segnali in uscita dai misuratori di portata, dalle pompe ad inverter e dalle valvole a tre vie di regolazione.

La lista completa dei sensori che sono stati connessi al sistema di acquisizione è riportata in Tabella 3.

Tabella 3. Lista dei sensori installati nell'impianto HiL.

Sensore/Comando	Quantità
Sensori NTC (resistenza el. 10 kOhm a 25 °C)	52
Sensori di umidità (interno CC)	10
Sensori di temperatura (Pt100)	10
Sensori di pressione (uscita in corrente)	2
Sensori di pressione raziometrici (uscita in tensione)	10
Misuratori di portata (uscita in corrente)	6
Sonda esterna (temperatura umidità)	1
Comandi in tensione (6 aerotermi, 3 valvole a tre vie, 3 pompe di circolazione, 1 valvola a due vie, 3 umidificatori)	16
Comandi digitali	3
Comandi a relay per attivazione pompe di circolazione on-off (2) e resistenza elettrica accumulo caldo	3

I segnali sono raccolti in un quadro di comando appositamente realizzato all'interno del quale è installato l'hardware di acquisizione e controllo della National Instruments. In particolare, l'hardware NI utilizzato è il seguente:

- n.2 NI cDAQ 9189 a 8 slots;
- 2 moduli NI 9216 (8+8 PT100);
- 1 modulo NI 9208 (16 ingressi in corrente);
- 2 moduli NI 9209 (16+16 ingressi in tensione);
- 2 moduli NI 9205 (16+16 ingressi in corrente);
- 1 modulo NI 9227 (ingressi in corrente).

La gestione dell'intero circuito HiL e il monitoraggio delle principali grandezze misurate e controllate viene effettuata mediante software LabView attraverso un codice appositamente realizzato assieme ad IRS che ha fornito una consulenza sullo sviluppo del codice. In particolare il codice scritto in LabView utilizza dei moduli di proprietà IRS per il controllo PID dei regolatori. La società IRS ha inoltre testato il codice e avviato all'utilizzo dello stesso gli operatori del Laboratorio.

Il codice LabView è “aperto” e può essere modificato dall’utente. Le uniche parti non modificabili sono quelle relative ai moduli di regolazione di proprietà IRS.

2.2.1 Linea di collegamento Pompa di calore-Accumulo caldo

Sono stati costruiti degli attacchi flessibili da utilizzare per la connessione della pompa di calore al circuito idronico dell’impianto HiL; gli attacchi sono strumentati con pozzetti per la misura della temperatura e della pressione sia all’ingresso che all’uscita della pompa di calore. Le sonde di temperatura utilizzate per la misura della temperatura dell’acqua in ingresso e in uscita dalla pompa di calore sono delle sonde Pt100 di precisione al fine di effettuare un calcolo accurato della potenza termica ceduta all’acqua dalla pompa di calore istante per istante.

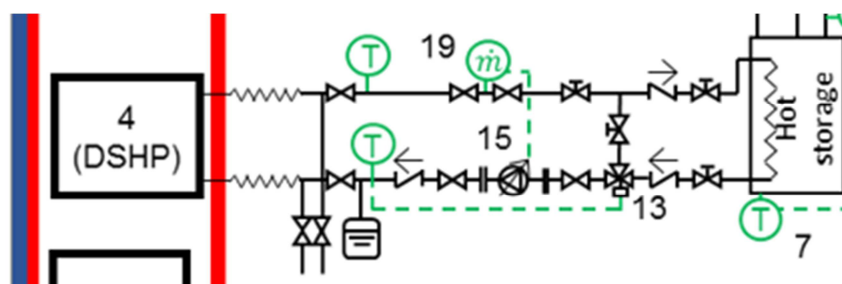


Figura 8. Linea di collegamento tra pompa di calore ed accumulo caldo.

La linea che collega la pompa di calore al serbatoio caldo (Figura 8) è strumentata con prese di pressione e di temperatura. E’ inoltre presente un misuratore di portata Siemens (MAG1100+MAG 6000) che permette la misura della portata di acqua che attraversa lo scambiatore a piastre della pompa di calore.

La valvola a tre vie è installata sulla linea di ritorno della pompa di calore e lavora in miscelazione riprendendo acqua calda dalla linea di mandata per aggiustare la temperatura con cui l’acqua ritorna alla pompa di calore.

Il sistema di controllo installato nel circuito idronico che collega la pompa di calore all’accumulo caldo permette di regolare:

1. La portata di acqua che circola nello scambiatore a piastre della pompa di calore, intervenendo sulla pompa di circolazione ad inverter (Wilo STRATOS 40_1-16) comandabile con segnale in tensione in ingresso (0-10 V);
2. La temperatura di ritorno dell’acqua alla pompa di calore, intervenendo sulla valvola a 3 vie (Siemens VXG 41.25) comandabile con segnale in tensione in ingresso. La valvola permette solo di aumentare la temperatura di ritorno rispetto al valore di temperatura con cui l’acqua esce dalla serpentina presente nell’accumulo caldo. La regolazione della temperatura di uscita dall’accumulo si ottiene agendo sui sistemi di scambio termico interfacciati con l’accumulo caldo (vedi sezioni successive);
3. La temperatura di mandata dell’acqua prodotta dalla pompa di calore, intervenendo sulla centralina della pompa di calore (setup temperatura di mandata).

2.2.2 Accumulo caldo

Il serbatoio di accumulo è strumentato con 7 pozzetti per la misura della temperatura dell’acqua all’interno dell’accumulo a diverse altezze. E’ inoltre presente una resistenza elettrica da 6 kW da utilizzare come sistema di back-up per il riscaldamento dell’acqua stoccata. L’attivazione della resistenza è ottenuta mediante relay (regolazione on-off) comandato dal valore misurato della temperatura dell’acqua all’interno dell’accumulo.

