



Ricerca di Sistema elettrico

Test sperimentali in calorimetro ENEA di due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R290 ed R134a

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 ED R134a

N. Calabrese, R. Trinchieri, L. Saraceno, G. Boccardi, M. Pieve (ENEA), G. Ponticorvo (UNINA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Obiettivo C: Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 L'IMPIANTO SPERIMENTALE	6
2.1.1 Camera climatica	6
2.1.2 Impianto idronico.....	9
2.1.3 Macchina in test e strumentazione.....	15
2.1.4 Strumentazione di sicurezza per i test con la macchina a R290.....	24
2.2 METODOLOGIA DI PROVA E FASE DI ACQUISIZIONE DEI DATI	26
2.3 MATRICE DI PROVA SECONDO LE NORMATIVE UNI-EN 14511 PARTE SECONDA E UNI-EN 14825	27
2.4 RISULTATI SPERIMENTALI	31
2.4.1 Risultati sperimentali sulla macchina a R134a in modalità riscaldamento	31
2.4.2 Risultati sperimentali sulla macchina a R134a in modalità raffreddamento.....	32
2.4.3 Risultati sperimentali sulla macchina a R290 in modalità riscaldamento	32
2.4.4 Risultati sperimentali sulla macchina a R290 in modalità raffreddamento.....	34
2.4.5 Risultati sperimentali in condizioni di progetto.....	35
3 CONCLUSIONI.....	39
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	39
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	40

Sommario

La presente attività di ricerca è la prosecuzione di quella condotta nella precedente annualità riguardante la “Progettazione di due banchi prova strumentati per test su componenti di impianti a compressione di vapore con fluidi HFC e HFO”. Essa ha avuto come obiettivo la realizzazione e l’analisi di test comparativi di due pompe di calore reversibili di piccola taglia (4.5 kW) operanti con fluidi refrigeranti diversi (R134a e R290) al fine di determinarne le prestazioni al variare delle condizioni al contorno (temperatura dell’ambiente, portata e temperature dell’acqua).

L’attività è stata realizzata nelle seguenti fasi:

- Preparazione e messa a punto dell’impianto “Calorimetro ENEA”, sito presso l’istituto di ricerca ENEA Casaccia;
- Esecuzione della campagna sperimentale sui due prototipi, costruttivamente identici (a parte il compressore), sia in regime invernale (modalità pompa di calore), sia in regime estivo (modalità macchina frigorifera);
- Elaborazione e riduzione dei dati sperimentali;
- Analisi dei risultati per il calcolo dei parametri di prestazione a carico parziale e stagionale in accordo con le normative vigenti;
- Interpretazione dei risultati al fine della valutazione dell’impatto ambientale diretto e indiretto nel caso di impiego di tali macchine nella climatizzazione residenziale.

In questo documento sono descritti, in particolare, l’impianto sperimentale “Calorimetro Enea” e le modifiche di volta in volta adottate per adattarlo alla macchina in test, la metodologia di prova, i criteri con i quali si è definita la matrice di prova, in accordo alle normative di riferimento su questo argomento (UNI EN 14511 parte seconda e parte terza e UNI EN 14825) ed infine sono mostrati i principali risultati sperimentali ottenuti.

1 Introduzione

L'impianto "Calorimetro Enea" allestito presso l'edificio F40 del Centro ricerche Enea Casaccia di Roma consente di testare pompe di calore aria/acqua in accordo alla norma UNI-EN 14511 del novembre 2011. Tali test sperimentali, eseguiti secondo le condizioni di prova richieste dalla norma, permettono di valutarne le prestazioni in una specifica condizione (COP per le pompe di calore ed EER per i refrigeratori di liquido) per poi calcolare gli indici stagionali SCOP e SEER, nonché rilasciarne la certificazione energetica.

Una pompa di calore aria/acqua ha come effetto utile la cessione del calore prelevato dal sistema a temperatura inferiore (aria) al sistema a temperatura superiore (acqua), al quale viene inoltre aggiunto l'equivalente termico del lavoro di compressione della macchina operatrice. Essa è costituita da un compressore, che incrementa la pressione e la temperatura del fluido refrigerante, un condensatore (o gas-cooler per macchine a CO₂ con ciclo trans-critico), nel quale viene ceduto calore all'acqua da riscaldare, da 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.

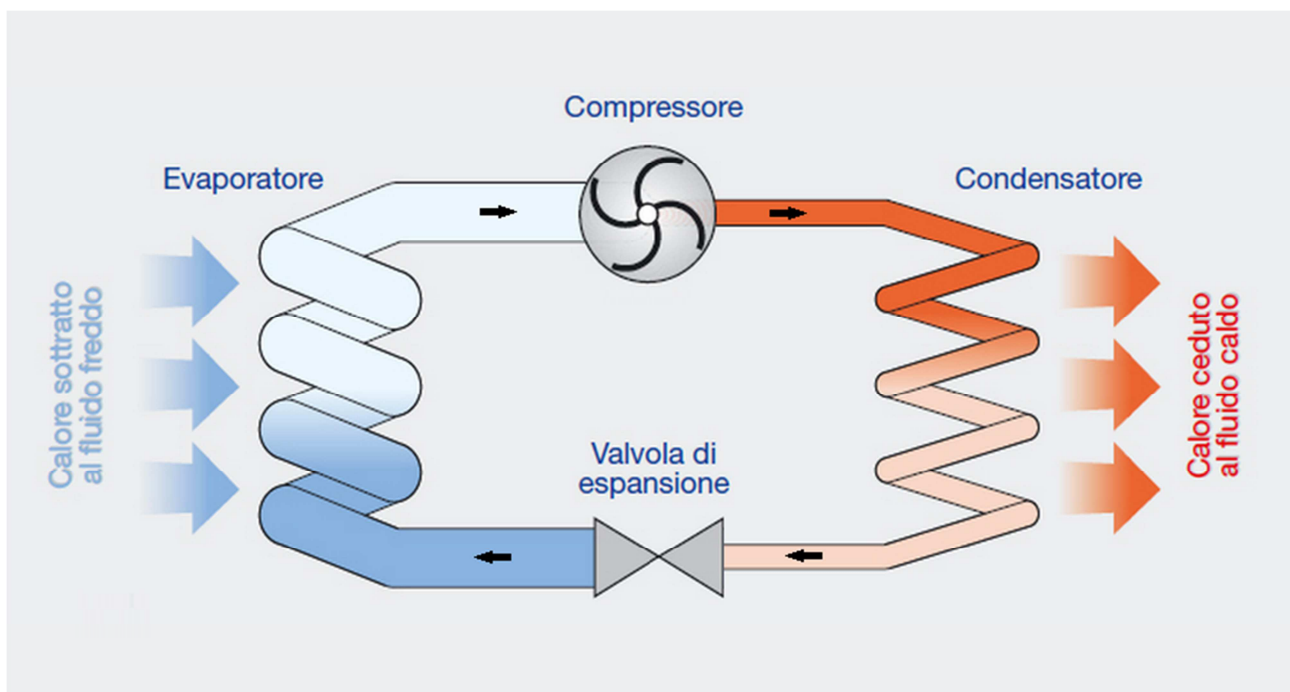


Figura 1. Schema Funzionale di una Pompa di Calore

Per il test di pompe di calore di questo tipo si deve poter disporre di condizioni al contorno stabili. Deve cioè essere garantito un flusso d'acqua avviato 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 l'ottenimento delle condizioni richieste sull'acqua, è stato realizzato un circuito apposito in grado di produrre e rendere disponibile un idoneo flusso d'acqua a temperatura controllata.

Invece, per controllare la temperatura e l'umidità dell'aria avviata all'evaporatore ci si è avvalsi di una camera climatica all'interno della quale fosse possibile alloggiare i prototipi da testare.

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

Per la definizione e l'esecuzione delle prove sono state seguite le prescrizioni delle normative di riferimento per i test sulle pompe di calore, ossia la UNI EN 14511-parte 2 [1] e parte 3 [2] e la UNI EN 14825 [3].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Per la realizzazione di questa attività si è proceduto alla preliminare progettazione e costruzione di un nuovo impianto sperimentale denominato “Calorimetro ENEA”, che ha consentito l’esecuzione dei test sperimentali secondo le normative di riferimento per il test di pompe di calore (UNI EN 14511-parte 2 [1] e parte 3 [2] e UNI EN 14825 [3]). Sono stati condotti test su due prototipi costruttivamente identici (escluso il compressore), funzionanti rispettivamente con R134a e R290 (propano), in differenti condizioni di funzionamento, sia in regime invernale (modalità pompa di calore) che in regime estivo (modalità macchina frigorifera). Per ognuna delle singole prove sperimentali, sono stati elaborati e ridotti i dati, successivamente utilizzati per la stima delle prestazioni stagionali durante la climatizzazione estiva e invernale.

2.1 L’impianto sperimentale

L’impianto “Calorimetro Enea” allestito presso l’edificio F40 del Centro ricerche Enea Casaccia di Roma consente di testare pompe di calore aria/acqua reversibili con potenza termica fino a 50 kW in accordo alla norma UNI-EN 14511 del novembre 2011. In esso coesistono tre diversi sistemi, che devono essere gestiti simultaneamente:

- Camera climatica, con la quale si gestiscono le condizioni termoigrometriche dell’aria che arriva sullo scambiatore ad aria della macchina in test;
- Loop idronico, che consente di gestire la portata e la temperatura dell’acqua avviata alla macchina in test;
- Macchina in test stessa, che deve essere opportunamente strumentata e monitorata per controllare il raggiungimento di condizioni di funzionamento stabili.

2.1.1 Camera climatica

La camera climatica (figura 2) consente di controllare e misurare la temperatura e l’umidità in ambiente in modo da garantire accuratezza delle misure, stabilità delle condizioni di prova e contenimento della velocità dell’aria che investe lo scambiatore della macchina in test entro i limiti previsti dalla UNI-EN 14511.



Figura 2. Camera climatica

Il servizio utilizza una camera climatica con 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

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 in un range che va da -15°C a 35°C. E' possibile inoltre controllare anche il livello di umidità relativa dal 10 al 95% esclusivamente nel range di temperatura 10°C÷ 35°C. Per quanto riguarda la velocità dell'aria si è proceduto ad una sua misura per ogni prototipo installato verificando che il suo valore in prossimità dell'evaporatore non superasse quello richiesto dalla normativa.

La camera ha al suo servizio un gruppo frigorifero (figura 3) della potenza nominale di 21 kW ed un gruppo di resistenze elettriche da 60 kW suddivise in 3 pacchi da 20 kW, uno dei quali a potenza modulabile.

In sede di collaudo si è provveduto a settare i PID di gestione del gruppo frigo e delle resistenze elettriche in modo da rispettare anche le prescrizioni del prospetto 5 della norma UNI-EN 14511 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 elettrico (figura 3) che invia vapor d'acqua in camera.



Figura 3. Gruppo Frigorifero e generatore di vapore a servizio della Camera Climatica

L'intero sistema della camera climatica è controllato da un sistema PLC implementato, creato e programmato dal produttore che gestisce il tutto in modo totalmente automatico (figura 4). L'operatore ha il solo compito di impostare i setpoint di temperatura ambiente ed umidità relativa sul pannello touch screen a bordo camera o su PC tramite il software Winkratos (figura 5), sviluppato anch'esso da Angelantoni. In figura 4 sono mostrati i sensori di temperatura e di umidità, usualmente collocati all'interno della camera, utilizzati dal sistema di controllo per gestire le richieste di caldo o freddo.



Figura 4. Quadro elettrico con pannello di controllo Touch Screen della camera climatica e sensori di temperatura e umidità alloggiati all'interno della stessa

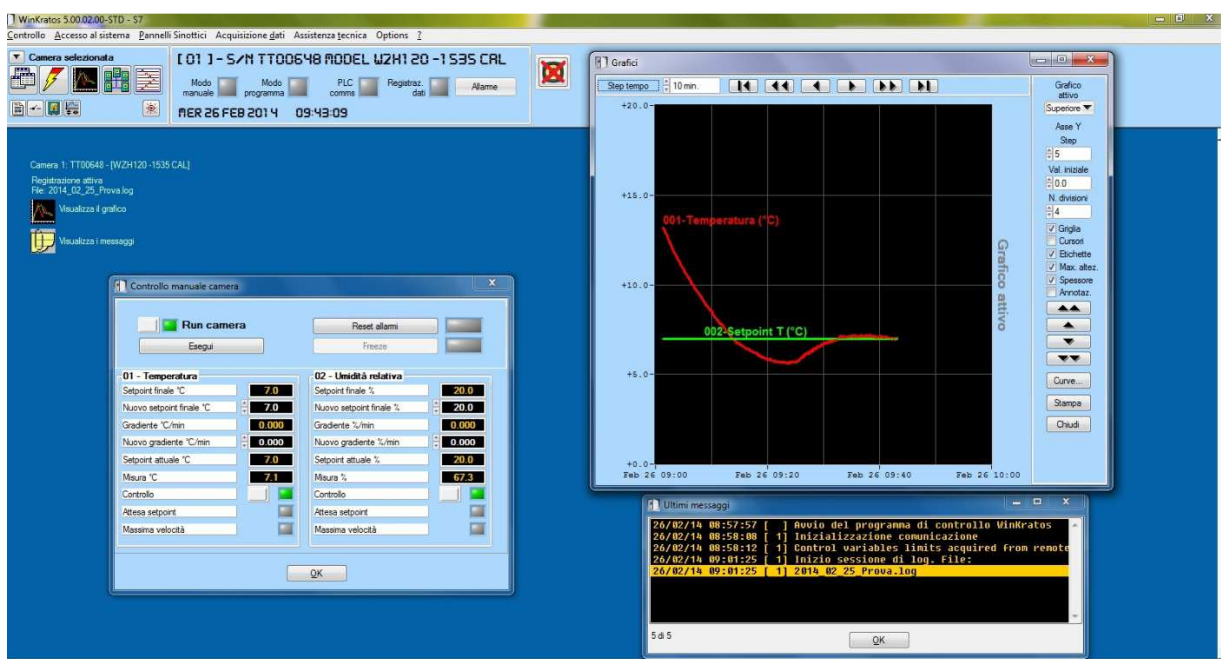


Figura 5. Schermata del software di controllo della camera climatica "Winkratos"

2.1.2 Impianto idronico

L'impianto idronico consente di controllare e misurare la portata e la temperatura dell'acqua elaborata per mezzo di un apposito loop di cui si riporta lo schema d'impianto (figura 6).

