RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA 4.1: Sistemi integrati: Predisposizione impianto per Pompe di calore dual source ad alta temperatura e caratterizzazione geotermica

A.C. Violante, S. Attanasi, E. Giacomazzi, L. Gugliermetti, G. Guidi, A. Mariani, M. Pieve, M. Proposito, R. Trinchieri, G. Guidarelli, M. Morlacca, C. Stringola

RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA4.1_027

LA4.1: SISTEMI INTEGRATI: PREDISPOSIZIONE IMPIANTO PER POMPE DI CALORE DUAL SOURCE AD ALTA TEMPERATURA E CARATTERIZZAZIONE GEOTERMICA

A.C. Violante, S. Attanasi, E. Giacomazzi, L. Gugliermetti, G. Guidi, A. Mariani, M. Pieve, M. Proposito, R. Trinchieri, G. Guidarelli, M. Morlacca, C. Stringola (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: 4.1
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Anna Carmela Violante, ENEA
Mese inizio previsto: gennaio 2022
Mese inizio effettivo: gennaio 2022
Mese fine previsto: giugno 2023
Mese fine effettivo: giugno 2023

Indice

1 RISULTATI ATTESI 4

2 RISULTATI OTTENUTI 5

3 PRODOTTI ATTESI 6

4 PRODOTTI SVILUPPATI 7

5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 8

6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 9

7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 10

8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 41

9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 42

10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 43

1 Risultati attesi

I principali output attesi, descritti in questo report e nel corrispondente allegato (Report RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA4.4_027_ALL) sono:

i) Caratterizzazione dei pozzi geotermici realizzati presso il C.R. ENEA Casaccia, attraverso misure di conducibilità termica sui campioni prelevati durante la realizzazione di pozzi piezometrici. La realizzazione dei pozzi si è resa necessaria in virtù della successione stratigrafica del terreno, estremamente eterogenea, riscontrata sui quattro pozzi realizzati nel precedente triennio del PTR. I dati raccolti dalle misure di conducibilità consentiranno di disporre di dati input reali per le successive fasi di modellizzazione tramite software dedicati. Inoltre, i dati acquisiti sui piezometri avranno anche lo scopo di consentire una valutazione della capacità di utilizzo della sorgente geotermica come accumulo stagionale;

ii) Caratterizzazione della pompa di calore dual-source ad alta temperatura con sorgente termica aria. Si è previsto che la medesima pompa di calore sarà in seguito installata sull'apparato di prova di tipo HiL anch'esso realizzato in questa LA;

iii) Dimensionamento, approvvigionamento dei componenti, e realizzazione del suddetto impianto di tipo HiL per il test statico e dinamico di pompe di calore a doppia sorgente termica (aria e terreno) su utenza simulata; la sezione di simulazione dovrà essere in grado di simulare un gran numero di tipologie abitative (di vecchia e nuova costruzione) e di utenze attraverso una sezione del circuito idronico opportunamente attrezzata e strumentata.

2 Risultati ottenuti

Tutti i risultati attesi sono stati ottenuti. In particolare:

i) Sul tema della caratterizzazione dei pozzi geotermici, sono state realizzate due perforazioni a carotaggio continuo attrezzate a piezometri (PZ1 e PZ2) fino alla profondità di 45 m dal p.c, per monitorare le oscillazioni del livello di falda acquifera e la temperatura nell'intorno del campo geosonde. Le perforazioni sono state effettuate a carotaggio continuo per ricostruire e correlare le successioni stratigrafiche, caratterizzando in tal modo l'assetto litologico nell'area del campo geosonde. Misure dirette di conducibilità termica sono state effettuate sulle carote appena estratte, in quanto rappresentative della condizione reale di confinamento nel sottosuolo. I dati acquisiti sono stati confrontati con i valori di conducibilità termica lungo la verticale, riferiti al sondaggio geognostico S1 del campo geosonde. Il valore di conducibilità termica media trovato per ogni litotipo dei tre sondaggi (S1, PZ1 e PZ2), fino alla profondità di 45 m, risulta uguale a 0,90 W/mK, a conferma della corretta esecuzione anche delle analisi svolte in laboratorio. Da 45 a 85 m sono stati considerati i valori di conducibilità termica media misurati in laboratorio sui campioni del sondaggio S1.
È stato inoltre possibile calcolare densità e calore specifico (J/kg*K) per la sorgente terreno. Infine, definita la permeabilità delle diverse litologie lungo la verticale, e noto il gradiente idraulico, è stata calcolata la portata unitaria (m/s) attraverso i diversi strati ed è stata determinata la velocità effettiva dell'acqua all'interno di ogni litologia;

ii) Per quanto riguarda la caratterizzazione della pompa di calore dual-source invertibile ad alta temperatura con sorgente termica aria, dopo aver installato la pompa di calore in camera climatica, dotandola dell'opportuna strumentazione, si è proceduto all'esecuzione dei test indicati dalle normative con diverse modalità di produzione acqua (bassa temperatura, 30-35 °C, media temperatura, 40-45 °C, alta temperatura, 47-55 °C, altissima temperatura, 55-65 °C) e diverse temperature ambiente (da 2 °C a 12 °C). I dati raccolti sono stati analizzati, misurando gli assorbimenti elettrici, le potenze termiche e i COP, evidenziando alcuni possibili miglioramenti da apportare al prototipo in prova. Sono state inoltre calcolate le prestazioni stagionali (SCOP) che, forniscono comunque un valore prestazionale solo indicativo, in quanto la macchina, che utilizza l'R600a come refrigerante, è progettata per lavorare con la sorgente terreno quando la temperatura dell'aria scende sotto certi valori;

iii) Infine, è stato effettuato il dimensionamento, l'approvvigionamento dei componenti e la realizzazione dell'impianto di test per PdC a doppia sorgente termica di tipo HiL, che è in grado di simulare differenti tipologie di utenza e di tipologie di trasmissione termica (livelli di temperatura d'esercizio di possibili differenti terminali d'impianto). L'impianto è stato strumentato in modo da poter registrare gli assorbimenti elettrici, (parziali e complessivi, dei diversi componenti) e le potenze termiche prodotte e scambiate dai vari componenti (sorgente termica, pompa di calore, serbatoio di accumulo, chiller, dry-cooler di simulazione utenza). È stato impostato il programma di controllo e gestione dell'impianto, che ha tenuto conto della necessità di automatizzare l'impiego delle varie possibili configurazioni d'impianto.

3 Prodotti attesi

Il principale prodotto atteso da questa LA è la realizzazione di un impianto sperimentale per test stazionari e dinamici di PdC dual-source. In particolare, era previsto il dimensionamento, l'approvvigionamento di componenti e l'assemblaggio di un impianto integrato composto da pompa di calore dual-source (aria-terreno) ad alta temperatura, sonde geotermiche (realizzate nel precedente triennio del PTR) e delle relative logiche di controllo.

Un ulteriore prodotto di questa LA è la stesura del presente Rapporto tecnico, che sarà affiancato da un elaborato più esteso, che descriverà anche le altre attività condotte in questa LA, tra cui la realizzazione di due fori attrezzati a piezometri, al fine di monitorare la temperatura e il livello dell'acqua di falda nel campo geotermico realizzato nel 2021 e la caratterizzazione del prototipo di pompa di calore con l'uso della sorgente termica aria.

4 Prodotti sviluppati

La realizzazione dell'impianto sperimentale per test stazionari e dinamici di PdC dual-source è stata sostanzialmente completata. In particolare, è stato completato il dimensionamento, l'approvvigionamento di componenti (salvo il dry-cooler da impiegare come simulatore dell'utenza, per un ritardo nella consegna) e l'assemblaggio dell'impianto di prova composto da pompa di calore dual-source (aria-terreno) ad alta temperatura e relativa batteria alettata per lo sfruttamento della sorgente aria, sonde geotermiche (realizzate nel precedente triennio del PTR) e delle relative logiche di controllo. L'impianto è stato dotato di un programma dedicato al monitoraggio, alla modifica della configurazione di lavoro e all'acquisizione dati.

Nel presente Rapporto tecnico sono descritti anche altri importanti prodotti ottenuti tra cui la realizzazione di due fori attrezzati a piezometri, al fine di monitorare la temperatura e il livello dell'acqua di falda nel campo geotermico realizzato nel 2021 e la caratterizzazione del prototipo di pompa di calore con l'uso della sorgente termica aria.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati registrati scostamenti tecnici rispetto alle attività previste. Dal punto di vista economico, la LA 4.1 ha fatto registrare un incremento molto contenuto dei costi, in linea con gli aumenti effettivi del costo delle materie prime e dei materiali (in particolare dei beni consumabili) tra il periodo di preventivazione e quello di consuntivazione.

6 Sintesi delle attività svolte

Grazie alla realizzazione di due piezometri sono state effettuate misure di conducibilità termica, di densità e di calore specifico di ogni strato litologico incontrato. Inoltre, sono state determinate altre grandezze (permeabilità, portata unitaria e velocità effettiva dell'acqua all'interno di ogni litotipo) utili alla realizzazione di un modello per la caratterizzazione geotermica della sorgente.
La pompa di calore dual-source ad alta temperatura è stata testata in camera climatica con sorgente termica aria, con diverse modalità di produzione acqua. I dati raccolti sono stati analizzati ottenendo i COP e gli SCOP e sono state proposte migliorie da apportare al prototipo.
Infine, è stato effettuato il dimensionamento e la realizzazione dell'impianto di test per PdC a doppia sorgente termica, di tipo HiL, e il programma di controllo. L'impianto è stato strumentato per misurare gli assorbimenti elettrici e le potenze termiche prodotte e dissipate.

7 Dettaglio delle attività svolte

La LA 4.1 si incentra sulla realizzazione di un apparato sperimentale per il test di PdC in grado di sfruttare sorgenti geotermiche a bassa entalpia e sulla caratterizzazione geotermica del campo sonde realizzato presso il C.R. ENEA Casaccia. Nel par. 7.1 si illustrano le attività di caratterizzazione del campo geosonde, effettuate anche grazie alla realizzazione di 2 piezometri (par. 7.1).
Dal punto di vista impiantistico, nel corso di questa attività è stata selezionata ed installata una PdC dual-source aria-terreno invertibile ad alta temperatura su un apparato di prova di tipo HiL, opportunamente progettato e realizzato, modificando l'impianto esistente (par. 7.3). Prima dell'installazione sull'impianto di prova, la PdC è stata provata in camera climatica con la sorgente termica aria (par. 7.2). I risultati saranno impiegati per definire le corrette logiche di impiego delle due sorgenti per massimizzare le prestazioni della PdC.

7.1 Attività di caratterizzazione impianto geotermico

7.1.1 Metodo di perforazione

Nella prima fase di attività sono stati realizzati due piezometri, al fine di monitorare la temperatura e il livello dell'acqua di falda nel campo geotermico realizzato nel 2021, costituito da 4 pozzi ad andamento verticale e a diversa profondità. Un piezometro (PZ1) è stato realizzato in prossimità del parcheggio autovetture antistante l'ingresso dell'edificio F40, e l'altro (PZ2) a circa 2 m di distanza dal pozzo S1 (Figura 1).