2.2.3 Aerotermi interni alla camera climatica

Gli aerotermi installati in camera climatica (Aeroterme AREO 12-22-43 EC) permettono, nel caso in cui si voglia mantenere costante la temperatura dell'aria in camera climatica, di compensare il raffreddamento dell'aria della camera climatica dovuto all'evaporatore della pompa di calore quando si testano pompe di calore ad aria (ASHP).

Nel caso in cui si voglia far diminuire la temperatura dell'aria in camera climatica, la potenza termica degli aerotermi viene diminuita fintanto che si raggiunge il nuovo valore di set-point.

Viceversa, nel caso in cui la temperatura dell'aria in camera climatica debba essere aumentata, gli aerotermi vengono chiamati ad erogare una maggiore potenza termica.

Il circuito che alimenta gli aerotermi è collegato al serbatoio di accumulo caldo (Figura 9). Nel circuito sono presenti prese di pressione e di temperatura (come indicato in Figura 9) ed un misuratore di portata Siemens (MAG1100+MAG 6000) che permette la misura della portata di acqua totale che viene inviata agli aerotermi.

La potenza termica rilasciata dagli aerotermi può essere controllata intervenendo su:

1. La portata d'aria che attraversa gli aerotermi mediante la regolazione degli inverter dei ventilatori;
2. La portata d'acqua in ingresso agli aerotermi, intervenendo sulla pompa ad inverter (Wilo STRATOS 40_1-16) comandabile con segnale in tensione in ingresso (0-10 V);
3. La temperatura dell'acqua in ingresso agli aerotermi, intervenendo sulla valvola a tre vie (Siemens VVG 41.25) comandabile con segnale in tensione in ingresso. La valvola lavora in miscelazione sulla linea di mandata degli aerotermi e permette solo di diminuire la temperatura d'acqua di mandata agli aerotermi rispetto al valore di temperatura con cui l'acqua esce dall'accumulo caldo. La regolazione della temperatura di uscita dall'accumulo si ottiene agendo sui sistemi di scambio termico interfacciati con l'accumulo caldo (vedi sezioni successive);
4. Il numero di aerotermi attivi.

Al momento attuale il circuito non è collegato con l'accumulo freddo né con sistemi di riscaldamento indipendenti dall'accumulo caldo.

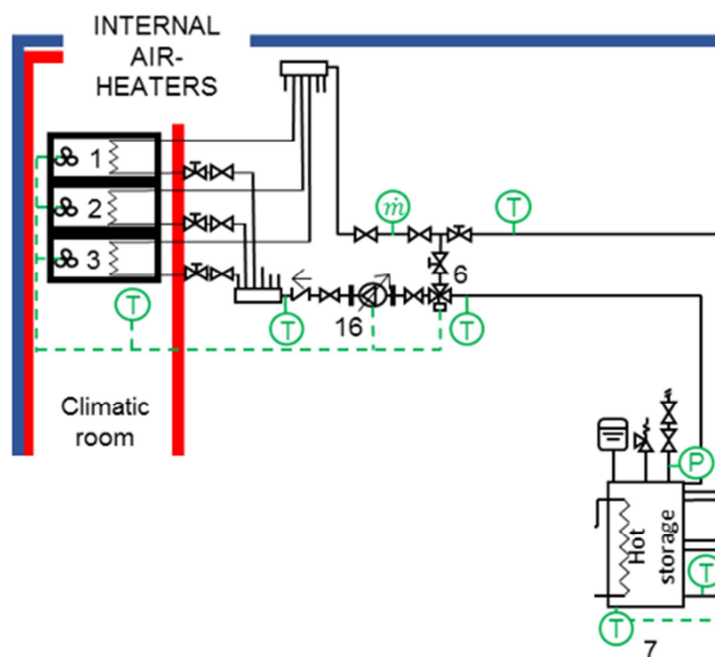


Figura 9. Linea di collegamento tra accumulo caldo ed aerotermi installati in CC.

Sono state lasciate delle predisposizioni per poter realizzare in futuro questo tipo di collegamenti/espansioni in quanto nei transitori di avvio o di cambio serbatoio esterno (nel caso di pompe DSHP) per il controllo della temperatura dell'aria all'interno della camera climatica può rendersi necessario rifornire gli aerotermi con acqua calda o fredda non disponibile nell'accumulo caldo.

E' quindi previsto che il circuito possa essere collegato ad un riscaldatore elettrico di back-up ed all'accumulo freddo.

2.2.4 Aerotermi esterni

Gli aerotermi installati all'esterno (Aerotermino AREO 12-22-43 EC) permettono di dissipare all'esterno la potenza termica ceduta all'acqua dell'accumulo caldo dalla pompa di calore nel caso in cui la potenza della pompa di calore non venga utilizzata (o venga utilizzata solo parzialmente) dagli aerotermi interni (ad esempio nel caso in cui si voglia abbassare la temperatura dell'aria in camera climatica).

L'attivazione del circuito che collega all'accumulo caldo gli aerotermi esterni viene governata dal valore di set-point dell'accumulo caldo.

Il circuito che alimenta gli aerotermi esterni è collegato al serbatoio di accumulo caldo (Figura 10). Nel circuito sono presenti prese di pressione e di temperatura (come indicato in Figura 10) e un misuratore di portata Siemens (MAG1100+MAG 6000) che permette la misura della portata di acqua totale che viene inviata agli aerotermi esterni.

