



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Messa in funzione, analisi sperimentale e caratterizzazione della pompa di calore a CO<sub>2</sub>

*N. Calabrese, G. Oliveti, V. Marinelli, R. Mastrullo, A. W. Mauro*



MESSA IN FUNZIONE, ANALISI SPERIMENTALE E CARATTERIZZAZIONE DELLA POMPA DI CALORE A CO<sub>2</sub>

N. Calabrese (ENEA), G. Oliveti, V. Marinelli (Università della Calabria, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Meccanica), R. Mastrullo, A. W. Mauro (Università di Napoli Federico II, DETEC)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

# Indice

Sommario .....	5
<b>1 REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO AI.CO.WA .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Componenti principali dell'impianto .....</b>	<b>11</b>
1.2.1 Pompa di calore a R744 .....	12
1.2.2 UTA (Unità di Trattamento Aria) .....	37
1.2.3 Pompe di circolazione .....	44
1.2.4 Dry Cooler .....	46
1.2.5 Serbatoi inerziali .....	48
1.2.6 Scambiatori di calore a piastre .....	50
1.2.7 Collettori solari (sola predisposizione) .....	60
<b>1.3 Strumentazione e sistema di acquisizione dati, controllo e gestione impianto .....</b>	<b>61</b>
1.3.1 Strumentazione di misura lato acqua .....	66
1.3.2 Strumentazione di misura lato CO <sub>2</sub> .....	82
1.3.3 Regolazione e gestione dell'impianto: BX EINSTEIN .....	83
1.3.4 Sistema di monitoraggio della pompa di calore: TelevisNet 4.0 .....	93
<b>1.4 Valutazione delle incertezze di misura .....</b>	<b>96</b>
1.4.1 Incertezza della potenza termica scambiata all'evaporatore .....	96
1.4.2 Incertezza della potenza termica scambiata al gas cooler .....	98
1.4.3 Incertezza del COP .....	99
<b>2 RILIEVO ED ANALISI DATI SPERIMENTALI .....</b>	<b>100</b>
<b>2.1 Introduzione .....</b>	<b>100</b>
<b>2.2 Rilievo dati sperimentali invernali .....</b>	<b>100</b>
2.2.1 Scelta dei parametri di prova (Caso invernale) .....	101
<b>2.3 Analisi e rielaborazione dei dati sperimentali invernali .....</b>	<b>114</b>
<b>2.4 Rilievo dati sperimentali estivi .....</b>	<b>125</b>
2.4.1 Scelta dei parametri di prova (Caso estivo) .....	126
<b>2.5 Analisi e rielaborazione dei dati sperimentali estivi .....</b>	<b>145</b>
<b>3 MODELLO MATEMATICO DI SIMULAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE PROTOTIPO ENEA.....</b>	<b>159</b>
<b>3.1 Introduzione al modello di simulazione.....</b>	<b>159</b>
<b>3.2 Calibrazione e modellazione dei componenti.....</b>	<b>161</b>
3.2.1 Compressori .....	161
3.2.2 Valvola di laminazione principale ICMTS .....	165
3.2.3 Valvola di laminazione secondaria JKV .....	168
3.2.4 Gas cooler .....	171
3.2.5 Evaporatore.....	173
3.2.6 Sottoraffreddatore.....	175
3.2.7 Rigeneratore .....	177
<b>3.3 Flow chart e strategia risolutiva .....</b>	<b>178</b>
<b>4 VALIDAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE PROTOTIPO ENEA.....</b>	<b>186</b>
<b>4.1 Introduzione .....</b>	<b>186</b>
<b>4.2 Risultati forniti dal modello di simulazione per il funzionamento invernale.....</b>	<b>187</b>

<b>5</b>	<b>VERIFICA DELLE PRESTAZIONE DELLA POMPA DI CALORE IN FUNZIONAMENTO POLIVALENTE .....</b>	<b>221</b>
5.1	<i>Introduzione .....</i>	221
5.2	<i>Analisi dati sperimentali .....</i>	221
<b>6</b>	<b>CONSIDERAZIONI ECONOMICHE SULLA CONVENIENZA DI UNA POMPA DI CALORE A CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>224</b>
6.1	<i>Introduzione .....</i>	224
6.2	<i>Caso applicativo .....</i>	226
	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>229</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>233</b>

## Sommario

Il principale obiettivo del progetto “Studi e valutazioni sull’uso razionale dell’energia: Utilizzo dell’energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva”, svolto nell’ambito del programma di Ricerca di Sistema Elettrico in collaborazione con il Ministero dello Sviluppo Economico è di definire e sviluppare un sistema di produzione integrato che sia robusto, competitivo e di riferimento per il “sistema Italia”, in grado di assolvere l’intero compito della climatizzazione estiva e invernale. Il progetto ha inoltre l’obiettivo di comprendere in quali condizioni climatiche, con quali tecnologie e con quale politica di supporto possa essere avviata un’azione che porti a una diffusione di massa di sistemi di climatizzazione basati sull’energia solare o comunque assistiti da fonti rinnovabili.

Per assolvere a tali richieste, la ricerca si sta concentrando su soluzioni caratterizzate essenzialmente dalle seguenti caratteristiche:

- Sfruttamento di fonti rinnovabili (aria, terra, sole) per la produzione di energia elettrica da utilizzarsi per l’alimentazione di macchine per la climatizzazione.
- Utilizzo di fluidi frigoriferi non dannosi per l’ambiente (CO<sub>2</sub>) in macchine termiche a compressione di vapore in luogo di quelli attualmente utilizzati.
- Realizzazione di sistemi “globali” capaci di provvedere autonomamente al riscaldamento degli ambienti in inverno, al raffrescamento in estate e, simultaneamente, alla produzione di acqua calda sanitaria nell’arco dell’intero anno solare.

Sotto il profilo più strettamente ambientale, la sostituzione dei fluidi frigoriferi attualmente utilizzati con fluidi naturali (CO<sub>2</sub>) consentirebbe di ridurre o addirittura annullare gli effetti negativi sul buco dell’ozono in caso di dispersione del fluido frigorifero nell’atmosfera.

Un importante sistema che si sta imponendo all’attenzione degli specialisti del settore è l’utilizzo di pompe di calore utilizzanti la CO<sub>2</sub> (R744), quindi un fluido naturale, come refrigerante in grado di provvedere alla produzione di acqua ad alta temperatura e di acqua refrigerata, nonché alla climatizzazione degli ambienti.

Il tipo di refrigerante utilizzato consente il funzionamento della macchina anche a temperature esterne prossime a -25°C e per questo è particolarmente adatta alle zone climatiche “rigide”, dove le tradizionali pompe di calore hanno il problema dello sbrinamento delle batterie esterne.

Questa tecnologia può essere quindi una valida alternativa alle caldaie termiche attualmente utilizzate, specie nelle zone scarsamente servite da gas di città.

L'ottimale sfruttamento delle pompe di calore a CO<sub>2</sub> per la climatizzazione e per la produzione di acqua calda sanitaria, richiede comunque una serie di ottimizzazioni, legate alla massimizzazione del rendimento della pompa di calore in ogni condizione operativa, alla gestione dei flussi termici, alla definizione di componentistica efficiente ed affidabile ed infine al perfezionamento dei sistemi di controllo e supervisione.

Tale attività di ricerca consiste nell'analisi sperimentale di una pompa di calore che impiega come fluido refrigerante la CO<sub>2</sub> (R744) in grado di produrre acqua calda fino alla temperatura massima di 65°C anche qualora la temperatura esterna fosse prossima ai -25°C. L'attività si è svolta dapprima effettuando la prova dei vari componenti costituenti la pompa di calore e, successivamente, realizzando un prototipo ottimizzato per garantire il riscaldamento, il raffrescamento degli ambienti ed anche la produzione di acqua calda sanitaria. E' stata inoltre allestita una facility per la caratterizzazione della pompa di calore a servizio di un edificio sperimentale, altamente strumentato e con utenza simulata. La realizzazione della facility ha come finalità la verifica tecnica ed economica della convenienza di questa soluzione impiantistica. L'impianto servito dalla pompa di calore è individuato dall'acronimo AI.CO.WA (AIr Conditioning with HP CO<sub>2</sub> WAter-water) ed è un impianto di climatizzazione ad aria primaria e fan coil.

È stato effettuato il monitoraggio del funzionamento della macchina sia nel periodo invernale che in quello estivo durante i quali sono state effettuate delle prove sperimentali in cui sono stati acquisiti i dati sperimentali necessari alla caratterizzazione della pompa di calore. Tale caratterizzazione ha permesso di determinare i parametri che ne definiscono il comportamento, sia nel funzionamento estivo che in quello invernale.

Lo studio del comportamento della macchina ha anche avuto lo scopo di realizzare un modello di simulazione del funzionamento della pompa di calore stessa. I risultati di tale modello sono stati poi confrontati con i dati sperimentali acquisiti.

# 1 REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO AI.CO.WA

## 1.1 Introduzione

L'impianto AI.CO.WA è installato presso l'area Capanna del Centro ricerche Enea di Casaccia, nei pressi dell'edificio F92, e realizza la produzione di acqua calda e acqua fredda da utilizzarsi per coprire i fabbisogni termici legati alla climatizzazione annuale del locale di prova appositamente strumentato. In particolare, esso è un impianto di climatizzazione ad aria primaria e fan coil (figura 1.1). Gli impianti con aria primaria prevedono l'impiego, oltre che dei ventilconvettori stessi, anche di una serie di canalizzazioni che garantiscono l'immissione in ambiente di una certa quantità di aria di rinnovo, che permette sia di migliorare la qualità dell'aria stessa all'interno dei locali, sia di regolare nella maniera desiderata le sue caratteristiche igrometriche. Queste funzioni vengono svolte da un'apposita unità di trattamento aria (UTA).

L'impianto, l'ambiente esterno e quello interno vengono costantemente monitorati mediante il controllore BX EISTEIN, che acquisisce e rielabora le grandezze rilevate dagli strumenti di misura. Il controllo della pompa di calore avviene attraverso il sistema TelevisNet che permette la gestione e il monitoraggio da computer, fornendo i dati necessari al tracciamento del ciclo termodinamico svolto dalla CO<sub>2</sub>.

Nel funzionamento invernale, il sistema ha come obiettivo il raggiungimento di una temperatura di set all'interno del serbatoio di accumulo dell'acqua calda SAC. L'acqua del serbatoio di accumulo caldo non scambia direttamente con la CO<sub>2</sub> nel gas cooler, della pompa di calore, perché tra i due fluidi è interposto un circuito ausiliario. Questo, contenente acqua, è costituito dalla pompa P2, che spinge il fluido dapprima nel gas-cooler, dove l'acqua viene riscaldata, e poi nello scambiatore SC01, dove l'acqua del circuito ausiliario cede calore a quella prelevata dalla pompa P1 dal serbatoio di accumulo: quest'ultima ritorna nel serbatoio dopo aver subito un aumento di temperatura. Al raggiungimento della temperatura di set, il sistema di controllo e supervisione spegne la pompa di calore. Lo scambiatore SC01 ha, in questa configurazione d'impianto, il compito di separare l'acqua adibita allo scambio con l'utenza da quella di alimentazione del condensatore della pompa di calore: in tal modo, si prevengono anche eventuali svuotamenti del ramo acqua del condensatore a seguito di eventuali perdite d'acqua nel serbatoio di accumulo.

Mentre il gas-cooler fornisce calore, all'evaporatore della pompa di calore viene prodotto "freddo". Anche questo componente è collegato al serbatoio di accumulo freddo attraverso un circuito ausiliario. Questo contiene una miscela di acqua e glicole (circa 40%) che cede calore all'evaporatore e si riscalda nello scambiatore SC02, dove raffredda l'acqua di alimento del serbatoio di accumulo freddo SAF.

L'acqua calda stoccata nel serbatoio SAC e quella fredda in SAF vengono prelevate rispettivamente attraverso le pompe di circolazione P7, P6 e P5 ed avviate ad un sistema di collettori. Da qui, agendo sulle valvole ivi collocate, viene inviato una parte del flusso caldo ai fan coil a servizio dell'ambiente da climatizzare, mentre la restante parte del flusso caldo e tutto quello freddo vengono avviati alla UTA. In particolare, le pompe P6 e P5 servono rispettivamente il collettore caldo e quello freddo dell'UTA mentre la pompa P7 alimenta i fan coil.

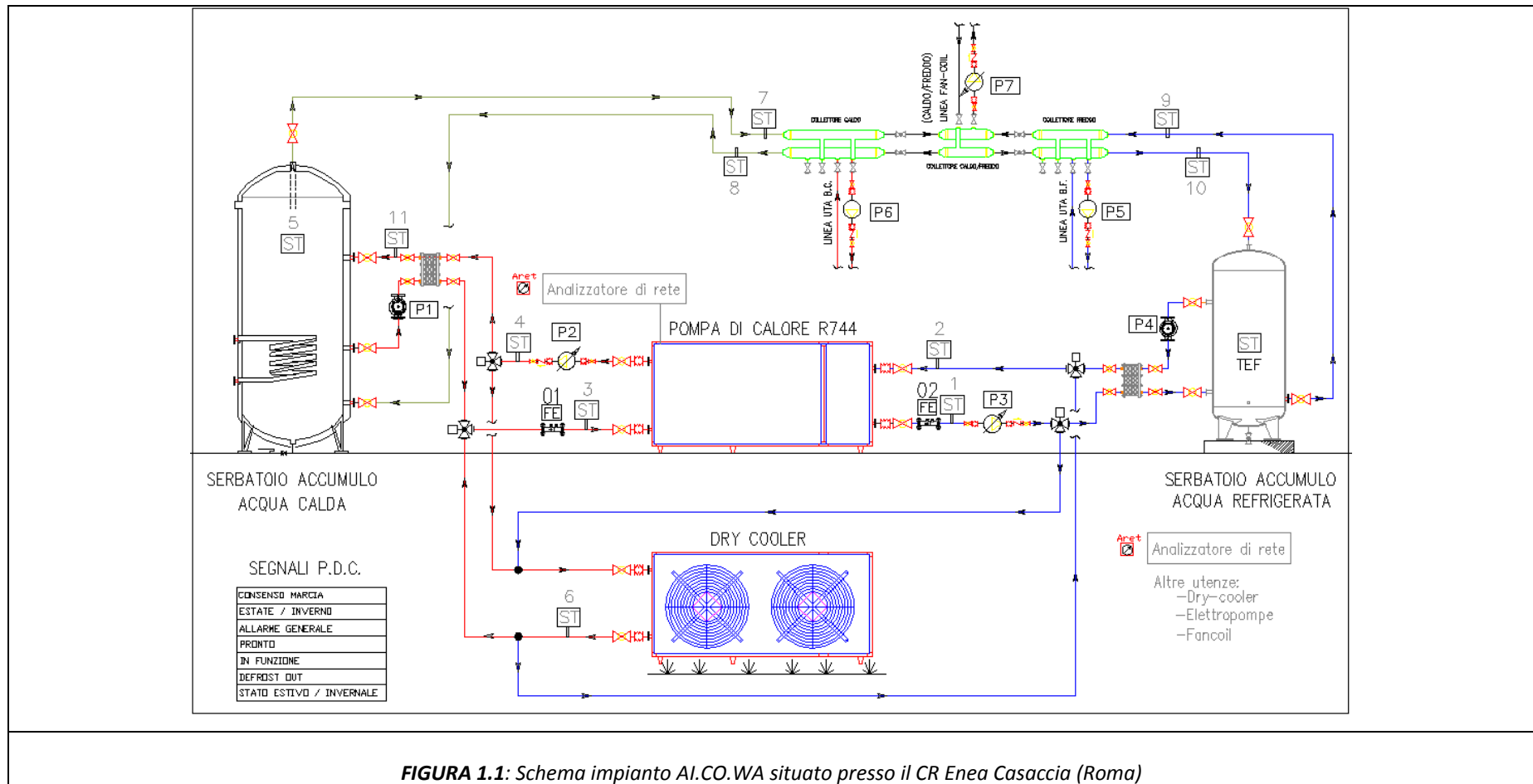
In inverno, il fluido freddo, viene riinviato al serbatoio di accumulo per mezzo di una valvola a tre vie miscelatrice, mentre quello caldo contribuisce a mantenere l'aria trattata dalla UTA ad una certa temperatura (20°C). Poiché l'acqua fredda ritorna al serbatoio ad una temperatura prossima a quella iniziale, per evitare un suo eccessivo raffreddamento, una volta raggiunta la temperatura di set "fredda", il flusso di acqua-glicole del circuito ausiliario viene deviato al Dry Cooler (che in questo caso si comporta da riscaldatore), invece che allo scambiatore SC02.