Figura 1: Ubicazione del campo geosonde esistente e dei piezometri di nuova realizzazione (in arancione)

Le perforazioni sono state eseguite a carotaggio continuo per avere misure dirette di conducibilità termica su tutti gli strati di terreno attraversati dal sondaggio. La scelta della profondità di installazione dei piezometri (45 m dal piano campagna, p.c.) e della lunghezza del tratto filtrante è stata determinata dalla quota del livello statico della falda acquifera e dalle caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo.

7.1.2 Metodo di perforazione

Le immagini seguenti mostrano alcune fasi della realizzazione dei piezometri (preforo iniziale, Figura 2; perforazione e stabilizzazione con tubi di rivestimento, Figura 3; uso di batteria di aste di perforazione in acciaio, di lunghezza standard di 1,5 o 3 m, Figura 4).

Figura 2: Preforo iniziale e scavo manuale fino alla profondità di 1,5 m dal p.c.

Figura 3: Tubo di rivestimento e corona per l'alesaggio del foro

Figura 4: Batteria di aste di perforazione (a), che vengono collegate al carotiere (b), e quindi inserite nei tubi di rivestimento del foro (c)

7.1.3 Messa in posa dei piezometri

Il piezometro è composto da tubi aperti lunghi 3 m, filettati alle estremità e avvitati in serie fino alla profondità di 45 m dal p.c., di diametro di 3", utilizzando tubi microfessurati in corrispondenza dell'acquifero e ciechi nei tratti non drenanti (Figura 5).

Figura 5: Tubi piezometrici in PVC da 3" microfessurati nel tratto drenante e ciechi nel tratto non drenante

I tubi microfessurati (slot da 2,5 mm) sono stati inseriti da fondo foro fino a – 24 m dal p.c. (in totale 7 tubi), per intercettare la falda anche considerando le fluttuazioni stagionali del livello piezometrico. Nello spazio tra il tratto di piezometro fessurato e le pareti del foro è stato introdotto il filtro costituito da ghiaietto di cava, il cui spessore riempie l'intervallo da fondo foro fino a – 21 dal p.c. Nel tratto superiore, dove non si hanno funzioni di drenaggio, da – 24 m dal p.c., sono stati installati 8 tubi ciechi fino a boccapozzo.

7.1.4 Messa in posa dei sensori di livello e di temperatura

All'interno dei piezometri sono stati installati i sensori di livello e di temperatura (Figura 6). I sensori di livello sono di tipo elettrico e misurano pressioni e sovrapressioni interstiziali e il livello dell'acqua nel pozzo. Il sensore può rilevare la pressione idrostatica, con cavo elettrico schermato e tubicino per la compensazione atmosferica.

Figura 6: Messa in posa dei sensori di livello e di temperatura con cavo e datalogger per l'acquisizione dei dati

I campioni provenienti dai sondaggi hanno consentito di definire la stratigrafia delle formazioni geologiche nei punti di indagine. Nel piezometro PZ2 è stata riscontrata la stessa successione litostratigrafica definita per il campo geosonde, insistendo entrambi sullo stesso piazzale. La correlazione tra le due successioni litostratigrafiche, distanti tra loro circa 100 m, ha permesso di ricostruire l'assetto litostratigrafico dell'intera area. In particolare, il piezometro PZ1 si trova a quota ≈ 147 m s.l.m. e la soggiacenza della falda si attesta a 25,30 m dal p.c.. Al contrario, il p.c. del piezometro PZ2 è posto a quota ≈ 148 m s.l.m. e la profondità della superficie di falda è stata misurata in 26,21 m dal boccapozzo. Quindi, l'andamento della superficie piezometrica può essere considerata suborizzontale.

7.1.5 Misure di conducibilità termica

La misura di conducibilità termica λ (espressa in W/mK) ha interessato i diversi litotipi incontrati fino alla profondità di 45 m. I valori più alti di conduttività termica sono stati misurati in corrispondenza delle lave, il cui spessore è di 12,50 m nel PZ2 (da 21 m a 33,50 m dal p.c.) e di 11,20 m nel PZ1 (da 23 m a 34,20 m dal p.c.). I valori maggiori si registrano al tetto delle lave sia in PZ1 (1,806 W/mK) che in PZ2 (1,651 W/mK). Alla base, invece, le lave sono più fratturate e più mineralizzate, per la risalita di acque profonde; in questi strati si osservano i valori più bassi di conduttività termica, rispettivamente 1,656 W/mK per PZ1 e 1,340 W/mK per PZ2.

Con lo stesso strumento è stata misurata la conducibilità termica in laboratorio sulle carote del pozzo 1 del campo geosonde, fino alla profondità di 85 m.

Il valore medio totale di conducibilità termica, ottenuto dalle misure effettuate in laboratorio sui litotipi del sondaggio geognostico S1, risulta uguale ai dati misurati in cantiere sui campioni appena estratti dei sondaggi PZ1 e PZ2, ossia 0,90 W/mK.

7.1.6 Misure di densità e del calore specifico sui campioni del sondaggio geognostico S1, di PZ1 e di PZ2

Noto il volume e il peso dei campioni saturi o insaturi (ossia quello osservato dopo essiccazione in stufa ventilata, per i campioni fino alla profondità di 21 m) del sondaggio S1 è stata calcolata la densità e da questa, da valori di bibliografia per la capacità termica volumica, il calore specifico (cp, J/Kg*K). Per i campioni PZ1 e PZ2, è stato usato lo stesso procedimento, ma le misure di conducibilità sono state effettuate al momento dell'estrazione delle carote, rendendole particolarmente rappresentative del reale contesto litologico dell'area in studio.

7.1.7 Correlazione tra i valori di densità e del calore specifico nei sondaggi geognostici S1, PZ1 e PZ2

Dopo opportuna analisi critica dei risultati di densità e calore specifico determinati come indicato, i valori medi calcolati, relativi all'intera successione stratigrafica, verranno utilizzati per le successive simulazioni del

campo termico. Per i primi 20 m di profondità sono stati considerati solo i valori medi riferiti ai sondaggi PZ1 e PZ2. Dai 20 m ai 45 m, i valori sono la media dei dati registrati nei tre sondaggi (S1, PZ1 e PZ2). Dai 45 m fino ai limi sabbiosi, si considerano soltanto i dati del sondaggio S1 poiché i carotaggi PZ1 e PZ2 si arrestano a 45 m di profondità dal p.c..

7.1.8 Misura della permeabilità, della portata unitaria e della velocità effettiva

Per le diverse litologie attraversate nei sondaggi PZ1 e PZ2 i valori di permeabilità considerati, da bibliografia, sono:

- basalto: 1,27E-07 m/s;
- tufi sabbiosi, pozzolane: 3,39E-05 m/s;
- tufo argilloso e piroclastite: 3,00E-09 m/s;
- ignimbrite: 3,00E-05 m/s;
- tufo sabbioso argilloso: 1,50E-05 m/s;

È stata calcolata la portata unitaria (q) attraverso i diversi strati e assumendo un generico valore di porosità efficace (n_e) di 0,21 per i tufi e 0,08 per il basalto, è stata determinata la velocità effettiva (v_e) dell'acqua all'interno di ogni strato.

7.1.9 Dati piezometrici e correlazione con i dati di piovosità mensile

Il valore della soggiacenza media mensile nel PZ1 è rimasto invariato per tutto l'intervallo temporale considerato (24 marzo-31 maggio 2023) e non sono state registrate variazioni di livello significative in relazione alla piovosità.
La variazione di livello registrata in PZ2 in alcuni mesi piovosi, negativa e contraria a quella di PZ1, sembra non essere in linea con i dati pluviometrici, probabilmente per l'instaurarsi di un elevato ruscellamento superficiale in occasione di piogge abbondanti. Al fine di una migliore comprensione del fenomeno sarà necessario un monitoraggio esteso nel tempo.

7.2 Caratterizzazione PdC dual source con sorgente aria

7.2.1 Installazione in camera climatica

Il prototipo di PdC ad alta temperatura TEON RT10, composto da due elementi distinti, l'unità interna e la batteria alettata è stato installato in camera climatica e dotato di strumentazione per valutare le potenze termiche prelevate e/o erogate dai vari componenti d'impianto. Il circuito idronico, che collega l'unità esterna all'evaporatore, è stato caricato con acqua e glicole al 30%, per evitare congelamenti in test a bassa temperatura.

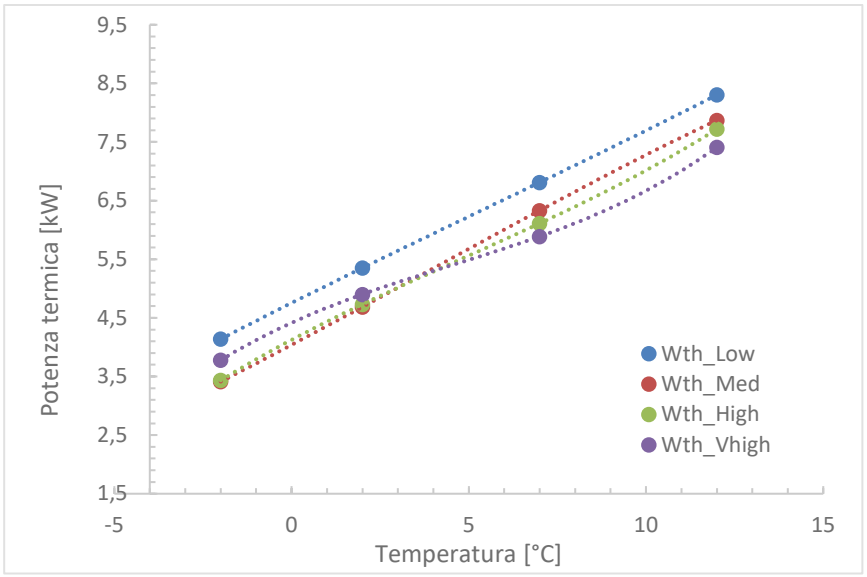
Figura 7: PdC dual source ad alta temperatura installata in camera climatica

7.2.2 Risultati dei test in camera climatica

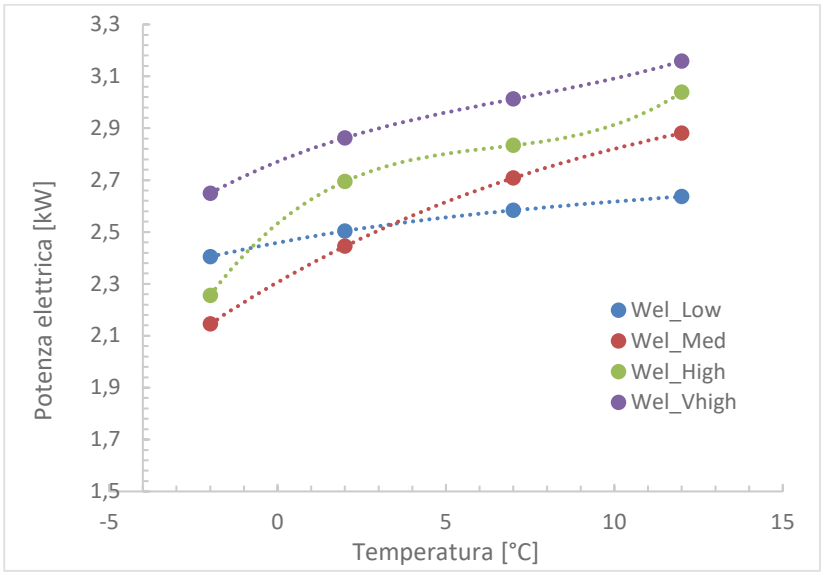
Per caratterizzare la macchina dual-source con sorgente termica aria sono stati eseguiti test secondo la norma UNI-EN 14511 parte II: in modalità riscaldamento sono stati eseguiti test a bassa (30÷35 °C), media (40÷45 °C), alta (47÷55 °C), altissima temperatura (55÷65 °C). I risultati sono riportati in Tabella 1 e graficamente in Figura 8: a) potenza totale elettrica assorbita; b) potenza termica erogata, c) COP solo compressore; d) COP complessivo.

