



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione di prototipi di pompa di calore operanti con refrigeranti a basso GWP

A.Mariani, F. D'Annibale, L. Gugliermetti, A. Lattanzi, C. Menale,
M. Morlacca, M. Pieve, L. Simonetti, R. Trinchieri

REALIZZAZIONE DI PROTOTIPI DI POMPA DI CALORE OPERANTI CON REFRIGERANTI A BASSO GWP

A.Mariani, F. D'Annibale, L. Gugliermetti, A. Lattanzi, C. Menale, M. Morlacca, M. Pieve, L. Simonetti, R. Trinchieri (ENEA)

Luglio 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - 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: Attività su refrigeranti a basso GWP: Realizzazione prototipo di PdC di comparazione

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 DESCRIZIONE IMPIANTO CALORIMETRO ENEA E MODIFICHE APPORTATE.....	6
2.2 AGGIORNAMENTO DELLE POMPE DI CALORE PER OSPITARE REFRIGERANTI A BASSO GWP E COLLAUDO.....	15
2.2.1 <i>Strumentazione di misura</i>	21
2.2.2 <i>Strumentazione di sicurezza per i test</i>].....	27
3 CONCLUSIONI.....	28
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	29
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	30

Sommario

La presente attività di ricerca prosegue l'attività di progettazione di una pompa di calore da impiegare in ambito residenziale precedentemente svolta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova nell'ambito della LA 3.3 di questo WP [1].

L'obiettivo dell'attività attuale è la realizzazione e installazione di componentistica idraulica, elettrica e strumentazione di misura sui prototipi di PdC in modo da rendere possibile il test con refrigeranti a basso GWP.

L'attività riportata in questo report è stata realizzata nelle seguenti fasi:

- Progettazione degli impianti sperimentali a pompa di calore e basso GWP con R1234ze, R410A, R452B e R454B divisi in due macchine indipendenti, una utilizzabile con R410A, R452B, R454B e una con R1234ze a partire dai vecchi prototipi a R290 ed R134a;
- Modifica impianto "Calorimetro ENEA" per installazione pompe di calore;
- Installazione delle pompe di calore all'interno dell'impianto "Calorimetro ENEA";
- Sviluppo/aggiornamento software di acquisizione e controllo;
- Carica e collaudo.

Per la progettazione, al fine di ridurre i costi di sviluppo e ottimizzare le tempistiche di sviluppo, si è scelto di riadattare due pompe di calore aria-acqua per edifici unifamiliari (potenza nominale in riscaldamento 4 kW). Le macchine operavano con fluido R134a (Prototipo #1) e con propano (Prototipo #2), è stato quindi necessario modificare gli impianti a seguito delle analisi svolte dal partner UNIPD. all'interno dell'attività di simulazione "Progettazione e modellazione di due prototipi di pompa di calore invertibile operanti con refrigeranti a basso GWP" [1]. A partire da questi due prototipi, si è proceduto alla riprogettazione delle due macchine in modo da ottenere due pompe di calore in grado di operare con i fluidi selezionati: R1234ze, R410A, R452B e R454B. I cambiamenti effettuati riguardano principalmente il compressore, il software di controllo, le sicurezze e gli ausiliari connessi al compressore.

1 Introduzione

Il GWP (Global Warming Potential) è il parametro di riferimento per il calcolo dell'impatto ambientale dei fluidi evolvibili rilasciati in atmosfera. Esso viene calcolato considerando il potenziale contributo all'effetto serra delle molecole di ogni specie gassosa presente in un'emissione in atmosfera e rilasciato dal produttore del refrigerante [2]. Come riferimento l'anidride carbonica ha un GWP di 1 e il metano di 25 per un orizzonte temporale di 100 anni (GWP_{100}). Altri riferimenti per il GWP sono lifetime, 20 anni e 500 anni [3, 4, 5]. Se la vita del refrigerante supera il tempo considerato nel GWP vengono considerati anche gli effetti a catena (climate-carbon feedback). All'interno dell'attività sono state sviluppate due macchine sperimentali a pompa di calore in grado di lavorare con refrigeranti a basso GWP. Come fluidi sono stati selezionati:

- R1234ze con $GWP_{100} < 1$ installato sul Prototipo #1;
- R410A con $GWP_{100} = 1923$, R452B con $GWP_{100} = 676$ e R454B con $GWP_{100} = 467$ sul Prototipo #2.

Le pompe di calore hanno come effetto utile la cessione del calore prelevato dal sistema a temperatura inferiore (aria nel caso studio) al sistema a temperatura superiore (acqua nel caso studio), il quale avviene tramite ciclo termodinamico a compressione. I principali componenti di una pompa di calore sono evidenziati in Figura 1 e sono: compressore, che incrementa la pressione e la temperatura del fluido refrigerante, un condensatore, nel quale viene ceduto calore all'acqua da riscaldare, un evaporatore, che preleva calore dall'aria dell'ambiente in cui è collocato e da un organo di espansione, che provvede a laminare il fluido refrigerante chiudendo il ciclo, inoltre è spesso presente un rigeneratore di calore al fine di incrementare il rendimento del ciclo prelevando calore dal ciclo stesso ridurre le condizioni di sottoraffreddato e surriscaldato e a valle dell'evaporatore e a monte della valvola di laminazione.

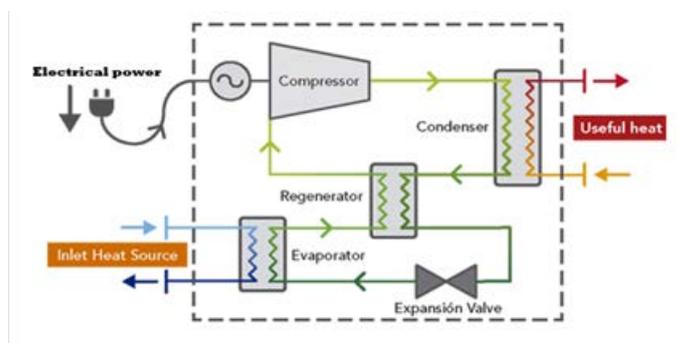


Figura 1: Schema Funzionale di una Pompa di Calore.

Al fine di caratterizzare i fluidi si intende procedere, nella terza annualità, all'esecuzione di test secondo le normative di riferimento per i test sulle pompe di calore, ossia la UNI EN 14511 [6] e la UNI EN 14825 [7].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

L'attività riportata in questo report è stata realizzata nelle seguenti fasi, che verranno dettagliate nei paragrafi successivi:

- Modifica impianto "Calorimetro ENEA" per installazione pompe di calore;
- Installazione delle pompe di calore all'interno dell'impianto "Calorimetro ENEA";
- Sviluppo/aggiornamento software di acquisizione e controllo;
- Carica e collaudo.

2.1 Descrizione impianto Calorimetro ENEA e modifiche apportate

Per il test delle pompe di calore di questo tipo si deve poter disporre di condizioni al contorno stabili. Deve cioè essere garantito un flusso d'acqua stabilizzato al condensatore a temperatura e portata fissata e stabile e si deve assicurare un flusso d'aria all'evaporatore anch'esso di portata e temperatura definita e stabile e avente una velocità entro i limiti posti dalle norme. Per questo motivo le macchine sono state installate all'interno dell'impianto "Calorimetro ENEA" visibile in Figura 2. L'impianto è stato specificamente realizzato per i test delle pompe di calore in condizioni transitorie e stazionarie.



Figura 2: Camera climatica.

Per l'ottenimento delle condizioni richieste sull'acqua, è stato modificato il circuito idronico asservito al calorimetro al fine di ospitare le macchine e per rendere disponibile un idoneo flusso d'acqua a temperatura controllata. Invece, per controllare la temperatura e l'umidità dell'aria all'evaporatore è stato utilizzato il circuito di climatizzazione interno al calorimetro senza effettuare modifiche.

La gestione simultanea della camera climatica, del loop idronico e della macchina in test ha richiesto la messa a punto di una logica di controllo avanzata, che ha consentito di automatizzare le fasi di preparazione dell'acqua e di coordinare l'accensione o lo spegnimento di ogni singolo componente.

La camera presenta le seguenti caratteristiche:

Tabella 1: Principali caratteristiche camera climatica.