Nel funzionamento estivo, rimanendo ancora valide le condizioni di funzionamento (temperature) della pompa di calore, la condizione di stacco della macchina si ha quando viene raggiunta una temperatura di set dell'acqua nel serbatoio di accumulo freddo. E' possibile che la temperatura nell'accumulo caldo raggiunga più rapidamente il set point: in tal caso, l'acqua del circuito ausiliario viene avviata al Dry Cooler (che in tal caso si comporta da dissipatore).

I fluidi "caldo" e "freddo" avviati ai collettori vengono gestiti in questo caso in maniera diversa: parte del fluido freddo è avviato ai fan coil dove si riscalda; il rimanente fluido "freddo" e quello caldo sono avviati verso la UTA dove contribuiscono a mantenere la temperatura dell'aria di ricambio a circa 26°C. Nel periodo estivo, l'aria della UTA viene investita anche da parte del fluido caldo (la maggior parte viene rinviata al serbatoio SAC attraverso la valvola a tre vie), per garantire il giusto grado di umidità dell'aria in mandata della macchina.



Nel successivo paragrafo saranno illustrate più in dettaglio le caratteristiche dei principali componenti dell'impianto e della strumentazione predisposta per il monitoraggio e controllo dello stesso.



## 1.2 Componenti principali dell'impianto

I principali componenti impiegati dell'impianto AI.CO.WA sono:

- Pompa di calore acqua-acqua a CO<sub>2</sub>;
- Unità di trattamento aria (UTA);
- Pompe di circolazione;
- Valvole miscelatrici a tre vie;
- Dry Cooler DRY1;
- Serbatoi inerziali SAC e SAF;
- Scambiatori di calore a piastre caldo e freddo;
- Locale container asservito all'impianto di climatizzazione;
  - Vetilconvettori;
- Collettori solari (predisposizione).

Di seguito sono brevemente descritti i componenti impiegati sull'impianto sperimentale realizzato presso il centro ricerche ENEA di Casaccia (figura 1.2).



### 1.2.1 Pompa di calore a R744

La pompa di calore prototipo ENEA costituisce il cuore dell'impianto sperimentale (figura 1.3).

La pompa di calore è del tipo acqua-acqua e polivalente con la funzione di refrigerare in funzionamento estivo o riscaldare in quello invernale. La capacità frigorifera viene gestita e modulata da un controllore automatico, il PLC Eliwell EXTMPPro dotato di display, in funzione del carico termico richiesto. Si possono distinguere due circuiti, quello principale e quello secondario o economizzatore.

La pompa dispone di tre compressori semiermetici ad olio, due compressori principali ON/OFF e un compressore ausiliario dotato di inverter per il circuito economizzatore. La presenza dell'inverter consente una migliore adattabilità al carico richiesto.



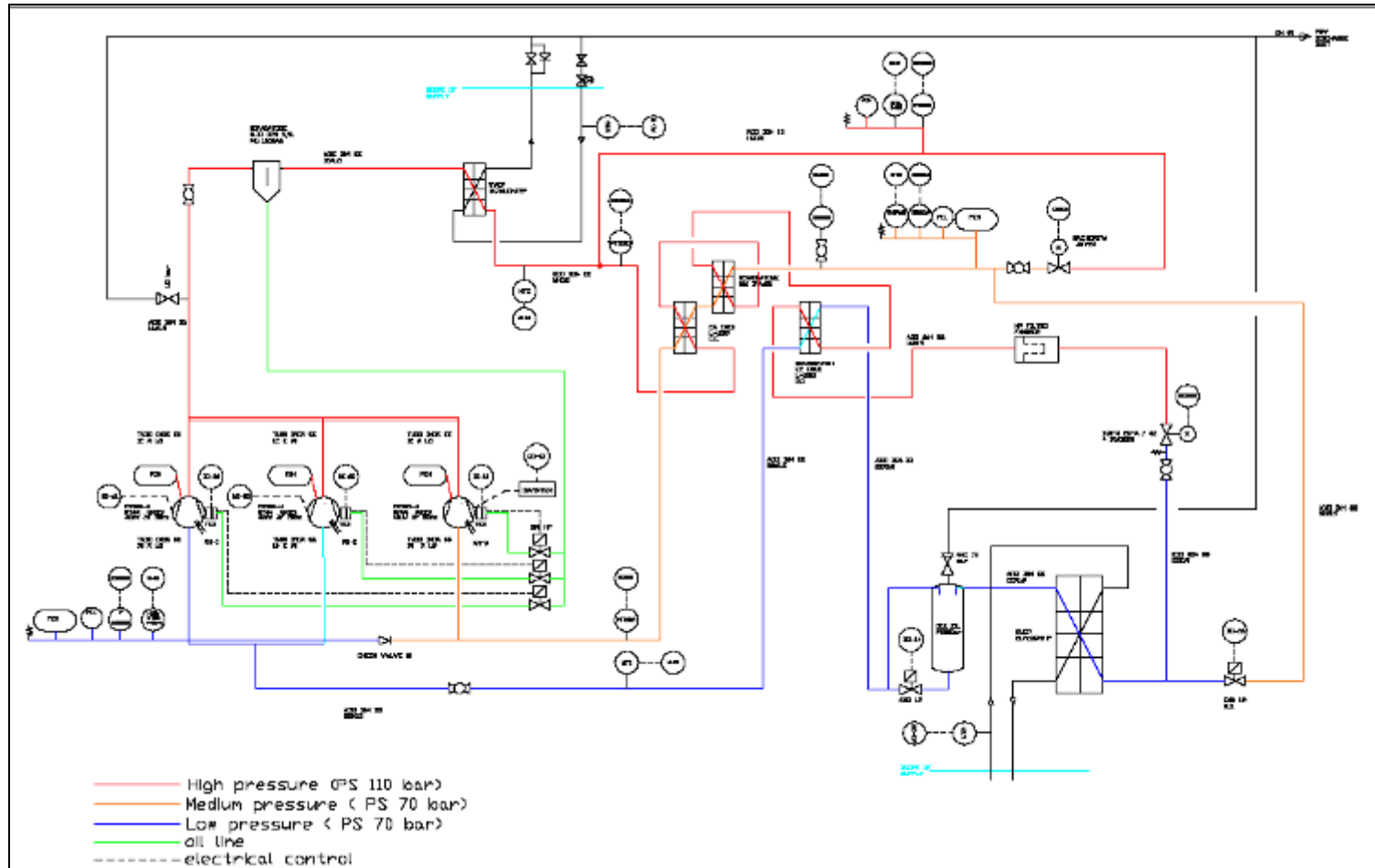
**FIGURA 1.3:** Pompa di calore a CO<sub>2</sub> prototipo ENEA installata presso il Centro Ricerche di Casaccia

La pompa di calore è dotata di un gas cooler, un evaporatore e un sottoraffreddatore di liquido, tutti scambiatori del tipo compatto a piastre, e due scambiatori a fascio tubiero per permettere di surriscaldare il gas in aspirazione ai compressori del circuito principale ed al compressore del circuito economizzatore (figura 1.4). La pompa di calore è dotata di un sistema di gestione dell'olio costituito da un separatore d'olio sulla linea di mandata e da tre

sensori di livello tipo TK3 in grado di gestire la carica dell'olio all'interno dei tre compressori. La tabella 1.1 riporta i componenti e lo schema della pompa di calore.

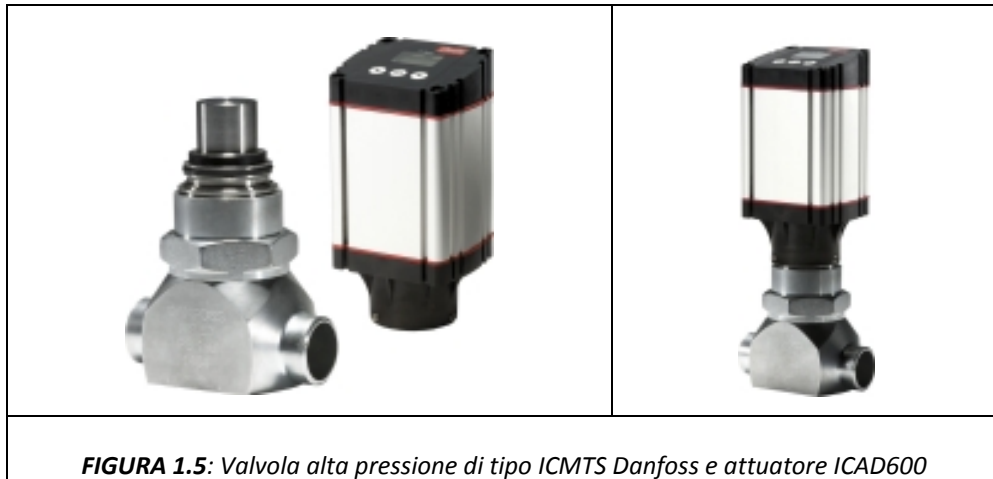
<b>Componente</b>	<b>Breve Descrizione</b>	<b>Quantità</b>
Compressori Dorin	Semiermetici ad olio.	3
Ricevitore di liquido	15 litri, 80 bar	1
Filtro linea liquido	Tipo meccanico	1
Scambiatore rigenerativo tra liquido e aspirazione bassa pressione	Fascio tubiero	1
Scambiatore rigenerativo tra liquido e aspirazione media pressione	Fascio tubiero	1
Separatore olio lato alta pressione	3,5 litri, 130 bar	1
Sensore livello olio TK3	Uno per ogni compressore	3
Evaporatore	B16DWx100 a piastre	1
Gas Cooler	B16DWx101 a piastre	1
Sottoraffreddatore di liquido	B16DWx20 a piastre	1
Valvola di laminazione ICMTS	alta pressione, Danfoss	1
Valvole di sicurezza	110 bar per alta pressione 70 bar per bassa pressione	2
Pressostato	3 per alta pressione 1 per bassa pressione 1 per media pressione	5
Valvola di laminazione	JKV media pressione	1
Valvole iniezione olio	Una per ogni compressore	3
Elettrovalvola GRS alta pressione N.O.	Di sicurezza	1

**TABELLA 1.1:** Componenti pompa di calore



**FIGURA 1.4:** Pompa di calore a CO<sub>2</sub> prototipo ENEA: schema funzionale


Il circuito frigorifero principale comprende i due compressori, il separatore d'olio, il gas cooler, la valvola di laminazione ICMTS, l'evaporatore, il ricevitore di liquido e il primo scambiatore a fascio tubiero per surriscaldare il gas all'aspirazione dei compressori. Entrambi i compressori funzionano in inverno in base alla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler: il primo compressore si disattiva a 52°C mentre il secondo a 55°C.



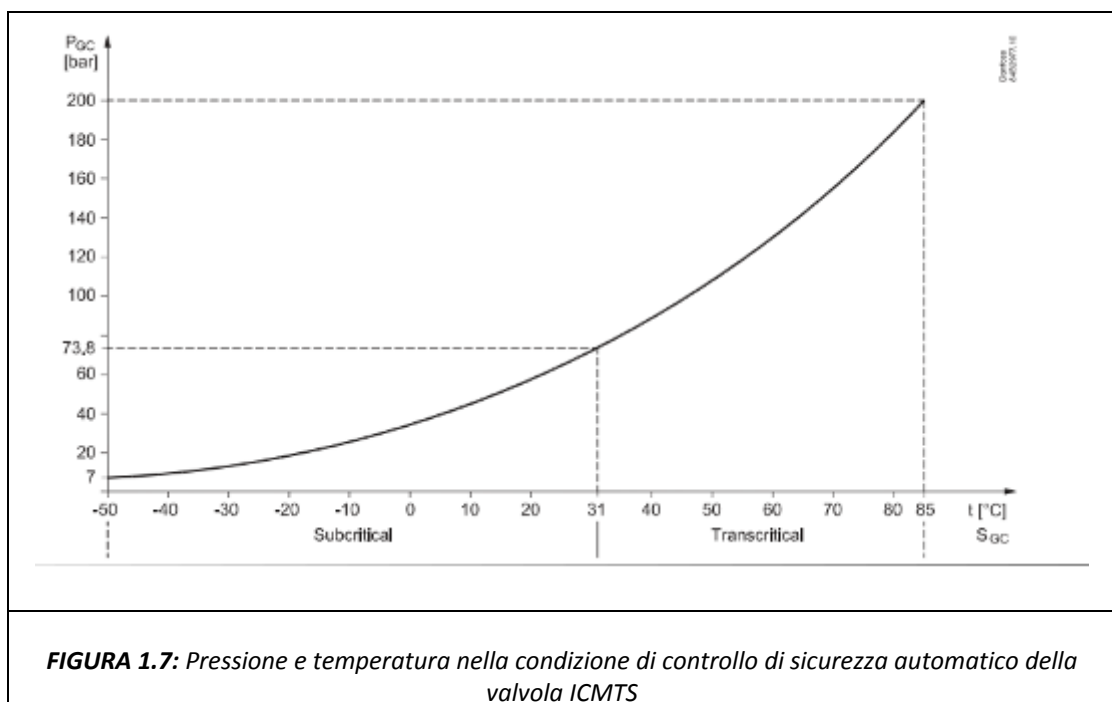
<i>Intervallo di Temperatura [°C]</i>	-60 - 120
<i>Massima pressione di esercizio [bar]</i>	140
<i>Massima differenza di pressione [bar]</i>	90
<i>Tempo di apertura valvola alla massima velocità dell'attuatore [s]</i>	3

**TABELLA 1.2:** Caratteristiche della valvola ICMTS installata sulla pompa di calore

La valvola di laminazione principale ICMTS viene gestita dal controllore EKC326A in funzione del valore della pressione di mandata (figura 1.7). La valvola ICMTS è una valvola motorizzata ad azionamento diretto pilotata da un attuatore di tipo ICAD600TS (figura 1.5). L'ICMTS è progettata per regolare il flusso del gas transcritico o del liquido subcritico proveniente dal raffreddatore di gas nei sistemi a CO<sub>2</sub> transcritici. Essa può essere utilizzata anche per altre funzioni di controllo nei sistemi a CO<sub>2</sub>. L'ICMTS è progettata in modo che le forze di apertura e di chiusura siano bilanciate.