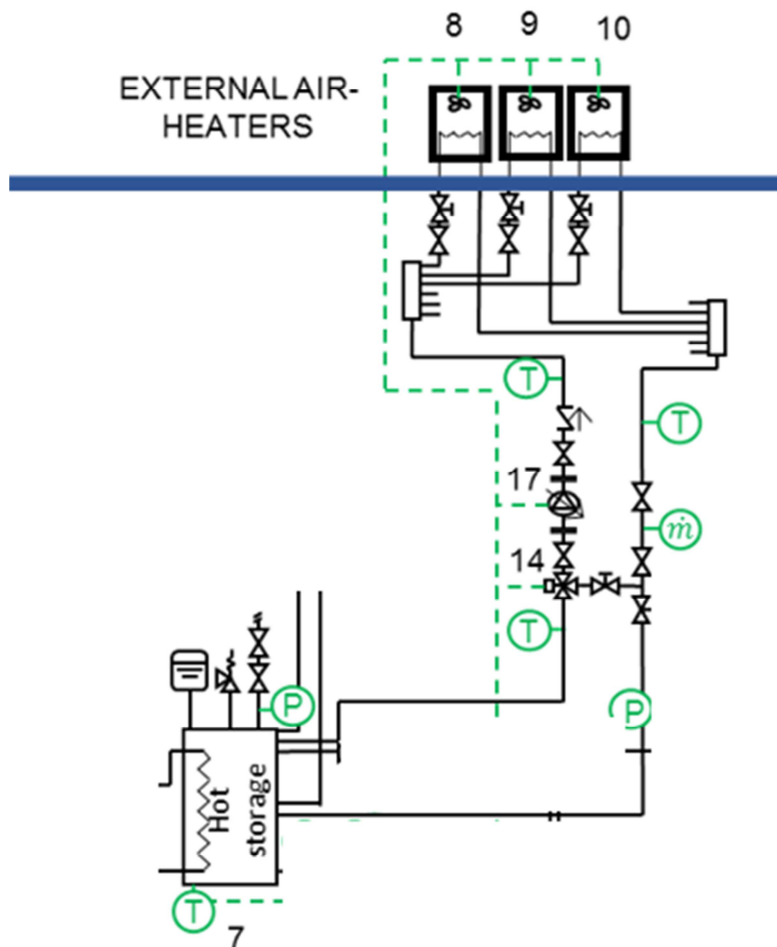


Figura 10. Linea di collegamento tra accumulo caldo ed aerotermi esterni.

La potenza termica dissipata all'esterno dagli aerotermi può essere controllata intervenendo su:

1. La portata d'aria che attraversa gli aerotermi mediante la regolazione degli inverter dei ventilatori;
2. La portata d'acqua in ingresso agli aerotermi, intervenendo sulla pompa ad inverter (Wilo STRATOS 40_1-16) comandabile con segnale in tensione in ingresso (0-10 V);
3. La temperatura dell'acqua in ingresso agli aerotermi, intervenendo sulla valvola a tre vie (Siemens VXG 41.25) comandabile con segnale in tensione in ingresso. La valvola lavora in miscelazione sulla linea di mandata degli aerotermi e permette solo di diminuire la temperatura d'acqua di mandata agli aerotermi rispetto al valore di temperatura con cui l'acqua esce dall'accumulo caldo. La regolazione della temperatura di uscita dall'accumulo si ottiene agendo sui sistemi di scambio termico interfacciati con l'accumulo caldo;
4. Il numero di aerotermi attivi.

2.2.5 Collegamento tra accumulo caldo-accumulo freddo

E' previsto un collegamento tra l'accumulo caldo e l'accumulo freddo connesso ad un chiller dedicato. Il chiller viene attivato per mantenere l'accumulo freddo alla temperatura di set-point (10-18 °C).

Il collegamento tra accumulo caldo e freddo viene attivato nel caso in cui la temperatura di set-point dell'accumulo caldo non venga mantenuta durante il funzionamento della pompa di calore. In questo modo si riesce ad abbassare la temperatura di set-point in modo molto veloce.

Il circuito che collega i due accumuli è un circuito diretto (Figura 11). Nel circuito sono presenti prese di pressione e di temperatura (come indicato in Figura 11) ed un misuratore di portata Siemens (MAG1100+MAG 6000) che permette la misura della portata di acqua totale che circola da un accumulo all'altro.

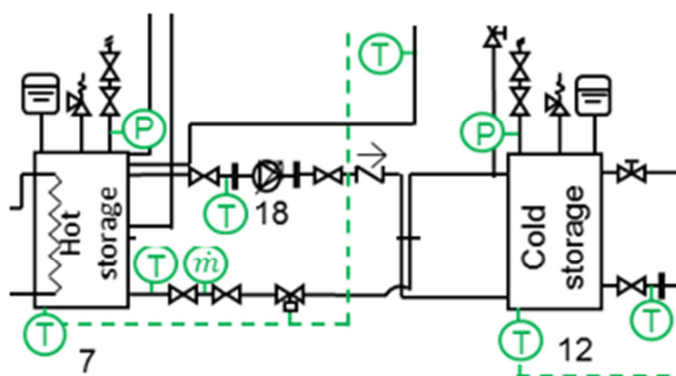


Figura 11. Linea di collegamento tra accumulo caldo e freddo.

La potenza termica scambiata tra i due accumuli può essere controllata intervenendo su:

1. La portata d'acqua in circolo tra i due accumuli attivando la pompa on-off (Wilo STRATOS Pico 30_1-6) comandabile con un relay e intervenendo sulla valvola a due vie (Siemens VVG44.40-25) attraverso un segnale di input in tensione;
2. La temperatura dell'acqua fredda contenuta nell'accumulo freddo intervenendo sul chiller connesso all'accumulo freddo.

L'accumulo freddo è provvisto di 4 pozzetti per la misura della temperatura a diverse altezze.

2.2.6 Collegamento tra accumulo freddo e chiller esterno

La temperatura dell'acqua nell'accumulo freddo viene regolata e mantenuta grazie all'attivazione di un chiller da 18.2 kW di potenza frigorifera nominale (Galletti MPIDC018COAC), installato all'esterno del laboratorio.

Il circuito di collegamento presente tra il chiller e l'accumulo freddo (Figura 12) prevede sonde di pressione e temperatura e un misuratore di portata Siemens (MAG1100+MAG 6000) che permette la misura della portata di acqua totale che viene raffreddata dal chiller. Le sonde di temperatura in ingresso e in uscita dall'evaporatore del chiller, assieme al misuratore di portata, permettono di monitorare la potenza frigorifera fornita dal chiller istante per istante.