Calorimetro ENEA	
Produttore	Angelantoni
Dimensioni Interne	4,70 m [L] x 5,50 m [P] x 4,60 m [H]
Superficie utile	26 m ²
Volume utile	120 m ³
Temperatura di esercizio	-15°C ÷ 35°C
Umidità Relativa	10% ÷ 95% (controllata da 10°C a 35°C)
Velocità aria	< 1 m/s (UNI EN_14511-3:2011 Appendice A -A.1.2)
Potenza elettrica massima assorbita	80 kW
Potenza frigorifera massima smaltibile	50 kW

Come visibile in Tabella 1, la camera climatica consente di testare pompe di calore aria/acqua con potenza termica fino a 50 kW. Essa è in grado di mantenere, al suo interno una temperatura dell'aria pari al valore di setpoint impostato, in modo stabile e in un range tra -15°C e +35°C. Risulta inoltre possibile controllare anche il livello di umidità relativa nel range 10-95% tra le temperature di 10-35°C. In Figura 3 è visibile l'impianto di condizionamento interno a soffitto della camera climatica.



Figura 3: Unità di condizionamento interna alla camera climatica.

Per quanto riguarda la velocità dell'aria si richiama il report "Test sperimentali in Calorimetro ENEA di due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R290 ed R134a" del 2013 [8] dove vengono evidenziate le specificità dell'impianto. Le misure dei parametri di temperatura e umidità avvengono invece tramite centralina strumentata dedicata installata internamente alla camera (Figura 4).



Figura 4: Centralina controllo temperatura e umidità dell'aria asservita all'impianto Calorimetro Enea.

Nello specifico, la camera è provvista di gruppo frigorifero (figura 3) della potenza nominale di 50 kW termici ed un gruppo di resistenze elettriche da 60 kW suddivise in 3 pacchi da 20 kW, uno dei quali a potenza modulabile.

La camera rispetta le prescrizioni riportate nel capitolo 5 della norma UNI-EN 14511 [6] parte terza, riguardante le variazioni ammesse nelle prove della capacità di riscaldamento quando si usa il procedimento di prova in condizioni transitorie.

Il controllo dell'umidità avviene tramite l'evaporatore di detto gruppo frigorifero e tramite un generatore di vapore (Figura 6).



Figura 5: Sistema frigorifero Calorimetro Enea.



Figura 6: Generatore di vapore e addolcitore d'acqua.

L'intero sistema della camera climatica è controllato da un sistema PLC integrato, creato e programmato dal produttore che gestisce l'impianto in modo semi-automatico, necessitando esclusivamente dei setpoint di temperatura (acqua/aria), portata e del grado di umidità da mantenere. I parametri possono essere impostati tramite pannello della macchina o tramite interfaccia PC mediante il software Winkratos. Le PdC dovranno lavorare in abbinamento al circuito idronico modificato per eseguire i test anche in modalità HiL. In Figura 7 è visibile il diagramma operativo di funzionamento del circuito idronico modificato con la strumentazione si misura installata. In rosso sono riportate le linee d'acqua calda e in blu le linee d'acqua fredda. Il sistema è dotato di chiller e dry cooler per gestire i carichi di riscaldamento invernali anche durante il periodo estivo, inoltre, tramite lo stesso sistema è possibile gestire anche i carichi di raffrescamento estivi tramite dry cooler e, tramite il riscaldatore anche quelli durante il periodo invernale. Questo permette la massima flessibilità di utilizzo del sistema che è in grado di operare durante tutto l'anno indipendentemente dalle condizioni esterne.

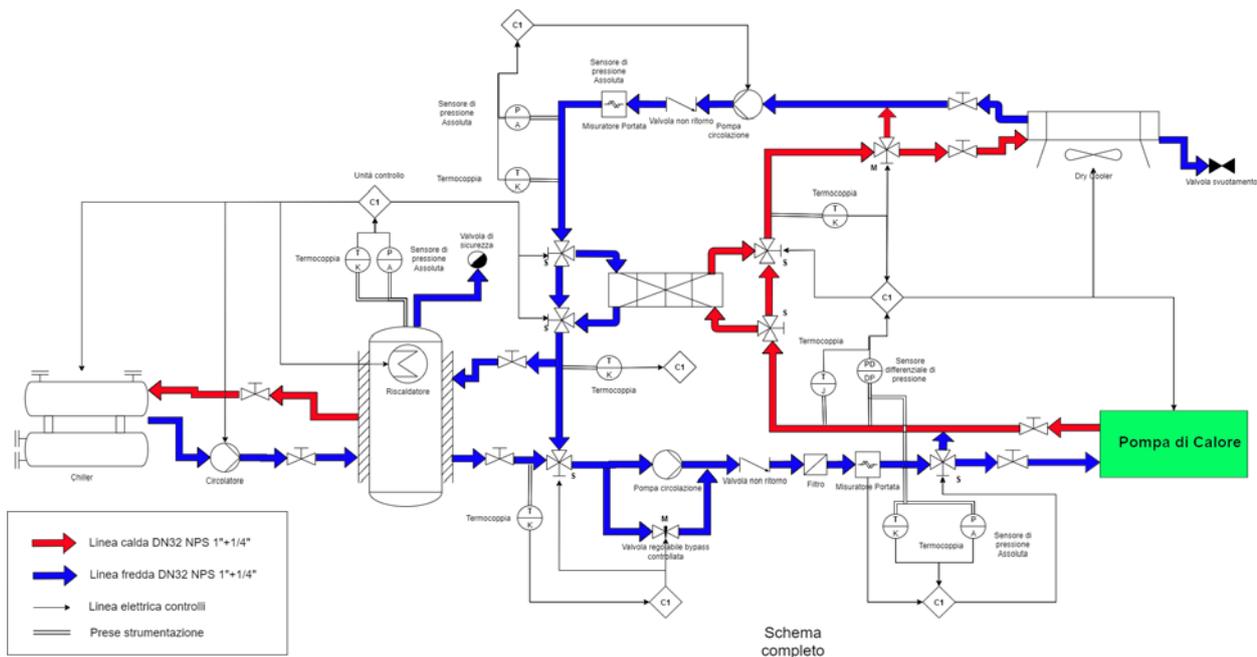


Figura 7: Diagramma operativo/strumentale camera climatica.

L’impianto idronico è necessario per la regolazione di portata e temperatura dell’acqua di alimentazione al condensatore della pompa di calore utilizzata per l’esecuzione dei test sperimentali. Esso è costituito dai seguenti componenti principali:

- Serbatoio d’accumulo con capacità pari a 1000 litri (Figura 8). Esso è in grado di svolgere la funzione di sorgente calda o fredda a seconda della stagione. All’interno del serbatoio sono presenti due resistenze da 7,5 kW ciascuna, allo scopo di regolare la temperatura dell’acqua contenuta al suo interno;
- Gruppo frigo (chiller) Climaventa da 8kW frigoriferi (dotato di inverter a bordo) destinato alla regolazione della temperatura dell’acqua contenuta all’interno del serbatoio (Figura 9);
- Dry-Cooler Alfa-Laval da 120 kW termici con inverter a bordo che può svolgere sia la funzione di sorgente calda che di sorgente fredda in base alla stagione (assume la funzione opposta del serbatoio di accumulo, Figura 11);
- Tre elettropompe di circolazione Grundfos Magna 40-120F (Figura 10) con inverter a bordo, per permettere la circolazione della portata d’acqua all’interno del loop idronico;
- Scambiatore di calore T5M-36H da 175 kW per disaccoppiare i sistemi e fornire salti di temperatura controllati alla pompa di calore. Durante le prove non è risultato necessario utilizzare lo scambiatore, che è stato quindi by-passato, in quanto previsto principalmente per l’utilizzo nel progetto HIL (Hardware In the Loop);
- Il diagramma presenta anche la parte strumentale con le sonde di temperatura, pressione, portata e pressione differenziale asserviti ai diversi componenti dell’impianto.



Figura 8: Serbatoio d'accumulo con resistenze elettriche.



Figura 9: Gruppo Frigorifero Climaveneta.



Figura 10: Pompa di circolazione Grundfos.