	<i>Limite minimo pressione [bar]</i>	45
	<i>Limite massimo di pressione [bar]</i>	105
	<i>Minima apertura consentita alla valvola in %</i>	0
	<i>Massima apertura consentita alla valvola in %</i>	100
<b>FIGURA 1.6:</b> <i>Controllore Danfoss mod. EKC326A lato alta pressione</i>		<b>TABELLA 1.3:</b> <i>Caratteristiche del controllore EKC326A installata sulla pompa di calore</i>

Il controllore legge la pressione di mandata  $P_{GC}$ , la temperatura del gas all'uscita del Gas Cooler  $S_{GC}$  e in funzione di questi parametri, assegna un nuovo valore di set della pressione di mandata. Successivamente lo stesso controllore modula il grado di apertura della valvola per ottenere tale livello di pressione (figura 1.7). La valvola è stata sviluppata appositamente per le pressioni che caratterizzano un ciclo transcritico ad anidride carbonica. Il motore della valvola è un attuatore ICAD ed è controllato attraverso un segnale 0-10 V inviato dal controllore.



Il ricevitore di liquido è installato sul lato di bassa pressione, posto all'uscita dell'evaporatore, ha una capacità di 15 litri e una pressione di progetto di 80 bar e, per



protezione è stata installata direttamente sul serbatoio una valvola di sicurezza meccanica da 70 bar (figura 1.8). Il ricevitore permette di separare la CO<sub>2</sub> liquida (non ancora evaporata), l'olio ed il refrigerante allo stato gassoso. Esso raccoglie quindi il liquido in uscita dall'evaporatore in modo tale che i compressori non aspirino refrigerante allo stato liquido. Una valvola a solenoide posta sul fondo del serbatoio e comandata dal PLC, inietta nella linea di aspirazione una piccola quantità di olio e di CO<sub>2</sub> liquida.

La CO<sub>2</sub> liquida evaporerà all'interno dello scambiatore rigenerativo a fascio tubiero appositamente inserito, mentre l'olio fluirà all'interno dei compressori ripristinando la carica. La linea del liquido è munita di un filtro per garantire la pulizia interna dell'impianto.




**FIGURA 1.8:** Ricevitore di liquido modello LRTU15

La CO<sub>2</sub> liquida evaporerà all'interno dello scambiatore rigenerativo a fascio tubiero appositamente inserito, mentre l'olio fluirà all'interno dei compressori ripristinando la carica.

La linea del liquido è munita di un filtro per garantire la pulizia interna dell'impianto.

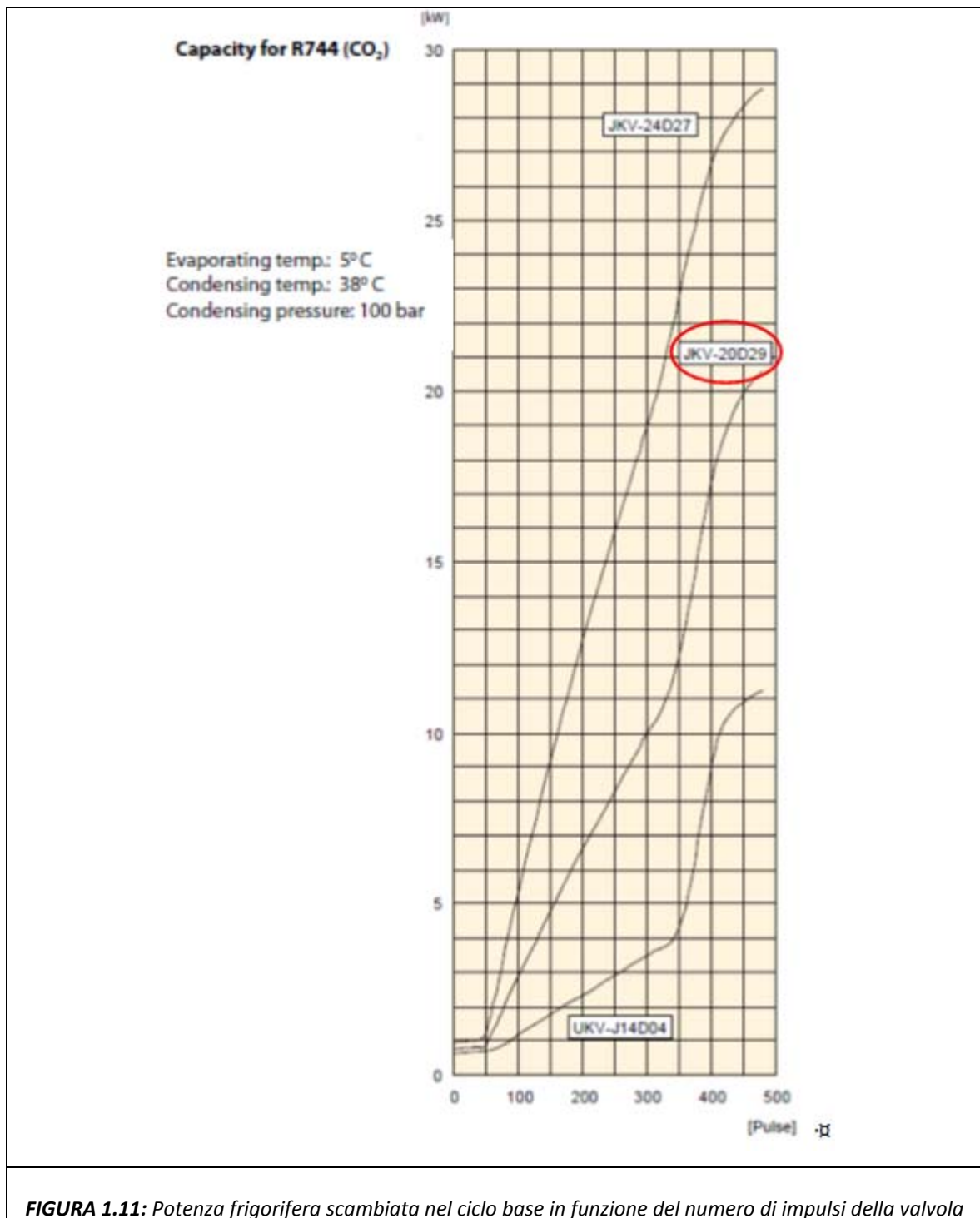
Il circuito frigorifero secondario invece, comprende il compressore con inverter, il separatore d'olio, il gas cooler, la valvola di laminazione ridotta JKV, il sottoraffreddatore ed il secondo scambiatore a fascio tubiero per surriscaldare il gas all'aspirazione del compressore ausiliario. Il compressore gestito dall'inverter si attiva quando l'acqua in ingresso al gas cooler raggiunge 35°C; esso viene mantenuto ad una pressione di aspirazione di circa 50 bar dallo stesso inverter. La valvola JKV viene gestita dal controllore EKD316 che ne modula il

grado di apertura in modo tale da ottenere un surriscaldamento all'aspirazione (del compressore ausiliario) di circa 12K e per massimizzare l'efficienza di scambio termico degli scambiatori di calore. Tale valvola termostatica è la Danfoss Saginomiya modello JKV-20D29 (figura 1.9).

	<i>Massima pressione di esercizio [bar]</i>	150
	<i>Massima velocità di eccitazione [pps]<sup>1</sup></i>	80
	<i>Massima differenza di pressione [bar]</i>	100
	<i>Intervallo di temperatura del fluido refrigerante [°C]</i>	-30 - 70
<b>FIGURA 1.9:</b> Valvola JKV installata sulla pompa di calore		<b>TABELLA 1.3:</b> Caratteristiche tecniche della valvola JKV installata sulla pompa di calore

	<i>Valore massimo di surriscaldamento [°C]</i>	15
	<i>Valore minimo di surriscaldamento [°C]</i>	2
	<i>Limite massimo di pressione trasmessa [bar]</i>	60
	<i>Limite minimo di pressione trasmessa [bar]</i>	1
<b>FIGURA 1.10:</b> Controllore Danfoss EKD316		<b>TABELLA 1.4:</b> Caratteristiche tecniche del controllore EKD316 installato sulla pompa di calore

<sup>1</sup> Pps= impulsi al secondo

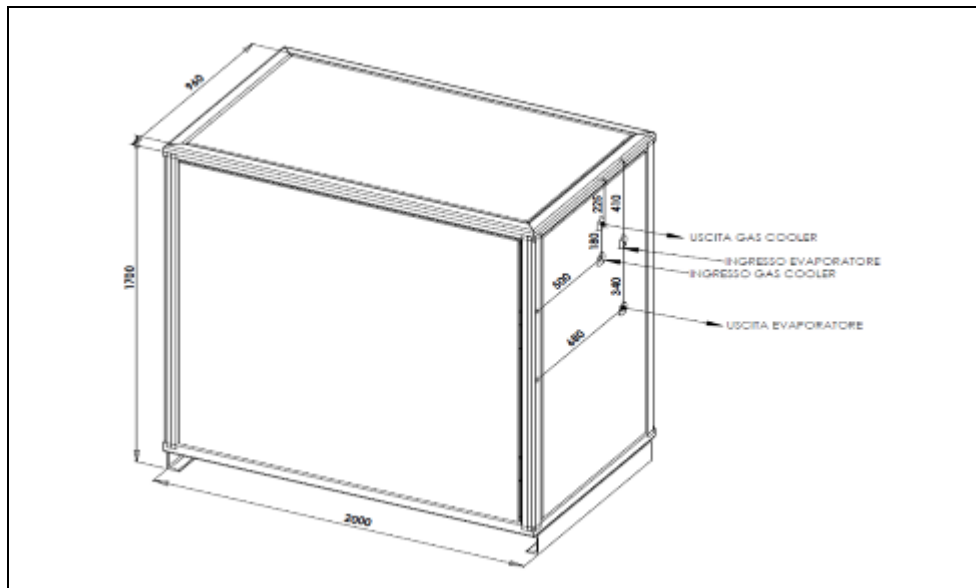


Il quadro elettrico è parte integrante della pompa di calore e fornisce tutti i controlli necessari per modulare l'impianto di refrigerazione in base alle condizioni di funzionamento nel rispetto delle specifiche progettuali (figura 1.12). In particolare, tramite il sistema TelevisNet è possibile visualizzare e acquisire i dati relativi all'anidride carbonica in termini di temperature e pressioni dei diversi punti del ciclo termodinamico.



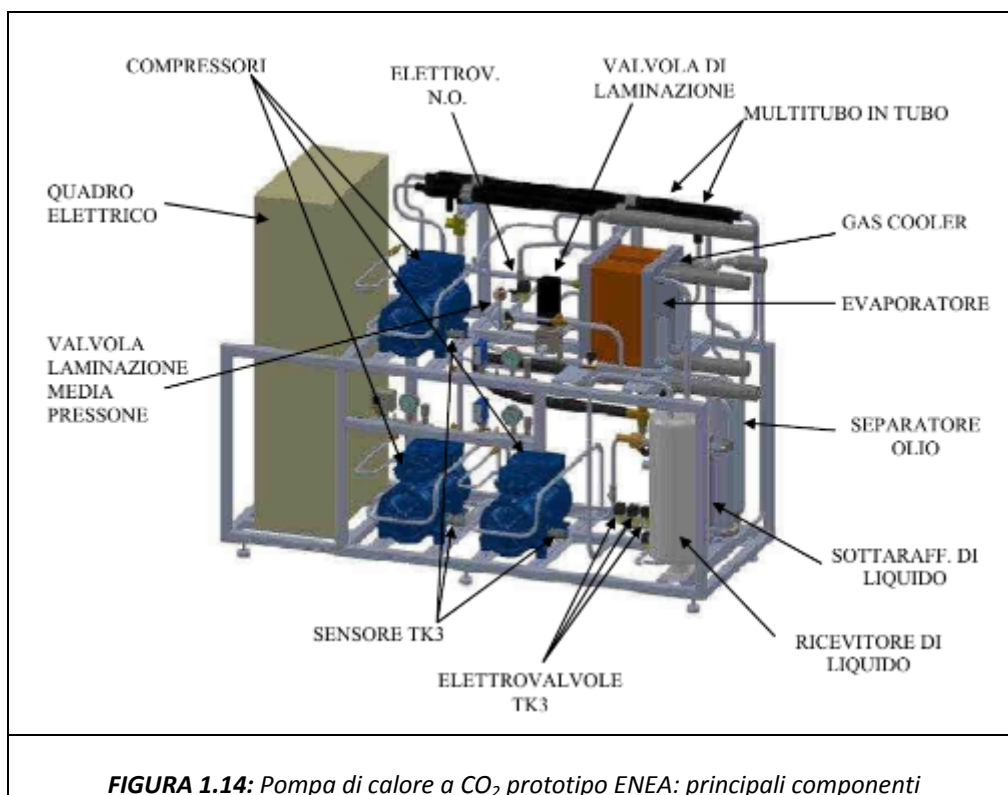
L'accensione e lo spegnimento della pompa di calore, l'attivazione dei singoli compressori, l'attivazione della valvola JKV, il controllo delle pressioni di ciclo, il controllo delle temperature di ciclo, i livelli d'olio all'interno dei compressori e gli allarmi vengono gestiti dalla logica di regolazione principale inserita all'interno del PLC. Gli scambi termici con le utenze esterne lato caldo e lato freddo, avvengono nel circuito principale al gas cooler ed all'evaporatore.

Il circuito frigorifero secondario ha invece lo scopo di realizzare uno scambio interno al ciclo, ossia ha lo scopo di sottoraffreddare la CO<sub>2</sub> all'uscita del gas cooler prima dell'ingresso in valvola di laminazione. Inoltre la CO<sub>2</sub> dopo la laminazione ha un titolo inferiore e l'evaporazione all'interno dell'evaporatore avviene in modo più efficiente. Questa configurazione permette di aumentare la resa in pompa di calore (circa 20%) nelle condizioni di funzionamento più sfavorevoli, ossia quando l'acqua in ingresso al gas cooler ha una temperatura elevata (35 - 55°C). Questo aumento di resa rispetto a pompe di calore a CO<sub>2</sub> che lavorano con ciclo transcritico standard, la rendono particolarmente interessante per applicazioni di riscaldamento invernale con impianti che lavorano con elevate temperature di ritorno e per applicazioni di condizionamento estivo con elevate temperature dell'aria esterna. Lo scambio rigenerativo infatti riduce il titolo della miscela liquido-vapore che entra all'evaporatore, aumenta cioè l'effetto frigorifero volumetrico.



**FIGURA 1.13:** Pompa di calore a CO<sub>2</sub> prototipo ENEA: principali dimensioni e connessioni

La figura 1.14 mostra i principali componenti della pompa di calore.



**FIGURA 1.14:** Pompa di calore a CO<sub>2</sub> prototipo ENEA: principali componenti

Nel funzionamento estivo, a regime, si vuole ottenere una temperatura preimpostata dell'acqua, lato freddo di 7 °C. All'aumentare della temperatura dell'aria esterna tende ad aumentare la temperatura dell'accumulo caldo (temperatura al gas-cooler) e quindi decresce il COP<sub>raff</sub> (o EER, definito come rapporto tra la capacità frigorifera e la potenza

elettrica assorbita dal compressore), si riduce la capacità frigorifera ed aumenta la potenza elettrica assorbita.

La tabella 1.4 riporta alcuni dati relativi a una simulazione di funzionamento estivo e a due invernali fornita dalla casa costruttrice.