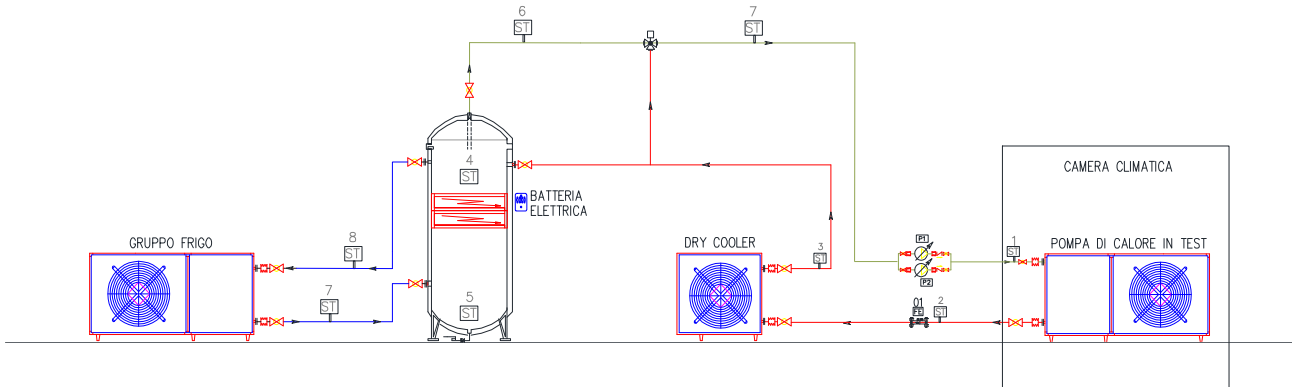


Figura 6. Schema dell'impianto idronico del "Calorimetro Enea"

L'anello è costituito da:

- Serbatoio d'accumulo da 1000 litri, dotato di resistenze elettriche da 15 kW divise in 2 batterie da 7,50 kW l'una con modulazione della potenza 0 ÷ 100% (figura 7);
- Pompa di circolazione Grundfos Magna 40-120F con inverter a bordo (figura 8);
- Gruppo Frigo Climaveneta da 8 kW frigoriferi con inverter a bordo (figura 9);
- Dry-Cooler Alfa-Laval da 60 kW termici con inverter a bordo (figura 10);
- Valvola miscelatrice a tre vie (figura 11);
- Addolcitore d'acqua (figura 12).



Figura 7. Serbatoio d'accumulo con resistenze elettriche

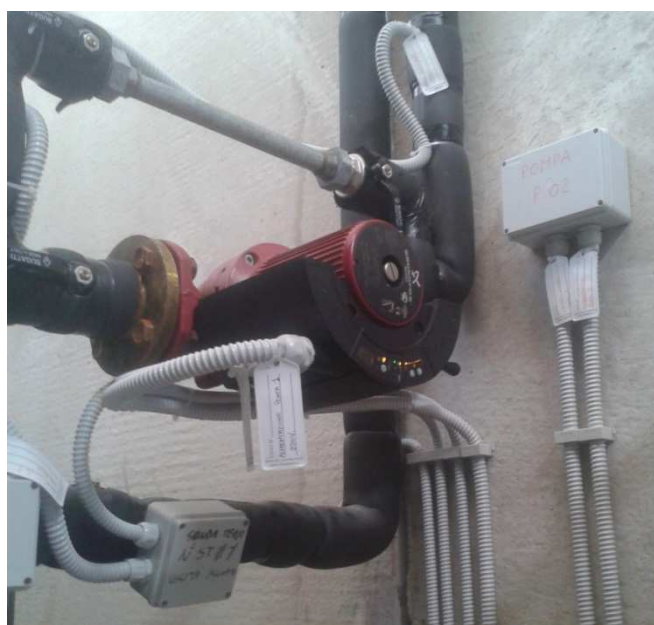


Figura 8. Pompa di circolazione Grundfos



Figura 9. Gruppo Frigorifero Climaveneta



Figura 10. Dry Cooler Alfa Laval



Figura 11. Valvola miscelatrice a tre vie



Figura 12. Addolcitore d'acqua

La preparazione dell'acqua in ingresso alla macchina in prova richiede la disponibilità di due sorgenti termiche, una calda ed una fredda. Per incrementare la flessibilità operativa del loop, gestito da un sistema di controllo completamente automatico, si è progettato l'impianto in modo che la funzione di sorgente calda e di sorgente fredda possa essere svolta indifferentemente dal serbatoio d'accumulo o dall'acqua uscente dal dry-cooler. Solitamente per i test di macchine in modalità pompa di calore, la sorgente calda è costituita dal serbatoio d'accumulo, mentre il flusso termico freddo è fornito dall'acqua uscente dal dry-cooler, che raffredda quella proveniente dalla macchina in prova. Nel caso invece di test di macchine in modalità frigorifera, solitamente la sorgente fredda è costituita dal serbatoio d'accumulo, mentre il dry-cooler provvede a riscaldare l'acqua fredda in uscita dalla macchina in test. La valvola miscelatrice a tre vie provvede poi a miscelare opportunamente i flussi termici caldi e freddi.

Tutto il sistema è gestibile manualmente dall'operatore, oppure in maniera automatica per mezzo di una logica di controllo sviluppata in collaborazione con Emerson Climate Technologies (in figura 13 si mostra il computer a bordo del quadro Emerson che gestisce l'azionamento delle resistenze del serbatoio d'accumulo, l'accensione del gruppo frigo, la modulazione della valvola a tre vie e la velocità di rotazione del dry-cooler al fine di garantire il raggiungimento della temperatura di set point dell'acqua del loop idronico). In figura 14 si mostra l'interfaccia grafica del software UltraSite32 per la gestione da postazione remota del loop idronico: attraverso questa schermata è possibile impostare il set point della temperatura dell'acqua in ingresso alla macchina in prova, il ΔT di offset (ovvero la temperatura alla quale si vuole portare l'accumulo, in genere maggiore della temperatura di set), la velocità di rotazione del dry cooler (che consente di variare la temperatura dell'acqua di ritorno dalla macchina in prova, a parità di temperatura ambiente), 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), la fase di defrost della macchina in prova.

In figura 15 è mostrata invece un'altra pagina grafica del software, che mostra anche la collocazione in pianta dei componenti dell'impianto e operativamente consente il monitoraggio dei parametri di controllo del circuito acqua.

Per il controllo della temperatura di set point possono presentarsi delle situazioni critiche che richiedono la presenza di un operatore che supervisioni il corretto funzionamento della valvola a tre vie. In alcune situazioni infatti la temperatura delle sorgenti calde o fredde può subire una variazione improvvisa.

Per quanto riguarda la sorgente fredda, questo può accadere quando il set richiesto è molto basso (dell'ordine dei 10°C) con conseguente accensione e spegnimento del gruppo frigo durante la prova: la non perfetta miscelazione del fluido nel serbatoio di accumulo provoca una netta riduzione di temperatura dell'acqua avviata alla tre vie con conseguente eccessivo abbassamento anche della temperatura a valle della stessa. Questo evento, che avviene perché la valvola lavora con flussi termici "fuori progetto" (ossia caratterizzati da gradienti di temperatura maggiori di quelli per cui sono stati settati i controllori PID che ne gestiscono l'apertura), può provocare lo sfioramento del limite inferiore dello scostamento ammissibile sul valore impostato di set point ($\pm 0,5$ K secondo la norma UNI EN 14511 parte terza, tabella 6).

Per quanto riguarda la sorgente calda, la stessa criticità può accadere quando la temperatura esterna cambia in maniera molto brusca, come ad esempio nel caso di cambiamento delle condizioni climatiche oppure all'approssimarsi delle ore più calde della giornata: in questi casi, può capitare di oltrepassare il limite superiore dello scostamento ammissibile, poiché la valvola a tre vie non riesce ad operare in maniera altrettanto rapida.

In tutti questi casi, l'operatore, che è in grado di monitorare lo stato del sistema nella sua globalità rispetto al controllore della valvola a tre vie (quest'ultima infatti si regola attraverso due sole misure di temperatura, all'uscita del serbatoio di accumulo e all'uscita del dry cooler), può gestire manualmente l'apertura della valvola assicurando il contenimento delle oscillazioni della temperatura di set point.



Figura 13. Computer Emerson "Einstein"

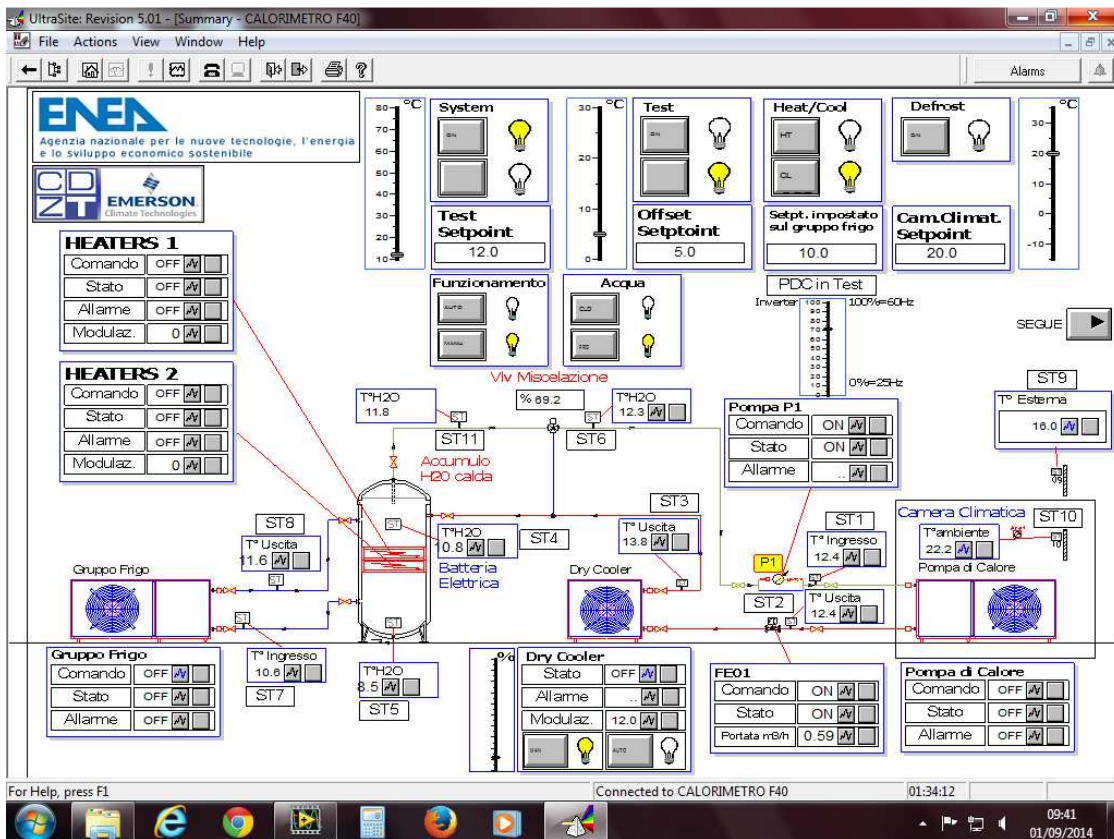


Figura 14. Schermata del Software di controllo dell'anello idronico

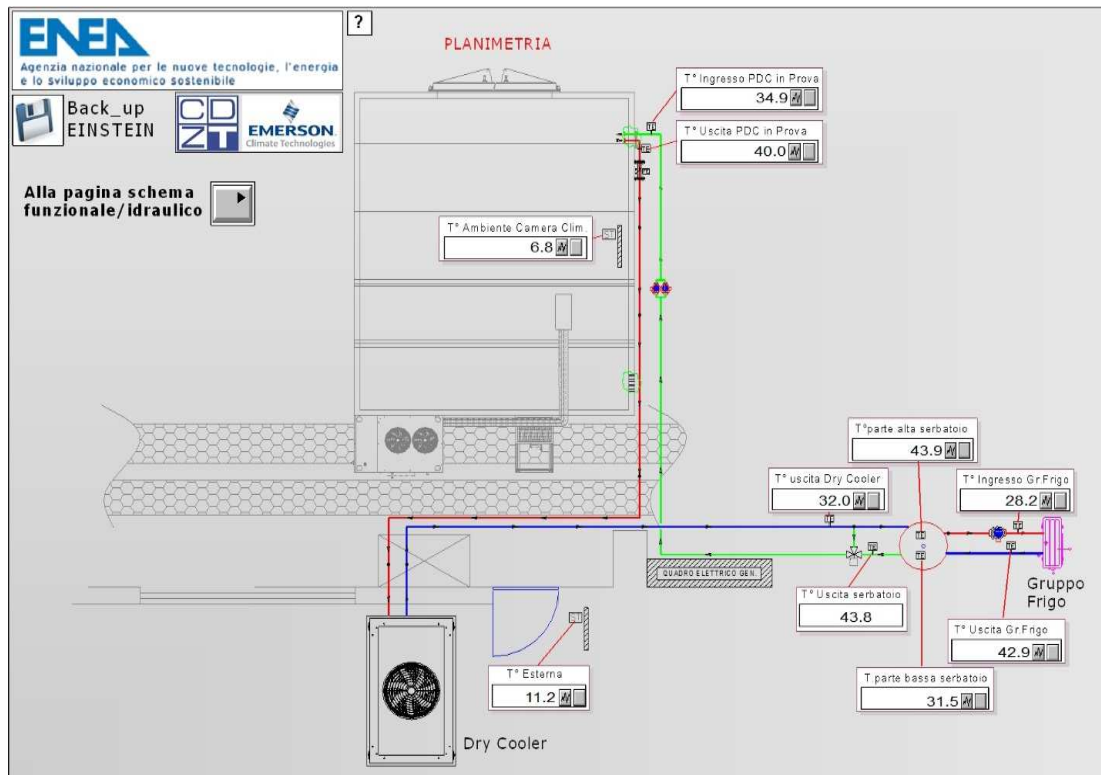


Figura 15. Schermata del Software di controllo con layout dell'impianto "Calorimetro ENEA"

Tutti i componenti, compresa la camera climatica, sono connessi alla rete LAN Enea; ogni dispositivo dispone quindi di un proprio indirizzo IP ed è possibile collegarsi ad esso da qualsiasi punto della Casaccia od eventualmente, previa autorizzazione, da postazioni esterne al C. R. Casaccia. Il punto di forza di un tale sistema è proprio la possibilità di controllarlo in modo completo da remoto. E' chiaro però che la presenza sul posto dell'operatore è necessaria e fondamentale in quanto, in caso di rotture meccaniche di componenti del "Calorimetro ENEA" o della macchina in test stessa, si deve provvedere a mettere in sicurezza e circoscrivere tutta la zona in cui è collocato l'impianto (si pensi ad esempio ad eventuali rotture sulla macchina ad R290 con conseguente perdita di refrigerante).