Figura 11: Dry Cooler Alfa Laval.

La gestione delle portate d'acqua in ingresso alla macchina richiede due sorgenti termiche, una calda ed una fredda. L'impianto sperimentale è gestito, in maniera innovativa, da un sistema di controllo completamente automatico, in grado di alternare la funzione di sorgente calda e di sorgente fredda tra il serbatoio d'accumulo e il dry-cooler. Normalmente per impianti asserviti al test di pompe di calore la

sorgente calda è costituita esclusivamente dal serbatoio d'accumulo, mentre il flusso termico freddo è fornito dall'acqua uscente dal dry-cooler. Nel caso attuale invece la sorgente è invertibile al fine di garantire un controllo più preciso delle temperature e operazioni di lunga durata.

Il sistema di controllo è gestibile manualmente, oppure in modalità automatica tramite un software di controllo sviluppato dalla Emerson Climate Technologies). In Figura 12 viene mostrata l'interfaccia grafica del software per la gestione del loop idronico da postazione remota: attraverso questa schermata è possibile impostare i set point di temperatura, i ΔT di offset (la temperatura di accumulo), la velocità di rotazione del dry cooler (per il controllo del flusso termico in uscita), la modalità di funzionamento della macchina in prova (pompa di calore o macchina frigo), la velocità di rotazione del compressore della macchina in prova (qualora esso sia dotato di inverter), e la fase di defrost. In Figura 13 è mostrata invece la collocazione in pianta dei componenti dell'impianto il monitoraggio dei parametri di controllo del circuito acqua.

L'operatore inoltre è in grado di monitorare lo stato del sistema nella sua globalità rispetto al controllore della valvola a tre vie e modificarne l'apertura (per il controllo fine della temperatura di impianto e nel caso in cui la gestione del test sia non effettuabile in modo automatico tramite PID integrato nel Software).

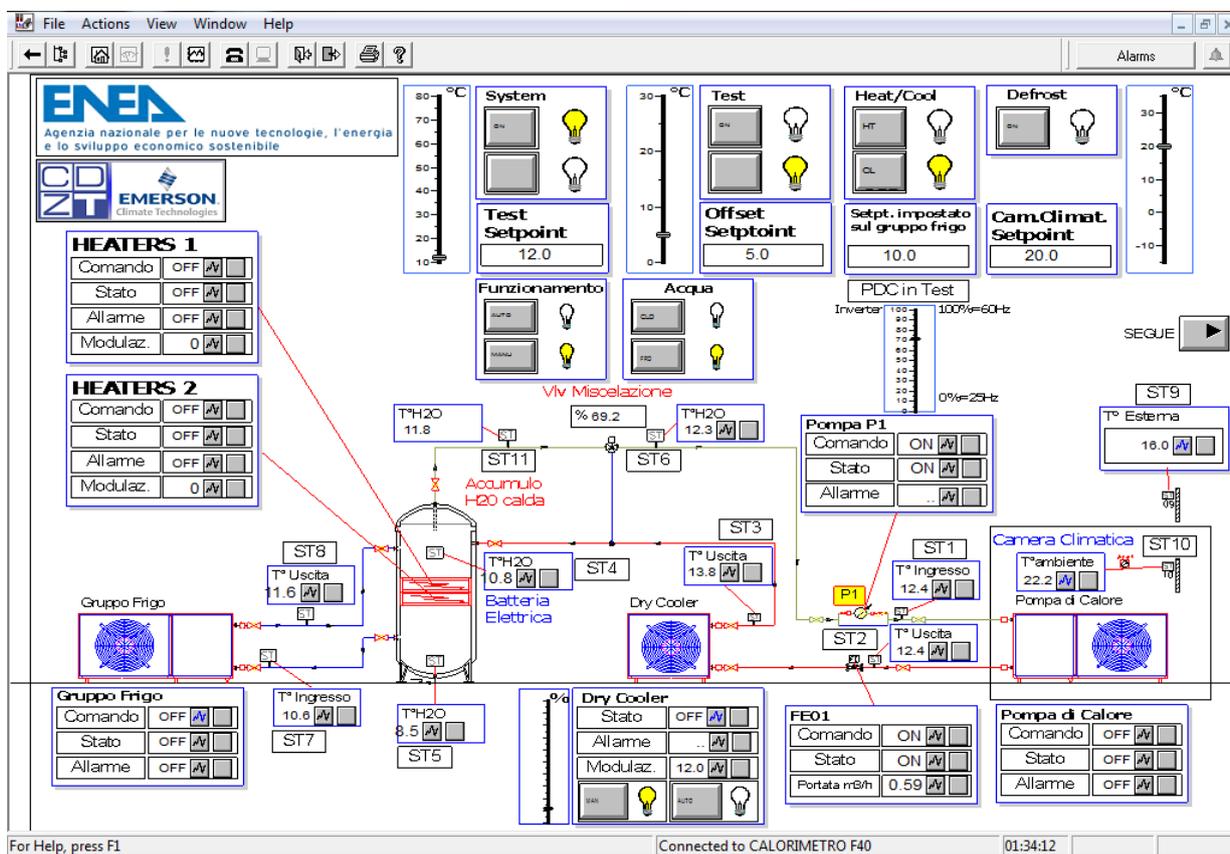


Figura 12: Schermata del Software di controllo del circuito idronico.

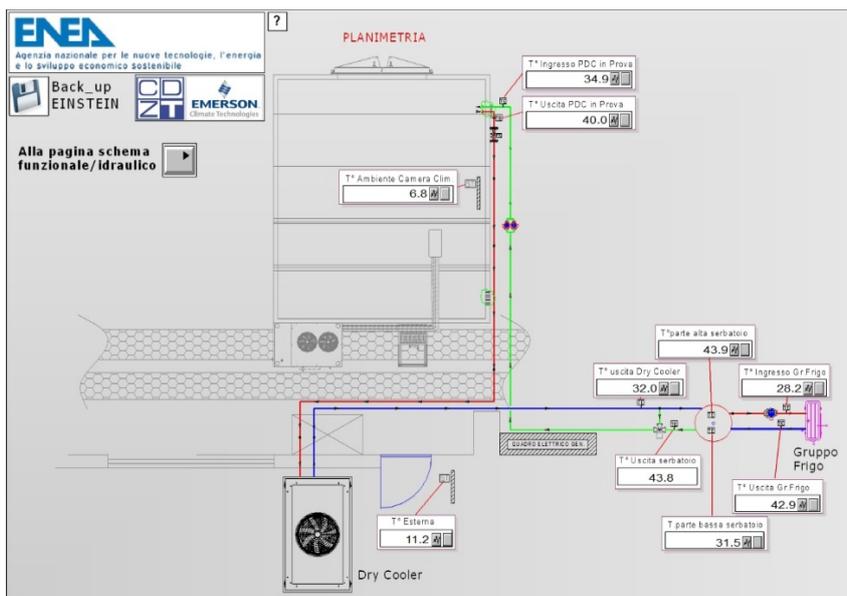


Figura 13: Schermata del Software di controllo con layout dell'impianto "Calorimetro ENEA".

Tutti i componenti, compresa la camera climatica, sono connessi alla rete ethernet Enea; ogni dispositivo dispone quindi di un proprio indirizzo IPv4 ed è possibile collegarsi ad esso da qualsiasi punto della Casaccia o, eventualmente, da postazioni esterne al C. R. Casaccia tramite VPN dotata di firewall ad elevata sicurezza. Grazie a queste caratteristiche è stato possibile proseguire l'attività sperimentale nonostante l'emergenza COVID.

La supervisione dell'impianto è comunque necessaria in caso di utilizzo con refrigeranti pericolosi, per i quali si è dotata la camera climatica di sensori e allarmi per le perdite.

Sotto il profilo idraulico, al fine di ospitare i prototipi a pompa di calore sono stati smontati tutti i sensori precedentemente installati sulla pompa di calore a CO₂ in test all'interno della Camera Climatica. Si è quindi provveduto a sezionare il circuito idronico e installare una derivazione per alimentare le macchine in prova. La derivazione è visibile in Figura 14.



Figura 14: Derivazione tubazioni per alimentazione delle pompe di calore a basso GWP.