Tabella 1: Risultati test prototipo di pompa di calore dual-source in modalità riscaldamento

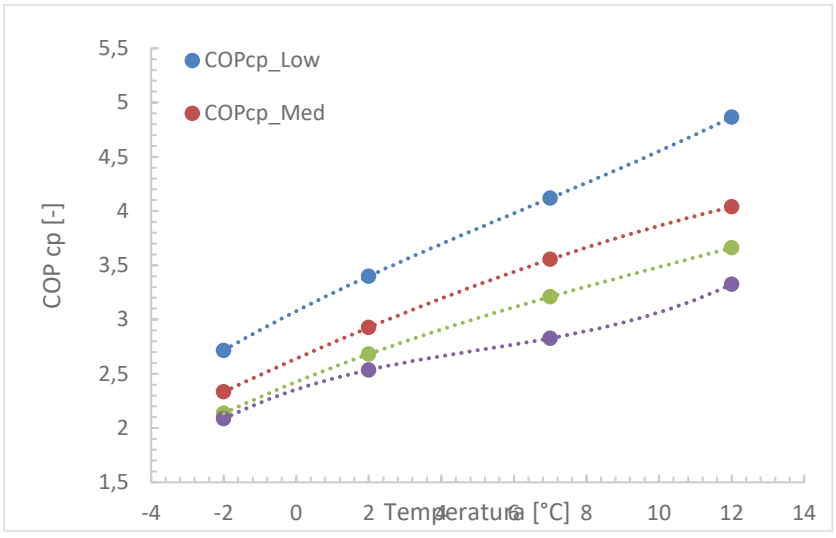
test	Tambiente	Twater in	Twater out	Poternza termica	Potenza elettrica	COP_cp	COP_tot
	[°C]	[°C]	[°C]	[kW]	[kW]	[-]	[-]
LT	12	28,95	35,1	8,30	2,63	4,86	3,14
LT	7	29,92	35,01	6,81	2,58	4,12	2,63
LT	2	31,03	35,07	5,35	2,50	3,4	2,13
LT*	-2	31,84	35	4,13	2,4	2,71	1,72
MT	12	39.35	45.05	7.87	2,88	4,04	2,73
MT	7	40.09	45.04	6,33	2,71	3,55	2,34
MT	2	40,83	45	4,69	2,44	2,93	1,92
MT*	-2	41,42	45	3,41	2,14	2,33	1,59
HT	12	44,61	55,05	7,72	3,04	3,66	2,54
HT	7	47,00	55,09	6,11	2,83	3,21	2,16
HT	2	48,15	54,96	4,73	2,69	2,68	1,83
HT*	-2	48,17	55	3,43	2,25	2,13	1,52
VHT	12	52,23	64,94	7,41	3,16	2,54	2,34
VHT	7	55,01	65,14	5,89	3,01	2,16	1,95
VHT	2	56,55	64,91	4,9	2,86	1,83	1,71
VHT*	-2	56,88	65	3,78	2,65	1,52	1,42


9,5
8,5
7,5
6,5
5,5
4,5
3,5
2,5
1,5
Potenza termica [kW]
-5
0
5
10
15
Temperatura [°C]
Wth_Low
Wth_Med
Wth_High
Wth_Vhigh

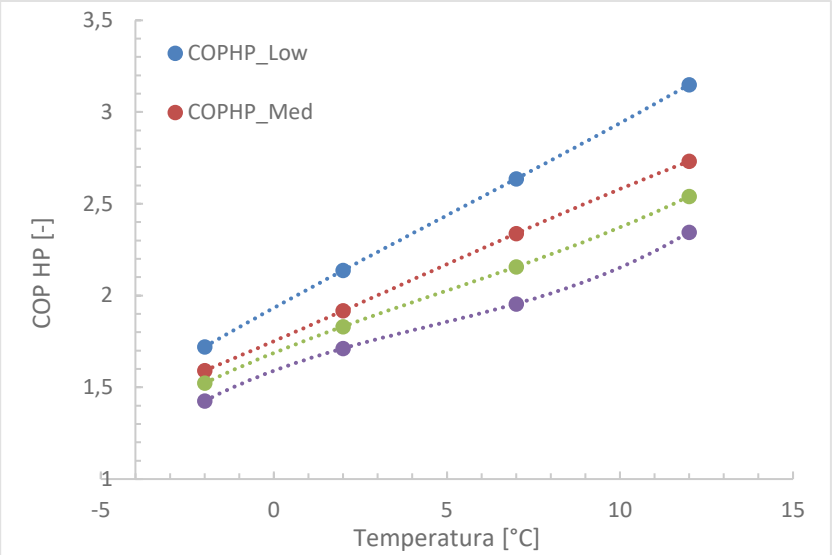
a)


3,3
3,1
2,9
2,7
2,5
2,3
2,1
1,9
1,7
1,5
Potenza elettrica [kW]
-5
0
5
10
15
Temperatura [°C]
Wel_Low
Wel_Med
Wel_High
Wel_Vhigh

b)


5,5
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
COP cp [-]
-4
-2
0
2
4
6
8
10
12
14
Temperatura [°C]
COPcp_Low
COPcp_Med

c)



d)

Figura 8: Andamento dei principali parametri prestazionali: Consumo elettrico (a), Potenza erogata (b), COP solo compressore (c), COP globale (d)

I risultati ottenuti sono leggermente inferiori a quelli attesi probabilmente a causa della non corretta gestione della valvola di espansione elettronica (EEV), attraverso un sensore di pressione posto a monte del compressore. Infatti, in virtù delle caratteristiche del refrigerante impiegato (R600a, Tabella 1 e Figura 9 confronto con l'R32) e della presenza del recuperatore tra evaporatore e compressore (Figura 10), la presumibile differenza di pressione tra evaporatore e ingresso compressore può dar luogo a repentini fenomeni di cambiamento di fase nell'evaporatore con conseguente influenza sulla potenza termica prodotta dalla PdC (Figura 11).
Bisogna comunque evidenziare che un'altra possibile giustificazione ai valori prestazionali non ottimali ottenuti, può venire dall'elevato assorbimento del ventilatore dell'unità esterna. Esso è risultato pari a 755 W, tra il 23,97 e il 35,3% degli assorbimenti totali e non sembra in linea con quello di altri sistemi analoghi testati, a parità di portata d'aria erogata.
Infine, si precisa che la macchina in test può lavorare anche con l'esclusione del recuperatore, ma in questa fase della ricerca non sono disponibili i risultati in tale configurazione.

Tabella 2:Pressione e temperatura di saturazione dell'R600a nel range 1-2,05 bar

Pressione [bar]	Temperatura Saturazione [°C]	Pressione [bar]	Temperatura Saturazione [°C]
1	-12,08	1,55	-0,35
1,05	-10,84	1,6	0,54
1,1	-9,63	1,65	1,42
1,15	-8,47	1,7	2,27
1,2	-7,35	1,75	3,11
1,25	-6,26	1,8	3,93
1,3	-5,20	1,85	4,73
1,35	-4,18	1,9	5,51
1,4	-3,18	1,95	6,28
1,45	-2,22	2,0	7,04
1,5	-1,27	2,05	7,78

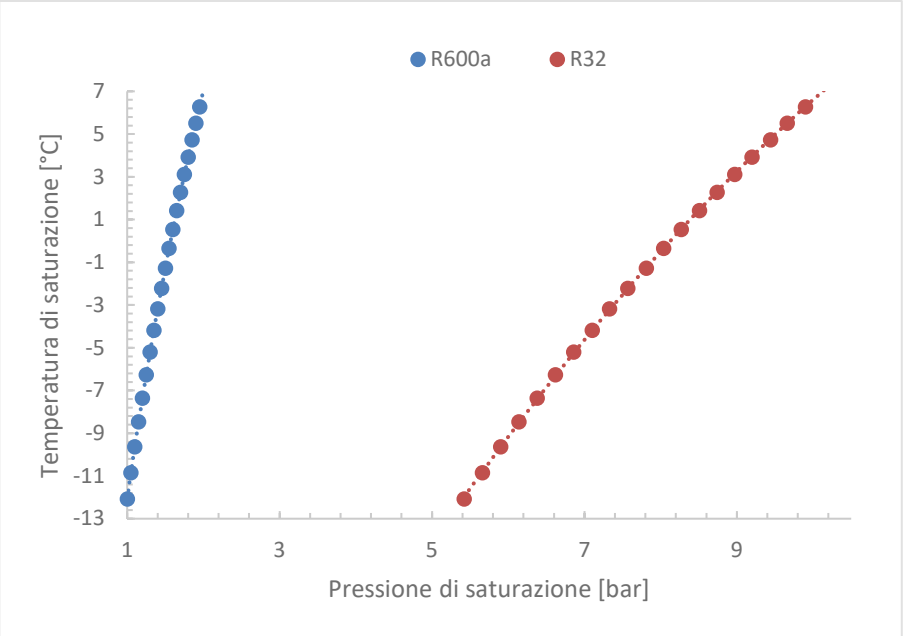


Figura 9: Confronto tra le pendenze delle curve di saturazione dell'R600a e dell'R32 nel range -13÷ 7 °C

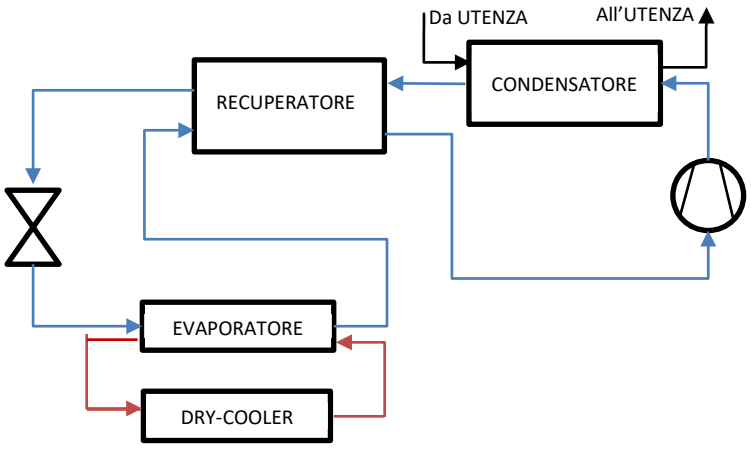


Figura 10: Schema semplificato del circuito frigorifero del prototipo di PdC in test