2.1.3 Macchina in test e strumentazione

Per questa attività sono state testate due macchine, impiantisticamente identiche (a parte il compressore), assemblate dalla ENEX, che utilizzano come refrigeranti l'R134a e l'R290 (fig.16). I principali componenti delle macchine sono:

- un compressore semiermetico alternativo della DORIN (quello utilizzato per la macchina a R290 progettato in accordo ai requisiti di sicurezza previsti per l'uso in zona classificata per presenza di gas infiammabili);
- uno scambiatore alettato, che funziona da condensatore in modalità frigorifera e da evaporatore in modalità pompa di calore;
- uno scambiatore a piastre, che funziona da evaporatore in modalità frigorifera e da condensatore in modalità pompa di calore;
- uno scambiatore interno a tubi concentrici;
- una valvola elettronica come organo di laminazione;
- due ricevitori di liquido, in uscita all'evaporatore e al condensatore;
- un separatore di olio.



Figura 16. I due prototipi installati in camera climatica (a destra la macchina a R290)

Gli schemi circuitali delle due macchine sono riportati in figura 17 (dove è indicato il percorso del fluido refrigerante quando la macchina lavora in modalità riscaldamento) e in fig. 18 (modalità di raffreddamento).

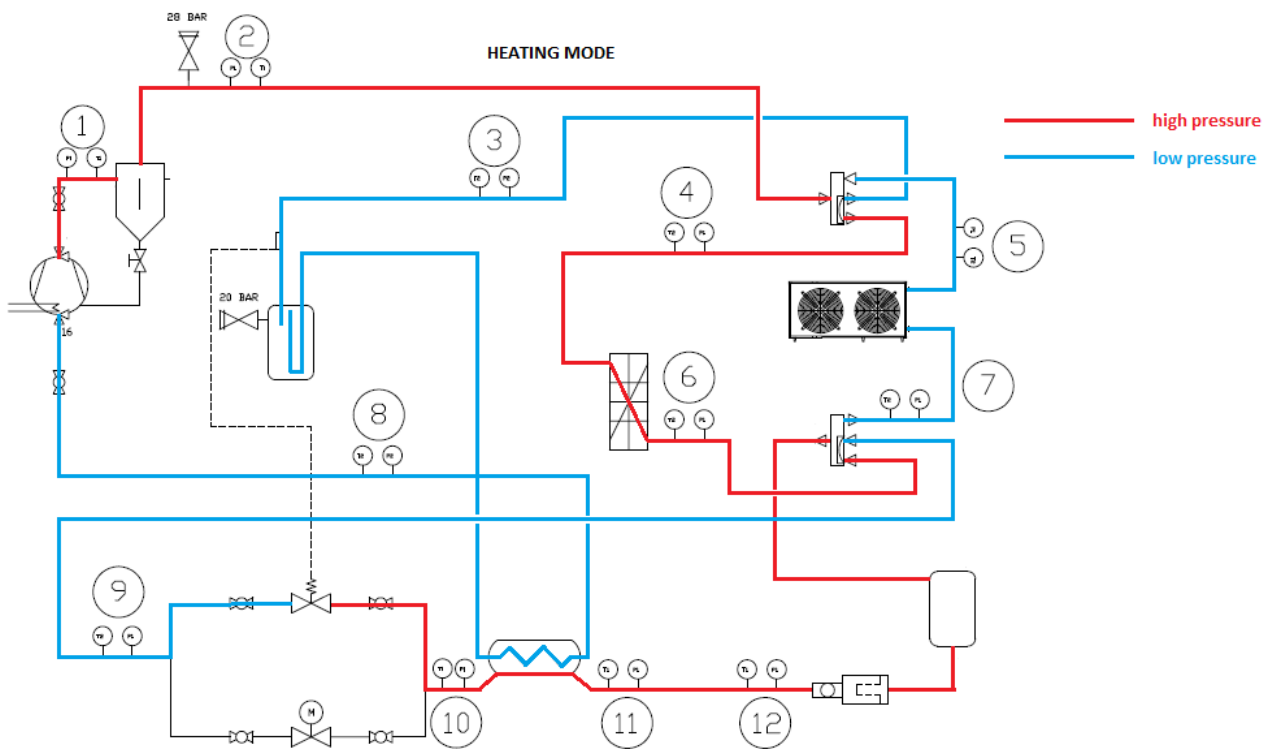


Figura 17. Schema circuitale prototipi in funzionamento pompa di calore

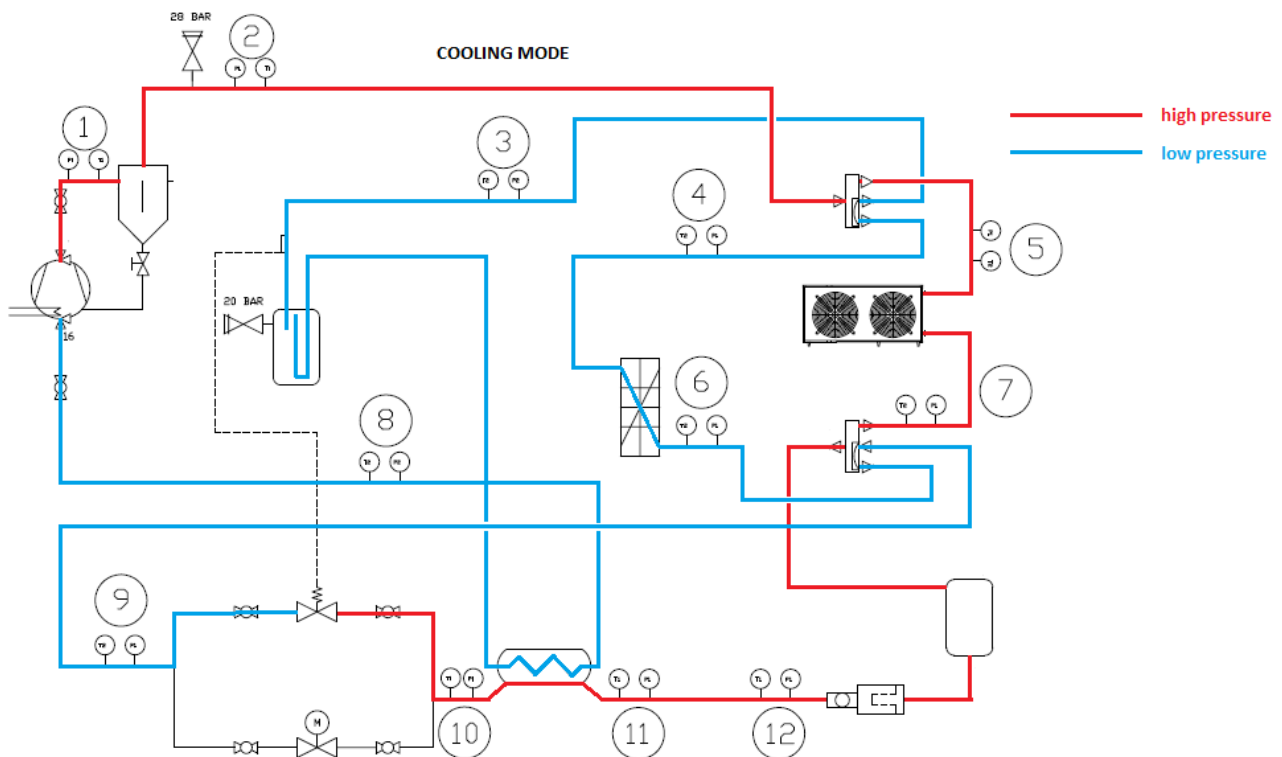


Figura 18. Schema circuitale prototipi in funzione raffreddamento

Per quanto riguarda la strumentazione, si è provveduto ad installare la strumentazione, uguale nei due casi, riassunta in tabella 2.

Essa riassume sinteticamente tutta la catena di misura predisposta dal personale ENEA, dal sensore di misura al sistema di acquisizione, realizzato con hardware della National Instruments: in particolare, la seconda colonna riporta la posizione del modulo all'interno dello chassis della National Instruments, la terza colonna il tipo di modulo al quale giungono i segnali provenienti dai sensori di misura e nella quarta colonna il canale occupato nel modulo dalla misura indicata.

Per quanto riguarda i sensori, per le misure delle pressioni sono stati utilizzati dei trasmettitori GE DRUCK serie PTX 600 (in figura 19 sono visibili alcuni trasmettitori di pressione installati sul prototipo a R290). In accordo a quanto richiesto dalla norma UNI EN 14511-parte terza si è provveduto all'utilizzo di termocoppie di tipo K e di tipo J e di misuratori di pressione caratterizzati da un'elevata accuratezza (tabelle 3 e 4), posizionandoli all'ingresso e all'uscita di ogni componente e di un misuratore di portata volumetrica lato acqua per il calcolo delle varie grandezze dirette ed indirette.

Tabella 2. Strumentazione- Sintesi della catena di misura

N	Id. Dev. cDAQ1	Dev. Type	Canale	Nome	Grandezza	Unità misura	Range Grandezza	Tipo Sensore	Posizione in fig.15 (14)
0	Mod1	NI-9213	ai7	TiCP	Temp. in Compressore	°C	0 80	TC CR/AL(J)	8
1	Mod2	NI-9213	ai0	ToCP	Temp. out Compressore	°C	40 100	TC CR/AL(K)	1
2	Mod2	NI-9213	ai1	ToSEPo	Temp. out Separatore olio	°C	40 100	TC CR/AL(K)	2
3	Mod1	NI-9213	ai0	TiSCa_ToSCa	Temp. in condensatore	°C	-10 100	TC CR/AL(J)	5
4	Mod1	NI-9213	ai1	ToSCa/TiSCa	Temp. out condensatore	°C	-10 40	TC CR/AL(J)	7
5	Mod2	NI-9213	ai2	ToRICI	Temp. out Ricev. Liquido	°C	10 80	TC CR/AL(K)	12
6	Mod2	NI-9213	ai3	TiSOTTc	Temp. in filtro	°C	10 80	TC CR/AL(K)	11
7	Mod2	NI-9213	ai4	TiEEV	Temp. in valvola (EEV o TEV)	°C	10 80	TC FE/CO(K)	10
8	Mod1	NI-9213	ai2	ToEEV	Temp. out valvola (EEV o TEV)	°C	-40 40	TC FE/CO(J)	9
9	Mod1	NI-9213	ai3	TiSCI/ToSCI	Temp. in evaporatore	°C	-40 30	TC FE/CO(J)	6
10	Mod1	NI-9213	ai4	ToSCI/TiSCI	Temp. out evaporatore	°C	0 40	TC FE/CO(J)	4
11	Mod1	NI-9213	ai5	TiSEPI	Temp. in Separatore LIQ	°C	0 40	TC FE/CO(J)	3
12	Mod2	NI-9213	ai5	TiSC_W	Temp. in SC H ₂ O	°C	15 80	TC CR/AL(K)	
13	Mod2	NI-9213	ai6	TuSC_W	Temp. out SC H ₂ O	°C	5 80	TC CR/AL(K)	
14	Mod1	NI-9213	ai6	Tambiente	Temp. ambiente	°C	-10 40	TC CR/AL(J)	
15	Mod3	NI-9205	ai0	piCP	Press. in Compressore	bar	0 10	TRASMETT.	8
16	Mod3	NI-9205	ai1	poCP	Press. out Compressore	bar	10 40	TRASMETT.	1
17	Mod3	NI-9205	ai2	poSEPo	Press. out Separatore olio	bar	10 40	TRASMETT.	2
18	Mod3	NI-9205	ai3	piSCa_poSCa	Press. in condensatore	bar	0 40	TRASMETT.	5
19	Mod3	NI-9205	ai4	poSCa/piSCa	Press. out condensatore	bar	0 40	TRASMETT.	7
20	Mod3	NI-9205	ai5	poRICI	Press. out Ricev. Liquido	bar	10 40	TRASMETT.	12
21	Mod3	NI-9205	ai6	piSOTTc	Press. in filtro	bar	10 40	TRASMETT.	11
22	Mod3	NI-9206	ai7	piEEV	Press. in valvola (EEV o TEV)	bar	11 40	TRASMETT.	10
23	Mod3	NI-9205	ai16	poEEV	Press. out valvola (EEV o TEV)	bar	0 10	TRASMETT.	9
24	Mod3	NI-9205	ai17	piSCI/poSCI	Press. in EV	bar	0 40	TRASMETT.	6
25	Mod3	NI-9205	ai18	poSCI/piSCI	Press. out EV	bar	0 40	TRASMETT.	4
26	Mod3	NI-9205	ai19	piSEPI	Press. in Separatore LIQ	bar	0 10	TRASMETT.	3
27	Mod4	NI-9205	ai1	W	potenza assorbita	kW	0 25	wattmetro	
28	Mod4	NI-9205	ai2	G_Water	Portata acqua	kg/h	0-1200	TRASMETT.	