2.2 Aggiornamento delle pompe di calore per ospitare refrigeranti a basso GWP e collaudo

Per questa attività sono state aggiornate due macchine a pompa di calore sviluppate durante l'attività "Test sperimentali in Calorimetro ENEA di due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R290 ed R134a" [8]. Le due macchine sono identiche dal punto di vista impiantistico escludendo per la scelta di un diverso compressore e inverter. Esse erano state assemblate dalla ENEX per essere utilizzate con i refrigeranti R134a e R290. La vecchia configurazione delle macchine è visibile in Figura 15, la nuova in Figura 16. I principali componenti erano:

- compressore semi-ermetico alternativo della DORIN;
- scambiatore alettato, in funzione da evaporatore in modalità pompa di calore;
- uno scambiatore a piastre, in funzione da condensatore in modalità pompa di calore;
- uno scambiatore interno a tubi concentrici come recuperatore di calore;
- una valvola elettronica come organo di laminazione;
- due ricevitori di liquido, in uscita all'evaporatore e al condensatore;
- un separatore di olio.



Figura 15: Vecchi prototipi delle pompe di calore installate in camera climatica (a destra la macchina a R290).



Figura 16: Nuovi prototipi delle pompe di calore (destra R1234ze), visibile il nuovo compressore e inverter.

La schematica del circuito termodinamico è riportata in Figura 17 (dov'è indicato il percorso del fluido refrigerante nel ramo di alta e bassa pressione).

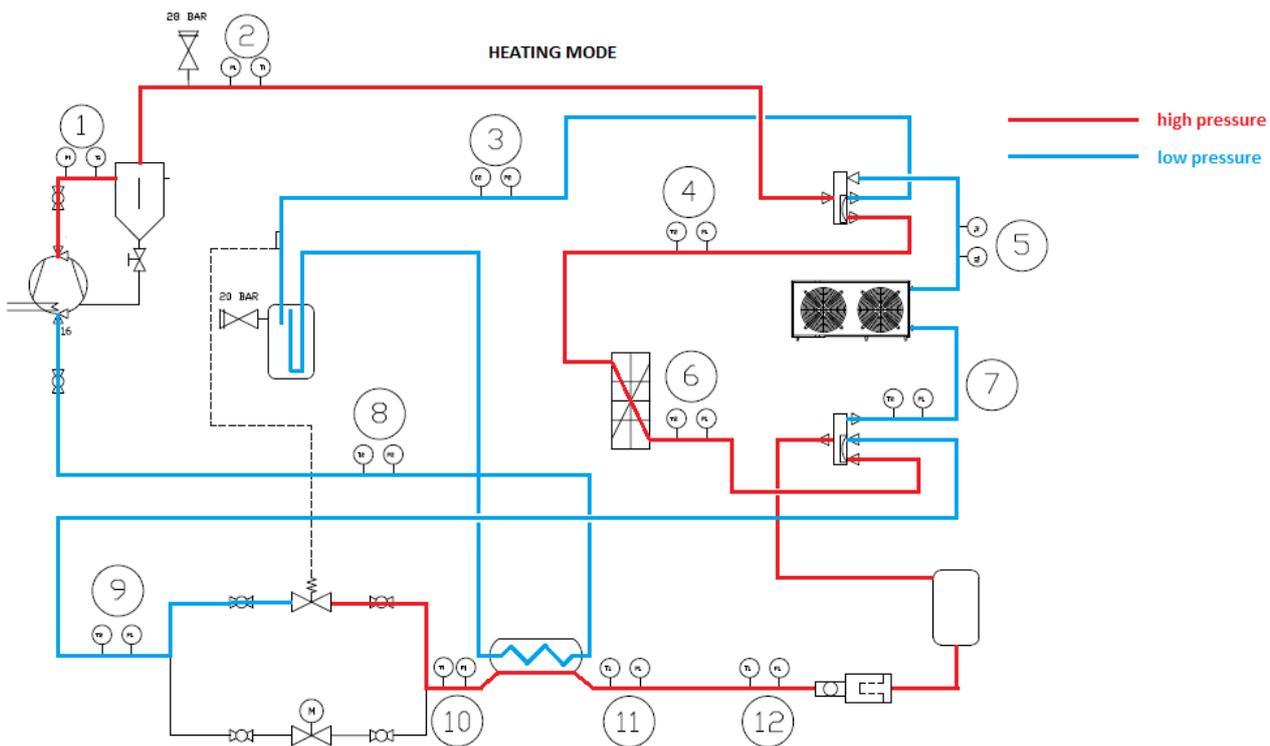


Figura 17: Schema circuitale in funzionamento pompa di calore.

Le macchine sono state aggiornate andando a sostituire i compressori H200CC (R134a) e HEX150CC (R290-propano), con i compressori Frascold B1.5-9.1AXY (guidato dall'inverter Danfoss VLT Automation Drive FC-302P4K0T5) per il prototipo #1 a l'R1234ze e Frascold A05-4AXY (guidato dall'inverter Danfoss VLT Automation Drive FC302P3K0T5) per il per il prototipo #2. I restanti componenti del circuito termico della pompa di calore non sono stati modificati in quanto identificati come idonei all'interno dell'attività "Progettazione e modellazione di due prototipi di pompa di calore invertibile operanti con refrigeranti a basso GWP" svolta da UNIPD [1]. Sono stati quindi aggiornati i quadri elettrici e modificati i software di gestione integrati nei controllori Carel delle pompe di calore. In Figura 18 è visibile in primo piano uno dei due compressori montati sul machina a pompa di calore con refrigerante R1234ze, entrambi sono comunque visibili in Figura 16 nella parte inferiore delle due pompe di calore. I dettagli tecnici sono invece riportati in Tabella 2. I due compressori sono collegati a quadro e controllabili in frequenza tramite regolazione sull'inverter. Sono inoltre state previste come sicurezze valvole di sfiato e pressostati tarati per evitare situazioni di sovrappressione. Infine, i compressori sono dotati di sonde di temperatura e riscaldatori per l'olio ausiliari.

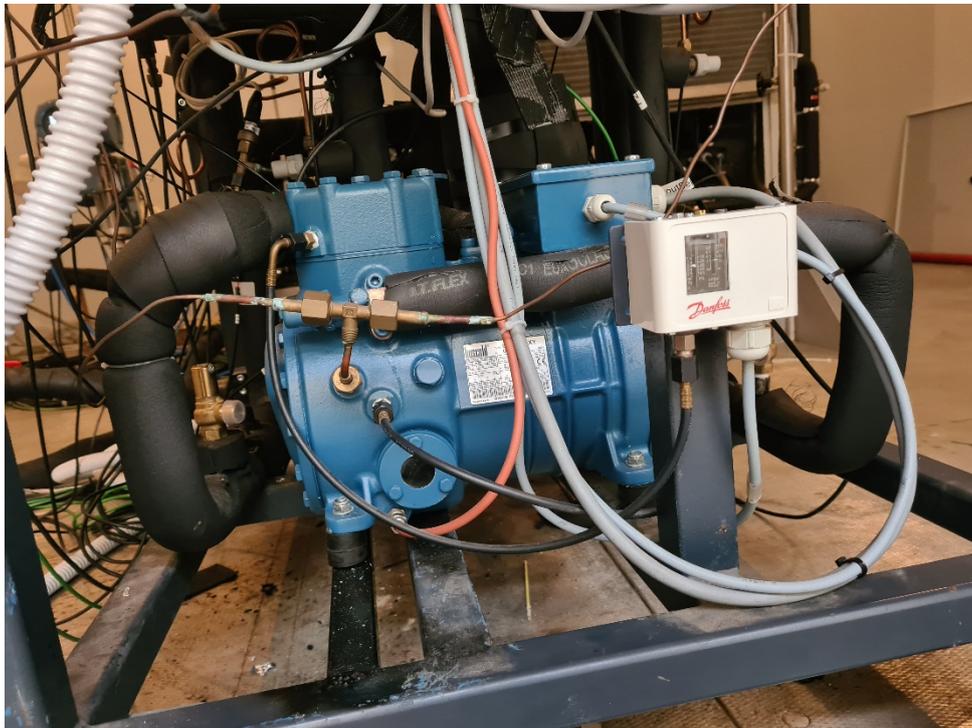


Figura 18: Compressore modello B1.5-9.1AXY installato sulla macchina Prototipo #1.