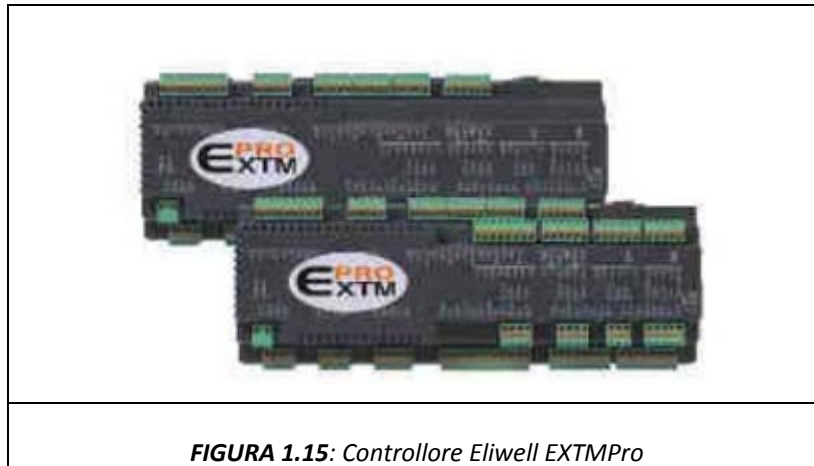
Per il funzionamento invernale sono state condotte due simulazioni. Nella prima si è ipotizzata una temperatura esterna di 5 °C: impostando la temperatura dell'accumulo caldo a valori compresi tra 40 e 55°C, il COP<sub>risc</sub> (definito come rapporto tra la potenza termica smaltita al gas-cooler e la potenza elettrica assorbita dal compressore) passa da 4.3 a 2.7.

Nella seconda simulazione si è ipotizzato che la temperatura esterna sia di 0°C. In questo caso, variando la temperatura dell'accumulo da 45 a 55 °C, il COP<sub>risc</sub> passa da 3.4 a 2.7.

ESTIVO			Tev=3°C		12		acqua out		7		SCAMBIATORE C		DT acqua		10 K		INTERNO	
Acqua_in_C [°C]	Acqua_out_C [°C]	Aria_ext [°C]	Acqua_in_F [°C]	Acqua_out_F [°C]	Cap_frig [kW]	Pot_el_in [kW]	Pot_tem [kW]	COP_raff	COP_risc	portata F kg/s	portata C kg/s							
40	50	35	12	7	27,03	13,25	38,96	2,0	2,9	1,291	0,931							
35	45	30	12	7	28,64	10,89	38,44	2,6	3,5	1,368	0,918							
30	40	25	12	7	30,48	9,23	38,79	3,3	4,2	1,456	0,927							
25	35	20	12	7	32,54	7,75	39,52	4,2	5,1	1,555	0,944							
INVERNALE 1			aria ext		+5°C		Tev=-5°C		SCAMBIATORE C		DT acqua		15		K		INTERNO	
Acqua_in_C [°C]	Acqua_out_C [°C]	Aria_ext [°C]	Acqua_in_F [°C]	Acqua_out_F [°C]	Cap_frig [kW]	Pot_el_in [kW]	Pot_tem [kW]	COP_raff	COP_risc	portata F kg/s	portata C kg/s							
40	55	5	3	-1	20,20	11,13	30,21	1,8	2,7	1,206	0,481							
35	50	5	3	-1	21,43	9,58	30,95	2,2	3,1	1,280	0,479							
30	45	5	3	-1	22,87	8,38	30,41	2,7	3,6	1,366	0,484							
25	40	5	3	-1	24,50	7,31	31,07	3,4	4,3	1,463	0,495							
INVERNALE 2			aria ext		0°C		Tev=-9°C		SCAMBIATORE C		DT acqua		15		K		INTERNO	
Acqua_in_C [°C]	Acqua_out_C [°C]	Aria_ext [°C]	Acqua_in_F [°C]	Acqua_out_F [°C]	Cap_frig [kW]	Pot_el_in [kW]	Pot_tem [kW]	COP_raff	COP_risc	portata F kg/s	portata C kg/s							
40	55	0	-2	-6	17,39	10,44	26,79	1,7	2,6	1,039	0,427							
35	50	0	-2	-6	18,41	8,93	26,45	2,1	3,0	1,099	0,421							
30	45	0	-2	-6	19,66	7,89	26,76	2,5	3,4	1,174	0,426							

**TABELLA 1.4:** Simulazione condizioni di funzionamento della pompa di calore a CO<sub>2</sub>

Sia durante la stagione estiva che quella invernale la centralina gestirà i compressori in modo tale da mantenere costante la temperatura di ritorno entro certi valori prefissati dall'utente. Il funzionamento della macchina viene monitorato e ogni anomalia viene segnalata attraverso il corrispondente allarme. Gli allarmi critici e quelli non critici vengono gestiti costantemente così come accade per la valvola di laminazione secondaria e la valvola a solenoide N.O. ed il ciclo di defrost.



**FIGURA 1.15:** Controllore Eliwell EXTMPRO

Sul display del controllore (figura 1.16-1.17) possono essere visualizzati gli allarmi con appositi codice identificativo, i parametri di ciclo, le variabili interne come temperature, pressioni, input e output digitali, lo stato della macchina e la modalità di funzionamento.

SICUREZZE		
<i>Digital input</i>	<i>Stato ingresso</i>	<i>Descrizione</i>
D11	OPEN	Allarme termica + pressostato di mandata del compressore 1
D18	OPEN	Allarme livello olio compressore 1
D13	OPEN	Allarme termica + pressostato di mandata del compressore 2
D19	OPEN	Allarme livello olio compressore 2
D15	OPEN	Allarme termica + press. di mandata + inverter ready comp.3
D110	OPEN	Allarme livello olio compressore 3
D17	OPEN	Allarme press. generale di media press. + bassa press.
PRESSIONI		
<i>Analog input</i>		<i>Descrizione</i>
A16		Pressione di mandata
A17		Pressione di aspirazione
A18		Pressione intermedia
STATO		
<i>Digital input</i>	<i>Stato ingresso</i>	<i>Descrizione</i>
D12	CLOSE	Richiesta avviamento, chiller ON
D16	CLOSE	Selezione funzionamento INVERNALE
D16	OPEN	Selezione funzionamento ESTIVO
D14	OPEN	Selettore di commutazione estate /inverno in modo MANUALE.
TEMPERATURE		
<i>Analog input</i>		<i>Descrizione</i>
A11		Temperatura Acqua-glicole_prop43% in ingresso al gas cooler
A12		Temperatura Acqua-glicole_prop43% in ingresso all'evaporatore
A13		Temperatura CO2 in aspirazione
A14		Temperatura CO2 all'uscita del gas cooler
A19		Variazione set estivo/invernale con comando esterno 4-20mA

**FIGURA 1.16:** Ingressi acquisiti dalla centralina



<i>Digital output</i>	<i>Stato ingresso</i>	<i>Descrizione</i>
DO1	CLOSE	Richiesta avviamento compressore 1
DO2	CLOSE	Richiesta avviamento compressore 2
DO3	CLOSE	Richiesta avviamento compressore 3
DO4	CLOSE	Spillamento olio dal ricevitore
DO5	CLOSE	Chiusura elettrovalvola N.O.
DO6	CLOSE	Attivazione valvola laminazione media pressione
DO7	CLOSE	Pompa di calore in funzione
DO8	CLOSE	Pompa di calore pronta
DO9	CLOSE	Allarme non critico
DO10	CLOSE	Defrost attivo
DO11	OPEN	Funzionamento ESTIVO
DO11	CLOSE	Funzionamento INVERNALE
DO12	CLOSE	Allarme critico

**FIGURA 1.17:** Uscite gestite dalla centralina

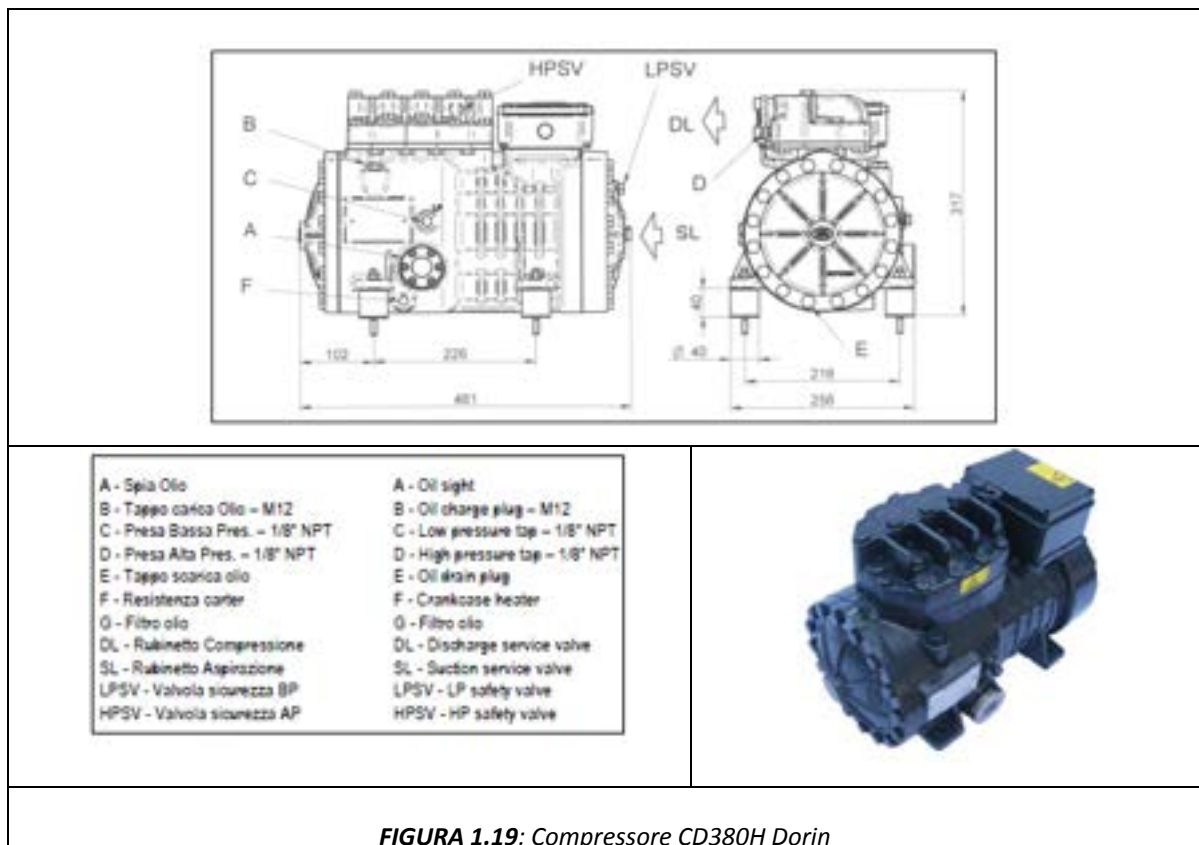
Il sistema di supervisione locale della pompa di calore prevede un tastierino Eliwell mod. EXTkpro con il quale è possibile scorrere le variabili di ciclo quali pressione, temperature, ingressi analogici e digitali e verificare lo stato delle uscite digitali (figura 1.15). È inoltre possibile agire sui parametri di funzionamento come i parametri di defrost, la temperatura di ritorno dall'impianto, i limiti massimi delle pressioni di ciclo e molti altri.





## Compressori

I compressori installati all'interno della pompa di calore sono stati forniti da DORIN che realizza compressori per CO<sub>2</sub> in diversi modelli e serie. In particolare, a bordo sono presenti tre compressori del tipo CD380H, ovvero compressori monostadio capaci di operare in regime transcritico (figura 1.19-1.20-1.21). Essi sono perfettamente adatti per applicazioni tipo: pompa di calore, refrigerazione commerciale, trasporto refrigerato, sistemi HVAC reversibili e non.



**FIGURA 1.19:** Compressore CD380H Dorin

In considerazione delle condizioni di lavoro estremamente gravose cui si trova a lavorare un compressore per anidride carbonica in ciclo transcritico, è stato deciso di sviluppare una piattaforma di macchina completamente nuova invece di sfruttare e modificare il design di un compressore esistente. La progettazione di questi compressori è stata effettuata tramite i più moderni elementi di calcolo come metodi agli elementi finiti e modellazione solida. Particolare attenzione è stata posta ai fenomeni di scambio termico tra la parte di alta e bassa pressione del compressore; ciò ha portato all'adozione di un design innovativo che ottimizza l'efficienza della macchina.

SERIE RANGE	MODELLO MODEL	CYL	volume spostato displacement m <sup>3</sup> /h - 50 Hz	HP	RPM 50 Hz	FLA A				LRA A				suction service valve mm		discharge service valve mm		peso net weight [kg]	carica olio oil charge [kg]
						220/230/240 data	400/230/240 star	400/230/240 PMS	220/230/240 data	400/230/240 star	400/230/240 PMS	socket welding	butt welding	socket welding	butt welding				
200	CD 150M	2	1,12	1,5	1450	5,9	3,4	-	27,0	15,6	-	10	14	10	14	71	1,3		
	CD 180H	2	1,12	1,8	1450	7,6	4,4	-	34,6	20	-	10	14	10	14	72	1,3		
	CD 180M	2	1,46	1,8	1450	7,6	4,4	-	34,6	20	-	10	14	10	14	73	1,3		
	CD 300H	2	1,46	3,0	1450	10,4	6,0	-	42,2	24,4	-	10	14	10	14	73	1,3		
	CD 300M	2	1,88	3,0	1450	10,4	6,0	-	42,2	24,4	-	10	14	10	14	73	1,3		
	CD 350H	2	1,88	3,5	1450	12,6	7,3	-	55,4	32	-	10	14	10	14	76	1,3		
	CD 350M	2	2,39	3,5	1450	12,6	7,3	-	55,4	32	-	10	14	10	14	76	1,3		
	CD 360H	2	2,39	3,8	1450	16,3	9,4	-	75,4	43,6	-	10	14	10	14	78	1,3		
	CD 360M	2	3,00	3,6	1450	13,0	7,5	-	59,0	34,1	-	10	14	10	14	77	1,3		
	CD 380H	2	3,00	3,8	1450	16,3	9,4	-	75,4	43,6	-	10	14	10	14	77	1,3		
CD 380M	3	3,59	3,8	1450	16,3	9,4	-	75,4	43,6	-	10	14	10	14	77	1,3			
CD 380B	3	4,50	3,8	1450	16,3	9,4	-	75,4	43,6	-	10	14	10	14	77	1,3			
300	CD 700H	2	4,34	7,0	1450	-	-	15,0	-	-	83	22	28	16	20	135	2,5		
	CD 700M	2	4,74	7,0	1450	-	-	15,0	-	-	83	22	28	16	20	135	2,5		
	CD 750H	2	4,74	7,5	1450	-	-	19,0	-	-	105	22	28	16	20	139	2,5		
	CD 750M	2	5,61	7,5	1450	-	-	19,0	-	-	105	22	28	16	20	139	2,5		
	CD 1000H	2	5,61	10,0	1450	-	-	23,0	-	-	109	22	28	16	20	145	2,5		
	CD 750B	2	6,92	7,5	1450	-	-	19,0	-	-	105	22	28	16	20	139	2,5		
	CD 1000M	2	6,92	10,0	1450	-	-	23,0	-	-	109	22	28	16	20	145	2,5		
	CD 1200H	2	6,92	12,0	1450	-	-	25,0	-	-	135	22	28	16	20	146	2,5		
	CD 800B	2	8,92	7,5	1450	-	-	19,0	-	-	105	22	28	16	20	138	2,5		
	CD 1100M	2	8,92	10,0	1450	-	-	23,0	-	-	109	22	28	16	20	144	2,5		
	CD 1300H	2	8,92	12,0	1450	-	-	25,0	-	-	135	22	28	16	20	148	2,5		
	CD 1300M	2	10,12	12,0	1450	-	-	25,0	-	-	135	22	28	16	20	148	2,5		
	CD 1500H	2	10,12	15,0	1450	-	-	34,0	-	-	171	22	28	16	20	146	2,5		
	CD 1000B	2	11,62	10,0	1450	-	-	23,0	-	-	109	22	28	16	20	145	2,5		
	CD 1400M	2	11,62	15,0	1450	-	-	34,0	-	-	171	22	28	16	20	146	2,5		
	CD 1900H	2	11,62	20,0	1450	-	-	38,0	-	-	177	22	28	16	20	147	2,5		