Figura 19. Misuratori di pressione GE Druck PTX montati sulla macchina in prova

Tabella 3. Caratteristiche sensori di pressione

Campo	0-60/0-100/0-160 bar
Accuratezza	0.08% del fondo scala
Intervallo di taratura	0 – 680 bar
Temperature di esercizio	-20 – 200 °C

Tabella 4. 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	± 0.4 % della lettura	± 0.4 % della lettura



Figura 20. Termocoppie di tipo K (a sinistra) e Termocoppie tipo J (a destra) installate lato refrigerante

Per quanto riguarda le termocoppie, lato refrigerante sono state fissate sulla superficie esterna dei tubi del circuito sia per ragioni di praticità, sia per ridurre le possibili sedi di perdita del refrigerante stesso (fig. 20). Sul circuito acqua invece si è provveduto ad installare le termocoppie all'interno dei tubi stessi e il più vicino possibile allo scambiatore a piastre, in modo da avere una maggiore affidabilità della misura (fig. 21).



Figura 21. Termocoppie di tipo K inserite all'interno dei tubi, lato acqua



Figura 22. Misuratori di portata installati lato acqua, Krohne optiflux 5000 a sinistra e Rosemount 8732E a destra

Per le misure di portata, sono stati installati due misuratori di portata di tipo elettromagnetico (fig. 22). Il misuratore di portata Krohne optiflux 5000 è stato alloggiato all'interno della camera e la sua misura è avviata al sistema di acquisizione Labview, per il calcolo delle prestazioni della macchina (COP o EER) e per il monitoraggio della stabilità di funzionamento della macchina in test. Il misuratore di portata Rosemount 8732E, anch'esso di tipo elettromagnetico, è collegato al software UltraSite32, per consentire una corretta gestione del loop idronico anche sotto il profilo della sicurezza operativa (il software ad esempio procede allo spegnimento della macchina in test nel caso di portata elaborata troppo bassa). La tabella 5 indica le principali caratteristiche del misuratore Krohne optiflux 5000.

Tabella 5. 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 utilizza il software Labview con il quale, una volta avviata la pompa di calore, è possibile registrare i dati sperimentali con programmi realizzati su misura per ogni macchina in test (figura 23, 24, 25). Attraverso tale software si monitora l'andamento delle grandezze termodinamiche in modo da verificare il raggiungimento di condizioni di stazionarietà (figura 26). Inoltre consente di controllare, che durante l'acquisizione dei dati, le oscillazioni delle grandezze misurate si mantengano entro gli scostamenti ammissibili (rispetto ai valori desiderati) indicati nel prospetto 4 della norma UNI EN 14511 parte 3 (figura 27).

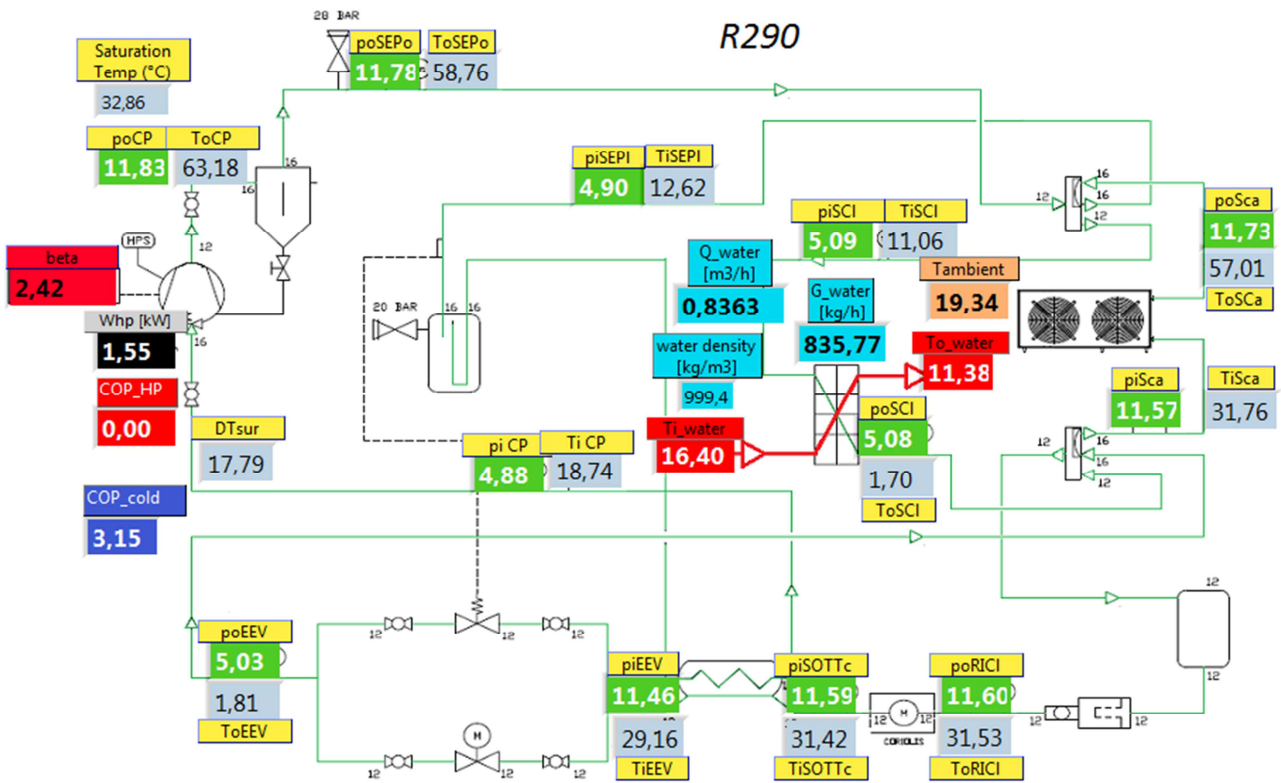


Figura 23. Schermata del Sistema di acquisizione Labview

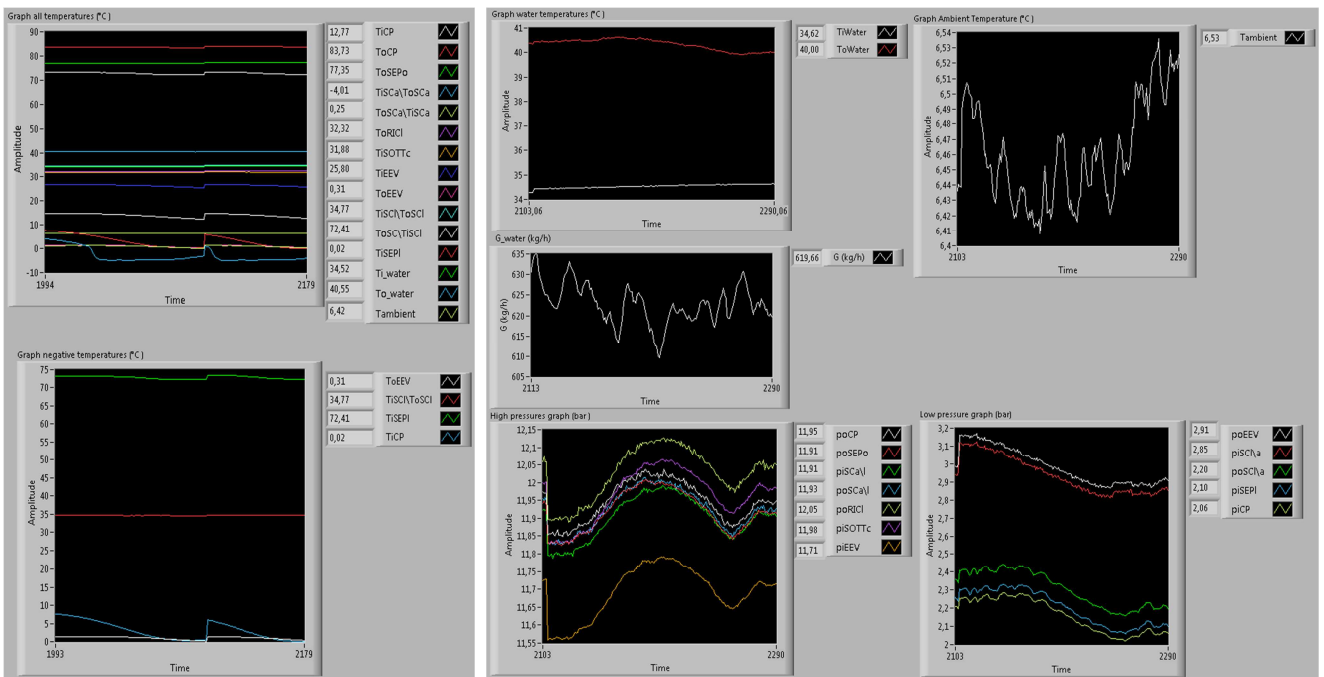


Figura 24. Andamenti dei parametri termodinamici visualizzati durante l'esecuzione di una prova tramite il programma realizzato in Labview

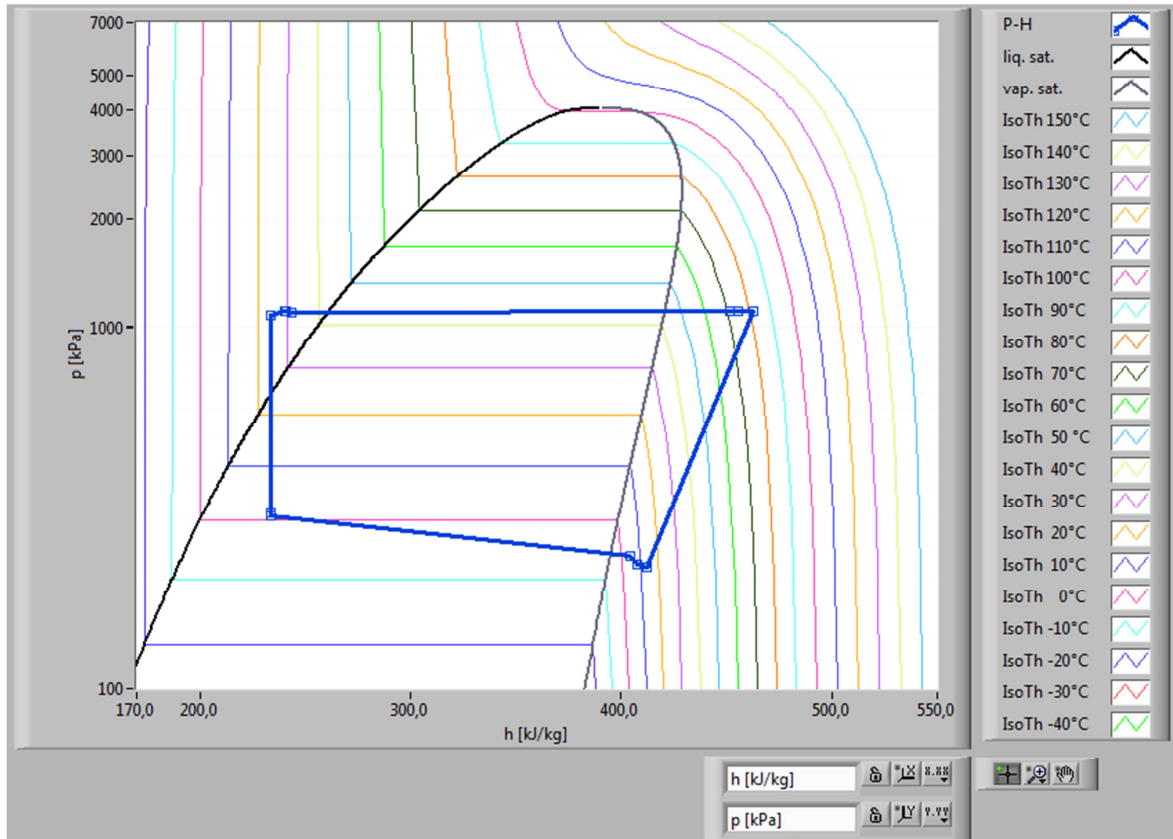


Figura 25. Diagramma p-h visualizzato in Labview durante l'esecuzione di una prova