Tabella 2: Caratteristiche dei compressori.

Modello		B1 5-9,1AXY	A05-4AXY
Macchina sperimentale		Prototipo #2	Prototipo #1
Refrigerante utilizzato		R410A, R452B, R454B	R1234ze
Potenza motore nominale	HP	2	1
Potenza motore nominale	kW	1,1	0,4
Spostamento volumetrico (1450 rpm - 50 Hz)	m ³ /h	9	4
Spostamento volumetrico (1740 rpm - 60 Hz)	m ³ /h	10,8	4,7
Alimentazione	V/pb/Hz/Connection	400/3/50/DOL-STAR	400/3/50/DOL-STAR
MRA	A	5,9	2,8
LRA	A	26,8	10,7
Massima frequenza	Hz	87	87
Minima frequenza	Hz	30	30
Peso netto	kg	38	36
Carica di olio	l	1	1
Massima pressione operativa HP	bar	30	30
Massima pressione statica BP	bar	20,5	20,5
Parzializzazione	%	100	100

Per quanto riguarda gli inverter in Figura 19 è visibile il modello Danfoss VLT Automation Drive FC-302P4K0T5 montato sulla macchina Prototipo #1, entrambi gli inverter sono esternamente identici e sono visibili entrambi montati in Figura 16 nella parte superiore delle due pompe di calore accanto alla batteria alettata. Le caratteristiche principali che devono possedere entrambi gli inverter sono:

- Metodo di controllo U/f;
- Corrente di uscita continuativa dell'inverter pari all'MRA moltiplicato 1.1 o superiore;
- Frequenza minima del compressore 30 Hz;
- Frequenza massima del compressore 87 Hz;
- Frequenza di commutazione uguale o maggiore a 4 kHz;
- Corrente di picco all'avvio pari a 2 volte la corrente nominale;
- Massima rampa da 0 Hz alla minima frequenza pari a 1 secondo;
- Minima rampa dalla minima alla massima frequenza e viceversa pari a 15 secondi.

Per quanto riguarda i dati di targa, essi sono riportati in Tabella 3 per entrambi i modelli selezionati.



Figura 19: Inverter Danfoss VLT Automation Drive FC-302P4K0T5 montato sul Prototipo #1.

Tabella 3: Caratteristiche elettriche degli inverter selezionati.

Modello	Tensione di alimentazione [V]	Frequenza di alimentazione [Hz]	Potenza tipica all'albero [kW]	Corrente ingresso massima [A]	Corrente nominale in uscita [A]	Frequenza in uscita [Hz]	Rendimento
FC302P4K0	380-500	50	4,0	9	10	0-590	0,97
FC302P3K0	380-500	50	3,0	6,5	7,2	0-590	0,97

Le macchine sono state caricate seguendo le indicazioni riportate nel report tecnico “Progettazione e modellazione di due prototipi di pompa di calore invertibile operanti con refrigeranti a basso GWP” svolta da UNIPD [1] (Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7). La carica è stata effettuata in tre fasi:

1. Messa a vuoto delle macchine;
2. Carica a macchina ferma fino ad una pressione sufficiente per l'accensione delle macchine stesse (> 2 bar);
3. Accensione della macchina e attesa raggiungimento condizioni semi-stazionarie (variazione parametri operativi inferiore al 5%);
4. Carica a macchina accesa in modo continuo e bassa portata di refrigerante fino al raggiungimento delle pressioni riportate nelle seguenti Tabelle (Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7):

Tabella 4: Risultati prova di design con R1234ze, frequenza 60 Hz, compressore B1.5-9.1AXY prototipo #1 [1]

<i>t</i> [°C]	valore	<i>p</i> [bar]	valore
<i>t</i> ₁	14,22	<i>p</i> ₁	1,48
<i>t</i> ₂	83,80	<i>p</i> ₂	10,22
<i>t</i> _{2a}	76,97	<i>p</i> _{2a}	10,07
<i>t</i> _{2b}	73,59	<i>p</i> _{2b}	10,07
<i>t</i> ₃	40,65	<i>p</i> ₃	10,05
<i>t</i> _{3b}	39,16	<i>p</i> _{3b}	10,05
<i>t</i> ₄	35,04	<i>p</i> ₄	10,04
<i>t</i> _{4a}	-4,13	<i>p</i> _{4a}	1,86
<i>t</i> ₅	-4,13	<i>p</i> ₅	1,86
<i>t</i> ₆	3,73	<i>p</i> ₆	1,61
<i>t</i> _{6a}	7,67	<i>p</i> _{6a}	1,53

Tabella 5: Risultati prova di design con R410A in modalità pompa di calore, frequenza 50 Hz, compressore A05-4AXY prototipo #2, [1]

<i>t</i> [°C]	valore	<i>p</i> [bar]	valore
<i>t</i> ₁	8,25	<i>p</i> ₁	6,32
<i>t</i> ₂	79,05	<i>p</i> ₂	19,72
<i>t</i> _{2a}	71,58	<i>p</i> _{2a}	19,57
<i>t</i> _{2b}	68,28	<i>p</i> _{2b}	19,57
<i>t</i> ₃	28,35	<i>p</i> ₃	19,55
<i>t</i> _{3b}	28,35	<i>p</i> _{3b}	19,55
<i>t</i> ₄	25,41	<i>p</i> ₄	19,55
<i>t</i> _{4a}	-6,42	<i>p</i> _{4a}	6,47
<i>t</i> ₅	-6,52	<i>p</i> ₅	6,47
<i>t</i> ₆	-0,34	<i>p</i> ₆	6,39
<i>t</i> _{6a}	3,18	<i>p</i> _{6a}	6,33

Tabella 6: Risultati prova di design con R452A in modalità pompa di calore, frequenza 50 Hz, compressore A05-4AXY prototipo #2, [1]

t [°C]	valore	p [bar]	valore
t_1	9,86	p_1	6,00
t_2	86,02	p_2	18,50
t_{2a}	78,10	p_{2a}	18,33
t_{2b}	74,23	p_{2b}	18,33
t_3	27,56	p_3	18,33
t_{3b}	27,56	p_{3b}	18,33
t_4	24,50	p_4	18,32
t_{4a}	-5,61	p_{4a}	6,16
t_5	-6,70	p_5	6,16
t_6	0,43	p_6	6,08
t_{6a}	4,55	p_{6a}	6,02

Tabella 7: Risultati prova di design con R454A in modalità pompa di calore, frequenza 50 Hz, compressore A05-4AXY prototipo #2, [1]

t [°C]	valore	p [bar]	valore
t_1	10,15	p_1	5,95
t_2	86,85	p_2	18,28
t_{2a}	78,78	p_{2a}	18,10
t_{2b}	74,84	p_{2b}	18,10
t_3	27,40	p_3	18,08
t_{3b}	27,40	p_{3b}	18,08
t_4	24,34	p_4	18,08
t_{4a}	-5,50	p_{4a}	6,09
t_5	-6,76	p_5	6,09
t_6	0,53	p_6	6,02
t_{6a}	4,70	p_{6a}	5,95

Il controllo di accensione degli impianti è effettuato tramite software Labview appositamente sviluppato. Il controllo della frequenza di funzionamento è manuale da pannello di controllo degli inverter, si è scelta questa configurazione in quanto le macchine sono state operate principalmente a 50 Hz.

2.2.1 Strumentazione di misura

Per quanto riguarda la strumentazione, si è provveduto a rimuovere la vecchia strumentazione e ad installare la nuova, uguale nella tipologia e nella collocazione nei due prototipi, riassunta in Tabella 8.