MT Protezione motore Motor protection	REL Modulo elettronico protezione motore Motor protection electronic module	CH Resistenza carter Crankcase heater
BF Ventilatore su testa Body cooling fan	PRALL Predisposizione allarme livello olio Oil level alarm arrangement	ALL Allarme livello olio
FL Lubrificazione forzata tramite pompa olio Oil pump forced lubrication	OP Pressostato differenziale olio Oil differential pressure	

SERIE RANGE	Modello Model	MT	REL	CH	BF	PRALL	ALL	FL	OP
CD 200	CD 150 M	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 180 H	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 180 M	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 300 H	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 300 M	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 350 H	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 350 M	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 360 H	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 360 M	A	B	B	B	A	B	-	-
	CD 380 H	A	B	B	B	A	B	-	-
CD 380 M	A	B	B	B	A	B	-	-	
CD 380 B	A	B	B	B	A	B	-	-	

FIGURA 1.20: Serie e modelli compressori Dorin

modello / model type	t_ev	p_suc	tgc_out	p_dis	beta	Q	P				
TCS234/4 operation in transcritical conditions	-20	19,72	15	75	3,803	5,0	2,8				
			25	75	3,903	4,3	2,8				
			35	90	3,903	3,1	3,1				
			40	110	5,500	2,3	3,3				
	-15	22,93	22,93	15	75	3,271	6,2	3,0			
				25	75	3,271	5,3	3,0			
				35	90	3,925	4,0	3,4			
				40	110	4,797	3,7	3,7			
	-10	26,50	26,50	15	75	2,830	7,5	3,0			
				25	75	2,830	6,5	3,0			
				35	90	3,396	4,9	3,5			
				45	120	4,528	4,0	4,2			
	0	34,86	34,86	15	75	2,151	11,7	3,7			
				25	75	2,151	10,0	3,1			
				35	90	2,582	7,5	4,0			
				15	100	2,869	10,4	4,0			
				25	100	2,869	9,2	4,0			
				45	120	3,442	5,9	4,7			
				5	39,69	39,69	15	75	1,890	14,1	3,0
							25	75	1,890	12,0	3,0
	35	90	2,268				9,0	3,8			
	15	120	3,023				11,8	4,9			
	25	120	3,023				10,5	4,9			
	35	120	3,023				9,0	4,9			
	10	45,01	45,01	15	75	1,666	16,9	2,8			
				25	75	1,666	14,3	2,8			
				35	90	2,000	10,9	3,7			
				15	120	2,666	14,2	5,0			
				25	120	2,666	12,7	5,0			
				35	120	2,666	10,9	5,0			
				45	120	2,666	8,5	5,0			
				15	130	2,888	13,8	5,3			
25	130	2,888	12,3	5,3							

Dati preliminari soggetti a variazione senza obbligo di preavviso - Preliminary data subject to variation without notice

beta: rapporto di compressione / pressure ratio

dati con 10K di surriscaldamento utile in evaporazione / datas valid with 10K of suction gas us

Q: resa frigorifera / refrigerating capacity [kW]

tgc\_out: temperatura di uscita dal gas cooler / gas cooler outlet temperature [°C]

p\_dis: pressione di mandata / discharge pressure [bar\_a]

p\_suc: pressione di aspirazione / suction pressure [bar\_a]

t\_ev: temperatura di evaporazione / evaporating temperature [°C]

FIGURA 1.21: Dati tecnici compressori CD380H

### **Scambiatori di calore interni alla pompa di calore**

Gli scambiatori di calore interni alla macchina sono:

- evaporatore (figura 1.24-1.25);
- gas cooler (figura 1.22-1.23);
- scambiatore rigenerativo tra CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler e CO<sub>2</sub> in aspirazione media pressione (figura 1.26);
- scambiatore rigenerativo tra CO<sub>2</sub> liquida e aspirazione bassa pressione (figura 1.26);
- sottoraffreddatore di liquido (figura 1.27).

## Gas Cooler

Il Gas cooler è uno scambiatore di calore impiegato in cicli transcritici, ovvero in quei cicli termodinamici in cui il fluido refrigerante impiegato ha una bassa temperatura critica; il suo compito è quello di raffreddare il fluido refrigerante che evolve al suo interno. È l'elemento posto a valle della fase di compressione e consente al fluido refrigerante di cedere calore all'ambiente esterno. Esso è in pratica l'equivalente del condensatore tipicamente utilizzato in cicli a compressione di vapore con fluidi alogenati; nel Gas cooler non avviene però una condensazione vera e propria (passaggio dalla fase vapore a quella liquida in equilibrio) ma solo la transizione da uno stato più compresso ad elevata temperatura ad uno più espanso a temperatura più bassa dello stesso fluido. Per tale motivo, sebbene l'evaporazione continui a restare subcritica, la trasformazione operata dal Gas cooler avviene ad una pressione superiore alla pressione critica.

Nel caso specifico dove il refrigerante è l'anidride carbonica caratterizzata da una temperatura critica di soli 31°C e una pressione critica di 73.8 bar quando il ciclo in cui evolve è transcritico il Gas cooler si sostituisce al tradizionale condensatore in quanto, data la bassa temperatura critica della CO<sub>2</sub>, in esso non avviene la fase di condensazione, ma il refrigerante conserva la sua fase gassosa, per cui avviene solo un semplice raffreddamento del gas.

Come descritto in precedenza, per la pompa di calore acqua/acqua oggetto di studio il Gas cooler è uno scambiatore di calore a piastre che lavora rispettivamente con acqua, rappresentante il fluido freddo da riscaldare, e con CO<sub>2</sub> rappresentante il fluido caldo.

Il Gas cooler realizza il riscaldamento dell'acqua del circuito ausiliario, collegato a sua volta al serbatoio di accumulo caldo. Il livello di temperatura e pressione che la CO<sub>2</sub> raggiunge all'uscita di tale scambiatore determina il funzionamento della valvola principale ICMTS.

Tale Gas cooler è uno scambiatore a piastre della SWEP modello B16DWHx100/1P-SCU.

I due fluidi a temperatura diversa scambiano calore attraverso le piastre, superfici lavorate a rilievo disposte una accanto all'altra in modo tale da formare delle camere in cui i due fluidi si succedono con flusso in controcorrente. Viene riportata la scheda tecnica del Gas cooler impiegato nella pompa di calore prototipo Enea.

**SINGLE PHASE - Design**  
**Heat Exchanger : B16DWx101/2P**

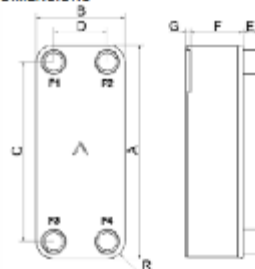
Fluid Side 1 : Carbon Dioxide (R744) (90,0 bar)  
 Fluid Side 2 : Propylene Glycol - Water (43,0 %)

Flow Type : Counter-Current

DUTY REQUIREMENTS		Side 1	Side 2
Heat load	kW	40,00	
Inlet temperature	°C	112,00	40,00
Outlet temperature	°C	41,00	50,00
Flow rate	kg/s	0,2322	1,069
Max. pressure drop	kPa	30,0	30,0
Thermal length		4,80	0,68
PLATE HEAT EXCHANGER		Side 1	Side 2
Total heat transfer area	m <sup>2</sup>	4,06	
Heat flux	kW/m <sup>2</sup>	9,9	
Mean temperature difference	K	14,78	
O.H.T.C. (available/required)	W/m <sup>2</sup> .°C	1890/1920	
Pressure drop -total*	kPa	7,01	31,3
- in ports	kPa	0,267	1,61
Port diameter	mm	27,0	27,0
Number of channels		25	25
Number of plates		101	
Oversurfacing	%	0	
Fouling factor	m <sup>2</sup> .°C/kW	-0,007	
Reynolds number		7550	355
Port velocity	m/s	1,39	1,82
PHYSICAL PROPERTIES		Side 1	Side 2
Reference temperature	°C	58,19	44,76
Dynamic viscosity	cP	0,0209	2,12
Dynamic viscosity - wall	cP	0,0238	1,98
Density	kg/m <sup>3</sup>	195,5	1025
Heat capacity	kJ/kg.°C	1,737	3,743
Thermal conductivity	W/m.°C	0,03045	0,4042
Min. fluid temperature at wall	°C	40,38	
Max. fluid temperature at wall	°C		67,18
Film coefficient	W/m <sup>2</sup> .°C	3070	6840
Minimum wall temperature	°C	48,04	47,31
Channel velocity	m/s	0,280	0,246
Shear stress	Pa	8,81	38,8

TOTALS		
Total weight (no connections)	kg	24,0 - 70,7
Hold-up volume, inner circuit	dm <sup>3</sup>	1,52
Hold-up volume, outer circuit	dm <sup>3</sup>	1,52
PortSize F1/P1	mm	27,0
PortSize F2/P2	mm	27,0
PortSize F3/P3	mm	27,0
PortSize F4/P4	mm	27,0
NND F1/P1	mm	18,0 and/or 27,0
NND F2/P2	mm	18,0 and/or 27,0
NND F3/P3	mm	18,0 and/or 27,0
NND F4/P4	mm	18,0 and/or 27,0
Channel plate thickness	mm	0,300

**DIMENSIONS**



A	mm	377 to 417 +/-2
B	mm	120 to 160 +/-1
C	mm	329 +/-1
D	mm	72,0 +/-1
E	mm	81,1 +/-1
F	mm	208 to 266 +0,5%/-1,5%
G	mm	0,000 to 6,00 +/-1
R	mm	23,5

**FIGURA 1.22: Scheda tecnica Gas Cooler B16DWx101 2P Caso Estivo**



**SINGLE PHASE - Performance**  
Heat Exchanger : B16DWx101/2P

Fluid Side 1 : Carbon Dioxide (R744) (100,0 bar)  
Fluid Side 2 : Propylene Glycol - Water (43,0 %)  
Flow Type : Counter-Current

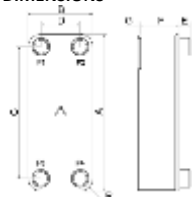
DUTY REQUIREMENTS		Side 1	Side 2
Heat load	kW	30,00	
Inlet temperature	°C	112,00	43,60
Outlet temperature	°C	44,49	57,00
Flow rate	kg/s	0,1695	0,5952
Max. pressure drop	kPa	35,0	35,0
Thermal length		5,14	1,02

PLATE HEAT EXCHANGER		Side 1	Side 2
Total heat transfer area	m <sup>2</sup>	4,06	
Heat flux	kW/m <sup>2</sup>	7,39	
Mean temperature difference	K	13,13	
O.H.T.C. (available/required)	W/m <sup>2</sup> ,°C	1470/1450	
Pressure drop -total*	kPa	3,27	10,6
- in ports	kPa	0,123	0,502
Port diameter	mm	27,0	27,0
Number of channels		25	25
Number of plates		101	
Oversurfacing	%	2	
Fouling factor	m <sup>2</sup> ,°C/kW	0,013	
Reynolds number		5090	229
Port velocity	m/s	0,878	1,02

PHYSICAL PROPERTIES		Side 1	Side 2
Reference temperature	°C	61,22	49,99
Dynamic viscosity	cP	0,0220	1,82
Dynamic viscosity - wall	cP	0,0262	1,72
Density	kg/m <sup>3</sup>	225,3	1022
Heat capacity	kJ/kg,°C	1,904	3,761
Thermal conductivity	W/m,°C	0,03286	0,4065
Min. fluid temperature at wall	°C	43,93	
Max. fluid temperature at wall	°C		73,20
Film coefficient	W/m <sup>2</sup> ,°C	2350	5000
Minimum wall temperature	°C	53,02	52,49
Channel velocity	m/s	0,178	0,137
Shear stress	Pa	4,11	13,2

TOTALS		
Total weight (no connections)	kg	24,0 - 70,7
Hold-up volume, inner circuit	dm <sup>3</sup>	1,52
Hold-up volume, outer circuit	dm <sup>3</sup>	1,52
PortSize F1/P1	mm	27,0
PortSize F2/P2	mm	27,0
PortSize F3/P3	mm	27,0
PortSize F4/P4	mm	27,0
NND F1/P1	mm	18,0 and/or 27,0
NND F2/P2	mm	18,0 and/or 27,0
NND F3/P3	mm	18,0 and/or 27,0
NND F4/P4	mm	18,0 and/or 27,0
Channel plate thickness	mm	0,300

**DIMENSIONS**



A	mm	377 to 417 +/-2
B	mm	120 to 160 +/-1
C	mm	329 +/-1
D	mm	72,0 +/-1
E	mm	81,1 +/-1
F	mm	206 to 286 +0,5%/-1,5%
G	mm	0,000 to 6,00 +/-1
R	mm	23,5

**FIGURA 1.23: Scheda tecnica Gas Cooler B16DWx101 2P Caso Invernale**

## Evaporatore

L'evaporatore realizza la produzione di acqua refrigerata raffreddando l'acqua del circuito ausiliario collegato a sua volta al serbatoio freddo.

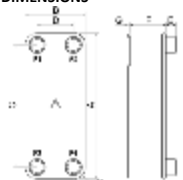
		Side 1	Side 2
<b>EVAPORATOR - Performance</b>			
Heat Exchanger : B16DWx100			
Fluid Side 1 : Carbon Dioxide (R744)			
Fluid Side 2 : Propylene Glycol - Water (43,0 %)			
Flow Type : Counter-Current			
<b>DUTY REQUIREMENTS</b>			
Heat load	kW	26,66	
Inlet vapor quality		0,00	
Outlet vapor quality		1,00	
Inlet temperature	°C	0,97	9,70
Evaporation temperature (dew)	°C	0,97	
Superheating	K	7,00	
Outlet temperature	°C	7,97	4,50
Flow rate	kg/s	0,1111	1,420
- inlet vapor	kg/s	0,0000	
Fluid vaporized	kg/s	0,1111	
Max. pressure drop	kPa	35,0	35,0
<b>PLATE HEAT EXCHANGER</b>			
Total heat transfer area	m <sup>2</sup>	4,02	
Heat flux	kW/m <sup>2</sup>	6,64	
Mean temperature difference	K	5,85	
H.T.C. (available/required)	W/m <sup>2</sup> ,°C	1130/1130	
Pressure drop -total*	kPa	2,45	22,7
- in ports	kPa	0,242	2,81
Pressure drop in fluid distribution	kPa	0,000 - 0,000	
Operating pressure - outlet	kPa	3580	
Number of channels		49	50
Number of plates		100	
Oversurfacing	%	0	
Fouling factor	m <sup>2</sup> ,°C/kW	-0,001	
Port diameter	mm	27,0	27,0
Recommended inlet connection diameter	mm	From 2,48 to 3,92	
Recommended outlet connection diameter	mm	From 7,50 to 16,8	
Reynolds number			52,0
Outlet port velocity	m/s	1,93	2,37
<b>PHYSICAL PROPERTIES</b>			
Reference temperature	°C	0,98	6,97
Liquid - Dynamic viscosity	cP	0,0977	9,66
- Density	kg/m <sup>3</sup>	921,6	1046
- Heat capacity	kJ/kg,°C	2,573	3,610
- Thermal conductivity	W/m,°C	0,1093	0,3797
Vapor - Dynamic viscosity	cP	0,0149	
- Density	kg/m <sup>3</sup>	100,5	
- Heat capacity	kJ/kg,°C	1,902	
- Thermal conductivity	W/m,°C	0,01999	
- Latent heat	kJ/kg	0,2279	
Film coefficient	W/m <sup>2</sup> ,°C	6640	3140
Minimum wall temperature	°C	2,43	2,63
Channel velocity	m/s	0,133	0,160
<b>TOTALS</b>			
Total weight (no connections)	kg	23,8 - 70,5	
Hold-up volume, inner circuit	dm <sup>3</sup>	2,99	
Hold-up volume, outer circuit	dm <sup>3</sup>	3,05	
PortSize F1/P1	mm	27,0	
PortSize F2/P2	mm	27,0	
PortSize F3/P3	mm	27,0	
PortSize F4/P4	mm	27,0	
NND F1/P1	mm	18,0 and/or 27,0	
NND F2/P2	mm	18,0 and/or 27,0	
NND F3/P3	mm	18,0 and/or 27,0	
NND F4/P4	mm	18,0 and/or 27,0	
Channel plate thickness	mm	0,300	
<b>DIMENSIONS</b>			
	A	mm	377 to 417 +/-2
	B	mm	120 to 160 +/-1
	C	mm	329 +/-1
	D	mm	72,0 +/-1
	E	mm	81,1 +/-1
	F	mm	204 to 284 +0,5%/-1,5%
	G	mm	0,000 to 6,00 +/-1
	R	mm	23,5

FIGURA 1.24: Dati tecnici Evaporatore B16DWx100 (Caso Estivo)



Tale scambiatore lavora allagato, il che spiega ulteriormente la presenza del separatore di liquido alla sua uscita.