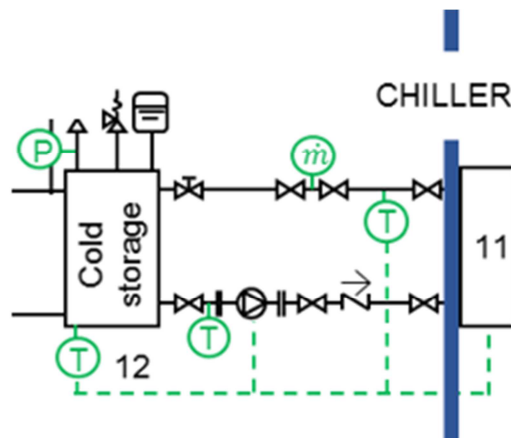


Figura 12. Linea di collegamento tra accumulo freddo e chiller esterno.

La temperatura dell'acqua all'interno dell'accumulo freddo viene controllata intervenendo direttamente sul chiller.

Il sistema è inoltre in grado di ricevere tramite RS485 i segnali dal microprocessore installato sul chiller (Microprocessore Carel).

2.2.7 Linea circuito geotermico

La linea che collega alla pompa di calore le quattro sonde geotermiche verticali (2 da 100 m e 2 da 60 m) si compone di due collettori, in cui vengono raccolte le tubazioni di mandata e ritorno dei quattro scambiatori geotermici, connessi allo scambiatore a piastre della pompa di calore da due tubazioni di mandata e ritorno su cui sono installate sonde di pressione e temperatura, un misuratore di portata (Siemens MAG 1100 MAG 6000) e una pompa di circolazione Wilo YONOS Pico-D 30_1-8.

Il sistema lavora a portata costante e la regolazione della portata si ottiene intervenendo sulle valvole di bilanciamento. La pompa di circolazione è del tipo on-off.

2.2.8 Monitoraggio pompa di calore

Il sistema prevede di acquisire la temperatura del fluido frigorifero in 10 diverse posizioni all'interno del ciclo frigorifero attraverso sonde NTC (Italcoppie) (ingresso/uscita evaporatore, ingresso/uscita condensatore, ingresso/uscita aria dall'evaporatore etc..)

Si prevede inoltre di acquisire la pressione del fluido frigorifero in corrispondenza di 10 punti all'interno della macchina frigorifera (sensori Carel SPKT00B6R0):

- Ingresso piastre utenza;
- Uscita piastre utenza;
- Ingresso piastre sonde;
- Uscita piastre sonde;

- Ingresso batteria alettata;
- Uscita batteria alettata;
- Ingresso valvola elettronica EEV 1;
- Ingresso valvola elettronica EEV 2;
- Aspirazione compressore;
- Mandata compressore.

Il sistema è inoltre in grado di ricevere tramite RS485 i segnali dal microprocessore installato sulla pompa di calore.

2.2.9 Monitoraggio condizioni esterne

Le condizioni termo igrometriche esterne vengono monitorate attraverso un sensore di temperatura Delta Ohm HD 4817TV (segnale di output in corrente) e un sensore di umidità relativa Delta Ohm HD 4817TV (segnale di output in corrente).

2.2.10 Monitoraggio condizioni aria all'interno della camera climatica

All'interno della camera climatica sono installate:

- 10 termocoppie per la misura locale della temperatura all'interno della camera;
- 10 sensori di umidità.

2.3 La logica di controllo

Viene scelto un edificio ed una località per testare la pompa di calore. Viene decisa la tipologia di terminali (pannelli radianti a soffitto, a pavimento, radiatori, ventilconvettori etc..) e la loro posizione all'interno dell'edificio. Viene deciso il tracciato del circuito di distribuzione del fluido termovettore all'interno dell'edificio. Viene decisa la tipologia di regolazione adottata per il sistema di riscaldamento (ad es. regolazione ambiente per ambiente con valvole termostatiche, regolazione climatica e di zona etc..).

Il comportamento termico dell'edificio, del sottosistema di emissione, regolazione e distribuzione viene simulato per l'intera stagione di riscaldamento mediante software dinamico (ad es. TRNSYS, AlmaBuild).

Nota la portata d'acqua calda in uscita dalla pompa di calore e la temperatura dell'acqua calda introdotta nella rete di distribuzione si ottiene come output della simulazione l'andamento temporale della temperatura dell'acqua di ritorno alla pompa di calore e della portata.

Nota la località, si conosce il valore della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria esterna ora per ora.

Tali valori vengono utilizzati dall'impianto HiL per riprodurre in tempo reale la portata e la temperatura dell'acqua che ritorna alla pompa di calore e per cambiare le condizioni termo-igrometriche in camera climatica.

In altre parole, gli output ottenuti dal programma di simulazione dinamica vengono utilizzati come parametri di setup dall'impianto HiL.

La prova ha diverse regole di controllo a seconda che la pompa di calore da testare sia una pompa ad aria (ASHP), una pompa geotermica (GSHP) o una pompa dual-source (DSHP).

Prima di avviare il test si carica il serbatoio freddo e caldo di acqua alla temperatura di 10-18 °C (temperatura di avvio) attivando il chiller esterno. La prova può iniziare quando il serbatoio caldo è in temperatura (temperatura di avvio prova, ad es. 14 °C).

2.3.1 Test su pompe di calore GSHP

Si accende la pompa di calore settando il valore della temperatura dell'acqua in mandata al valore utilizzato anche nel software di simulazione (ad es. 50 °C). Il software di simulazione fornisce l'andamento della temperatura di ritorno dell'acqua alla pompa di calore in funzione del tempo. In funzione dell'inerzia dell'impianto simulato la temperatura di ritorno (che parte dal valore di avvio prova) si alza lentamente.