Tabella 8: Strumentazione installata nella catena di misura

N	Dev. Type	Nome	Grandezza	Unità misura	Range Grandezza	Tipo Sensore	Posizione in fig.15 (14)
0	NI-9213	TiCP	Temp. in Compressore	°C	0 80	TC CR/AL(J)	8
1	NI-9213	ToCP	Temp. out Compressore	°C	40 100	TC CR/AL(K)	1
2	NI-9213	ToSEPo	Temp. out Separatore olio	°C	40 100	TC CR/AL(K)	2
3	NI-9213	TiSCa_ToSCa	Temp. in condensatore	°C	-10 100	TC CR/AL(J)	5
4	NI-9213	ToSCa/TiSCa	Temp. out condensatore	°C	-10 40	TC CR/AL(J)	7
5	NI-9213	ToRICI	Temp. out Ricev. Liquido	°C	10 80	TC CR/AL(K)	12
6	NI-9213	TISOTTc	Temp. in filtro	°C	10 80	TC CR/AL(K)	11
7	NI-9213	TiEEV	Temp. in valvola	°C	10 80	TC FE/CO(K)	10
8	NI-9213	ToEEV	Temp. out valvola	°C	-40 40	TC FE/CO(J)	9
9	NI-9213	TiSCI/ToSCI	Temp. in evaporatore	°C	-40 30	TC FE/CO(J)	6
10	NI-9213	ToSCI/TiSCI	Temp. out evaporatore	°C	0 40	TC FE/CO(J)	4
11	NI-9213	TiSEPI	Temp. in Separatore LIQ	°C	0 40	TC FE/CO(J)	3
12	NI-9213	TISC_W	Temp. in SC H ₂ O	°C	15 80	TC CR/AL(K)	-
13	NI-9213	TuSC_W	Temp. out SC H ₂ O	°C	5 80	TC CR/AL(K)	-
14	NI-9213	Tambiente	Temp. ambiente	°C	-10 40	TC CR/AL(J)	-
15	NI-9205	piCP	Press. in Compressore	bar	0 60	TRASMETT.	8
16	NI-9205	poCP	Press. out Compressore	bar	0 60	TRASMETT.	1
17	NI-9205	poSEPo	Press. out Separatore olio	bar	0 60	TRASMETT.	2
18	NI-9205	piSCa_poSCa	Press. in condensatore	bar	0 60	TRASMETT.	5
19	NI-9205	poSCa/piSCa	Press. out condensatore	bar	0 60	TRASMETT.	7
20	NI-9205	poRICI	Press. out Ricev. Liquido	bar	0 60	TRASMETT.	12
21	NI-9205	piSOTTc	Press. in filtro	bar	0 60	TRASMETT.	11
22	NI-9206	piEEV	Press. in valvola	bar	0 60	TRASMETT.	10
23	NI-9205	poEEV	Press. out valvola	bar	0 60	TRASMETT.	9
24	NI-9205	piSCI/poSCI	Press. in EV	bar	0 60	TRASMETT.	6
25	NI-9205	poSCI/piSCI	Press. out EV	bar	0 60	TRASMETT.	4
26	NI-9205	piSEPI	Press. in Separatore LIQ	bar	0 60	TRASMETT.	3
27	NI-9205	W	potenza assorbita	kW	0 25	wattmetro	-
28	NI-9205	G_Water	Portata acqua	kg/h	0-1200	TRASMETT.	-

L'acquisizione è stata affidata all'hardware della National Instruments come riportato dal modello di scheda di acquisizione utilizzata presente nella seconda colonna.

Per quanto riguarda i sensori, per le misure delle pressioni sono stati utilizzati dei trasmettitori Kobold modello SEN-9601 0 B115 G 0 (Figura 20).



Figura 20: Sensore di pressione montato sugli impianti sperimentali a pompa di calore

Nella norma UNI EN 14511 [6], il legislatore impone l'utilizzo di sensori di pressione dotati di elevata accuratezza (le specifiche dei sensori installati sono riportati Tabella 9) e di termocoppie tipo K e J (Tabella 10), posizionate all'ingresso e all'uscita di ogni componente. Infine, è obbligatorio l'uso di un misuratore di portata volumetrica lato acqua per il calcolo delle varie grandezze dirette ed indirette.

Tabella 9: Caratteristiche sensori di pressione

Campo	0-60 bar
Accuratezza	$\leq \pm 0.5\%$ del fondo scala
Non linearità	$\leq \pm 0.25\%$ del fondo scala
Non ripetibilità	$\leq \pm 0.1\%$ del fondo scala
Deviazione dallo zero	$\leq \pm 0.5\%$ tipica, $\leq \pm 0.75\%$ massima
Scostamento dovuto al gradiente termico	0-80°C 1%, 2.5% massimo
Temperature di esercizio	-25 – 100 °C

Tabella 10: Caratteristiche termocoppie

	Termocoppie tipo K	Termocoppie tipo J
Materiali	Cr/Al	Fe/Co
Diametro esterno	0,5 mm	0,5 mm
Intervallo di taratura	-40 – 1000 °C	-40 – 750 °C
Accuratezza	$\pm 0.4\%$ della lettura	$\pm 0.4\%$ della lettura

Come visibile in Figura 21 le termocoppie di tipo J sono preferibili a basse temperature dove la risposta è maggiore in termini di $V/^{\circ}C$ rispetto alle K, per alte temperature tuttavia si preferiscono le K in quanto più stabili come variazione di tensione in rapporto alla temperatura [10].

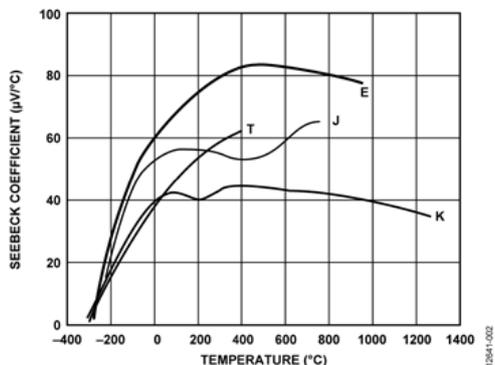


Figura 21: Coefficiente Seedback per termocoppie J, T e K [10]

Le termocoppie sono quindi state fissate sulla superficie esterna dei tubi del circuito della pompa di calore e all'interno del materiale di coibentazione al fine di ridurre il rischio perdite e il numero di perforazioni sull'impianto garantendo al contempo una misura di temperatura accurata e non dipendente dalle condizioni ambientali esterne (installazione visibile in Figura 22).



Figura 22: Esempio installazione termocoppie e sensori di pressione

Al fine di garantire le misure di portata, sono stati installati due misuratori di portata di tipo elettromagnetico. Il primo misuratore di portata è un Krohne Optiflux 5000 (a sinistra in Figura 23) ed è stato installato all'interno della camera climatica e collegato al sistema di acquisizione Labview. Il misuratore viene utilizzato esclusivamente dal software Labview e non interferisce con le misure dell'impianto di gestione automatico della Camera Climatica. Il secondo misuratore di portata è un Rosemount 8732E (a destra in Figura 23), anch'esso di tipo elettromagnetico, è collegato al software UltraSite32, e viene utilizzato esclusivamente per la gestione della portata del loop idronico, anche sotto il profilo della sicurezza operativa (i.e. spegnimento della macchina nel caso di portata elaborata troppo bassa dovuta a rotture dell'impianto).



Figura 23: Misuratori di portata installati sull’impianto Calorimetro ENEA, modello Krohne Optiflux 5000 a sinistra e Rosemount 8732E a destra

La Tabella 11 indica inoltre le principali caratteristiche del misuratore Krohne optiflux 5000.

Tabella 11: Caratteristiche misuratore di portata Krohne optiflux 5000

Accuratezza	0.02% della lettura
Intervallo di taratura	0 – 235 l/min
Intervallo di misura	0-200 l/min

Per l’acquisizione delle misure si è scelto di utilizzare software Labview per via della sua affidabilità e dell’esperienza del gruppo di ricerca con tale software. Per il calcolo delle proprietà si è utilizzato invece il software Refprop [9], interfacciato tramite API con Labview. Tramite esso è possibile registrare i dati sperimentali dell’impianto attraverso specifici programmi realizzati su misura per ogni macchina in test (Figura 24), risulta quindi possibile monitorare l’andamento delle grandezze termodinamiche e verificare il corretto raggiungimento di condizioni di stazionarietà (Figura 25). Infine, il sistema consente di controllare, che durante l’acquisizione dei dati, le oscillazioni delle grandezze misurate si mantengano entro gli scostamenti ammissibili come da norma UNI EN 14511 (Figura 26).