Tale evaporatore è uno scambiatore a piastre della SWEP modello B16DWx100/2P-SC-U.

A differenza del Gas cooler, l'evaporatore lavora sempre in condizioni subcritiche in quanto non realizza semplicemente il riscaldamento del fluido refrigerante a spese del fluido termovettore, ma si ha l'evaporazione vera e propria la quale prevede il riscaldamento e il contemporaneo passaggio di fase da vapore a vapore surriscaldato.



**EVAPORATOR - Performance**

Heat Exchanger : B16DWx100

Fluid Side 1 : Carbon Dioxide (R744)

Fluid Side 2 : Propylene Glycol - Water (43,0 %)

Flow Type : Counter-Current

**DUTY REQUIREMENTS**

		Side 1		Side 2
Heat load	kW		17,00	
Inlet vapor quality		0,00		
Outlet vapor quality		0,92		
Inlet temperature	°C	-9,85		-4,00
Evaporation temperature (dew)	°C	-9,85		
Superheating	K	0,00		
Outlet temperature	°C	-9,85		-8,00
Flow rate	kg/s	0,07156		1,192
- inlet vapor	kg/s	0,0000		
Fluid vaporized	kg/s	0,06584		
Max. pressure drop	kPa	0,000		0,000

**PLATE HEAT EXCHANGER**

		Side 1		Side 2
Total heat transfer area	m <sup>2</sup>		4,02	
Heat flux	kW/m <sup>2</sup>		4,23	
Mean temperature difference	K		3,35	
H.T.C. (available/required)	W/m <sup>2</sup> .°C		1260/1260	
Pressure drop -total*	kPa	2,59		25,6
- in ports	kPa	0,132		1,96
Pressure drop in fluid distribution	kPa	0,000 - 0,000		
Operating pressure - outlet	kPa	2660		
Number of channels		49		50
Number of plates			100	
Oversurfacing	%		0	
Fouling factor	m <sup>2</sup> .°C/kW		-0,001	
Port diameter	mm	27,0		27,0
Recommended inlet connection diameter	mm	From 1,93 to 3,05		
Recommended outlet connection diameter	mm	From 6,87 to 15,4		
Reynolds number				21,1
Outlet port velocity	m/s	1,62		1,98

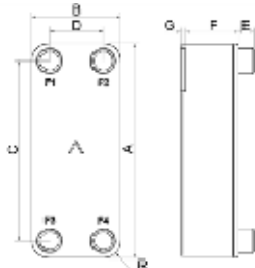
**PHYSICAL PROPERTIES**

		Side 1		Side 2
Reference temperature	°C	-9,84		-6,00
Liquid				
- Dynamic viscosity	cP	0,118		20,0
- Density	kg/m <sup>3</sup>	982,1		1051
- Heat capacity	kJ/kg.°C	2,310		3,565
- Thermal conductivity	W/m.°C	0,1224		0,3682
Vapor				
- Dynamic viscosity	cP	0,0139		
- Density	kg/m <sup>3</sup>	71,41		
- Heat capacity	kJ/kg.°C	1,508		
- Thermal conductivity	W/m.°C	0,01699		
- Latent heat	kJ/kg	0,2582		
Film coefficient	W/m <sup>2</sup> .°C	4820		1880
Minimum wall temperature	°C	-9,11		-9,03
Channel velocity	m/s	0,112		0,134

**TOTALS**

Total weight (no connections)	kg	23,8 - 70,5
Hold-up volume, inner circuit	dm <sup>3</sup>	2,99
Hold-up volume, outer circuit	dm <sup>3</sup>	3,05
PortSize F1/P1	mm	27,0
PortSize F2/P2	mm	27,0
PortSize F3/P3	mm	27,0
PortSize F4/P4	mm	27,0
NND F1/P1	mm	18,0 and/or 27,0
NND F2/P2	mm	18,0 and/or 27,0
NND F3/P3	mm	18,0 and/or 27,0
NND F4/P4	mm	18,0 and/or 27,0
Channel plate thickness	mm	0,300

**DIMENSIONS**



A	mm	377 to 417 +/-2
B	mm	120 to 160 +/--1
C	mm	329 +/--1
D	mm	72,0 +/--1
E	mm	81,1 +/--1
F	mm	204 to 284 +0,5%/-1,5%
G	mm	0,000 to 6,00 +/--1
R	mm	23,5

**Figura 1.25: Dati tecnici Evaporatore B16DWx100 (Caso Invernale)**

## Rigeneratori

Il rigeneratore è uno scambiatore di calore tipicamente inserito in cicli frigoriferi base al fine di incrementare la loro prestazione tipicamente attraverso uno scambio di calore interno al ciclo tra il vapore in uscita dal Gas cooler e il flusso in uscita dall'evaporatore. Ovviamente questa modifica del ciclo base oltre a restituire un aumento delle prestazioni globali, garantisce anche un certo surriscaldamento in aspirazione del compressore, fattore essenziale al suo buon funzionamento. Infatti, indipendentemente dal valore del titolo che il flusso in uscita dall'evaporatore ha, ammesso che ci sia in uscita da quest'ultimo una miscela e non un vapore già surriscaldato, lo scambio termico che avviene nel rigeneratore assicura il suo surriscaldamento.

Questo scambiatore è posizionato a monte della valvola di laminazione principale e a valle del separatore di liquido per garantire il surriscaldamento del fluido in aspirazione ai due compressori on/off. Il suo ruolo è importante in quanto la presenza del separatore di liquido a valle dell'evaporatore fa sì che la condizione del fluido in aspirazione ai compressori possa essere vapore saturo secco oppure miscela con titolo molto alto. Dato che questo potrebbe essere un problema per il compressore, lo scambiatore rigenerativo assicura il surriscaldamento all'aspirazione scongiurando qualsiasi problema.

Tali rigeneratori scelti sono scambiatori di tipo a fascio tubiero.


I due fluidi scambiano all'interno di tale scambiatore disponendosi rispettivamente all'interno del fascio tubiero e del mantello, in modo tale da garantire un valore di area di scambio termico quanto più grande possibile.

Tali scambiatori possiedono un'area di scambio totale (lato fasciame) di 0.560 m<sup>2</sup> +/-3%.

	<table border="1"><tr><td>Lunghezza [m]</td><td>1,1</td></tr><tr><td>Numero di tubi</td><td>34</td></tr><tr><td>Materiale mantello</td><td>ASTM106grB</td></tr><tr><td>Materiale tubi</td><td>Rame</td></tr></table>	Lunghezza [m]	1,1	Numero di tubi	34	Materiale mantello	ASTM106grB	Materiale tubi	Rame
	Lunghezza [m]	1,1							
	Numero di tubi	34							
	Materiale mantello	ASTM106grB							
Materiale tubi	Rame								
<p><b>FIGURA: 1.26:</b> Tipologia di rigeneratore installato sulla pompa di calore</p>	<p><b>TABELLA 1.5:</b> Caratteristiche dei rigeneratori installati sulla pompa di calore</p>								

## Sottoraffreddatore

Il sottoraffreddatore è l'elemento base del circuito di media pressione in quanto realizza il sotto raffreddamento della CO<sub>2</sub> in uscita dal Gas cooler.

		
	<i>Temperatura massima di esercizio [°C]</i>	150
	<i>Pressione massima di esercizio [bar]</i>	140
	<i>Superficie di scambio termico [m<sup>2</sup>]</i>	0.738
<b>FIGURA 1.27:</b> - Tipologia di sottoraffreddatore installato sulla pompa di calore	<b>TABELLA 1.6:</b> Caratteristiche del sottoraffreddatore installato sulla pompa di calore	

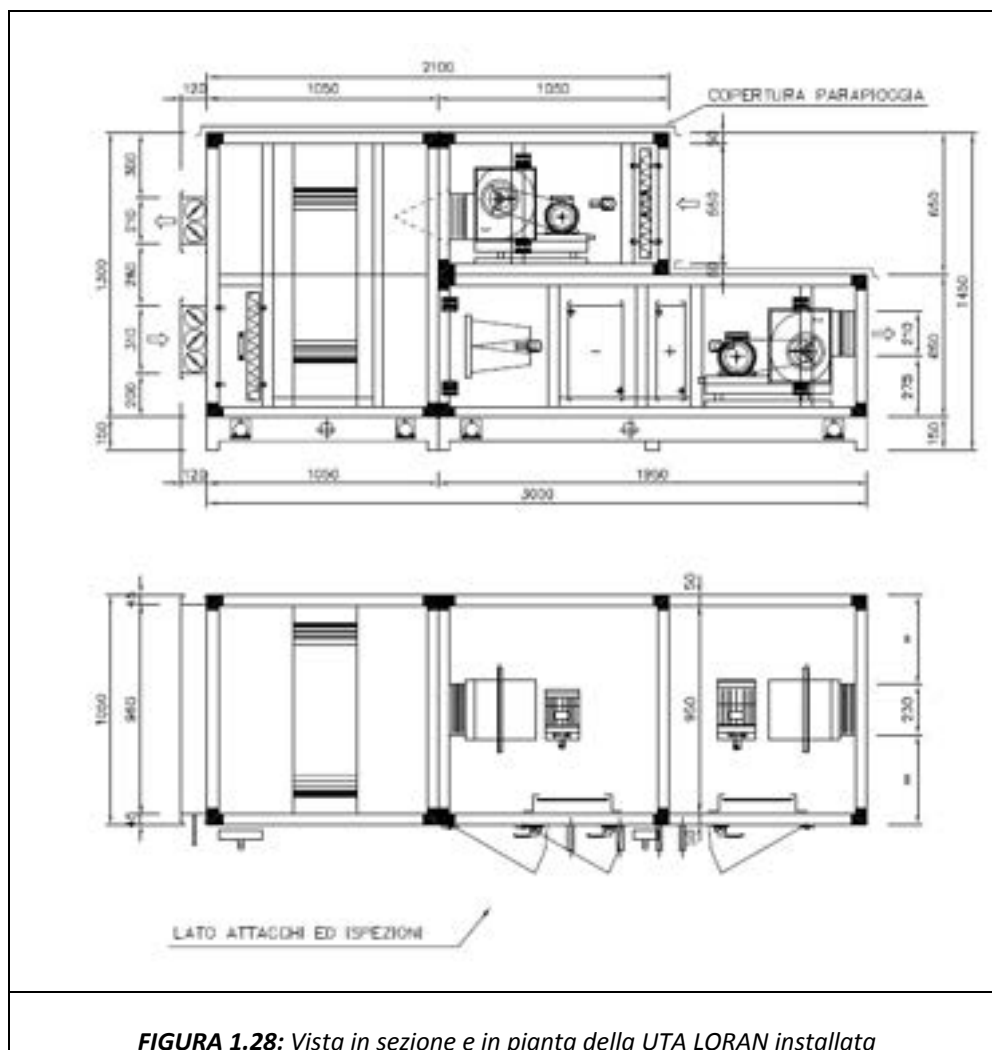
Il sottoraffreddatore è posizionato a valle del primo scambiatore rigenerativo e a monte della valvola di laminazione principale. Ci permette di sotto-raffreddare la CO<sub>2</sub> ad alta pressione prima di entrare nella valvola laminatrice principale, sfruttando il flusso di portata secondaria evolvente all'interno del ramo di media pressione. Il principale vantaggio quindi, oltre a quello di garantire un titolo di ingresso all'evaporatore più basso, è quello di riuscire a recuperare calore dal sottoraffreddamento della portata principale e renderlo disponibile al Gas cooler in modo da aumentare l'efficienza dello scambio termico tra l'anidride carbonica e l'acqua.

Il modello scelto per il sottoraffreddatore è uno scambiatore a piastre fabbricato dalla SWEP modello B16DWHx20/1P-SC-U.

All'interno di questo scambiatore i due fluidi che scambiano calore sono rispettivamente CO<sub>2</sub> alla pressione e temperatura di uscita dal Gas cooler e CO<sub>2</sub> alla pressione intermedia e temperatura che si raggiunge in uscita dalla valvola secondaria.

## 1.2.2 UTA (Unità di Trattamento Aria)

L'unità di trattamento aria (UTA, nella figura seguente rappresentata in sezione e in pianta) gestisce il ricambio d'aria dell'ambiente da climatizzare, garantendo il corretto valore di temperatura, di umidità dell'aria immessa nel locale da climatizzare e della concentrazione di CO<sub>2</sub> espressa in ppm (figura 1.28).



**FIGURA 1.28:** Vista in sezione e in pianta della UTA LORAN installata

L'unità di trattamento aria è costituita da una sezione di presa dell'aria esterna, una di ripresa dell'aria ambiente, una di mandata e una filtrante, un recuperatore rotativo entalpico, una batteria calda e una batteria fredda e due ventilatori, rispettivamente posti sulla mandata e sulla ripresa, comandati da inverter. Il recuperatore rotativo entalpico ha il compito di diminuire il dispendio energetico per portare l'aria in ambiente nelle condizioni desiderate sfruttando il contenuto termico igrometrico dell'aria ripresa dall'ambiente.

Nella figura 1.29 è rappresentata la UTA installata a servizio del container:



Dopo il recuperatore, la portata d'aria da immettere in ambiente viene prima filtrata per poi passare nelle batterie calda o fredda a seconda se è necessario riscaldare o raffreddare l'aria. La quantità d'acqua da inviare alle batterie viene gestita dalle due valvole a tre vie, presenti sul circuito di mandata e di ritorno dell'UTA.



In particolare i set point, e quindi la regolazione del funzionamento delle due valvole, è fatto in modo tale che esse non siano mai aperte contemporaneamente ma venga sempre garantita una zona morta.



**FIGURA 1.31:** UTA LORAN, presa aria esterna, espulsione aria ambiente e canale ripresa aria

L'involucro autoportante della centrale è costituito da profilati di alluminio anodizzato uniti per mezzo di giunti d'angolo anch'essi in alluminio, da pannellatura a doppio guscio in lamiera con interposto isolante termico-acustico, da un basamento in lamiera pressopiegata di forte spessore.