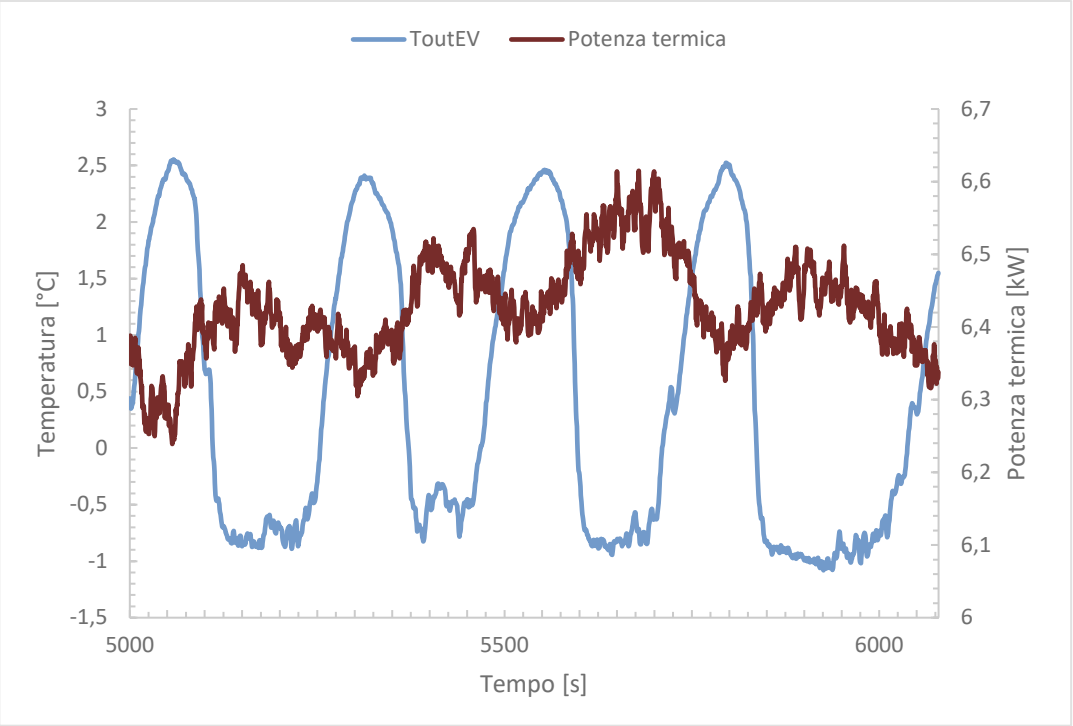


Figura 11: Effetto delle condizioni di lavoro dell'evaporatore sulla potenza termica erogata dalla PdC

7.2.3 Calcolo delle prestazioni stagionali della PdC

Lo SCOP è stato calcolato secondo la norma UNI-EN 14825 ai fini della caratterizzazione del funzionamento della PdC con sorgente termica aria; esso non costituisce il valore di massima prestazione ottenibile con la macchina dual-source a disposizione perché questa, in molte condizioni climatiche, impiegherebbe più efficientemente la sorgente termica terreno. Si prevede di poter fornire i dati prestazionali definitivi del sistema al termine della campagna di sperimentazione del sistema integrato, che sarà svolta nel prosieguo del progetto di ricerca.

Per il calcolo dello SCOP in riscaldamento sono state scelte 2 diverse condizioni, una customizzata per i limiti operativi della macchina (che non è progettata per lavorare a temperature delle sorgenti inferiori a -2 °C, avendo il refrigerante impiegato, R600A, un punto di ebollizione a -11.75 °C a 1 bar di pressione, sotto cui non potrebbe avvenire il cambiamento di fase all'evaporatore) ed una seconda corrispondente alle condizioni Warmer della normativa. Il valore dei parametri scelti, necessari al calcolo dello SCOP, sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3: Condizioni utilizzate per il calcolo dello SCOP

Condizioni	Bin da normativa	TOL [°C]	$T_{bivalente}$ [°C]	T_{design} [°C]
Custom	Average	-2	2	-2
Warmer	Warmer	2	7	2

Dall'elaborazione dei test effettuati con varie temperature di produzione dell'acqua (bassa, media, alta altissima temperatura) è stato possibile trarre i seguenti risultati per il calcolo dello SCOP:

- condizione "Custom", bassa temperatura (Tabella 4), media temperatura (Tabella 5), alta temperatura (Tabella 6) e altissima temperatura (Tabella 7);
- condizione "Warmer", bassa temperatura (Tabella 8), media temperatura (Tabella 9), alta temperatura (Tabella 10) e altissima temperatura (Tabella 11).

Tabella 4: SCOP bassa temperatura condizioni Custom

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWhth	kWth	kWth	kW	kWhth		kWhel	kWhth	kWhel
21	-10	1	1,44	9,94	10	0,00	0,00	9,94	10	0,90	10	0	0
22	-9	25	1,39	9,56	239	0,00	0,00	9,56	239	1,00	239	0	0
23	-8	23	1,33	9,17	211	0,00	0,00	9,17	211	1,11	211	0	0
24	-7	24	1,28	8,79	211	0,00	0,00	8,79	211	1,21	211	0	0
25	-6	27	1,22	8,41	227	0,00	0,00	8,41	227	1,31	227	0	0
26	-5	68	1,17	8,03	546	0,00	0,00	8,03	546	1,41	546	0	0
27	-4	91	1,11	7,64	696	0,00	0,00	7,64	696	1,52	696	0	0
28	-3	89	1,06	7,26	646	0,00	0,00	7,26	646	1,62	646	0	0
29	-2	165	1,00	6,88	1135	4,14	4,14	2,74	452	1,72	849	683	397
30	-1	173	0,94	6,50	1124	4,44	4,44	2,06	356	1,82	777	768	421
31	0	240	0,89	6,12	1468	4,74	4,74	1,38	331	1,93	920	1137	589
32	1	280	0,83	5,73	1605	5,03	5,03	0,70	196	2,03	889	1410	693
33	2	320	0,78	5,35	1712	5,33	5,33	0,02	6	2,14	804	1707	799
34	3	357	0,72	4,97	1774	5,63	4,97	0,00	0	2,19	810	1774	810
35	4	356	0,67	4,59	1633	5,93	4,59	0,00	0	2,24	728	1633	728
36	5	303	0,61	4,20	1274	6,23	4,20	0,00	0	2,30	555	1274	555
37	6	330	0,56	3,82	1261	6,53	3,82	0,00	0	2,35	537	1261	537
38	7	326	0,50	3,44	1121	6,83	3,44	0,00	0	2,40	467	1121	467
39	8	348	0,44	3,06	1064	7,13	3,06	0,00	0	2,36	451	1064	451
40	9	335	0,39	2,68	896	7,42	2,68	0,00	0	2,31	387	896	387
41	10	315	0,33	2,29	722	7,72	2,29	0,00	0	2,27	318	722	318
42	11	215	0,28	1,91	411	8,02	1,91	0,00	0	2,23	185	411	185
43	12	169	0,22	1,53	258	8,32	1,53	0,00	0	2,18	118	258	118
44	13	151	0,17	1,15	173	8,62	1,15	0,00	0	2,14	81	173	81
45	14	105	0,11	0,76	80	8,92	0,76	0,00	0	2,09	38	80	38
46	15	74	0,06	0,38	28	9,22	0,38	0,00	0	2,05	14	28	14
TOTALI					20527						11716	16400	7589
					SCOPon = 20527/11716= 1,752						SCOPnet = 16400/7589= 2,16		

Tabella 5: SCOP media temperatura, condizioni Custom

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	1	1,44	8,70	9	0,00	0,00	8,70	9	0,94	9	0	9
22	-9	25	1,39	8,37	209	0,00	0,00	8,37	209	1,02	209	0	209
23	-8	23	1,33	8,04	185	0,00	0,00	8,04	185	1,10	185	0	185
24	-7	24	1,28	7,70	185	0,00	0,00	7,70	185	1,18	185	0	0
25	-6	27	1,22	7,37	199	0,00	0,00	7,37	199	1,27	199	0	0
26	-5	68	1,17	7,03	478	0,00	0,00	7,03	478	1,35	478	0	0
27	-4	91	1,11	6,70	609	0,00	0,00	6,70	609	1,43	609	0	0
28	-3	89	1,06	6,36	566	0,00	0,00	6,36	566	1,51	566	0	0
29	-2	165	1,00	6,03	994	3,41	3,41	2,61	431	1,59	785	563	354
30	-1	173	0,94	5,69	985	3,73	3,73	1,96	339	1,67	725	646	386
31	0	240	0,89	5,36	1286	4,05	4,05	1,31	314	1,75	868	972	554
32	1	280	0,83	5,02	1406	4,37	4,37	0,65	183	1,84	849	1223	666
33	2	320	0,78	4,69	1500	4,69	4,69	0,00	0	1,92	782	1500	782
34	3	357	0,72	4,35	1554	5,01	4,35	0,00	0	1,96	795	1554	795
35	4	356	0,67	4,02	1430	5,32	4,02	0,00	0	1,99	718	1430	718
36	5	303	0,61	3,68	1116	5,64	3,68	0,00	0	2,03	550	1116	550
37	6	330	0,56	3,35	1105	5,96	3,35	0,00	0	2,07	534	1105	534
38	7	326	0,50	3,01	982	6,28	3,01	0,00	0	2,11	466	982	466
39	8	348	0,44	2,68	932	6,60	2,68	0,00	0	2,05	454	932	454
40	9	335	0,39	2,34	785	6,92	2,34	0,00	0	2,00	393	785	393
41	10	315	0,33	2,01	633	7,23	2,01	0,00	0	1,94	325	633	325
42	11	215	0,28	1,67	360	7,55	1,67	0,00	0	1,89	190	360	190
43	12	169	0,22	1,34	226	7,87	1,34	0,00	0	1,84	123	226	123
44	13	151	0,17	1,00	152	8,19	1,00	0,00	0	1,78	85	152	85
45	14	105	0,11	0,67	70	8,51	0,67	0,00	0	1,73	41	70	41
46	15	74	0,06	0,33	25	8,83	0,33	0,00	0	1,67	15	25	15
TOTALI					17981						11139	14275	7835
					SCOPon = 17981/1113 9= 1,614						SCOPnet = 14275/7835 = 1,82		