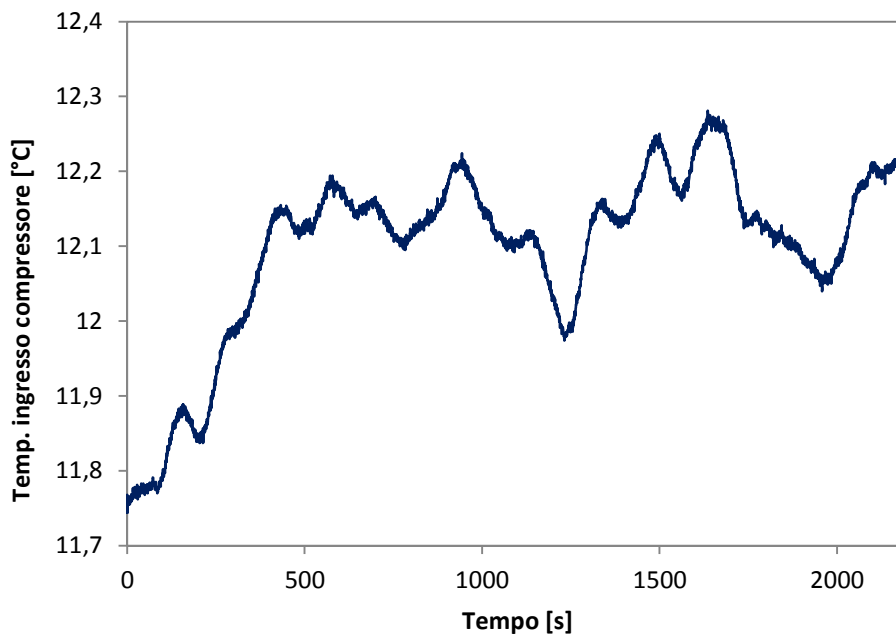


Figura 26. Tipico andamento di una fase di stabilizzazione delle condizioni termodinamiche della macchina in prova

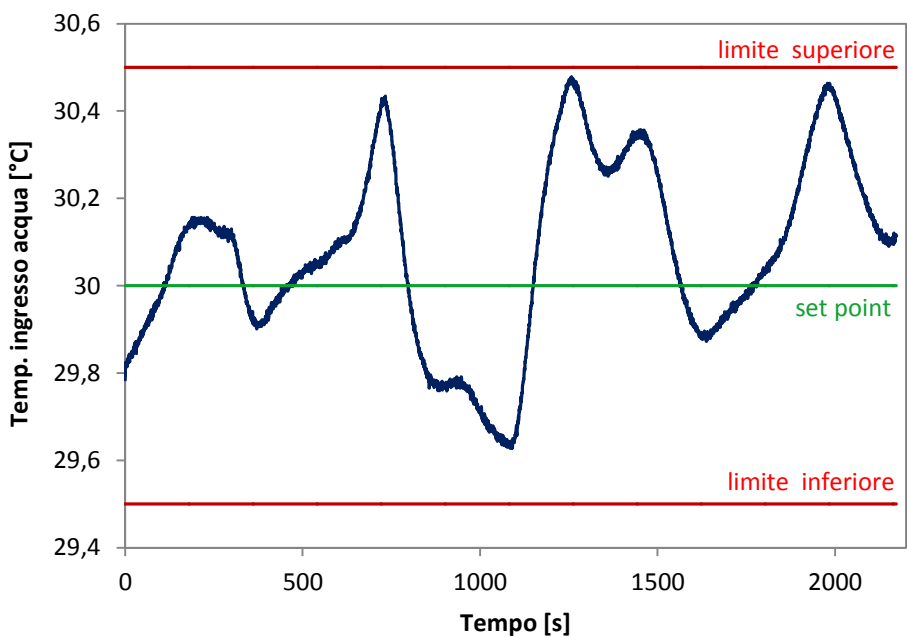


Figura 27. Tipica fluttuazione di una variabile controllata (temperatura dell’acqua in ingresso alla macchina) entro i valori richiesti dalla normativa

2.1.4 Strumentazione di sicurezza per i test con la macchina a R290

Per effettuare i test sulla macchina a R290, la camera climatica è stata appositamente attrezzata con un sistema di sensori per la rilevazione e la segnalazione delle perdite di refrigerante di cui si riporta lo schema d’impianto (figura 28). Tale sistema è così composto:

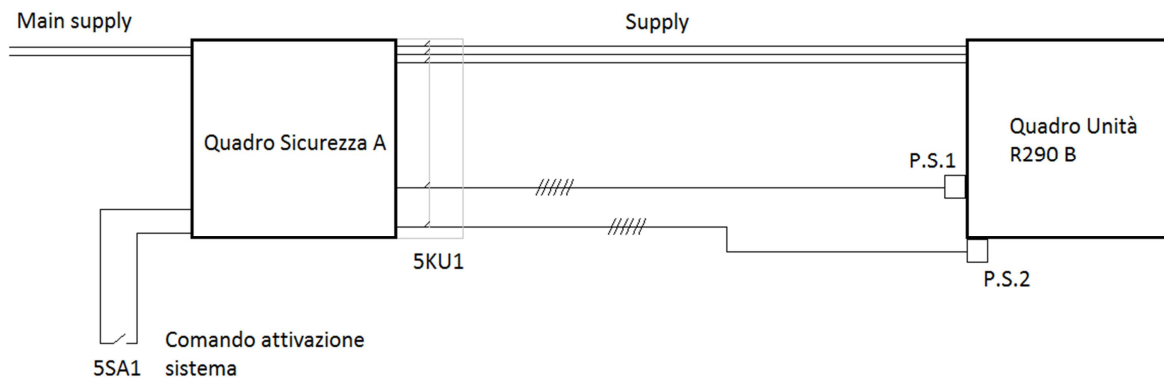


Figura 28. Schema della catena di sicurezza per i test con la macchina a R290

- Quadro di sicurezza A, collocato all’esterno della camera climatica (fig. 29);
- due sensori Eliwell LKD a semiconduttore;
- Quadro Unità B, collocato a bordo della macchina in prova all’interno della camera climatica.

I sensori Eliwell LKD a semiconduttore (compatibili con il regolamento F-GAS - CE 842/2006 e la normativa UNI EN378) rappresentano lo stato dell'arte dei rilevatori di gas e possono rilevare la fuga di un ampio range di refrigeranti (R134a, R404a, NH3, R290, R600a, CO2). I rilevatori sono stati installati all'interno della camera climatica a bordo della macchina in prova, posizionati a diverse altezze (a bordo quadro elettrico e lato compressore, figura 30). Tali sensori, integrati all'interno di un sistema di gestione remoto Eliwell, collocato nel quadro di sicurezza A, permettono la rilevazione di una concentrazione di gas oltre il limite pre-impostato generando l'invio di un segnale di allarme e l'attivazione in locale di una segnalazione acustica e visiva. I rilevatori di gas LKD permettono quindi un rilievo tempestivo delle perdite di gas riducendo il rischio di ulteriori conseguenze negative (quali saturazione di locali, scoppio di incendi, etc). Per l'avviamento della catena di sicurezza, dopo aver controllato con un rilevatore di gas (R290) portatile oppure con un rilevatore ATEX da muro che non vi siano tracce di propano nell'ambiente da controllare (nel nostro caso l'ambiente all'interno della camera climatica), si procede ad attivare il quadro di sicurezza A, chiudendo il contatto 5SA1. Dopo 5 minuti, in assenza di rilevazioni di perdite, viene consentita l'alimentazione del quadro B.

Nel caso di intervento dei sensori di propano viene tolta l'alimentazione a tutto il quadro B (a bordo macchina) ed ai due sensori P.S.1 e P.S.2 (fig. 28). Il sistema di gestione di tutto l'impianto provvede poi a togliere l'alimentazione elettrica a tutte le apparecchiature dell'impianto.



Figura 29. Quadro di sicurezza A, collocato all'esterno della camera climatica

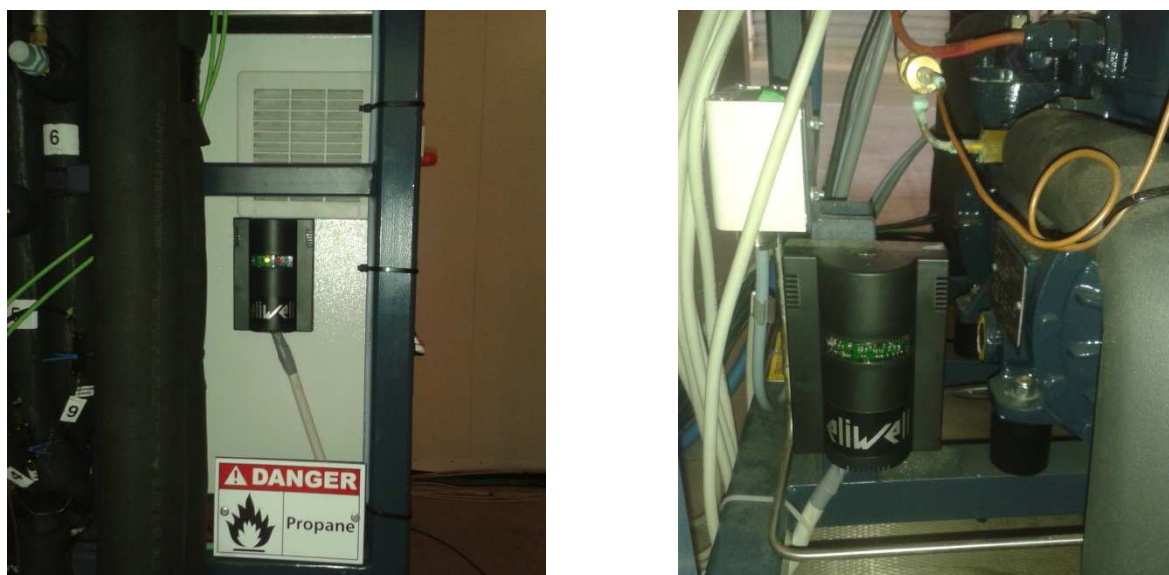


Figura 30. Sensori Eliwell a bordo quadro elettrico e lato compressore

2.2 Metodologia di prova e fase di acquisizione dei dati

La norma UNI-EN 14511 parte terza prevede che i test vadano eseguiti in tre fasi distinte: un periodo di condizionamento, un periodo di equilibrio e un periodo di raccolta dei dati. La durata della raccolta dei dati differisce a seconda del fatto che il funzionamento della pompa di calore sia in condizioni stabili o transitorie. In particolare, le tre fasi devono avere le seguenti caratteristiche:

- **Periodo di condizionamento**

L'apparecchiatura di ricondizionamento della camera di prova e la pompa di calore sottoposta a prova devono essere azionate sino a ottenere le tolleranze di prova specificate nel prospetto 4 della norma (sinteticamente richiamata in tabella 6) per almeno 10 minuti.

- **Periodo di equilibrio**

Il periodo di equilibrio segue immediatamente il condizionamento e un periodo di recupero di 10 minuti che conclude il condizionamento. Un periodo di equilibrio completo ha una durata di un'ora. In questo periodo, a parte i test eseguiti in condizioni transitorie, la pompa di calore deve essere azionata nel rispetto delle tolleranze di prova specificate nel prospetto 4 della norma.

- **Periodo di raccolta dati**

Il periodo di raccolta dei dati segue immediatamente il periodo di equilibrio e ha una durata di almeno 70 minuti. I dati devono essere campionati a intervalli uniformi che si estendono ogni 30 s o meno, fatta eccezione per i cicli di sbrinamento. Durante i cicli di sbrinamento, più i primi 10 minuti che seguono la fine dello sbrinamento, i dati devono essere campionati con maggiore frequenza, a intervalli uniformi ogni 10 secondi o meno.

Per quanto riguarda la singola misura, le fluttuazioni periodiche delle grandezze misurate provocate dal funzionamento dei dispositivi di regolazione e controllo sono ammissibili, a condizione che sia il singolo valore sia il valore medio della misura nell'intervallo di acquisizione non sia maggiore degli scostamenti indicati nel prospetto 4 della norma.

Tabella 6. Scostamenti ammissibili dai valori impostati tratta dal prospetto 4 della norma UNI-EN 14511 parte terza

Grandezza misurata	Scostamenti ammissibili dei valori di media aritmetica dai valori impostati	Scostamenti ammissibili di ciascuno dei valori misurati dai valori impostati
Liquidi		
- Temperatura in entrata	$\pm 0,2$ K	$\pm 0,5$ K
- Temperatura in uscita	$\pm 0,3$ K	$\pm 0,6$ K
- Portata volumetrica	$\pm 1\%$	$\pm 2,5\%$
Aria		
- Temperatura in entrata	$\pm 0,3$ K	± 1 K

2.3 Matrice di prova secondo le normative UNI-EN 14511 parte seconda e UNI-EN 14825

La matrice di prova è stata determinata in accordo alle normative di riferimento per il test di pompe di calore (UNI EN 14511-parte seconda e UNI EN 14825:2013).

La norma UNI EN 14511-parte seconda definisce le condizioni di prova per il test di refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento degli ambienti. Per le nostre macchine aria-acqua, si è fatto riferimento ai prospetti 12 e 13 (test in modalità riscaldamento a bassa e media temperatura) e al prospetto 16 (test in modalità raffreddamento).

I tre prospetti indicati sono riportati sinteticamente nelle successive tabelle 7, 8 e 9. Nelle colonne in grigio, è riportato il numero progressivo del test effettivamente realizzato, rintracciabile poi nelle tabelle indicate (la prima indicazione si riferisce all'R134a e la seconda all'R290), inserite nel paragrafo successivo. Si noti che, in alcuni casi lo stesso test è stato eseguito con tre diverse frequenze dell'inverter del compressore (40, 50 e 60Hz).