GRANDEZZA SIZE	dimensioni dimensions L x H	sezione section Sb mq	portata aria x V (m <sup>3</sup> /sec) air flow x V (m <sup>3</sup> /sec)									
			2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	
CTL 30	1050 x 650	0,33	2.389	2.688	2.986	3.285	3.583	3.882	4.181	4.479	4.778	

CTL: Modello CTL  
H: Altezza centrale basamento escluso (aggiungere 95/150 mm)  
L: Larghezza sezione  
Sb: Superficie frontale batteria  
V: Portata aria m<sup>3</sup>/h

**FIGURA 1.32:** UTA LORAN, caratteristiche dimensionali e tecniche

Il telaio è costituito da un sistema modulare realizzato con profili estrusi in lega di alluminio UNI 9006/1 anodizzato, accoppiati ad angolari in alluminio pressofuso. L'isolamento termico e acustico utilizzabile è poliuretano espanso (densità 40+/-5 kg/m<sup>3</sup>, conducibilità termica 0.022 (W/mk). Reazione al fuoco secondo ISO 3582 DIN 4102:B3).

L'attenuazione acustica è realizzata con un pannello di spessore 48 mm in poliuretano espanso (figura 1.33).

Pannello sp. 48 poliuretano espanso.		48 mm polyurethane foam panel.							
Frequenza banda Frequency	Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Abbattimento acustico Sound attenuation	Db	3	11	12	13	13	15	33	38

**Figura 1.33: UTA LORAN, attenuazione acustica**

La sezione di filtrazione dell'aria è da ritenersi parte fondamentale nella composizione della centrale di trattamento dell'aria, in quanto svolge un'azione di rimozione di sostanze contaminanti presenti nel flusso aeraulico (figura 1.29). Vengono utilizzati due filtri di tipo piano, a setto sintetico pieghettato, con celle filtranti da 48 mm, efficienza EU4-90% e un filtro a tasche rigide di efficienza F7-85%. Con questo ultimo viene realizzata la filtrazione molecolare, realizzando l'abbattimento di inquinamento dovuto a gas (molecole) quali gas di scarico di autovetture, emissioni industriali rilasciate da processi di combustione o semplicemente fumo di sigaretta.



Il riscaldamento dell'aria esterna, durante il periodo invernale, avviene in gran parte nel recuperatore rotativo (che lavora in ogni condizione con rendimento molto elevato pari al 76% sia in funzionamento estivo che in quello invernale), a scapito dell'aria di ripresa dall'ambiente, e viene successivamente completato nella batteria calda (quella fredda in questo caso non lavora in quanto il flusso freddo è riinviato all'accumulo prima di arrivare alla batteria).

Il recuperatore di calore rotativo aria-aria è costituito da un rotore cilindrico è riempito con un mezzo permeabile all'aria contenente migliaia di canali e caratterizzato da un elevatissimo sviluppo superficiale, da un telaio di contenimento (completo di guarnizioni a spazzola per minimizzare il trafileamento fra i flussi d'aria di immissione e di espulsione), e da



un sistema di azionamento formato da un motore elettrico dotato, secondo necessità, di un regolatore di velocità. Il processo realizzato è un trasferimento di calore e di umidità dall'aria espulsa a quella di rinnovo (figura 1.35).

Le caratteristiche fondamentali di tale recuperatore sono:

- superficie di scambio, molto elevata in rapporto al volume, che consente delle rese molto elevate rispetto ad altre tipologie di recuperatori, raggiungendo anche rendimenti dell'85%;
- efficienza elevata e la possibilità di recupero dell'umidità oltre che del calore (ruota igroscopica) consentono di ridurre in modo determinante la potenzialità installata in un impianto;
- possibilità di trasferimento di calore latente;
- basse perdite di carico.



L'aria di rinnovo e quella di espulsione attraversano ciascuna una metà dello scambiatore, fluendo in controcorrente realizzando uno scambio termico per accumulo: mentre il cilindro ruota lentamente l'aria espulsa attraversa una metà dell'involucro e cede calore alla matrice del rotore che lo accumula. L'aria di rinnovo, che attraversa l'altra metà, assorbe il calore accumulato. Proseguendo la rotazione, le parti che assorbono e cedono calore e umidità si invertono continuamente. In regime invernale, l'aria entrante, fredda e secca, viene

riscaldata e umidificata da quella espulsa mentre in estate l'aria esterna viene raffreddata e deumidificata.

Dopo il recuperatore, il flusso d'aria incontra poi la batteria fredda e quella calda (che assume in questo caso principalmente la funzione di regolazione dell'umidità e di stabilizzazione della temperatura), che portano l'aria alla temperatura di mandata di progetto. Le tabelle successive indicano ulteriori caratteristiche di funzionamento del recuperatore rotativo (tabella 1.7) e delle batterie di raffreddamento e riscaldamento (tabella 1.8).

n° pz.	Descrizione	Marca - Codice	
1	TI AL 08 N v2 C K AT	RECUPERATOR	
	<b>Aria Espulsa</b>		
	Temperatura aria espulsione in	20 °C	Umidità relativa espulsione in 40 %
	Temperatura aria espulsione out	4.82 °C	Umidità relativa espulsione out 96.70 %
	Portata aria di espulsione	2000 m³/h	Perdita carico lato espulsione 148 Pa
	<b>Aria rinnovo</b>		
	Temperatura aria esterna in	0 °C	Umidità relativa esterna in 60 %
	Temperatura aria esterna out	15.18 °C	Umidità relativa esterna out 27.25 %
	Portata aria esterna	2000 m³/h	Perdita carico lato esterna 148 Pa
	<b>Potenzialità di recupero</b>	11.34 kW	Rendimento 75.9 % Rapp. Temperature 75.9 %
	Recuperatore in alluminio Azionamento a velocità costante Motore SPG40 (3x400V), 0.04 kW Giri al minuto: 10 rpm rotore igroscopico (idoneo al recupero di calore sensibile e latente) Bacinella in acciaio zincato		
	<b>Filtro su aria rinnovo</b>		
1	Filtro piano, a setto sintetico pieghettato, celle filtranti 48 mm, eff. EU4 - 90% 400x500x48 mm		
1	Filtro piano, a setto sintetico pieghettato, celle filtranti 48 mm, eff. EU4 - 90% 500x500x48 mm		
	<b>Serranda di espulsione</b>		
1	Serranda di regolazione, telaio in alluminio, alette in alluminio, dimensioni 960x210 mm.		PDR
	<b>Serranda di presa aria esterna</b>		
1	Serranda di regolazione, telaio in alluminio, alette in alluminio, dimensioni 960x310 mm.		PDR
	<b>Verifica Estiva</b>		
	<b>Aria Espulsa</b>		
	Temperatura aria espulsione in	26 °C	Umidità relativa espulsione in 50 %
	Temperatura aria espulsione out	31.31 °C	Umidità relativa espulsione out 38 %
	Portata aria di espulsione	2000 m³/h	Perdita carico lato espulsione 147 Pa
	<b>Aria rinnovo</b>		
	Temperatura aria esterna in	33 °C	Umidità relativa esterna in 45 %
	Temperatura aria esterna out	27.69 °C	Umidità relativa esterna out 59 %
	Portata aria esterna	2000 m³/h	Perdita carico lato esterna 147 Pa
	<b>Potenzialità di recupero</b>	4.29 kW	Rendimento 75.9 % Rapp. Temperature 75.9 %

TABELLA 1.7: UTA LORAN: caratteristiche del recuperatore rotativo

Codice		Batteria di raffreddamento
n° pz.	Descrizione	Marca - Codice
1	<p>BAF60x30 T7 L790 R8 C4 P2.5</p> <p>Materiale Rame x 0,4 mm - Alluminio 0,12 mm - 8 Ranghi - 4 Circuiti - Telaio in ferro zincato</p> <p>Portata aria 2000 [m³/h], Velocità aria 1,67 [m/s], Perdita di carico aria 92 [Pa]</p> <p>Aria entrante: TBS 27,7 [C°], TBU 21,6 [C°], UR 59 [%], entalpia 63,0 [kJ/kg]</p> <p>Aria uscente: TBS 12,8 [C°], TBU 12,8 [C°], UR 100 [%], entalpia 36,1 [kJ/kg]</p> <p>Tipo fluido:Acqua</p> <p>Fluido entrante: 7,0 [C°], Fluido uscente: 12,0 [C°]</p> <p>Portata Fluido: 3094 [dm³/h], Velocità Fluido: 1,1 [m/s], Perdite di carico: 23,4 [kPa]</p> <p>Potenza totale: 18,0 [kW]</p> <p>Potenza sensibile: 10,1 [kW]</p> <p>Diametro collettori: 1"</p> <p>Superficie di scambio 58,26 [m²]</p> <p>Volume interno (escluso collettore) 11,60 [l]</p> <p>Bacinella in acciaio zincato</p> <p><b>Dimensionata per condizioni umide</b></p>	---
Codice		Batteria di riscaldamento
n° pz.	Descrizione	Marca - Codice
1	<p>BAC60x30 T7 L790 R3 C5 P2.5</p> <p>Materiale Rame x 0,4 mm - Alluminio 0,12 mm - 3 Ranghi - 5 Circuiti - Telaio in ferro zincato</p> <p>Portata aria 2000 [m³/h], Velocità aria 1,67 [m/s], Perdita di carico aria 17 [Pa]</p> <p>Aria entrante: TBS -5,0 [C°], TBU -5,9 [C°], UR 80 [%], entalpia 0,1 [kJ/kg]</p> <p>Aria uscente: TBS 21,6 [C°], TBU 9,1 [C°], UR 13 [%], entalpia 27,0 [kJ/kg]</p> <p>Tipo fluido:Acqua</p> <p>Fluido entrante: 50,0 [C°], Fluido uscente: 45,0 [C°]</p> <p>Portata Fluido: 3123 [dm³/h], Velocità Fluido: 0,9 [m/s], Perdite di carico: 6,6 [kPa]</p> <p>Resa totale: 18,0 [kW]</p> <p>Diametro collettori: 3/4"</p> <p>Superficie di scambio 21,85 [m²]</p> <p>Volume interno (escluso collettore) 5,00 [l]</p>	---

**TABELLA 1.8:** UTA LORAN: caratteristiche delle batterie di raffreddamento e riscaldamento

### 1.2.3 Pompe di circolazione

La tabella 3.5 indica la tipologia di circolatori selezionati per le varie esigenze d'impianto. In particolare, riferendosi allo schema d'impianto, per le pompe P1, P4 e P5 sono stati selezionati i circolatore tipo Grundfos UPS 25-80 le cui caratteristiche tecniche sono riportate nella tabella 1.9: si tratta di pompe a rotore bagnato a 3 velocità a bocchettoni, destinate alla circolazione di acqua all'interno di impianti di riscaldamento e piccoli impianti di condizionamento in edifici commerciali; il circolatore P6 del ramo compreso tra i collettori e la batteria calda della UTA è del tipo Grundfos UPS 25-70: in tabella 3.5 sono riportate le principali caratteristiche dei due tipi di circolatori (tra parentesi quelle del modello UPS 25-70).

Q.tà nr.	Identificazione (Etichetta)	pot. Motore/impiego			Posizione	Note
		Tens. V-Ph_Hz	KW	Corrente massima funzionamento A		
	<b>ELETTROPOMPE</b>					
1	P1: Q=2,0 mc/h ; H=60 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	UPS 25-80 V. 1X230
1	P2: Q=4,3 mc/h ; H=65 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	Magna 25-100 V. 1X230: CON INVERTER A BORDO
1	P3: Q=5,6 mc/h ; H=60 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	Magna 25-100 V. 1X230: CON INVERTER A BORDO
1	P4: Q=5,2 mc/h ; H=40 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	UPS 25-80 V. 1X230
1	P5: Q=3,1 mc/h ; H=50 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	UPS 25-80 V. 1X230
1	P6: Q=3,1 mc/h ; H=25 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	UPS 25-70 V. 1X230
1	P7: Q=2,6 mc/h ; H=40 kPa	230-1-50		-	Esterno Container	Magna 25-60 V. 1X230: CON INVERTER A BORDO

**TABELLA 1.9:** Caratteristiche delle pompe di circolazione previste sull'impianto

Range Temperature esercizio	-25 °C (+2 °C)/+110 °C (+95 °C)
Grandezza attacchi	G. 1"1/2
Interasse pompa	180 mm
Tensione	1x230 V
Potenza assorbita 1-2-3 velocità	190 (140)-175 (120)-130 (95) W
Portata massima	9 (4.5)mc/h
Prevalenza massima	8 (7)mt

**TABELLA 1.10:** Caratteristiche delle pompa di circolazione Grundfos UPS 25-80 (UPS 25-70)

Le pompe selezionate per i rami acqua raffreddamento gas-cooler e circuito glicolato (P2 e P3) sono della Grundfos modello Magna 25-100 (figura 1.36): si tratta di modelli dotati di inverter e aventi le caratteristiche indicate in tabella 1.7.



**FIGURA 1.36:** Circolatore di tipo Grundfos MAGNA 25-100

Il circolatore per la linea fan-coil, P7 nello schema d'impianto, è della stessa famiglia del precedente (Grundfos modello Magna 25-60): le sue caratteristiche, laddove diverse dal modello precedente, sono indicate tra parentesi in tabella 1.11.

Range Temperature esercizio	+2 °C/+95 °C
Grandezza attacchi	G. 1"1/2
Interasse pompa	180 mm
Tensione	1x230 V
Range Potenza assorbita	25 (10)/450 (85) W
Range portate esercizio	4.5/11 (8.5)mc/h
Range prevalenze esercizio	1/10(6)mt

**TABELLA 1.11:** Caratteristiche delle pompa di circolazione Grundfos Magna 25 - 100 (MAGNA 25-60)

#### 1.2.4 Dry Cooler

E' stato selezionato il modello SAL8S 2122 C V (Passo alette 3,2), un raffreddatore di liquido con elettroventilatori assiali. Esso è una batteria di scambio termico a pacco alettato per acqua che scambia calore con l'aria esterna grazie alla convezione forzata dai ventilatori (figura 1.37).







**FIGURA 1.37:** Dry Cooler SAL8S 2122 C V

Il dry cooler ha la funzione di dissipare l'acqua calda o l'acqua fredda prodotta dalla pompa di calore ma non usata dall'utenza. Due apposite valvole a tre vie gestiscono rispettivamente la mandata e il ritorno dell'acqua rispettivamente dal lato caldo e dal lato freddo.

Questo scambiatore è una macchina meno complessa e meno costosa dal punto di vista del consumo energetico e della manutenzione rispetto ad un tipico refrigeratore. L'efficienza di raffreddamento e riscaldamento dell'acqua, a seconda se è necessario dissipare caldo o freddo, dipende fortemente dal salto termico che si realizza nello scambio di calore tra aria e acqua. Lo scambio termico tra aria ed acqua si realizza tramite l'utilizzo di batterie alettate, attraverso le quali l'aria viene forzata a passare da due elettroventilatori assiali, raffreddando così l'acqua che circola all'interno delle tubazioni. In tal modo non c'è contatto diretto tra acqua ed aria, con lo svantaggio di una minore efficienza di scambio rispetto ad una torre evaporativa ad esempio (differenza tra temperatura dell'aria a bulbo secco e temperatura acqua) ma con tutti i vantaggi legati ad un circuito idraulico completamente chiuso. Il contatto diretto tra aria e acqua favorisce infatti la formazione di alghe, incrostazioni e lo sviluppo di fenomeni d'ossidazione delle parti metalliche del circuito

idraulico. Ne consegue che il dry cooler avrà sì un'efficienza leggermente inferiore alla torre evaporativa, ma avrà un costo ed una semplicità d'esercizio decisamente inferiori.