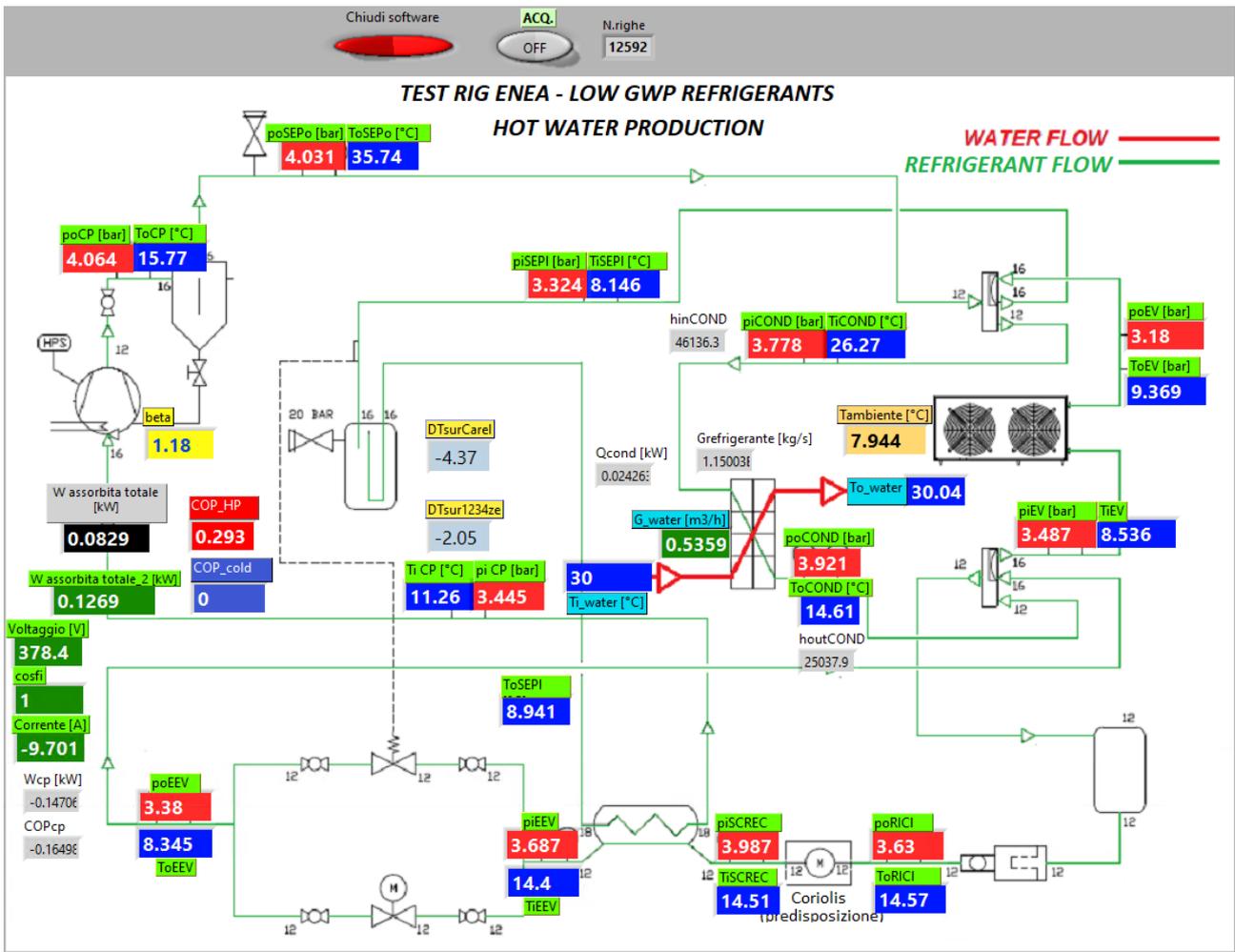


Figura 24: Una delle schermate del Sistema di acquisizione Labview

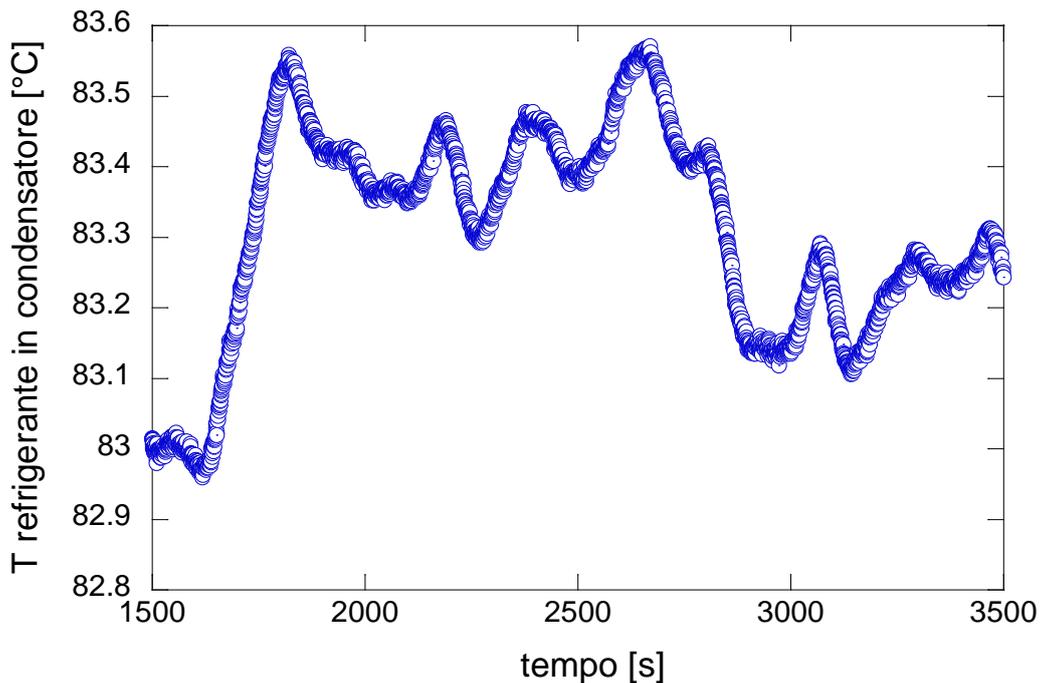


Figura 25: Esempio dell'andamento delle condizioni termodinamiche della macchina in prova

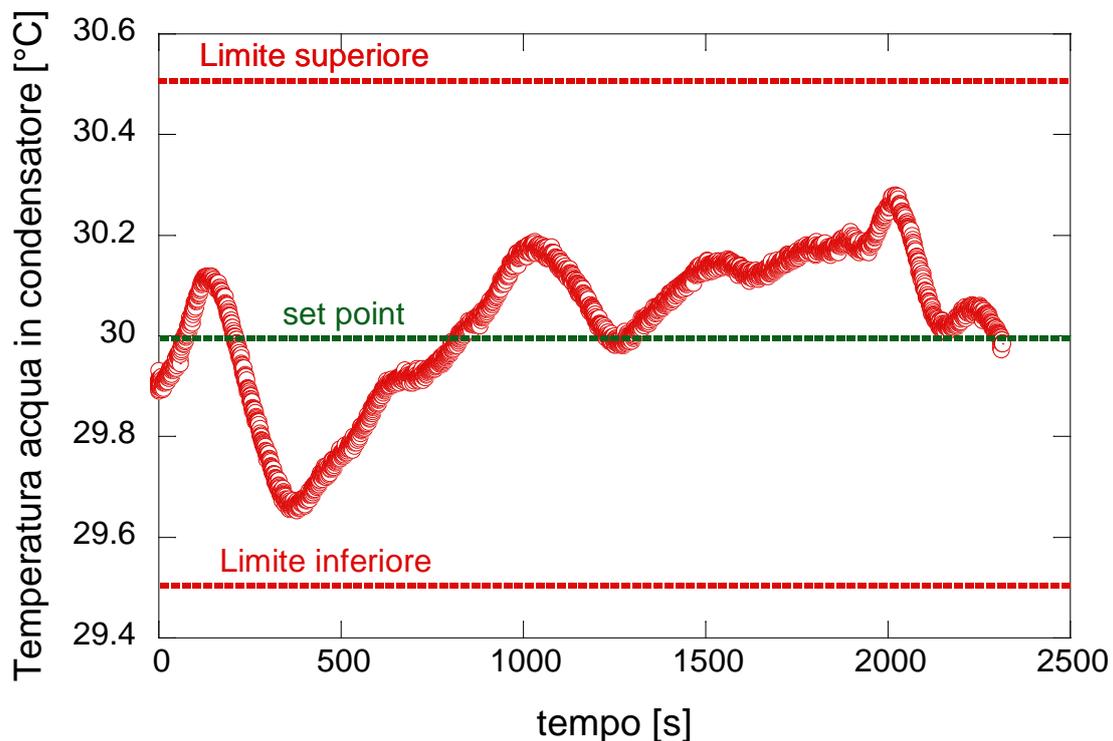


Figura 26: Esempio di fluttuazione di una variabile controllata entro i valori richiesti dalla normativa