Tabella 7. Test in accordo alla norma UNI-EN 14511-2 Unità aria/acqua

Modalità di riscaldamento (basse temperature)

	Scambiatore di calore esterno	Scambiatore di calore interno Applicazioni a bassa temperatura		R134a: tabella 11 R290: tabella 14		
	Aria esterna - Temperatura di bulbo secco d'ingresso [°C]	Temperatura d'ingresso [°C]	Temperatura d'uscita [°C]	N test ENEA (50HZ)	N test ENEA (60HZ)	N test ENEA (40HZ)
Condizioni di valutazione normalizzate	7	30	35	1	6	11
Condizioni di valutazione dell'applicazione	2	a)	35	2	7	12 (solo R134a)
	-7	a)	35	3	8 (solo R290)	13 (solo R134a)
	-15	a)	35	4	9	14 (solo R134a)
	12	a)	35	5	10	15 (solo R134a)
a) Prova effettuata alla portata ottenuta durante la prova alle condizioni normalizzate						

Tabella 8. Test in accordo alla norma UNI-EN 14511-2 Unità aria/acqua

Modalità di riscaldamento (medie temperature)

	Scambiatore di calore esterno	Scambiatore di calore interno Applicazioni a media temperatura		R134a: tabella 12 R290: tabella 15		
	Aria esterna - Temperatura di bulbo secco d'ingresso [°C]	Temperatura d'ingresso [°C]	Temperatura d'uscita [°C]	N test ENEA (50HZ)	N test ENEA (60HZ)	N test ENEA (40HZ)
Condizioni di valutazione normalizzate	7	40	45	16	21	26
Condizioni di valutazione dell'applicazione	2	a)	45	17	22	-
	-7	a)	45	18	23	27 (solo R134a)
	-15	a)	45	19	24	28 (solo R134a)
	12	a)	45	20	25	29 (solo R134a)
a) Prova effettuata alla portata ottenuta durante la prova alle condizioni normalizzate						

Tabella 9. Test in accordo alla norma UNI-EN 14511-2 Unità aria/acqua – Modalità di raffreddamento

	Scambiatore di calore esterno	Scambiatore di calore interno		R134a: tabella 13 R290: tabella 16
	Aria esterna - Temperatura di bulbo secco d'ingresso [°C]	Temperatura d'ingresso [°C]	Temperatura d'uscita[°C]	N test ENEA (50HZ)
Condizioni di valutazione normalizzate	35	12	7	30
	35	23	18	31
Condizioni di valutazione dell'applicazione	27	a)	7	32
	27	a)	18	33
a) Prova effettuata alla portata ottenuta durante la prova alle condizioni normalizzate				

La norma UNI EN 14825 definisce le condizioni di prova per la valutazione delle prestazioni a carico parziale e per il calcolo del rendimento stagionale.

Per la valutazione dello SCOP in macchine aria-acqua, si deve far riferimento alle tabelle 12-17 della norma. I test in condizioni “fixed outlet” riportati in queste tabelle corrispondono comunque a quelli già condotti in accordo alla norma 14511 parte seconda, per cui non sono stati realizzati altri test.

Per la valutazione del SEER sono invece richiesti i test riportati nella tabella 4 della norma stessa. La tabella 10 è una sintesi della tabella 4 della norma e riporta, nelle colonne in grigio, il numero progressivo del test effettivamente realizzato, rintracciabile poi nelle tabelle indicate tra parentesi, inserite nel paragrafo successivo. In questo caso i test sono stati effettuati impostando la frequenza di rotazione del compressore a 50Hz.

Tabella 10. Test per la valutazione del SEER in accordo alla tabella 4 della norma UNI-EN 14825

Part load ratio	Part load ratio	Outdoor heat exchanger	Indoor heat exchanger			
		Air dry bulb temperature	Fan coil application Inlet/outlet water temperatures			
	%	°C	Fixed outlet	N test ENEA (tab. 13/16)	Variable outlet	N test ENEA (tab.13/16)
(35-16)/(Tdesignc-16)	100	35	12/7	30	12/7	30
(30-16)/(Tdesignc-16)	74	30	a/7	34	a/8.5	37
(25-16)/(Tdesignc-16)	47	25	a/7	35	a/10	38
(20-16)/(Tdesignc-16)	21	20	a/7	36	a/11.5	39
a- I test “fixed outlet” sono eseguiti alla portata definita nel test a carico totale, quelli “variable outlet” sono eseguiti a ΔT costante, pari a 5°C						

2.4 Risultati sperimentali

Nel presente paragrafo sono riportate alcune tabelle con le grandezze più significative acquisite per ogni test realizzato, prima per i test sulla macchina a R134a e poi su quella a R290.

A loro volta, i test sono stati suddivisi in base alla frequenza del compressore.

Nella prima colonna delle tabelle qui proposte, è possibile rintracciare il numero d'ordine inserito nelle precedenti tabelle 7-10.

Ogni prova è stata considerata stabile quando tutte le grandezze misurate si sono mantenute entro gli scostamenti ammissibili dai valori impostati, riportati nel prospetto 4 della stessa normativa.

Per il prototipo a R134a, sono state testate 29 condizioni di funzionamento in regime invernale, con $T_{in,w}$ comprese tra 30 e 40 °C, $T_{out,w}$ comprese tra 35 e 45 °C, per differenti temperature della camera climatica, T_{cc} , comprese tra -15 e 12 °C, e per differenti frequenze del compressore, f_{comp} , pari a 40, 50 e 60 Hz. In modalità macchina frigorifera, invece, le diverse condizioni di funzionamento sono state 12, con $T_{in,w}$ comprese tra 12 e 23 °C, $T_{out,w}$ comprese tra 7 e 18 °C, per differenti temperature della camera climatica, T_{cc} , comprese tra 20 e 35 °C, e per una frequenze del compressore, f_{comp} , pari a 50 Hz. Per il prototipo a propano sono state eseguite le stesse prove ad eccezione di quelle a 40 Hz.

2.4.1 Risultati sperimentali sulla macchina a R134a in modalità riscaldamento

Tabella 11. Risultati dei test per la valutazione delle prestazioni - Modalità di riscaldamento (basse temperature)

N	Nome test	Freq. Hz	ToCP °C	ToEEV °C	Tin,w °C	Tout,w °C	Tamb °C	piCP bar	poCP bar	L _{el} kW	Gw m3/h	COP -	Qco kW
1	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	78.53	0.34	30.20	35.01	6.59	2.37	12.04	1.63	0.70	2.39	3.90
2	Tout_35_G700_Tcc2	50	78.30	-4.00	31.20	35.08	1.81	2.03	11.70	1.51	0.69	2.06	3.11
3	Tout_35_G700_Tcc-7	50	75.84	-11.58	32.39	34.89	-7.09	1.49	11.16	1.35	0.71	1.51	2.04
4	Tout_35_G700_Tcc-15	50	70.59	-18.67	33.48	35.08	-15.02	1.07	10.17	1.22	0.70	1.06	1.29
5	Tout_35_G700_Tcc12	50	82.08	3.70	29.41	35.07	11.73	2.68	13.14	1.73	0.70	2.63	4.56
6	Tin_30_Tout_35_Tcc7	60	78.47	0.33	30.09	35.08	6.85	2.19	10.73	1.75	0.76	2.50	4.38
7	Tout_35_G770_Tcc2	60	80.63	-3.84	30.81	34.91	1.85	1.88	10.88	1.63	0.76	2.21	3.61
9	Tout_35_G770_Tcc-15	60	75.94	-18.20	32.95	34.71	-15.11	1.04	10.13	1.31	0.76	1.19	1.55
9a	Tout_35_G770_Tcc-15	60	69.83	-18.79	33.67	35.14	-15.06	1.09	11.52	1.35	0.76	0.96	1.30
10	Tout_35_G770_Tcc12	60	77.61	3.67	29.07	34.95	11.71	2.45	10.87	1.80	0.76	2.88	5.16
11	Tin_30_Tout_35_Tcc7	40	72.52	-0.19	29.83	34.86	6.79	2.49	11.22	1.38	0.57	2.41	3.33
12	Tout_35_G570_Tcc2	40	74.30	-4.08	30.99	35.05	1.91	2.17	11.39	1.34	0.57	2.01	2.69
13	Tout_35_G570_Tcc-7	40	71.63	-12.22	32.70	35.13	-7.03	1.58	11.57	1.20	0.57	1.34	1.61
14	Tout_35_G700_T-15	40	65.56	-18.77	34.01	35.19	-14.87	1.14	10.11	1.06	0.70	0.90	0.95
15	Tout_35_G572_Tcc12	40	71.80	3.62	29.03	35.10	11.78	2.83	11.22	1.44	0.57	2.78	4.00

Tabella 12. Risultati dei test per la valutazione delle prestazioni - Modalità di riscaldamento (medie temperature)

N	Nome test	Freq.	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	COP	Q _{co}
		Hz	°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-	kW
16	Tin_40_Tout_45_Tcc7	50	90.17	0.99	40.04	45.18	6.78	2.44	15.16	1.73	0.60	2.04	3.53
17	Tout_45_G595_Tcc2	50	92.06	-3.24	40.95	45.01	1.81	2.12	15.60	1.62	0.60	1.72	2.79
17a	Tout_45_G595_Tcc2	50	91.36	-2.97	40.94	45.05	1.82	2.13	15.56	1.61	0.60	1.75	2.83
18	Tout_45_G595_Tcc-7	50	86.87	-11.24	42.51	45.05	-7.11	1.56	14.52	1.42	0.60	1.23	1.75
19	Tout_45_G595_Tcc-15	50	77.48	-18.29	43.48	45.01	-15.22	1.12	12.67	1.22	0.60	0.86	1.05
20	Tout_45_G595_Tcc12	50	90.32	4.88	38.70	44.92	11.85	2.79	15.83	1.87	0.60	2.30	4.30
21	Tin_40_Tout_45_Tcc7	60	88.65	1.44	39.99	45.03	6.86	2.29	13.33	1.87	0.71	2.19	4.09
22	Tout_45_G700_Tcc2	60	89.93	-2.32	40.83	45.04	1.78	2.00	13.58	1.77	0.71	1.94	3.42
23	Tout_45_G700_Tcc-7	60	88.48	-10.58	42.48	45.08	-7.32	1.50	13.39	1.48	0.71	1.43	2.12
24	Tout_45_G700_Tcc-15	60	79.60	-17.74	43.58	44.97	-15.07	1.17	14.42	1.37	0.71	0.82	1.13
25	Tout_45_G700_Tcc12	60	87.59	5.15	39.04	45.04	11.70	2.58	13.49	1.99	0.71	2.45	4.87
26	Tin_40_Tout_45_Tcc7	40	82.11	0.95	39.89	44.93	6.87	2.57	13.22	1.45	0.53	2.14	3.10
27	Tout_45_G533_Tcc-7	40	79.03	-11.41	42.93	45.01	-7.02	1.70	14.38	1.27	0.53	0.99	1.27
28	Tout_45_G533_Tcc-15	40	62.39	-19.96	44.36	45.01	-15.03	1.19	14.32	1.12	0.54	0.36	0.40
29	Tout_45_G530_Tcc12	40	82.13	4.77	38.98	45.10	11.79	2.94	14.07	1.56	0.53	2.38	3.71

2.4.2 Risultati sperimentali sulla macchina a R134a in modalità raffreddamento

Tutti i test in modalità raffreddamento sono stati eseguiti con la frequenza del compressore fissata a 50Hz.

Tabella 13. Risultati dei test per la valutazione delle prestazioni - Modalità di raffreddamento

N	Nome test	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	EER	Q _{EV}
		°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-	kW
30	Tin12_Tout7_Tcc35	92.71	0.32	12.04	7.05	34.62	2.77	14.27	1.79	0.59	1.91	3.43
31	Tin23_Tout18_Tcc35	92.24	9.42	23.21	18.17	35.00	3.85	16.32	2.14	0.85	2.34	5.01
32	Tout7_G590_Tcc27	82.95	-0.72	12.54	7.09	26.86	2.67	12.15	1.70	0.59	2.19	3.73
33	Tout18_G850_Tcc27	80.70	7.96	23.62	18.12	27.27	3.66	13.12	1.95	0.85	2.78	5.43
33a	Tout18_G850_Tcc27	81.65	7.94	23.35	17.87	27.28	3.67	13.29	1.96	0.85	2.74	5.38
35	Tout7_G590_Tcc25	80.66	-0.90	12.67	7.17	24.94	2.67	11.67	1.69	0.59	2.26	3.80
36	Tout7_G590_Tcc20	75.00	-1.74	12.86	7.08	19.70	2.59	10.44	1.62	0.59	2.45	3.96
37	Tin13.5_Tout8.5_Tcc30	85.13	0.80	13.54	8.51	29.69	2.84	12.88	1.77	0.65	2.16	3.82
38	Tin15_Tout10_Tcc25	79.64	1.30	15.06	10.02	24.91	2.90	11.93	1.75	0.72	2.40	4.19
39	Tin16.5Tout11.5_Tcc20	72.84	1.92	16.56	11.55	19.87	2.96	10.70	1.70	0.80	2.73	4.65

2.4.3 Risultati sperimentali sulla macchina a R290 in modalità riscaldamento

Inizialmente i test in modalità riscaldamento sono stati eseguiti con carica della macchina a R290 pari a 1.1 kg. Dopo aver riscontrato che tale carica era bassa per l'esecuzione dei test alle temperature ambiente più basse (in particolare per i test a -7 e -15°C in modalità riscaldamento-medie temperature) in quanto si aveva un sottoraffreddamento in ingresso all'organo di laminazione troppo basso, si è deciso di aumentare la carica a 1.3kg. I test eseguiti fino a quel momento sono stati comunque ritenuti validi, in quanto, dopo

aver ripetuto qualche prova con la nuova carica, non sono state riscontrate apprezzabili variazioni dei parametri termodinamici e delle prestazioni della macchina.

Nella tabella che segue i test 1h, 6a e 11 sono stati eseguiti con carica 1.3kg.