Il software fornisce l'andamento temporale della temperatura di ritorno dell'acqua alla pompa di calore e l'impianto viene regolato in modo da seguire l'andamento indicato dal software.

Per aggiustare in tempo reale il valore della temperatura dell'acqua di ritorno, l'impianto HiL agisce sulla temperatura dell'acqua contenuta nell'accumulo caldo.

La temperatura dell'acqua nell'accumulo caldo cresce quando la pompa di calore è in funzione e di conseguenza cresce la temperatura di ritorno alla pompa.

Se l'aumento di temperatura che si osserva è superiore a quello atteso occorre abbassare la temperatura dell'accumulo caldo agendo:

- Sul circuito di collegamento tra accumulo caldo e freddo andando a prelevare acqua fredda dall'accumulo freddo rallentando l'aumento della temperatura nell'accumulo caldo (e quindi l'aumento di temperatura dell'acqua di ritorno);
- Sugli aerotermini esterni che inizieranno a raffreddare l'accumulo caldo dissipando calore verso l'esterno.

Se invece l'aumento di temperatura che si osserva è inferiore a quello atteso occorre alzare la temperatura dell'accumulo caldo agendo:

- Sulla resistenza elettrica presente nell'accumulo.

In questo modo il sistema segue l'andamento della temperatura di ritorno calcolata dal software istante per istante.

La pompa scambia calore, oltre che con l'accumulo caldo, con il circuito geotermico.

Durante la prova vengono misurati in continua:

- Potenza termica rilasciata all'acqua dell'impianto;
- Potenza termica prelevata dal terreno;
- Assorbimento elettrico del compressore della pompa di calore.

L'assorbimento elettrico della pompa di calore viene misurato mediante un misuratore digitale di potenza elettrica di precisione Yokogawa WT333E-C2-F/C7 (Figura 13) installato sul quadro elettrico dell'impianto.



Figura 13. Digital Power Meter per la contabilizzazione della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore.

In questo modo è possibile calcolare il COP istantaneo della macchina e valutarne il valore medio durante l'intero test.

In questa prova non si interviene sulla temperatura dell'aria presente in camera climatica perché la pompa di calore non utilizza l'aria come serbatoio esterno. Di conseguenza, gli aerotermini interni alla camera climatica rimangono disattivati durante l'intera prova.

2.3.2 Test su pompe di calore ASHP

Si accende la pompa di calore settando il valore della temperatura dell'acqua in mandata al valore utilizzato anche nel software di simulazione (ad es. 50 °C). Il software di simulazione fornisce l'andamento della temperatura di ritorno dell'acqua alla pompa di calore in funzione del tempo. In funzione dell'inerzia dell'impianto simulato, la temperatura di ritorno (che parte dal valore di avvio prova) si alza lentamente.

La temperatura all'interno della camera climatica dove è installata la pompa ASHP inizia ad abbassarsi in quanto l'evaporatore della pompa sottrae calore dall'aria della camera.

Il software fornisce l'andamento temporale della temperatura di ritorno dell'acqua alla pompa di calore e della temperatura e umidità dell'aria esterna.

Occorre, in parallelo, tenere sotto controllo:

- La temperatura di ritorno dell'acqua alla pompa di calore;
- La temperatura dell'aria in camera climatica;
- L'umidità relativa dell'aria in camera climatica.

Per aggiustare in tempo reale il valore della temperatura dell'acqua di ritorno, l'impianto HiL agisce sulla temperatura dell'acqua contenuta nell'accumulo caldo.

La temperatura dell'acqua nell'accumulo caldo cresce quando la pompa di calore è in funzione e di conseguenza cresce la temperatura di ritorno alla pompa.

Se l'aumento di temperatura che si osserva è superiore a quello atteso occorre abbassare la temperatura dell'accumulo caldo agendo:

- Sul circuito di collegamento tra accumulo caldo e freddo andando a prelevare acqua fredda dall'accumulo freddo rallentando l'aumento della temperatura nell'accumulo caldo (e quindi l'aumento di temperatura dell'acqua di ritorno);
- Sugli aerotermini esterni che inizieranno a raffreddare l'accumulo caldo dissipando calore verso l'esterno.

Se invece l'aumento di temperatura che si osserva è inferiore a quello atteso occorre alzare la temperatura dell'accumulo caldo agendo:

- Sulla resistenza elettrica presente nell'accumulo.

In questo modo il sistema segue l'andamento della temperatura di ritorno calcolata dal software istante per istante.

Nello stesso tempo, la temperatura dell'aria nella camera viene controllata agendo:

- Sugli aerotermini interni, attivandoli nel caso in cui si voglia stabilizzare o aumentare la temperatura nella camera climatica o spegnendoli nel caso in cui si voglia abbassare la temperatura in camera.

Gli aerotermini esterni e il chiller esterno verranno attivati per continuare a garantire la temperatura corretta all'interno dell'accumulo caldo al fine di avere la giusta temperatura di ritorno.

Durante la prova vengono misurati in continua:

- Potenza termica rilasciata all'acqua dell'impianto;

- Assorbimento elettrico del compressore della pompa di calore.

L'assorbimento elettrico della pompa di calore viene misurato mediante un misuratore digitale di potenza elettrica di precisione Yokogawa WT333E-C2-F/C7 (Figura 13) installato sul quadro elettrico dell'impianto.

In questo modo è possibile calcolare il COP istantaneo della macchina e valutarne il valore medio durante l'intero test.

2.3.3 Test su pompe di calore DSHP

I test su pompe di calore in grado di valorizzare aria e terreno come sorgenti termiche esterne vengono condotti seguendo le due logiche di controllo prima descritte. Quando la pompa utilizza l'aria esterna come serbatoio termico, la prova viene condotta secondo quanto indicato per i test su pompe ASHP. Quando la pompa usa come serbatoio esterno il terreno, la prova viene condotta seguendo quanto descritto per i test su pompe GSHP.