Tabella 6: SCOP alta temperatura condizioni Custom

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	1	1,44	8,79	9	0,00	0,00	8,79	9	0,94	9	0	9
22	-9	25	1,39	8,45	211	0,00	0,00	8,45	211	1,02	211	0	211
23	-8	23	1,33	8,11	187	0,00	0,00	8,11	187	1,09	187	0	187
24	-7	24	1,28	7,77	187	0,00	0,00	7,77	187	1,16	187	0	0
25	-6	27	1,22	7,44	201	0,00	0,00	7,44	201	1,24	201	0	0
26	-5	68	1,17	7,10	483	0,00	0,00	7,10	483	1,31	483	0	0
27	-4	91	1,11	6,76	615	0,00	0,00	6,76	615	1,38	615	0	0
28	-3	89	1,06	6,42	571	0,00	0,00	6,42	571	1,46	571	0	0
29	-2	165	1,00	6,08	1004	3,43	3,43	2,65	437	1,52	809	567	372
30	-1	173	0,94	5,75	994	3,74	3,74	2,01	347	1,60	751	647	404
31	0	240	0,89	5,41	1298	4,04	4,04	1,36	327	1,68	906	971	579
32	1	280	0,83	5,07	1419	4,35	4,35	0,72	202	1,75	896	1218	694
33	2	320	0,78	4,73	1514	4,65	4,65	0,08	25	1,83	838	1489	813
34	3	357	0,72	4,39	1568	4,96	4,39	0,00	0	1,91	822	1568	822
35	4	356	0,67	4,06	1444	5,26	4,06	0,00	0	1,99	727	1444	727
36	5	303	0,61	3,72	1126	5,57	3,72	0,00	0	2,06	546	1126	546
37	6	330	0,56	3,38	1115	5,87	3,38	0,00	0	2,14	521	1115	521
38	7	326	0,50	3,04	992	6,18	3,04	0,00	0	1,96	506	992	506
39	8	348	0,44	2,70	941	6,48	2,70	0,00	0	1,91	492	941	492
40	9	335	0,39	2,37	793	6,79	2,37	0,00	0	1,87	425	793	425
41	10	315	0,33	2,03	639	7,09	2,03	0,00	0	1,82	351	639	351
42	11	215	0,28	1,69	363	7,40	1,69	0,00	0	1,77	205	363	205
43	12	169	0,22	1,35	228	7,70	1,35	0,00	0	1,73	132	228	132
44	13	151	0,17	1,01	153	8,01	1,01	0,00	0	1,68	91	153	91
45	14	105	0,11	0,68	71	8,31	0,68	0,00	0	1,63	43	71	43
46	15	74	0,06	0,34	25	8,62	0,34	0,00	0	1,59	16	25	16
TOTALI					18150						11541	14350	8147
					SCOPon = 18150/11541= 1,57						SCOPnet = 14350/8147 = 1,76		

Tabella 7: SCOP altissima temperatura, condizioni Custom

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	1	1,44	9,10	9	0,00	0,00	9,10	9	0,94	9	0	9
22	-9	25	1,39	8,75	219	0,00	0,00	8,75	219	1,00	219	0	219
23	-8	23	1,33	8,40	193	0,00	0,00	8,40	193	1,05	193	0	193
24	-7	24	1,28	8,05	193	0,00	0,00	8,05	193	1,10	193	0	0
25	-6	27	1,22	7,70	208	0,00	0,00	7,70	208	1,17	208	0	0
26	-5	68	1,17	7,35	500	0,00	0,00	7,35	500	1,24	500	0	0
27	-4	91	1,11	7,00	637	0,00	0,00	7,00	637	1,31	637	0	0
28	-3	89	1,06	6,65	592	0,00	0,00	6,65	592	1,37	592	0	0
29	-2	165	1,00	6,30	1040	3,78	3,78	2,52	417	1,43	854	623	437
30	-1	173	0,94	5,95	1030	4,03	4,03	1,92	332	1,50	798	697	466
31	0	240	0,89	5,60	1344	4,28	4,28	1,32	316	1,57	971	1028	655
32	1	280	0,83	5,25	1470	4,54	4,54	0,71	199	1,64	974	1271	775
33	2	320	0,78	4,90	1568	4,79	4,79	0,11	35	1,71	930	1534	896
34	3	357	0,72	4,55	1625	5,05	4,55	0,00	0	1,78	911	1625	911
35	4	356	0,67	4,20	1495	5,30	4,20	0,00	0	1,86	806	1495	806
36	5	303	0,61	3,85	1167	5,56	3,85	0,00	0	1,93	606	1167	606
37	6	330	0,56	3,50	1155	5,81	3,50	0,00	0	2,00	578	1155	578
38	7	326	0,50	3,15	1027	6,06	3,15	0,00	0	1,80	571	1027	571
39	8	348	0,44	2,80	975	6,32	2,80	0,00	0	1,77	551	975	551
40	9	335	0,39	2,45	821	6,57	2,45	0,00	0	1,74	473	821	473
41	10	315	0,33	2,10	662	6,83	2,10	0,00	0	1,70	388	662	388
42	11	215	0,28	1,75	376	7,08	1,75	0,00	0	1,67	225	376	225
43	12	169	0,22	1,40	237	7,33	1,40	0,00	0	1,64	144	237	144
44	13	151	0,17	1,05	159	7,59	1,05	0,00	0	1,61	98	159	98
45	14	105	0,11	0,70	74	7,84	0,70	0,00	0	1,58	47	74	47
46	15	74	0,06	0,35	26	8,10	0,35	0,00	0	1,55	17	26	17
TOTALI					18801						12493	14951	9065
					SCOPon = 18801/12493 = 1,50						SCOPnet = 14951/9065 = 1,65		

Tabella 8: SCOP bassa temperatura, condizioni Warmer

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	0	1,86	19,68	0	0,00	0,00	19,68	0	0,90	0	0	0
22	-9	0	1,79	18,92	0	0,00	0,00	18,92	0	1,00	0	0	0
23	-8	0	1,71	18,16	0	0,00	0,00	18,16	0	1,11	0	0	0
24	-7	0	1,64	17,41	0	0,00	0,00	17,41	0	1,21	0	0	0
25	-6	0	1,57	16,65	0	0,00	0,00	16,65	0	1,31	0	0	0
26	-5	0	1,50	15,89	0	0,00	0,00	15,89	0	1,42	0	0	0
27	-4	0	1,43	15,14	0	0,00	0,00	15,14	0	1,52	0	0	0
28	-3	0	1,36	14,38	0	0,00	0,00	14,38	0	1,62	0	0	0
29	-2	0	1,29	13,62	0	0,00	0,00	13,62	0	1,72	0	0	0
30	-1	0	1,21	12,86	0	0,00	0,00	12,86	0	1,82	0	0	0
31	0	0	1,14	12,11	0	0,00	0,00	12,11	0	1,93	0	0	0
32	1	0	1,07	11,35	0	0,00	0,00	11,35	0	2,03	0	0	0
33	2	3	1,00	10,59	32	5,33	5,33	5,26	16	2,14	23	16	7
34	3	22	0,93	9,84	216	5,63	5,63	4,21	93	2,23	148	124	56
35	4	63	0,86	9,08	572	5,93	5,93	3,15	198	2,33	359	374	160
36	5	63	0,79	8,32	524	6,23	6,23	2,09	132	2,43	293	392	161
37	6	175	0,71	7,57	1324	6,53	6,53	1,04	182	2,53	633	1142	451
38	7	162	0,64	6,81	1103	6,83	6,81	0,00	0	2,64	419	1103	419
39	8	259	0,57	6,05	1568	7,13	6,05	0,00	0	2,65	593	1568	593
40	9	360	0,50	5,30	1907	7,42	5,30	0,00	0	2,65	718	1907	718
41	10	428	0,43	4,54	1943	7,72	4,54	0,00	0	2,66	730	1943	730
42	11	430	0,36	3,78	1627	8,02	3,78	0,00	0	2,67	609	1627	609
43	12	503	0,29	3,03	1523	8,32	3,03	0,00	0	2,68	568	1523	568
44	13	444	0,21	2,27	1008	8,62	2,27	0,00	0	2,69	375	1008	375
45	14	384	0,14	1,51	581	8,92	1,51	0,00	0	2,70	215	581	215
46	15	294	0,07	0,76	222	9,22	0,76	0,00	0	2,71	82	222	82
TOTALI					14152						5764	13532	5143
					SCOPon = 14152/5764 = 2,455						SCOPnet = 13532/5143 = 2,63		

Tabella 9: SCOP media temperatura, condizioni Warmer

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	0	1,86	18,29	0	0,00	0,00	18,29	0	0,94	0	0	0
22	-9	0	1,79	17,59	0	0,00	0,00	17,59	0	1,02	0	0	0
23	-8	0	1,71	16,88	0	0,00	0,00	16,88	0	1,10	0	0	0
24	-7	0	1,64	16,18	0	0,00	0,00	16,18	0	1,47	0	0	0
25	-6	0	1,57	15,48	0	0,00	0,00	15,48	0	1,52	0	0	0
26	-5	0	1,50	14,77	0	0,00	0,00	14,77	0	1,57	0	0	0
27	-4	0	1,43	14,07	0	0,00	0,00	14,07	0	1,62	0	0	0
28	-3	0	1,36	13,37	0	0,00	0,00	13,37	0	1,67	0	0	0
29	-2	0	1,29	12,66	0	0,00	0,00	12,66	0	1,72	0	0	0
30	-1	0	1,21	11,96	0	0,00	0,00	11,96	0	1,77	0	0	0
31	0	0	1,14	11,26	0	0,00	0,00	11,26	0	1,82	0	0	0
32	1	0	1,07	10,55	0	0,00	0,00	10,55	0	1,87	0	0	0
33	2	3	1,00	9,85	30	4,69	4,69	5,16	15	1,92	23	14	7
34	3	22	0,93	9,15	201	5,01	5,01	4,14	91	2,06	144	110	53
35	4	63	0,86	8,44	532	5,32	5,32	3,12	196	2,13	354	335	157
36	5	63	0,79	7,74	488	5,64	5,64	2,10	132	2,20	294	355	162
37	6	175	0,71	7,03	1231	5,96	5,96	1,07	188	2,27	648	1043	460
38	7	162	0,64	6,33	1026	6,28	6,28	0,05	8	2,34	444	1017	435
39	8	259	0,57	5,63	1458	6,60	5,63	0,00	0	2,33	625	1458	625
40	9	360	0,50	4,92	1773	6,92	4,92	0,00	0	2,33	761	1773	761
41	10	428	0,43	4,22	1807	7,23	4,22	0,00	0	2,32	777	1807	777
42	11	430	0,36	3,52	1512	7,55	3,52	0,00	0	2,32	652	1512	652
43	12	503	0,29	2,81	1415	7,87	2,81	0,00	0	2,32	611	1415	611
44	13	444	0,21	2,11	937	8,19	2,11	0,00	0	2,31	405	937	405
45	14	384	0,14	1,41	540	8,51	1,41	0,00	0	2,31	234	540	234
46	15	294	0,07	0,70	207	8,83	0,70	0,00	0	2,30	90	207	90
TOTALI					13156						6061	12524	5430
					SCOPon = 13156/6061 = 2,171						SCOPnet = 12524/5430 = 2,31		