Un altro problema che si è verificato durante l'esecuzione dei test ha riguardato il valore del surriscaldamento in uscita evaporatore. Questo parametro, controllato dal software a bordo macchina era stato impostato inizialmente a 11 °C. Successivamente sono stati eseguiti una serie di test variando questo parametro da 5°C a 11°C. A seguito di questi test comparativi si è deciso di fissare tale valore a 7.5 °C, che rappresenta un buon compromesso tra la stabilità di funzionamento, la sicurezza operativa e l'ottenimento delle migliori prestazioni. Nella tabella seguente le prove 1e, 1f e 5a sono state realizzate con surriscaldamento pari a 11°C, la prova 1b con surriscaldamento pari a 5°C, la prova 1a con surriscaldamento pari a 5.1°C, la prova 1d con surriscaldamento pari a 7°C e le restanti con surriscaldamento pari a 7.5 °C.

Tabella 14. Risultati dei test per la valutazione delle prestazioni - Modalità di riscaldamento (basse temperature)

N	Nome Test	Freq.	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	COP	Qco
			Hz	°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-
1	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	66.90	-0.68	30.00	34.98	7.02	4.22	12.45	1.59	0.70	2.54	4.03
1a	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	66.96	-1.10	30.43	35.26	6.98	4.17	12.53	1.61	0.71	2.47	3.98
1b	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	67.69	-1.60	30.17	35.03	6.96	4.11	12.45	1.61	0.71	2.47	3.96
1c	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	67.03	-1.18	30.08	35.04	7.09	4.15	12.44	1.60	0.70	2.50	4.01
1d	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	66.59	-0.95	29.91	34.80	6.97	4.19	12.41	1.59	0.71	2.52	3.99
1e	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	68.48	-1.72	30.05	35.09	7.03	4.09	12.47	1.64	0.70	2.51	4.10
1f	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	69.27	-1.35	30.22	35.17	6.95	4.14	12.49	1.61	0.70	2.48	4.00
1h	Tin_30_Tout_35_Tcc7	50	65.14	-0.65	29.98	35.25	7.04	4.22	12.55	1.58	0.70	2.70	4.25
2	Tout_35_G700_Tcc2	50	69.63	-4.88	30.75	34.94	2.08	3.70	12.42	1.58	0.70	2.16	3.41
3	Tout_35_G700_Tcc-7	50	71.40	-11.59	32.03	34.75	-6.80	2.97	12.38	1.46	0.70	1.52	2.21
4	Tout_35_G700_Tcc-15	50	75.59	-17.45	33.57	35.04	-14.77	2.38	12.50	1.39	0.70	0.85	1.19
5	Tout_35_G700_Tcc12	50	65.34	2.93	29.34	35.14	11.95	4.69	12.51	1.59	0.70	2.95	4.69
5a	Tout_35_G700_Tcc12	50	66.90	2.71	28.86	34.88	11.91	4.68	12.43	1.65	0.71	2.99	4.93
6	Tin_30_Tout_35_Tcc7	60	70.52	-1.13	30.04	35.06	7.05	4.05	12.52	1.85	0.79	2.48	4.59
6a	Tin_30_Tout_35_Tcc7	60	68.40	-1.12	29.97	35.18	7.02	4.04	12.59	1.84	0.79	2.59	4.76
7	Tout_35_G790_Tcc2	60	72.25	-4.52	30.95	35.14	2.07	3.66	12.53	1.79	0.80	2.15	3.85
8	Tout_35_G790_Tcc-7	60	75.46	-11.62	32.21	35.22	-6.81	2.86	12.55	1.71	0.79	1.60	2.75
9	Tout_35_G790_Tcc-15	60	79.15	-17.39	33.58	35.16	-14.77	2.33	12.55	1.57	0.79	0.93	1.46
10	Tout_35_G790_Tcc12	60	68.82	2.50	29.18	35.15	12.01	4.48	12.57	1.88	0.79	2.89	5.45
11	Tin_30_Tout_35_Tcc7	40	61.15	-0.26	30.04	35.12	7.02	4.41	12.46	1.34	0.59	2.60	3.47

Per le prove in modalità riscaldamento - media temperatura (tabella 15) le prove 16a, 18a, 19a, 21a, 23a, 24a e 26 sono state eseguite con carica 1.3 kg. Per quanto riguarda il surriscaldamento tutti questi test sono stati effettuati fissando questo parametro a 7.5 °C.

Tabella 15. Risultati dei test per la valutazione delle prestazioni - Modalità di riscaldamento (medie temperature)

N	Test	Freq.	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	COP	Q _{ev}
		Hz	°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-	kW
16	Tin_40_Tout_45_Tcc7	50	79.62	0.21	39.93	45.01	7.04	4.34	15.52	1.78	0.61	2.00	3.55
16a	Tin_40_Tout_45_Tcc7	50	79.02	-0.67	40.00	45.26	6.88	4.26	15.66	1.75	0.61	2.12	3.70
17	Tout_45_G613_Tcc2	50	81.44	-3.11	40.79	45.02	1.97	3.93	15.54	1.70	0.61	1.76	2.99
18	Tout_45_G613_Tcc-7	50	86.28	-10.38	42.54	45.05	-6.99	3.08	15.57	1.59	0.62	1.11	1.77
18a	Tout_45_G613_Tcc-7	50	85.06	-11.19	42.17	45.00	-6.94	3.02	15.58	1.59	0.61	1.25	1.99
19	Tout_45_G613_Tcc-15	50	87.18	-16.38	44.44	44.89	-15.07	2.49	15.60	1.43	0.61	0.22	0.32
19a	Tout_45_G613_Tcc-15	50	84.86	-17.37	43.78	44.94	-14.79	2.44	15.63	1.42	0.62	0.58	0.82
20	Tout_45_G613_Tcc12	50	79.05	4.26	38.86	45.05	11.89	4.88	15.54	1.82	0.61	2.41	4.38
21	Tin_40_Tout_45_Tcc7	60	84.30	-0.54	40.22	45.13	7.02	4.12	15.63	2.10	0.72	1.93	4.06
21a	Tin_40_Tout_45_Tcc7	60	81.89	-0.91	40.00	45.22	6.93	4.10	15.72	2.07	0.71	2.06	4.27
22	Tout_45_G711_Tcc2	60	84.96	-3.11	40.65	45.03	2.06	3.80	15.59	2.01	0.71	1.78	3.58
23	Tout_45_G711_Tcc-7	60	88.61	-10.78	42.63	45.19	-6.93	2.99	15.65	1.78	0.71	1.18	2.10
23a	Tout_45_G711_Tcc-7	60	88.75	-10.85	42.45	45.19	-7.00	2.99	15.67	1.79	0.71	1.25	2.24
24	Tout_45_G711_Tcc-15	60	91.95	-15.66	44.34	45.18	-14.76	2.48	15.72	1.65	0.71	0.41	0.68
24a	Tout_45_G711_Tcc-15	60	90.94	-17.52	43.64	45.00	-14.92	2.36	15.66	1.63	0.71	0.69	1.12
25	Tout_45_G711_Tcc12	60	82.18	3.74	39.01	44.93	11.94	4.68	15.57	2.11	0.71	2.29	4.85
26	Tin_40_Tout_45_Tcc7	40	75.73	-0.61	40.03	44.82	6.81	4.40	15.48	1.49	0.54	2.00	2.98

2.4.4 Risultati sperimentali sulla macchina a R290 in modalità raffreddamento

Tutti i test in modalità raffreddamento sono stati effettuati con carica di refrigerante pari a 1.3kg e con surriscaldamento in uscita evaporatore fissato a 7.5 °C. Inoltre, tutti questi test sono stati eseguiti con la frequenza del compressore fissata a 50Hz.

Tabella 16. Risultati dei test per la valutazione delle prestazioni - Modalità di raffreddamento

N	Test	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	EER	Q _{EV}
		°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-	kW
30	Tin_12_Tout_7_Tcc35	83.33	2.98	12.10	7.20	34.98	5.05	16.41	1.86	0.63	1.94	3.62
31	Tin_23_Tout_18_Tcc35	82.23	11.74	22.99	17.95	34.92	6.54	17.68	2.05	0.85	2.42	4.95
32	Tout_7_G_634_Tcc27	71.95	1.86	12.50	6.94	26.98	4.89	13.83	1.66	0.63	2.48	4.10
33	Tout_18_G846_Tcc27	71.16	10.90	23.85	18.06	26.97	6.40	15.21	1.82	0.85	3.13	5.69
34	Tout7_G634_Tcc30	76.27	2.46	12.41	7.03	29.95	4.98	14.81	1.74	0.63	2.27	3.95
35	Tout_7_G_634_Tcc25	68.61	1.90	12.98	7.16	25.02	4.90	13.28	1.61	0.63	2.66	4.28
36	Tout_7_G_634_Tcc20	63.49	0.47	13.17	6.98	19.95	4.69	11.84	1.52	0.63	2.99	4.54
37	Tin_13.5_Tout_8.5_Tcc30	75.61	3.88	13.42	8.62	29.87	5.19	14.95	1.78	0.74	2.31	4.11
38	Tin_15_Tout_10_Tcc25	67.88	4.69	15.00	10.14	24.91	5.33	13.66	1.69	0.83	2.78	4.70
39	Tin_16.5_Tout_11.5_Tcc20	61.13	5.04	16.60	11.48	19.71	5.39	12.37	1.59	0.89	3.33	5.31

2.4.5 Risultati sperimentali in condizioni di progetto

Oltre ai test precedentemente elencati, richiesti dalle normative per la caratterizzazione delle prestazioni delle pompe di calore, sono stati effettuati anche altri test. Quelli in condizioni di progetto, indicate nel documento [4], sono riportati nella tabella seguente. I grafici delle figure 31 e 32 mostrano i diagrammi p-h delle medesime prove in modalità riscaldamento e raffreddamento.

Tabella 17. Risultati dei test sui due prototipi in modalità riscaldamento in condizioni di progetto

Fluido	prova	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	COP	Qco
		°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-	kW
R134a	Tin24.2_Tout30_Tcc7	73.69	-0.60	24.22	30.09	6.74	2.29	10.72	1.57	0.60	2.58	4.05
R290	Tin24.9_Tout30_Tcc7	58.94	-1.74	24.99	30.13	7.07	4.08	11.14	1.47	0.73	2.95	4.33

Tabella 18. Risultati dei test sui due prototipi in modalità raffreddamento in condizioni di progetto

Fluido	prova	ToCP	ToEEV	Tin,w	Tout,w	Tamb	piCP	poCP	L _{el}	Gw	EER	Q _{EV}
		°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	kW	m3/h	-	kW
R134a	Tin13_Tout7_Tcc30	86.67	-0.34	13.04	7.16	29.72	2.70	12.87	1.74	0.53	2.10	3.65
R290	Tin12.1_Tout7_Tcc30	76.67	2.33	12.21	7.09	30.02	4.95	14.81	1.74	0.66	2.26	3.93

In generale, per tutte e due le modalità di funzionamento si rileva un rapporto di compressione nettamente superiore nei test con l'R134a rispetto a quelli con R290, che provoca assorbimenti elettrici del compressore maggiori nel primo caso. Si rileva inoltre una notevole perdita di carico lato evaporatore in modalità pompa di calore, più accentuata per il test con l'R134a. Un'altra importante differenza si riscontra nel diverso sottoraffreddamento in ingresso all'organo di laminazione per i due test: questo potrebbe anche essere indicativo di una carica di refrigerante leggermente superiore a quella ottimale per la macchina a R134a.

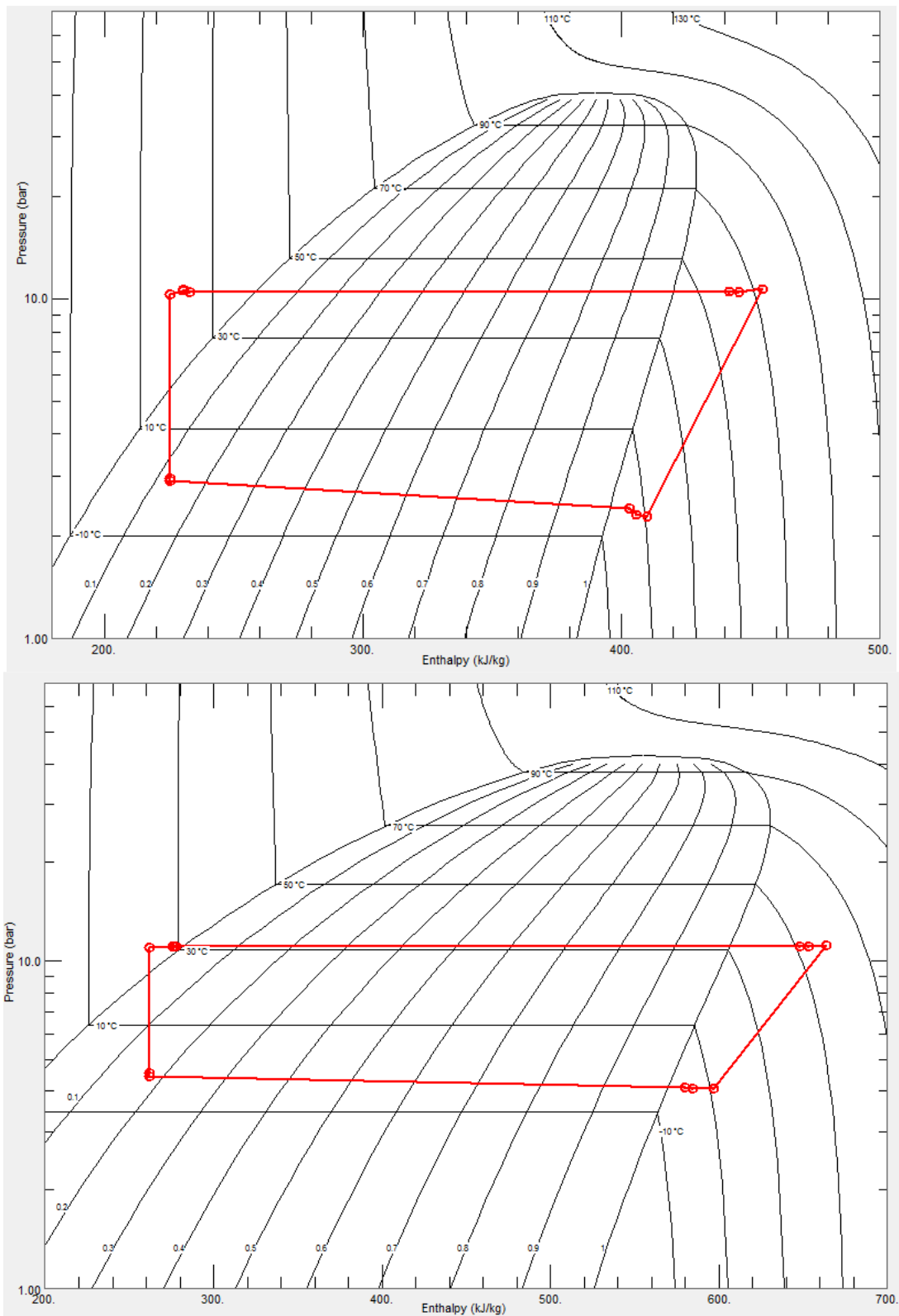


Figura 31. Diagrammi p-h delle prove in condizioni di progetto in modalità pompa di calore per la macchina a R134a (figura in alto) e per la macchina a propano (figura in basso) .