2.4 Valutazioni preliminari sulla logica di controllo

L'intero circuito è stato modellato numericamente al fine di testare il comportamento del sistema in condizioni di funzionamento critiche.

Nel presente studio, il sistema HiL è stato modellato utilizzando sia TRNSYS che AlmaBuild (Simulink). L'analisi delle condizioni stazionarie e non-stazionarie attese ha permesso di verificare che tutti i componenti dell'impianto siano stati correttamente dimensionati.

Innanzitutto è stata condotta una simulazione considerando di effettuare un test su una pompa ASHP "di riferimento" avente le caratteristiche mostrate nella Figura 14a e una GSHP "di riferimento" avente le caratteristiche riportate in Figura 14b.

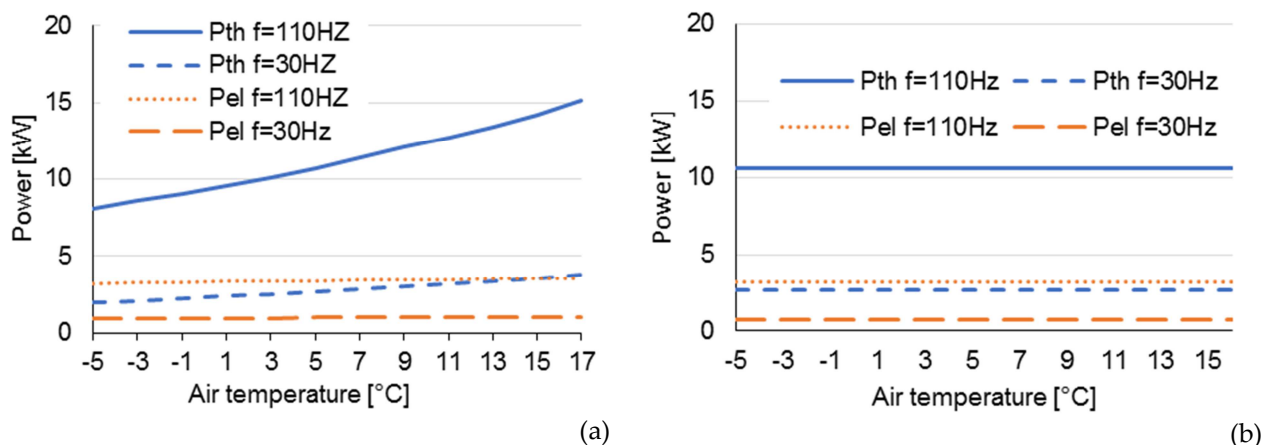


Figura 14. a) Potenza termica nominale e potenza elettrica assorbita nominale della pompa ASHP di riferimento al variare della temperatura esterna e della frequenza dell'inverter; b) Potenza termica nominale e potenza elettrica assorbita nominale della pompa GSHP di riferimento al variare della temperatura esterna e della frequenza dell'inverter.

La prima simulazione è stata condotta considerando il comportamento del sistema quando la temperatura dell'aria esterna è molto bassa (-5 °C), variando la temperatura dell'aria interna della stanza climatica da 5 °C a 16 °C. In queste prove si è considerata l'acqua in uscita dalla pompa di calore ad una temperatura fissa di 45 °C.

I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 4. Come si può osservare, il sistema è in grado di garantire la temperatura desiderata in camera climatica utilizzando un numero variabile di generatori d'aria interni ed esterni così da dissipare il calore prodotto dalla pompa di calore. Come previsto, il numero di aerotermini

attivati tende ad aumentare se la temperatura dell'aria interna richiesta aumenta. Tuttavia, quando la temperatura dell'aria esterna è bassa, non viene acceso più di un aerotermo esterno per dissipare il calore prodotto dalla pompa di calore e il chiller non viene mai acceso. I risultati sottolineano che le condizioni invernali tipiche dell'aria esterna a Bologna non sono critiche per il circuito HiL progettato.

Tabella 4. Dati prestazionali della pompa di calore e del circuito HiL durante il test di una pompa ASHP in una giornata invernale in cui la temperatura dell'aria esterna è pari a -5 °C.

Temp. esterna [°C]	Temp. aria in CC [°C]	Frequenza inverter [Hz]	Pot. termica nom. [kW]	COP [-]	Pot. termica dissipata all'esterno [kW]	Temp. media acqua accumulo caldo [°C]	Aerotermi attivi
-5	-5	Min (30)	2.0	2.1	1.4	25.0	1 (int) e 8 (ext)
-5	-5	Max (110)	8.1	2.5	4.4	26.4	1 (int) e 8 (ext)
-5	7	Min (30)	2.9	2.9	1.1	27.0	1 (int) e 8 (ext)
-5	7	Max (110)	11.4	3.3	3.5	26.9	3 (int) e 8 (int)
-5	16	Min (30)	3.7	3.8	0.9	28.7	2 (int) e 8 (ext)
-5	16	Max (110)	14.4	4.1	3.4	28.8	1+3 (int) e 9 (ext)

La seconda simulazione è stata condotta considerando il comportamento del sistema quando la temperatura dell'aria esterna è molto elevata (40 °C), variando la temperatura dell'aria interna della stanza climatica da 5 °C a 16 °C. In queste prove si è considerata l'acqua in uscita dalla pompa di calore ad una temperatura fissa di 45 °C.

In Tabella 5 sono riportati i dati di una condizione gravosa di lavoro estivo per il circuito HiL. Nonostante una temperatura dell'aria esterna impostata a 40 °C, il sistema è in grado di mantenere la temperatura dell'aria in camera climatica ai valori desiderati (cioè da -5 °C a 16 °C) tramite l'attivazione del chiller.

Il confronto dei dati di Tabella 4 con quelli di Tabella 5 mostra che la temperatura del serbatoio caldo è generalmente più bassa nei test estivi rispetto a quelli invernali.