Tabella 10: SCOP alta temperatura, condizioni Warmer

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	0	1,86	17,66	0	0,00	0,00	17,66	0	0,94	0	0	0
22	-9	0	1,79	16,98	0	0,00	0,00	16,98	0	1,02	0	0	0
23	-8	0	1,71	16,30	0	0,00	0,00	16,30	0	1,09	0	0	0
24	-7	0	1,64	15,62	0	0,00	0,00	15,62	0	1,16	0	0	0
25	-6	0	1,57	14,94	0	0,00	0,00	14,94	0	1,23	0	0	0
26	-5	0	1,50	14,26	0	0,00	0,00	14,26	0	1,31	0	0	0
27	-4	0	1,43	13,58	0	0,00	0,00	13,58	0	1,38	0	0	0
28	-3	0	1,36	12,90	0	0,00	0,00	12,90	0	1,45	0	0	0
29	-2	0	1,29	12,22	0	0,00	0,00	12,22	0	1,52	0	0	0
30	-1	0	1,21	11,54	0	0,00	0,00	11,54	0	1,60	0	0	0
31	0	0	1,14	10,86	0	0,00	0,00	10,86	0	1,67	0	0	0
32	1	0	1,07	10,19	0	0,00	0,00	10,19	0	1,74	0	0	0
33	2	3	1,00	9,51	29	4,65	4,65	4,85	15	1,81	22	14	8
34	3	22	0,93	8,83	194	4,96	4,96	3,87	85	1,88	143	109	58
35	4	63	0,86	8,15	513	5,26	5,26	2,89	182	1,96	351	332	169
36	5	63	0,79	7,47	471	5,57	5,57	1,90	120	2,03	293	351	173
37	6	175	0,71	6,79	1188	5,87	5,87	0,92	161	2,10	650	1028	489
38	7	162	0,64	6,11	990	6,18	6,11	0,00	0	2,16	459	990	459
39	8	259	0,57	5,43	1407	6,48	5,43	0,00	0	2,15	653	1407	653
40	9	360	0,50	4,75	1711	6,79	4,75	0,00	0	2,15	795	1711	795
41	10	428	0,43	4,07	1744	7,09	4,07	0,00	0	2,15	811	1744	811
42	11	430	0,36	3,40	1460	7,40	3,40	0,00	0	2,15	680	1460	680
43	12	503	0,29	2,72	1366	7,70	2,72	0,00	0	2,15	637	1366	637
44	13	444	0,21	2,04	904	8,01	2,04	0,00	0	2,14	422	904	422
45	14	384	0,14	1,36	522	8,31	1,36	0,00	0	2,14	244	522	244
46	15	294	0,07	0,68	200	8,62	0,68	0,00	0	2,14	93	200	93
TOTALI					12699						6253	12137	5691
					SCOPon = 12699/6253 = 2,03						SCOPnet = 12137/5691 = 2,13		

Tabella 11: SCOP altissima temperatura, condizioni Warmer

Bin	Outdoor temperature (dry bulb)	Hours	Part Load Ratio	Part Load	Annual Heating Demand	Heat Pump Capacity	Heat Load covered by HP	Electric back up heater	Annual Energy Input from Backup heater	COP_{PL}	Annual Energy Input including electric backup heater	Net Annual heating capacity	Net Annual power input
j	T_j	h_j		$Ph_{(Tj)}$	h_j x $Ph_{(Tj)}$			$elbu_{(Tj)}$	h_j x $elbu_{(Tj)}$		h_j x [$Ph_{(Tj)}$ - $elbu_{(Tj)}$ / $COP_{PL(Tj)}$ + $elbu_{(Tj)}$]	hj x {Ph(Tj) - elbu(Tj)}	hj x Ph(Tj) - elbu(Tj) / COPPL(Tj)
	°C	h		kW	kWh	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	kWh
21	-10	0	1,86	17,01	0	0,00	0,00	17,01	0	0,94	0	0	0
22	-9	0	1,79	16,36	0	0,00	0,00	16,36	0	1,00	0	0	0
23	-8	0	1,71	15,70	0	0,00	0,00	15,70	0	1,05	0	0	0
24	-7	0	1,64	15,05	0	0,00	0,00	15,05	0	1,10	0	0	0
25	-6	0	1,57	14,40	0	0,00	0,00	14,40	0	1,17	0	0	0
26	-5	0	1,50	13,74	0	0,00	0,00	13,74	0	1,23	0	0	0
27	-4	0	1,43	13,09	0	0,00	0,00	13,09	0	1,30	0	0	0
28	-3	0	1,36	12,43	0	0,00	0,00	12,43	0	1,36	0	0	0
29	-2	0	1,29	11,78	0	0,00	0,00	11,78	0	1,43	0	0	0
30	-1	0	1,21	11,12	0	0,00	0,00	11,12	0	1,50	0	0	0
31	0	0	1,14	10,47	0	0,00	0,00	10,47	0	1,57	0	0	0
32	1	0	1,07	9,82	0	0,00	0,00	9,82	0	1,64	0	0	0
33	2	3	1,00	9,16	27	4,79	4,79	4,37	13	1,71	22	14	8
34	3	22	0,93	8,51	187	5,05	5,05	3,46	76	1,78	138	111	62
35	4	63	0,86	7,85	495	5,30	5,30	2,55	161	1,86	341	334	180
36	5	63	0,79	7,20	453	5,56	5,56	1,64	103	1,93	285	350	182
37	6	175	0,71	6,54	1145	5,81	5,81	0,73	129	2,00	637	1017	509
38	7	162	0,64	5,89	954	6,06	5,89	0,00	0	1,96	488	954	488
39	8	259	0,57	5,23	1356	6,32	5,23	0,00	0	1,96	692	1356	692
40	9	360	0,50	4,58	1649	6,57	4,58	0,00	0	1,97	839	1649	839
41	10	428	0,43	3,93	1680	6,83	3,93	0,00	0	1,97	852	1680	852
42	11	430	0,36	3,27	1407	7,08	3,27	0,00	0	1,98	712	1407	712
43	12	503	0,29	2,62	1317	7,33	2,62	0,00	0	1,98	664	1317	664
44	13	444	0,21	1,96	872	7,59	1,96	0,00	0	1,99	438	872	438
45	14	384	0,14	1,31	503	7,84	1,31	0,00	0	1,99	252	503	252
46	15	294	0,07	0,65	192	8,10	0,65	0,00	0	2,00	96	192	96
TOTALI					12237						6455	11755	5973
					SCOPon = 12237/6455 = 1,90						SCOPnet = 11755/5973 = 1,97		

Per il completamento della caratterizzazione sono stati poi condotti quattro test in raffrescamento, i cui risultati sono riepilogati in Tabella 12:

Tabella 12: Dati principali test in raffrescamento

test	Tambiente	Twater in	Twater out	Portata	Potenza frigo	Potenza el.	EER
	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/h]	[kW]	[kW]	[-]
1	34,84	11,96	6,92	1035,7	6.07	2,93	2,07
2	34,93	23,07	17,94	1524,9	9,1	3,32	2,74
3	26,92	12,28	6,74	1039,3	6,7	2,74	2,44
4	26,94	25,46	18,12	1024,3	8,75	2,99	2,92

Anche gli EER ottenuti sono stati inferiori agli attesi. Il motivo va ricercato anche in questo caso in possibili funzionamenti non ottimali del sistema di controllo della valvola di laminazione e nell'elevato assorbimento elettrico del ventilatore.

7.3 Realizzazione impianto per test statici e dinamici di PdC dual source

7.3.1 Configurazioni d'impianto

Per i test statici e dinamici di PdC dual-source è stato progettato un impianto di tipo HiL, che abbina a componenti reali una sezione che ha il compito di simulare l'utenza.
In Figura 12 si riporta il circuito completo, comprensivo dei controlli, dei sensori e attuatori.

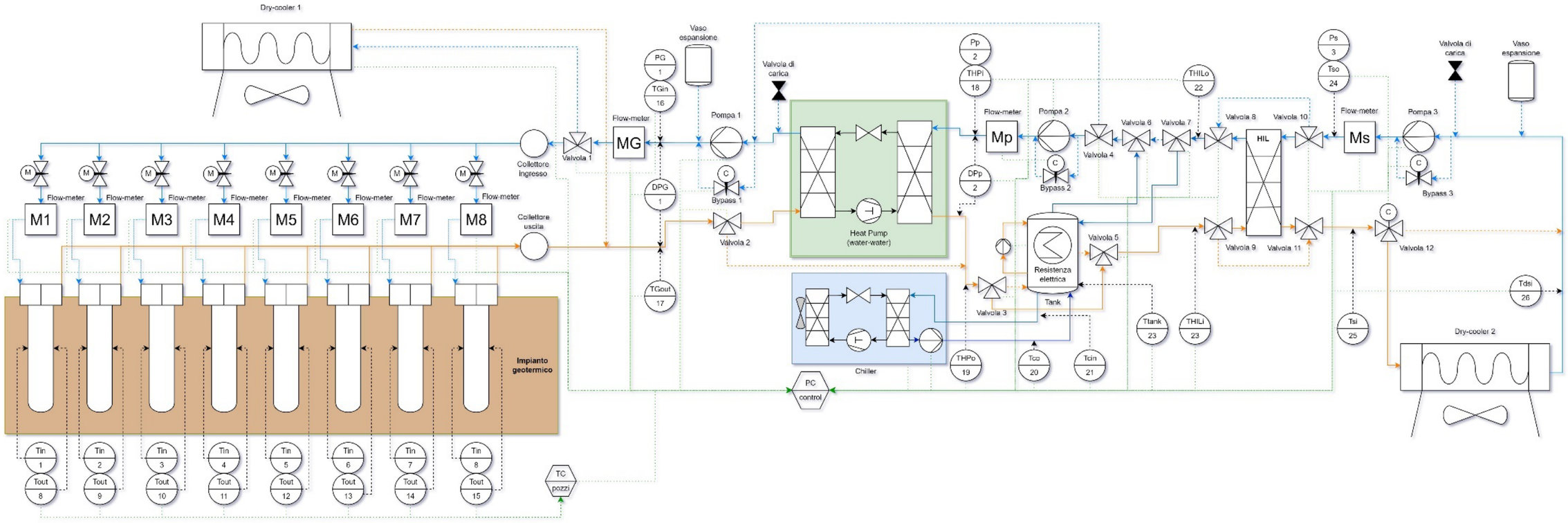


Figura 12: Schema del circuito di test HIL per impianto geotermia e test pompe di calore ad alta temperatura modalità riscaldamento

L'impianto può lavorare in 13 modalità differenti. Ad esempio, in Figura 13, si riporta la modalità di test con lo scambiatore HiL che divide la sezione di generazione termica dall'utilizzatore, simulato da un dry-cooler con ventilatore a velocità variabile. Il serbatoio può essere impiegato come accumulo di un impianto reale o come stabilizzatore delle temperature di lavoro della PdC in test stazionari; in questo caso, il chiller e le resistenze elettriche contribuiscono a mantenere la temperatura del serbatoio al set-point.