2.2.2 Strumentazione di sicurezza per i test

Al fine di garantire le corrette funzioni di sicurezza secondo la norma ASHRAE 34 [11] per l'operatività in camera climatica le macchine in test sono state equipaggiate con un sensore di perdite. Tali sensori sono stati collegati direttamente al quadro delle macchine per l'alimentazione, lo schema di massima del collegamento è riportato in Figura 27:

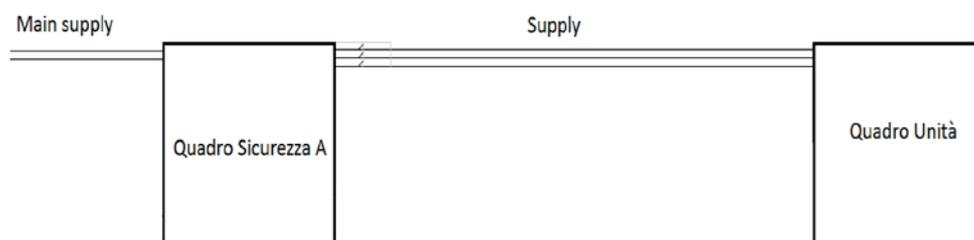


Figura 27: Schema della catena di sicurezza per i test

I sensori installati sono di tipologia GLD marcati Carel e lavorano tramite membrana a semiconduttore o infrarosso secondo lo standard ASHRAE 15 [12] ed EN 378 [13] (Figura 28). I rilevatori sono stati installati sul retro delle pompe di calore in zona centrale e forniscono un avviso sonoro e luminoso in caso di perdite. I rilevatori permettono quindi un rilievo tempestivo delle perdite di gas riducendo il rischio di perdite non rilevate. Sono inoltre collegati ad un quadro di sicurezza che può disattivare l'alimentazione elettrica e avviare il ricircolo dell'aria all'interno della camera climatica attraverso valvola e ventilatore appositamente installati.

Inoltre, durante tutte le prove il locale Camera Climatica non è mai stato frequentato riducendo a zero il rischio di entrata in contatto con eventuali gas dispersi. Per ulteriore sicurezza, durante ogni apertura della camera climatica si è provveduto ad arieggiare abbondantemente il locale interno.



Figura 28: Sensore GLD Carell posizionati sul retro del quadro di una delle pompe di calore in prova

3 Conclusioni

All'interno di questo report vengono riportate le azioni svolte per la progettazione, realizzazione e messa in opera delle due macchine prototipali a pompa di calore a basso *Global Warming Potential* (GWP) previste nella linea di attività 3.4. Nel report sono riportate anche le azioni adeguamento svolte presso l'impianto "Calorimetro Enea" al fine di poter ospitare i due prototipi all'interno dell'impianto. In dettaglio sono state svolte le seguenti attività:

- Progettazione degli impianti sperimentali a pompa di calore e basso GWP con R1234ze, R410A, R452B e R454B divisi in due macchine indipendenti, una utilizzabile con R410A, R452B, R454B e una con R1234ze a partire dai vecchi prototipi a R290 ed R134a;
- Modifica impianto "Calorimetro ENEA" per installazione pompe di calore;
- Installazione delle pompe di calore all'interno dell'impianto "Calorimetro ENEA";
- Sviluppo/aggiornamento software di acquisizione e controllo;
- Carica e collaudo

Per l'attività si è scelto di riadattare due pompe di calore aria-acqua per edifici unifamiliari a R134a (Prototipo #1) e con propano (Prototipo #2). Gli impianti sono stati modificati in seguito alle indicazioni ottenute dal partner UNI.P.D. all'interno dell'attività di simulazione "Progettazione e modellazione di due prototipi di pompa di calore invertibile operanti con refrigeranti a basso GWP".

Sono quindi stati identificati i componenti necessari, avviata la fase di approvvigionamento dei componenti e provveduto alla realizzazione degli impianti modificati. I cambiamenti effettuati riguardano principalmente il compressore, il software di controllo, le sicurezze e gli ausiliari connessi al compressore.

L'impianto "Calorimetro Enea" è stato modificato in modo da permettere l'attacco delle due pompe di calore sperimentali al circuito idronico e la sensoristica è stata spostata. Sono inoltre state previste sicurezze apposite in caso di perdita di refrigerante dagli impianti.

Si è progettata una nuova di acquisizione per i due prototipi ed è stato sviluppato un nuovo software di acquisizione e controllo per la gestione dei due prototipi. In conclusione, a seguito delle attività precedenti si è quindi provveduto ad installare le macchine per i test, alla carica e alla fase di collaudo, che è stata eseguita dopo ogni cambio di refrigerante o di macchina.

4 Riferimenti bibliografici

1. S. Bortolin, D. Menegon, L. Moro, D. Del Col, Progettazione e modellazione di due prototipi di pompa di calore invertibile operanti con refrigeranti a basso GWP, RdS/PTR(2020)/026
2. "Understanding Global Warming Potentials", United States Environmental Protection Agency, 12 Gennaio 2016. Weblink: "<https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>", Ultimo controllo 2021-03-02.
3. L. K. Gohar, K. P. Shine, "Equivalent CO₂ and its use in understanding the climate effects of increased greenhouse gas concentrations". *Weather*. Royal Meteorological Society. 62 (11), Novembre 2007, pagine: 307–311. doi:10.1002/wea.103, ISSN 1477-8696.
4. G. Myhre, D. Shindell, F. M. Bréon, W. Collins, et al., "Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing", *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013, pagine: 659–740.
5. M. Etminan, G. Myhre, E. J. Highwood, K. P. Shine, "Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing: Greenhouse Gas Radiative Forcing". *Geophysical Research Letters*. 43 (24), 2016, pagine: 614–623, doi:10.1002/2016GL071930.
6. Norma UNI EN 14511:2018, "Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti e refrigeratori per cicli di processo con compressore elettrico".
7. UNI EN 14825:2019, "Condizionatori d'aria, refrigeratori di liquido e pompe di calore, con compressore elettrico, per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti".
8. N. Calabrese, R. Trinchieri, L. Saraceno, G. Boccardi, M. Pieve, G. Ponticorvo, Test sperimentali in Calorimetro ENEA di due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R290 e R134a, Report RdS/PAR2014/164, AdP MiSE – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2013.
9. E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber, M. O. McLinden, "NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REF-PROP), Version 10.0." National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg (USA), 2018.
10. N. Cusack, P. Kendall, "The Absolute Scale of Thermoelectric Power at High Temperature". *Proceedings of the Physical Society*. 72 (5), 1958, pagina: 898. doi:10.1088/0370-1328/72/5/429.
11. ANSI/ASHRAE Standard 34 (2013), "Designation and Safety Classification of Refrigerants".
12. ANSI/ASHRAE Standard 15 (2019), "Safety Standard for Refrigeration Systems and Designation and Safety Classification of Refrigerants".
13. UNI EN 378-X (2017), "Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Parte 1: Requisiti di base, definizioni, criteri di classificazione e selezione".

5 Abbreviazioni ed acronimi

C.R.	Centro Ricerche
GWP	Global Warming Potential
LRA	Lowest Rotors Amps
MRA	Maximum Rotors Amps
P, p	Pressione
T, t	Temperatura
UNIPD.	Unniversità di Padova