Inoltre, in estate, quando la temperatura dell'aria esterna è molto elevata, il chiller si attiva e riesce a tenere sotto controllo il serbatoio caldo tenendo l'acqua nel serbatoio freddo a 15 °C.

Tabella 5. Dati prestazionali della pompa di calore e del circuito HiL durante il test di una pompa ASHP in una giornata estiva in cui la temperatura dell'aria esterna è pari a 40 °C.

Temp. esterna [°C]	Temp. aria in CC [°C]	Frequenza inverter [Hz]	Pot. termica nom. [kW]	COP [-]	Pot. termica dissipata all'esterno [kW]	Temp. media acqua accumulo caldo [°C]	Aerotermi attivi
40	-5	Min (30)	2.0	2.1	1.5	21.9	1 + chiller
40	-5	Max (110)	8.1	2.5	3.7	25.2	1 + chiller
40	7	Min (30)	2.9	2.9	1.1	27.4	1 + chiller
40	7	Max (110)	11.4	3.3	3.6	26.4	3 + chiller
40	16	Min (30)	3.7	3.8	0.9	28.6	2 + chiller
40	16	Max (110)	14.4	4.1	3.5	27.9	3 + chiller

La Tabella 6 mostra i valori del sistema quando viene testata una pompa GSHP.

In questo caso la temperatura in camera climatica non è importante per le prove in quanto la pompa GSHP è direttamente accoppiata al terreno tramite lo scambiatore geotermico. In questo caso si considera che l'acqua in uscita dallo scambiatore da pozzo abbia una temperatura fissa di 6 °C e la temperatura dell'acqua in uscita dalla pompa di calore sia pari a 45 °C. I dati riportati in Tabella 6 mostrano che tutto il calore generato dalla pompa di calore può essere dissipato utilizzando i generatori d'aria esterni quando la

temperatura dell'aria esterna è inferiore a 16 °C. Per una temperatura dell'aria esterna più elevata, il chiller deve essere attivato per dissipare il calore prodotto dalla pompa GSHP.

Tabella 6. Dati prestazionali della pompa di calore e del circuito HiL durante il test di una pompa GSHP (Temperatura dell'acqua all'uscita dello scambiatore geotermico pari a 6 °C).

Temp. esterna [°C]	Temp. aria in CC [°C]	Frequenza inverter [Hz]	Pot. termica nom. [kW]	COP [-]	Pot. termica dissipata all'esterno [kW]	Temp. media acqua accumulo caldo [°C]	Aerotermini attivi
-5	-	Min (30)	2.8	3.9	2.7	27.7	8 (ext)
-5	-	Max (110)	10.9	3.2	10.9	25.9	10 (ext)
10	-	Min (30)	2.8	3.9	2.7	28.6	9 (ext)
10	-	Max (30)	10.9	3.4	10.9	28.4	10 (ext)
25	-	Min (30)	2.8	3.9	2.7	22.8	Chiller
25	-	Max (110)	11	3.4	11.4	23.7	Chiller
40	-	Min (30)	2.8	3.9	2.7	22.8	Chiller
40	-	Max (110)	10.94	3.4	11	23.7	Chiller

3 Conclusioni

E' stato sviluppato un sistema di controllo al servizio di un impianto del tipo Hardware-in-the-loop per test su pompe di calore ad aria, geotermiche e multi-sorgente. L'apparato sperimentale è in grado di verificare le prestazioni delle pompe di calore in condizioni di lavoro realistiche mediante l'accoppiamento del circuito di prova con un simulatore in grado di valutare il comportamento dinamico di un edificio corredato di sottosistema di emissione, regolazione e distribuzione.

L'obiettivo di questo circuito è quello di:

- Permettere l'analisi delle reali prestazioni di macchina in condizioni di lavoro differenti da quelle stazionarie nominali;
- Permettere di analizzare il comportamento della macchina nella gestione dei transitori (carichi variabili, escursioni di temperatura esterna, avviamenti, spegnimenti, lavoro in condizioni di off-design);
- Permettere di testare innovative logiche di regolazione in grado di rendere la macchina più efficiente durante le fasi di funzionamento non-stazionario;
- Permettere la definizione di test di prova rapidi (1 giorno – 5 giorni – 10 giorni) per la stima delle prestazioni stagionali delle pompe di calore.

Il circuito HiL è stato progettato e costruito con il contributo dei fondi POR-FESR della Regione Emilia Romagna nell'ambito del progetto di ricerca HEGOS.

Il sistema di controllo, studiato nell'ambito di questo progetto, è stato completato solo al termine del II anno del progetto e per la sua ottimizzazione sono necessarie ancora molte prove sperimentali per la taratura dei diversi sottosistemi.

L'aspetto maggiormente innovativo del sistema descritto è la possibilità di accoppiare un simulatore dinamico (ad es. TRNSYS) all'impianto al fine di simulare il comportamento della pompa di calore accoppiandola "virtualmente" a qualsiasi edificio, con qualsiasi terminale, in qualunque località. Il sistema si presta a definire nuove logiche di controllo ottimali per la massimizzazione delle prestazioni energetiche degli impianti a pompa di calore in funzione delle tipologie di edificio e di terminali utilizzati. E' inoltre uno strumento utile al fine di mettere a punto prove rapide per la stima delle prestazioni stagionali delle pompe di calore. Infine, questo tipo di test permette di ottenere una "copia digitale" della pompa di calore che

simuli perfettamente il suo funzionamento reale (Digital Twin). Tale “copia digitale” può permettere di rilevare in anticipo guasti e malfunzionamenti delle pompe di calore installate riducendo sprechi economici ed energetici.

Il circuito risulta un apparato sperimentale molto interessante per la conduzione di test di ricerca industriale che aiutino l'industria italiana ad ottimizzare le prestazioni energetiche delle pompe di calore prodotte.