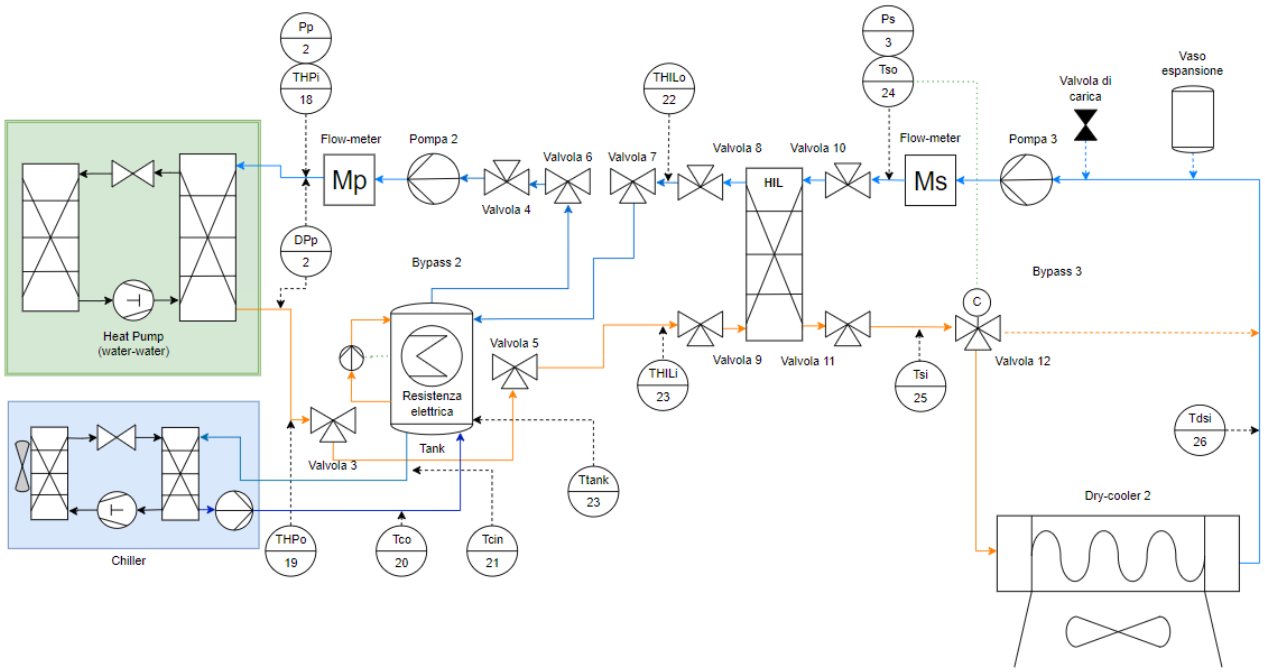


Figura 13: Configurazione in riscaldamento disaccoppiato

7.3.2 Sistema di acquisizione e controllo

Per monitorare e controllare il sistema è prevista l'installazione di strumentazione dedicata. La catena di misura e controllo è schematicamente riportata in Tabella 13.

Tabella 13: Attuatori, sensoristica e Catena di misura impianto HiL Geotermia

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
Chassis 1 - 8 Slot	Lettura PT100	0	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai0	Tin1	Sensore temperatura ingresso ramo 1	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	1	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai1	Tin2	Sensore temperatura ingresso ramo 2	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	2	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai2	Tin3	Sensore temperatura ingresso ramo 3	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	3	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai3	Tin4	Sensore temperatura ingresso ramo 4	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	4	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai4	Tin5	Sensore temperatura	°C	-200 +850	PT100	0-10mV

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
							ingresso ramo 5				
	Lettura PT100	5	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai5	Tin6	Sensore temperatura ingresso ramo 6	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	6	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai6	Tin7	Sensore temperatura ingresso ramo 7	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	7	NI-9216	cDAQ1 Mod1	ai7	Tin8	Sensore temperatura ingresso ramo 8	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	8	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai0	Tout1	Sensore temperatura uscita ramo 1	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	9	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai1	Tout2	Sensore temperatura uscita ramo 2	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	10	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai2	Tout3	Sensore temperatura uscita ramo 3	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	11	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai3	Tout4	Sensore temperatura uscita ramo 4	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	12	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai4	Tout5	Sensore temperatura uscita ramo 5	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	13	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai5	Tout6	Sensore temperatura uscita ramo 6	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	14	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai6	Tout7	Sensore temperatura uscita ramo 7	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	15	NI-9216	cDAQ1 Mod2	ai7	Tout8	Sensore temperatura uscita ramo 8	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	16	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai0	Tco	Temperatura uscita chiller	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	17	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai1	Tacc_o	Temp uscita accumulo	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	18	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai2	TGout	Temp uscita collettore rit	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	19	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai3	Tcin	Temp ingresso chiller	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	20	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai4	Ttank	Temp accumulo	°C	-200 +850	PT100	0-10mV
	Lettura PT100	21	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai5						0-10mV

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
	Lettura PT100	22	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai6						0-10mV
	Lettura PT100	23	NI-9216	cDAQ1 Mod3	ai7						0-10mV
	NON usata		NI-9265	cDAQ1 Mod4	ao0						4-20mA
	NON usata		NI-9265	cDAQ1 Mod4	ao1						4-20mA
	NON usata		NI-9265	cDAQ1 Mod4	ao2						4-20mA
	NON usata		NI-9265	cDAQ1 Mod4	ao3						4-20mA
	Relays	0	NI-9485	cDAQ1 Mod5	0	CHok	Consenso chiller	ON-OFF	0-1	Consenso	0V-10V
	Relays	1	NI-9485	cDAQ1 Mod5	1	CHon	Accensione chiller	ON-OFF	0-1	Chiller	0V-10V
	Relays	2	NI-9485	cDAQ1 Mod5	2	PCHon	Accensione circolatore chiller	ON-OFF	0-1	Chiller	0V-10V
	Relays	3	NI-9485	cDAQ1 Mod5	3	R1on	Accensione resistenza 1	ON-OFF	0-1	Resistenza 1	0V-10V
	Relays	4	NI-9485	cDAQ1 Mod5	4	R2on	Accensione resistenza 2	ON-OFF	0-1	Resistenza 2	0V-10V
	Relays	5	NI-9485	cDAQ1 Mod5	5	R3on	Accensione resistenza3	ON-OFF	0-1	Resistenza 3	0V-10V
	Relays	6	NI-9485	cDAQ1 Mod5	6	DCgeo	Accensione Dry-cooler lato sonde geotermiche	ON-OFF	0-1	Dry-Cooler	0V-10V
	Relays	7	NI-9485	cDAQ1 Mod5	7	DChil	Accensione Dry-cooler lato secondario	ON-OFF	0-1	Dry-Cooler	0V-10V
	Relays	8	NI-9485	cDAQ1 Mod6	8	P1on	Accensione pompa 1a geotermia	ON-OFF	0-1	Pompa	0V-10V
	Relays	9	NI-9485	cDAQ1 Mod6	9	P1bison	Accensione pompa 1b geotermia	ON-OFF	0-1	Pompa	0V-10V
	Relays	10	NI-9485	cDAQ1 Mod6	10	P2on	Accensione pompa 2 HIL primario	ON-OFF	0-1	Pompa	0V-10V
	Relays	11	NI-9485	cDAQ1 Mod6	11	P3on	Accensione pompa 3 HIL secondario	ON-OFF	0-1	Pompa	0V-10V
	Relays	12	NI-9485	cDAQ1 Mod6	12	CCon	Accensione circolatore tank	ON-OFF	0-1	Pompa	0V-10V
	Relays	13	NI-9485	cDAQ1 Mod6	13	Hpon	Accensione HP	ON-OFF	0-1	HP	0V-10V

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
	Relays	14		cDAQ1 Mod6	14		non usato				
	Relays	15		cDAQ1 Mod6	15		non usato				
	Portate-pressioni-Potenze	13	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai0	PG	Pressione lato sonde geotermiche	bar	0-6	Membrana	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	14	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai1	Pp	Pressione primario HIL	bar	0-6	Membrana	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	15	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai2	Ps	Pressione secondario HIL	bar	0-6	Membrana	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	16	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai3	DPG	Delta di pressione lato sonde geotermiche	mbar	0-1000	Membrana	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	17	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai4	DPp	Delta di pressione lato HIL	mbar	0-1000	Membrana	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	18	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai5	PwHP+PwCH	Potenza pompa di Calore+Dry-Cooler sorgente	kW	0-6	Hall	4-20 mA
	Portate-pressioni-Potenze	19	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai6	PwP	Potenza pompe di circolazione	kW	0-1	Hall	4-20 mA
	Portate-pressioni-Potenze	20	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai7	PwR	Potenza Resistenze	kW	0-6	Hall	4-20 mA
	Portate-pressioni-Potenze	21	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai8		non usato				4-20 mA
	Portate-pressioni-Potenze	22	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai9		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	23	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai10		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	24	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai11		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	25	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai12		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	26	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai13		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	27	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai14		non usato				4-20mA

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
	Portate-pressioni-Potenze	28	NI-9208	cDAQ1 Mod7	ai15		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze		NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai0		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze		NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai1		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze		NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai2		non usato				4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	0	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai3	M1	Portata ramo 1	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	1	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai4	M2	Portata ramo 2	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	2	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai5	M3	Portata ramo 3	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	3	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai6	M4	Portata ramo 4	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	4	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai7	M5	Portata ramo 5	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	5	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai8	M6	Portata ramo 6	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	6	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai9	M7	Portata ramo 7	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	7	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai10	M8	Portata ramo 8	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	8	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai11	MG	Portata complessiva impianto geotermico	kg/h	10000	Coriolis	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	9	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai12	P_collM	Pressione collettore mandata	bar	0-16		4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	10	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai13	P_collR	Pressione collettore ritorno	bar	0-16		4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	11	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai14	Mp	Portata primario HIL	kg/h	10000	Magnetico	4-20mA
	Portate-pressioni-Potenze	12	NI-9208	cDAQ1 Mod8	ai15	Ms	Portata secondario HIL	kg/h	10000	Magnetico	4-20mA

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
Chassis 2 - 4 Slot	NON usata		NI-9265	cDAQ2 Mod1	ao0						4-20 mA
	NON usata		NI-9265	cDAQ2 Mod1	ao1						4-20 mA
	NON usata		NI-9265	cDAQ2 Mod1	ao2						4-20 mA
	NON usata		NI-9265	cDAQ 2Mod1	ao3						4-20 mA
	Termo coppie	0	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai0	TGin	Ingresso Impianto Geotermico	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	1	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai1	TGout	Uscita Impianto Geotermico	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	2	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai2	THPi	Ingresso pompa di calore	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	3	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai3	THPo	Uscita pompa di calore	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	4	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai4	TCi	Ingresso Chiller	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	5	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai5	TCo	Uscita Chiller	°C	-20 +100	TC J	0-10 mV
	Termo coppie	6	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai6	THiLi	Ingresso primario HIL	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	7	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai7	THiLo	Uscita primario HIL	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	8	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai8	Tso	Ingresso secondario HIL	°C	-20 +100	TC J	0-10 mV
	Termo coppie	9	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai9	Tsi	Uscita secondario HIL	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	10	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai10	Tdsi	Uscita temperatura dry-cooler secondario	°C	-20 +100	TC J	0-10 mV
	Termo coppie	11	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai11	Ttank	Temperatura interna al serbatoio di accumulo	°C	0 150	TC K	0-10 mV
	Termo coppie	12	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai12		non usato				0-10 mV
	Termo coppie	13	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai13		non usato				0-10 mV
	Termo coppie	14	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai14		non usato				0-10 mV
	Termo coppie	15	NI-9213	cDAQ2 Mod2	ai15		non usato				0-10 mV
	Selez. Config.	0	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao0	Valvola 1	Ingresso Drycooler sorgente pdC	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V