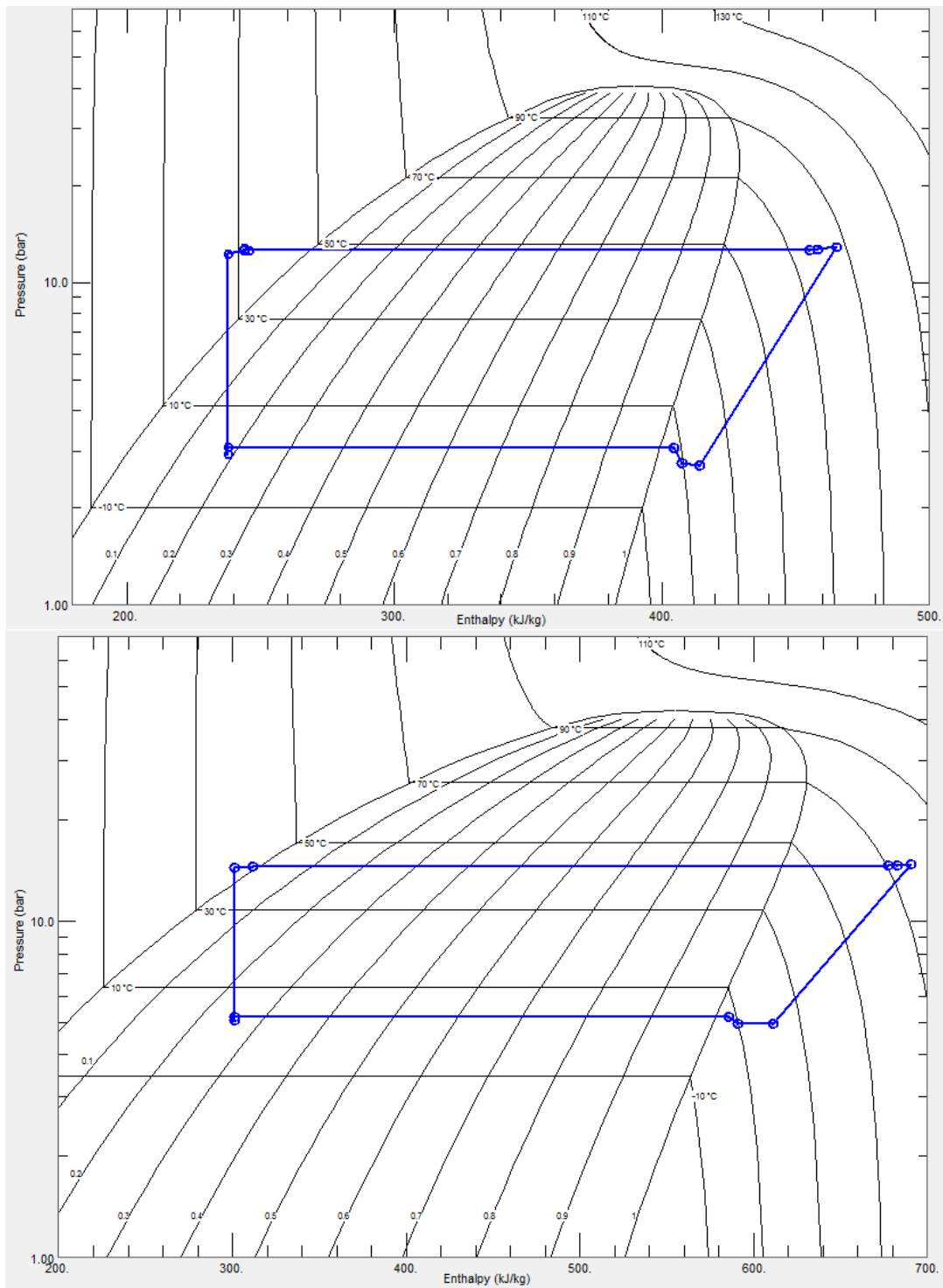


Figura 32. Diagrammi p-h delle prove in condizioni di progetto in modalità raffreddamento per la macchina a R134a (figura in alto) e per la macchina a propano (figura in basso) .

Tabella 19. Confronto tra le prestazioni attese e quelle sperimentali per la macchina a R134a

	Macchina Frigo		Pompa di Calore	
	progetto	sperimentale	progetto	sperimentale
Q_{ev} [kW]	3.79	3.65	3.11	4.76*
L_{el} [kW]	1.10	1.74	0.84	1.57
Q_{co} [kW]	4.45	3.7*	3.61	4.05
EER /COP [-]	3.43	2.10	4.31	2.58
$m_{f.t.,cond}$ [kg/s]	0.5	-	0.15	0.16
$m_{f.t.,ev}$ [kg/s]	0.15	0.15	0.50	-
m_{ref} [kg/s]	0.023	0.017*	0.018	0.023*
T_{co} [°C]	42.1	47.9	31.6	41.2
T_{ev} [°C]	5.6	0.02	-2.1	0.3
T_{oCP} [°C]	68.8	86.7	58.4	73.7
$T_{in,cond}$ [°C]	30	29.7	24.2	24.2
$T_{out,cond}$ [°C]	38.8	-	30	30.1
$T_{in,ev}$ [°C]	13	13	7	6.7
$T_{out,ev}$ [°C]	7	7.1	0.8	-

*: calcolate

Tabella 20. Confronto tra le prestazioni attese e quelle sperimentali per la macchina a R290

	Macchina Frigo		Pompa di Calore	
	progetto	sperimentale	progetto	sperimentale
Q_{ev} [kW]	3.19	3.93	2.80	3.71*
L_{el} [kW]	0.77	1.74	0.62	1.47
Q_{co} [kW]	3.71	3.1*	3.21	4.33
EER /COP [-]	4.15	2.26	5.20	2.95
$m_{f.t.,cond}$ [kg/s]	0.5	-	0.15	0.2
$m_{f.t.,ev}$ [kg/s]	0.15	0.18	0.5	-
m_{ref} [kg/s]	0.010	0.008*	0.009	0.01*
T_{co} [°C]	40.2	43.4	30.1	31.3
T_{ev} [°C]	5.6	1.4	-1.2	-4.8
T_{oCP} [°C]	66.6	76.7	55.4	58.9
$T_{in,cond}$ [°C]	30	30	24.9	25
$T_{out,cond}$ [°C]	37.4	-	30	30.1
$T_{in,ev}$ [°C]	12.1	12.2	7	7.1
$T_{out,ev}$ [°C]	7	7.1	1.4	-

*: calcolate

Confrontando le prestazioni attese [4] con i valori misurati sperimentalmente (tabelle 19 e 20) si nota che alcune misure si discostano in maniera significativa da quelle previste in sede di progetto. In particolare gli assorbimenti elettrici misurati risultano molto superiori a quelli previsti. A questo proposito si riportano le potenze elettriche assorbite dai singoli ausiliari a servizio dei prototipi.

Tabella 21. Potenze elettriche assorbite dagli ausiliari

	Potenza elettrica [kW]
Quadro elettrico	0,15
Ventilatori	0,27
Totale ausiliari	0,42

Le potenze elettriche assorbite dagli ausiliari comportano prestazioni inferiori rispetto ai COP ed EER teorici, che non ne tengono conto.

3 Conclusioni

La presente attività di ricerca ha avuto come obiettivo la realizzazione di test in camera climatica di due prototipi di pompe di calore reversibili (realizzati nella precedente annualità), di piccola potenza, per la prova e la verifica prestazionale di differenti fluidi frigoriferi utilizzati nelle pompe di calore a compressione. Per eseguire un'analisi comparativa scientificamente oggettiva si è proceduto alla realizzazione di una campagna di prove in accordo alle normative di riferimento sui test di pompe di calore e refrigeratori di liquido, UNI EN 14511 parte seconda e terza e UNI EN 14825.

La realizzazione di test che rispondessero alle richieste di normativa ha richiesto la progettazione e costruzione di un impianto, denominato "Calorimetro ENEA", in grado di garantire la gestione e il controllo delle portate e delle condizioni termofluidodinamiche dei fluidi vettori in gioco, aria e acqua.

Per il controllo delle condizioni termoigrometriche dell'aria si è proceduto alla messa a punto di una camera climatica di dimensioni e prestazioni adeguate.

Per il controllo della portata e della temperatura dell'acqua è stato realizzato un impianto di gestione in grado di mettere a disposizione una sorgente calda e una fredda da miscelare in maniera opportuna per mezzo di una valvola a tre vie.

Dopo la fase di messa a punto di tutto il sistema, si è proceduto alla realizzazione della campagna di prove in accordo alle normative sui due prototipi opportunamente strumentati, sia in regime invernale (modalità pompa di calore), sia in regime estivo (modalità macchina frigorifera).

ENEA ha poi provveduto alla prima fase di elaborazione e riduzione dei dati sperimentali, nella quale è stata verificata la stabilità dei test (sia negli andamenti dei parametri termodinamici pressione e temperatura, che delle grandezze imposte, come la temperatura dell'acqua in ingresso alla macchina) e il rispetto degli scostamenti ammissibili del valore medio delle grandezze controllate rispetto ai valori di set point.

La fase di analisi dei risultati per il calcolo dei parametri di prestazione a carico parziale e stagionale in accordo con le normative vigenti e l'interpretazione dei risultati al fine della valutazione dell'impatto ambientale diretto e indiretto nel caso di impiego di tali macchine nella climatizzazione residenziale è stata successivamente condotta dall'Università degli Studi di Napoli "Federico II" [5].

4 Riferimenti bibliografici

1. UNI EN 14511 (novembre 2011) - "Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti". Parte seconda: Condizioni di prova.
2. UNI EN 14511 (novembre 2011) - "Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti". Parte terza: Metodi di prova.
3. UNI EN 14825 (gennaio 2013) - "Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance".
4. R. Mastrullo, A.W. Mauro, L. Menna, A. Palma - "Progettazione di due banchi prova strumentati per test su componenti di impianti a compressione di vapore con fluidi HFC e HFO" - Report RdS/2013/095.
5. F. Botticella, R. Mastrullo, A.W. Mauro - "Analisi prove sperimentali di due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R290 ed R134a: valutazione delle prestazioni stagionali con relativa incertezza delle misure e del conseguente impatto ambientale diretto e indiretto" - Report RdS/PAR2013/165.

5 Abbreviazioni ed acronimi

COP: coefficiente di prestazione della macchina in modalità pompa di calore

EER: coefficiente di prestazione della macchina in modalità raffreddamento

f_{comp} : frequenza di rotazione del compressore [Hz]

G_w : portata volumetrica d'acqua [m^3/h]

L_{el} : Potenza elettrica assorbita totale [kW]

m : portata in massa [kg/s]

p_{iCP} : pressione ingresso compressore [bar]

p_{oCP} : pressione uscita compressore [bar]

Q_{co} : potenza termica scambiata al condensatore [kW]

Q_{EV} : potenza termica scambiata all'evaporatore [kW]

SCOP: coefficiente di prestazione stagionale, in modalità pompa di calore

SEER: coefficiente di prestazione stagionale, in modalità macchina frigo

T_{cc}/T_{amb} : temperatura della camera climatica [°C]

$T_{in,ev}$: temperatura del refrigerante in ingresso all'evaporatore [°C]

$T_{in,w}$: temperatura del fluido termovettore (acqua) in ingresso [°C]

$T_{out,ev}$: temperatura del refrigerante in uscita dall'evaporatore [°C]

$T_{out,w}$: temperatura del fluido termovettore (acqua) in uscita [°C]

T_{oCP} : temperatura refrigerante uscita compressore [°C]

T_{oEEV} : temperatura refrigerante uscita valvola elettronica [°C]

T_{co} : temperatura di condensazione [°C]

T_{ev} : temperatura di evaporazione [°C]

Pedici

cond: condensatore

ev: evaporatore

f.t.: fluido termovettore

ref: relativa al refrigerante

in: ingresso

out: uscita