4 Riferimenti bibliografici

1. European Parliament and Council. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj> (accessed on 5 January 2021).
2. European Parliament and Council. 2018. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj> (accessed on 5 January 2021).
3. Sarbu, I.; Sebarchievici, C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 2014, Vol. 70, pp. 441–454.
4. Carroll, P.; Chesser, M.; Lyons, P. Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, Vol. 134, pp. 1-12.
5. European heat pump association (EHPA). European heat pump market and statistics, 2019, http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards/ (accessed on 15 March 2021).
6. Dongellini, M.; Naldi, C; Morini, G. L. Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, 2015, Vol. 90, pp. 1072-1081.
7. Bagarella, G.; Lazzarin, R.; Noro, M. Sizing strategy of on-off and modulation heat pump systems based on annual energy analysis. *International Journal of Refrigeration*, 2016, Vol. 65, pp. 183-193.
8. Zhang, Y.; Zhang, G.; Zhang, A.; Jin, Y.; Ru, R.; Tian, M. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: An analysis and review. *Energies*, 2018, Vol. 11, pp. 1-36.
9. Vocale, P.; Morini, G. L.; Spiga, M. Influence of outdoor air conditions on the air source heat pumps performance. *Energy Procedia*, 2014, Vol. 45, pp. 653-662.
10. Lucchi, M.; Lorenzini, M.; Valdiserri, P. Energy performance of a ventilation system for a block of apartments with a ground source heat pump as generation system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 796, pp. 1-9.
11. You, T.; Wu, W.; Shi, W.; Baolong, W.; Li, X. An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground coupled heat pumps in cold regions. *Applied Energy*, 2016, Vol. 177, pp. 515-536.
12. Safa, A.A.; Fung, A.S.; Kumar, R. Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, 2015, Vol. 81, pp. 279-287.
13. Self, S.J.; Reddy, B.V.; Rosen, M.A.; Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 2013, Vol. 101, pp. 341-348.
14. Lazzarin, R.M. Dual source heat pump systems: Operation and performance. *Energy and Buildings*, 2012, Vol. 52, pp. 77-85.
15. Grossi, I.; Dongellini, M.; Piazzini, A.; Morini, G.L. Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 2018, Vol. 142, pp. 745-759.
16. Haves, P.; Dexter, A.; Jorgensen, D. R.; Ling, K.V.; Geng, G. Use of a building emulator to develop techniques for improved commissioning and control of HVAC system. *ASHRAE Transaction*, 1991, Vol. 97, pp. 684-688.

17. Lahrech, R.; Gruber, P.; Riederer, P.; Tessier, P.; Visier, J. C. Development of a testing method for control HVAC systems by emulation. *Energy and Buildings*, 2002, Vol. 34, pp. 909-916.
18. Anderson, M.; Buehner, M.; Young, P.; Hittle, D.; Anderson, C.; Tu, J.; Hodgson, D. An experimental system for advanced heating, ventilating and air conditioning (HVAC) control. *Energy and Buildings*, 2007, Vol. 39, pp. 136-147.
19. Da Silva, P., Knabe, G., LabHouse: System simulation and emulation within boiler development, *Building services Engineering Research and Technology*, 24,4, pp. 281-287 (2003)
20. Riederer, P., Partenay, V., Raguideau, O., Dynamic Test Method for the Determination of the Global Seasonal Performance Factor of Heat Pumps Used for Heating Cooling and Domestic Hot Water Preparation, Eleventh International IBPSA Conference (2009, July 27-30).
21. Haller, M., Y., Haberl, R., Persson, T., Bales, C., Kovacs, P., Chèze, D., Papillon, P. Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems - The current state of the art, *Energy and Buildings*, 66, pp. 667-677 (2013).
22. De La Cruz, A. T.; Riviere, P.; Marchio, D.; Cauret, O.; Milu, A. Hardware in the loop test bench using Modelica: A platform to test and improve the control of heating systems. *Applied Energy*, 2017, Vol. 188, pp. 107-120.
23. Conti, P.; Bartoli, C.; Franco, A.; Testi, D. Experimental Analysis of an Air Heat Pump for Heating Service Using a "Hard-ware-In-The-Loop" System. *Energies*, 2020, Vol. 13, pp. 1-18.
24. Frison, L.; Kleinstück, M.; Engelmann, P. Model-predictive control for testing energy flexible heat pump operation within a Hardware-in-the-Loop, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1343, pp. 1-6.
25. Mehrfeld, P.; Nürenberg, M.; Knorr, M.; Schinke, L.; Beyer, M.; Grimm, M.; Lauster, M.; Müller, D.; Seifert, J.; Stergiaropoulos, K. Dynamic evaluations of heat pump and micro combined heat and power systems using the hardware-in-the-loop approach, *Journal of Building Engineering*, 2020, Vol. 28, pp. 1-14.
26. Klein, S.A.; Beckman, W.A.; Mitchell, J.W.; Duffie, J.A.; Duffie, N.A.; Freeman, T.L.; Mitchell, J.C.; Braun, J.E.; Evans, B.L.; Kummer, J.P.; et al. TRNSYS Version 18; Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison: Madison, WI, USA, 2018.
27. Matlab-Simulink software, <https://it.mathworks.com/products/simulink.html> (accessed on 5 January 2021).
28. Solar-Institut Juelich, CARNOT-Blockset, 1999. Germany Scientific Computers GmbH.
29. Campana, J.P.; Magni, M.; Dongellini, M. The benchmark of a new SIMULINK library for thermal dynamic simulation of buildings. In *Building Simulation Applications, Proceedings of 3rd IBPSA-Italy Conference on Building Simulation Applications, BSA 2017, Bolzano, Italy, 8-10 February 2017*.

5 Abbreviazioni ed acronimi

HiL = apparato Hardware-in-the-Loop

CC = camera climatica

BE = simulatore dinamico di edifici ed impianti

HL = circuito idronico

ASHP = Pompa di calore ad aria

GSHP = Pompa di calore geotermica

DSHP = Pompa di calore dual source

EEV = valvola di regolazione elettronica