	Task	Num acq.	Dev Type	Id. Dev.	Ch.	Nome	Grandezza	Unità misura	Range misura	Tipo Sensore	Range Segnale
	Selez. Config.	1	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao1	Valvola 2	Intercettazione HP uscita sorgente	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	2	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao2	Valvola 3	Intercettazione Tank uscita HP	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	3	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao3	Valvola 4	Intercettazione HP ingresso sorgente	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	4	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao4	Valvola 5	Intercettazione Tank ingresso HIL	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	5	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao5	Valvola 6	Intercettazione tank ingresso HP	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	6	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao6	Valvola 7	Intercettazione tank uscita HP	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	7	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao7	Valvola 8	Intercettazione scambiatore HIL	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	8	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao8	Valvola 9	Intercettazione scambiatore HIL	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	9	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao9	Valvola 10	Intercettazione scambiatore HIL	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	10	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao10	Valvola 11	Intercettazione scambiatore HIL	Out 1-2	0-1	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	11	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao11	Valvola 12	Bypass Dry-cooler utenza	Out 1-2	0-10	valvola tre vie	0-10 V
	Selez. Config.	12	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao12	PG1	Regolazione pompa geotermia	kg/h	0-2	Pompa	0-10 V
	Selez. Config.	13	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao13	PHIL1	Regolazione pompa HIL primario	kg/h	0-2	Pompa	0-10 V
	Selez. Config.	14	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao14	PHIL2	Regolazione pompa HIL secondario	kg/h	0-2	Pompa	0-10 V
	Selez. Config.	15	NI-9264	cDAQ2 Mod3	ao15	Fan HIL	Regolazione ventola Dry-cooler HIL	rpm	0-3600	Ventola	0-10 V
	-	0	NI-9208	cDAQ2 Mod4	ao0		non usato				4-20mA

7.3.3 Dimensionamento e simulazione delle condizioni di prova del sistema HiL

Per il dimensionamento del sistema HiL è stato realizzato un software in Python 3.11 utilizzando alcune librerie open-source gratuite. Note le caratteristiche dei principali componenti (PdC, da dati di catalogo, Dry-cooler, pompe di circolazione, scambiatore separatore HiL. ecc.) è stato possibile valutare se e con quali limitazioni fosse possibile operare correttamente l'impianto con i range di temperature e potenze termiche da scambiare. A titolo di esempio, si riportano alcune mappe di funzionamento, che partendo dalla portata nominale al primario, riportano la massima potenza termica smaltibile dal circuito HiL al variare della temperatura ambiente e della portata sul secondario.

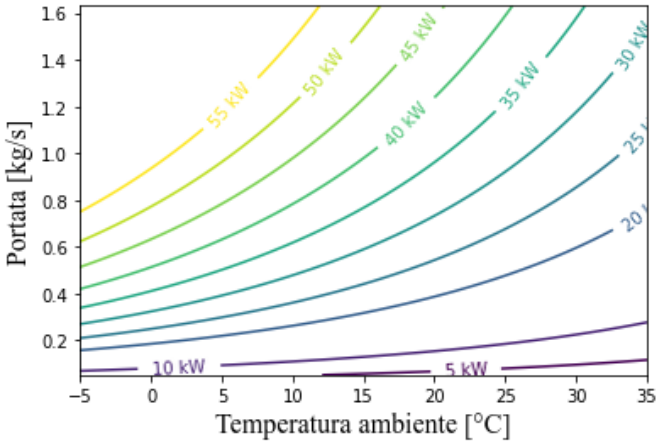


Figura 14: Potenza smaltita [kW] in riscaldamento a T ambiente vs portata, produzione 80 °C, primario 0,58 kg/s

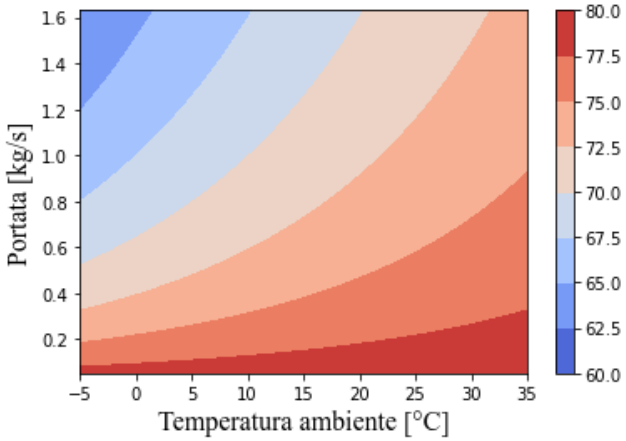


Figura 15: Temperatura ingresso macchina [°C] in riscaldamento a T ambiente vs portata, produzione 80 °C, primario 0,58 kg/s

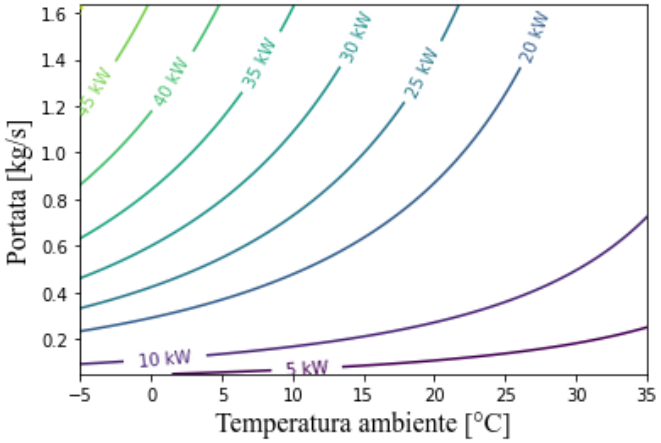


Figura 16: Potenza smaltita [kW] in riscaldamento a T ambiente vs portata, produzione 60 °C, primario 0,28 kg/s

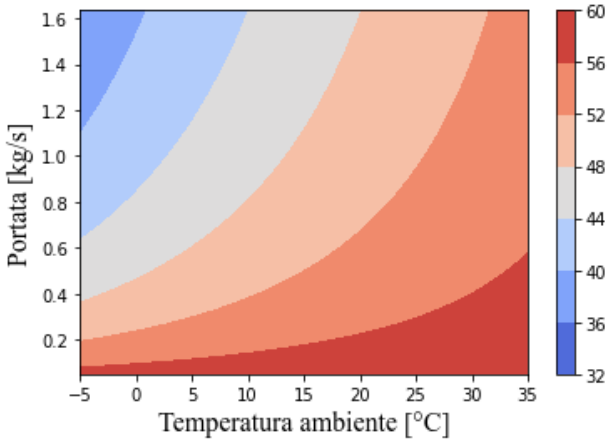


Figura 17: Temperatura ingresso macchina [°C] in riscaldamento a T ambiente vs portata, produzione 60 °C, primario 0,28 kg/s

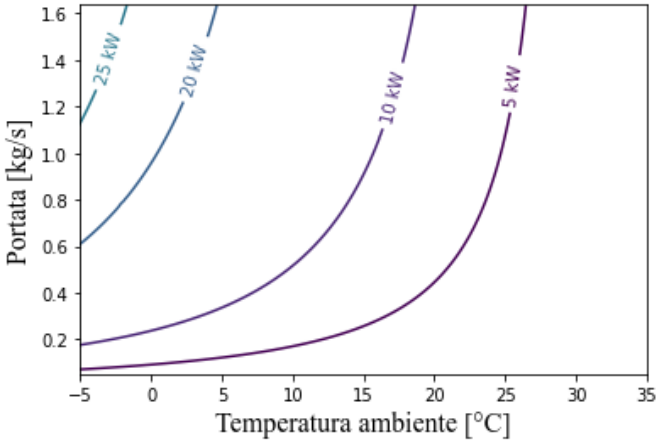


Figura 18: Potenza smaltita [kW] in riscaldamento a T ambiente vs portata, produzione 35 °C, primario 0,23 kg/s

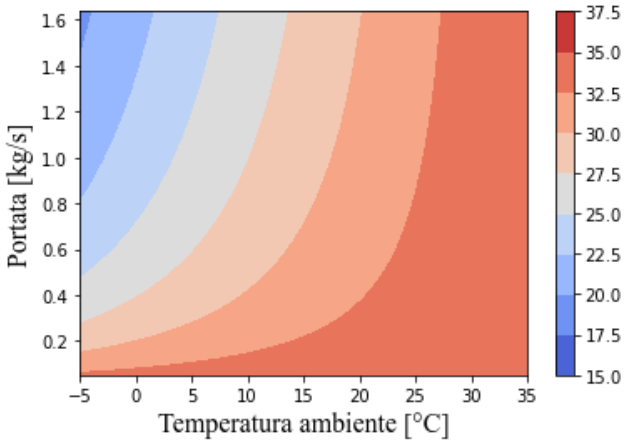


Figura 19: Temperatura ingresso macchina [°C] in riscaldamento a T ambiente vs portata, produzione 35 °C, primario 0,23 kg/s

Dalle simulazioni è possibile osservare a quali potenze possa operare il sistema; ad esempio, con temperature di produzione a 35 °C non è possibile operare la PdC a condizioni di portata nominali con temperature dell'aria superiori ai 17 °C in quanto la potenza dissipabile nell'ambiente non sarebbe sufficiente.

7.3.4 Realizzazione impianto HiL per PdC dual-source ad alta temperatura

Nel corso della prima fase del progetto sono stati assemblati i componenti d'impianto selezionati. Deve essere installato soltanto il dry-cooler del circuito secondario, per un ritardo nella sua fornitura.
Di seguito, si mostrano alcune immagini dell'impianto in fase di costruzione:

Figura 20: PdC dual source installata esternamente alla sala controllo

Figura 21: Rami di collegamento PdC alle sorgenti termiche, pompe di circolazione e strumenti di misura

Figura 22: Serbatoio di accumulo con resistenze, pompa circolazione primario e scambiatore separatore circuito primario e circuito secondario

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Per l'esecuzione delle attività di ricerca previste nella suddetta L.A. e per l'ottenimento dei risultati non è stata prevista alcuna consulenza esterna.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

[1] A.C. Violante, F. Donato, G. Guidi, M. Proposito, Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump. Renew. Energy, 188 (2022), pp. 1029-1037, 10.1016/j.renene.2022.02.075.

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione a cui ha partecipato personale ENEA:

[1]“EARTH TECH EXPO - TAVOLA ROTONDA LA GEOTERMIA IN ITALIA E CONVEGNO "GEOTERMIA E IDROGENO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA", Relatori: Anna Carmela Violante e Raniero Trinchieri, Firenze, 06/10/2022

[2] Workshop”INNOVAZIONE E SOSTENIBILITÀ PER LA GEOTERMIA DEL FUTURO, Pisa, 03/03/2023