Il dry cooler utilizza come fluido acqua e glicole al 43% dissipando in estate una potenza di 66 kW ed in inverno una potenza di 22 kW, assorbendo 3,5 kW ed elaborando una portata d'aria di 36000 m<sup>3</sup>/h (figura 1.38).

<b>RAFFREDDATORE DI LIQUIDO CON ELETTROVENT.ASSIALE</b>				
<b>Modello: SAL8S 2122 C V - Passo alette 3,2</b>		Refriger 2011 Ver. 1.5.7.216 - PRICE LIST 1/2011		
Funzionamento		<b>ESTIVO (R)</b>	<b>INVERNALE (W)</b>	
Temp. Ingresso Aria	[°C]	35,0	0,0	
Temp. ingresso Liquido	[°C]	50,0	-8,0	
Umidità relativa	[%]	Secco	50	
Portata Liquido	[kg/s]	1,96	1,49	
Perdita Pressione Liquido	[kPa]	16,8	51,3	
Liquido		propil. 43%	propil. 43%	
Livello sul mare	[m]	0	0	
Montaggio		Verticale	Verticale	
<b>Collegamento :</b>	<b>400V-3PH-50Hz</b> 			
<b>Potenza</b>	<b>[kW]</b>	<b>66,58</b>	<b>22,12</b>	
Portata aria	[m <sup>3</sup> /h]	36.230,0	36.230,0	
Temp. Uscita Aria	[°C]	40,8	-1,6	
Temp. uscita Liquido	[°C]	41,0	-4,0	
Potenza Assorbita	[W]	3.500	3.500	
Assorbimento	[A]	7,6	7,6	
Assorb. massimo ventilatori	[A]	8,6	8,6	
Velocità Ventilatori	[1/min]	895	895	
Livello Sonoro (alla distanza 10 [m])	[dB(A)]	50	50	
Livello di potenza sonora	[dB(A)]	82	82	
Ventilatori:	[mm]	2 x 800	Superficie [m <sup>2</sup> ]	178,5
Poli :	[n]	6	Peso [kg]	390
Passo alette	[mm]	3,2	Attacchi Gas ["]	2
Volume	[dm <sup>3</sup> ]	44,00	Dimensione d'ingombro [mm]	3.690 x 905 x 1.210
<b>Pressione massima di esercizio batteria</b>	<b>[bar]</b>	<b>12,0</b>		
Materiale Carenatura	Lamiera zincata verniciata a polvere RAL 9003	Materiale Alette	Al	
Materiale Collettori	Collettore Cu, attacco Fe filettato	Materiale Tubi	Cu	

**FIGURA 1.38:** Dati Dry Cooler modello SAL8S 2122 C V



### 1.2.5 Serbatoi inerziali

Nell'impianto sono presenti due serbatoi inerziali, rispettivamente quello lato caldo SAC (figura 1.41) e quello lato freddo SAF (figura 1.42), in cui viene stoccata l'acqua calda e l'acqua fredda, prodotte dalla pompa di calore. Entrambi i serbatoi hanno una capacità di 1500 L, sono coibentati in modo opportuno e presentano gli attacchi per la connessione ai circuiti di scambio con la pompa di calore, mediante due appositi scambiatori di calore a piastre, ai collettori dell'Unità di trattamento aria e dei fan coil. A differenza di quello freddo, il serbatoio di accumulo caldo è dotato di un serpentino interno per la produzione di acqua calda mediante i pannelli solari per i quali è presente la predisposizione, a macchina spenta. È necessario ribadire che i due serbatoi non interagiscono direttamente con la pompa di calore, ma sono presenti due appositi scambiatori di calore a piastre i quali realizzano un circuito ausiliario a parte.



**FIGURA 1.40:** Serbatoi inerziali: lato Sinistro accumulo caldo, lato Destro accumulo freddo





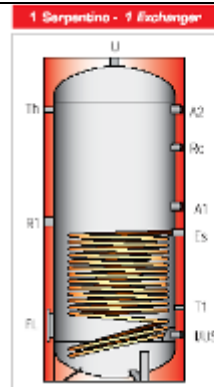
### Caratteristiche tecniche - Technical specifications

Versioni disponibili - Available versions	- con 1 serpentino fisso - with 1 fixed exchanger - con 2 serpentini fissi - with 2 fixed exchangers
Materiale - Material	- acciaio al carbonio - carbon steel
Treatmento interno - Internal coating	- smaltatura conforme alla norma DIN 4753.3, adatto per acqua potabile - enamel according to DIN 4753.3, suitable for drinkable water
Isolamento - Insulation	- 100 - 500 litri: poliuretano flessibile, spessore 50 mm, densità 30 kg/mc - 100 - 500 litres: flexible polyurethane, thickness 50 mm, density 30 kg/mc - 800 - 1500 litri: poliuretano flessibile, spessore 100 mm, densità 18 kg/mc - 800 - 1500 litres: flexible polyurethane, thickness 100 mm, density 18 kg/mc
Rivestimento - External coating	- sky colore rosso - sky red colour
Pressione massima sanitario Maximum pressure mains supply	6 bar
Pressione massima scambiatori Maximum pressure exchangers	9 bar
Temperatura massima di esercizio Maximum working temperature	95°C

### Accessori - Accessories

di serie - standard	- anodo di magnesio - magnesium anode - flangia di ispezione (escluso 100 litri) - inspection cover (excluded 100 litres)
a richiesta - optional	- resistenza elettrica - immersion heater - anodo elettronico - electronic anode - prozetto portasonda - sensor housing - gruppo solare - solar unit

MODELLO	Capacità nominale l	Diametro interno mm	Diametro esterno mm	Altezza mm	Volume l	Superficie scamb. Inf. mq	Superficie scamb. Sup. mq	U	B-Z	S
P03001S	300	500	600	1667	300	1,6	-	1" ¼	1" ¼	¾"
P05001S	500	650	750	1702	501	2,3	-	1" ¼	1" ¼	¾"
P06501S	650	790	990	1562	650	2,1	-	1" ½	1" ¼	1"
P08001S	800	790	990	1862	798	3,0	-	1" ½	1" ¼	1"
P10001S	1000	790	990	2212	970	3,5	-	1" ½	1" ¼	1"
P12501S	1250	1000	1200	1842	1239	3,1	-	1" ½	1" ¼	1"
P15001S	1500	1000	1200	2092	1450	3,8	-	1" ½	1" ¼	1"
P20001S	2000	1100	1300	2372	1997	4,6	-	1" ½	1" ¼	1"
P25001S	2500	1250	1450	2192	2380	4,7	-	1" ½	1" ¼	1"
P30001S	3000	1250	1450	2692	2960	5,3	-	1" ½	1" ¼	1"
P40001S	4000	1400	1600	2782	3805	6,4	-	1" ½	1" ¼	1"
P50001S	5000	1600	1800	2842	5021	7,1	-	1" ½	1" ¼	1"



- I Ingresso acqua sanitaria / Hot mains water
- U Uscita acqua calda / Outlet hot water
- Es, Ue Scambiatore edlere / Boiler exchanger
- Ec, Ue Scambiatore ausiliario / Auxiliary exchanger
- T1, T2 Attacchi sonda / Sensor connections
- Th Attacco termometro / Thermometer connection
- A1, A2 Anodo / Anode
- R1 Attacco resistenza elettrica / Immersion heater connection
- Rc Ricircolo / Recirculation

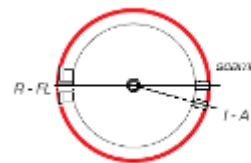


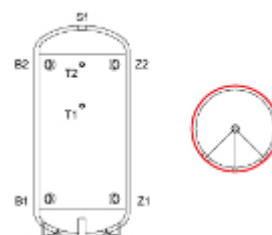
FIGURA 1.41: Serbatoio inerziale accumulo caldo SAC

## KOOLTANK

Accumuli in acciaio al carbonio per acqua refrigerata con isolamento a celle chiuse.  
Capacità da 100 a 5000 litri sono la soluzione per lo stoccaggio di acqua refrigerata o calda per impianti di climatizzazione.

### CARATTERISTICHE

Versioni disponibili: attacchi filettati - attacchi flangiati  
Materiale: acciaio al carbonio  
Isolamento: polietilene celle chiuse, spessore 20 mm  
Rivestimento: skay colore grigio  
Pressione massima: 6 bar  
Temperatura di esercizio: 7 - 50°C

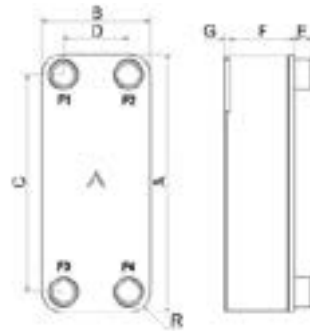


B, Z  
Attacchi impianto / Circuit connections  
T  
Attacchi sonda / Sensor connectors  
Sf  
Sfalo / Air vent

MODELLO	Capacità nominale l	Diametro interno mm	Diametro esterno mm	Altezza mm	Volume l	B-Z	T	Sf
P0100K00	100	450	500	763	103	1" ½	1" ½	1" ¼
P0200K00	200	500	550	1227	213	1" ½	1" ½	1" ¼
P0300K00	300	500	550	1642	300	3"	1" ½	1" ¼
P0500K00	500	650	700	1677	501	3"	½"	1" ¼
P0800K00	800	790	840	1687	770	3"	½"	1" ½
P1000K00	1000	790	840	1887	870	3"	½"	1" ½
P1500K00	1500	1000	1050	2017	1450	3"	½"	1" ½
P2000K00	2000	1100	1150	2047	1790	3"	½"	1" ½
P2500K00	2500	1250	1300	2117	2380	4"	½"	1" ½
P3000K00	3000	1250	1300	2617	2960	4"	½"	1" ½
P4000K00	4000	1400	1450	2707	3805	4"	½"	1" ½
P5000K00	5000	1600	1650	2767	5021	4"	½"	1" ½

FIGURA 1.42: Serbatoio inerziale accumulo freddo SAF

## 1.2.6 Scambiatori di calore a piastre



**DATI DI PROGETTO**

Fluido	:	Water	PropyleneGlycol_Water
			43 %
Temperatura entrata	:	12 °C	4,5 °C
Temperatura uscita	:	7 °C	9,5 °C
Portata	:	1,431 kg/s	1,662 kg/s

**DATI SCAMBIATORE**

Capacità	:		30,00 kW
Superficie totale di scambio	:		8,04 m <sup>2</sup>
dT medio logaritmico	:		2,5 K
Perdita di carico calcolata	:	5,08 kPa	10,1 kPa
Numero dei canali	:	67	68
Numero totale delle piastre	:		136

**DATI**

Materiale piastre	:		AISI 316
Brasatura in rame	:		Rame
Pressione di collaudo	:		45 bar
Pressione di esercizio	:		25/22 / 16/14 bar
Massima temperatura di	:		155/225 °C
Volume	:	7,437	dm <sup>3</sup> 7,548 dm <sup>3</sup>
Profondità (F+G)	:		314,64 mm
Larghezza	:		119 mm
Altezza	:		526 mm
Peso a vuoto	:		24,56 kg

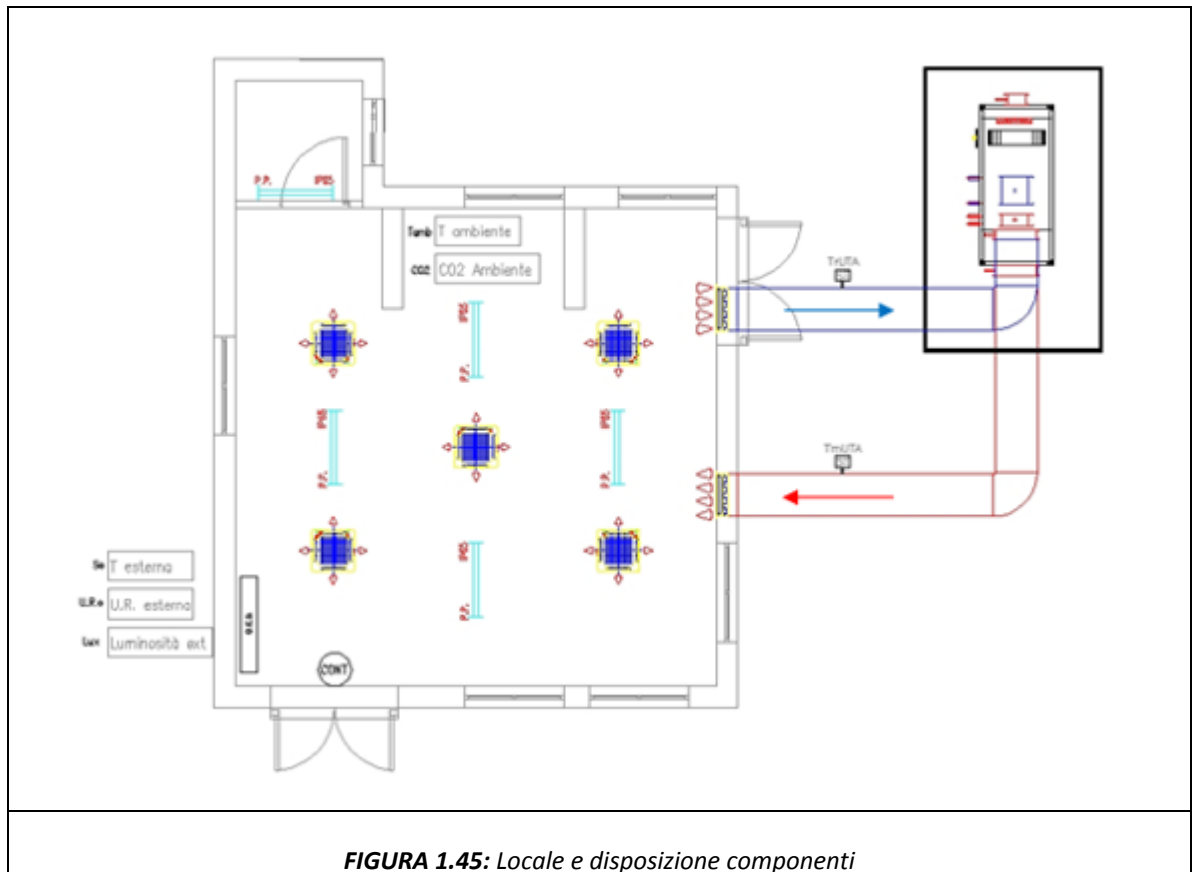
*FIGURA 1.43: Scambiatore a piastre, caso estivo lato freddo*

<b>Fluid Side 1 : Water</b>				
<b>Fluid Side 2 : Propylene Glycol - Water (43,0 %)</b>				
<b>Flow Type : Counter-Current</b>				
<b>DUTY REQUIREMENTS</b>				
Heat load	kW	<b>Side 1</b>	30,00	<b>Side 2</b>
Inlet temperature	°C		40,00	57,00
Outlet temperature	°C		55,00	43,64
Flow rate	kg/s		0,4785	0,5972
Max. pressure drop	kPa		50,0	50,0
Thermal length			5,47	4,87
<b>PLATE HEAT EXCHANGER</b>				
Total heat transfer area	m <sup>2</sup>	<b>Side 1</b>	8,04	<b>Side 2</b>
Heat flux	kW/m <sup>2</sup>		3,73	
Mean temperature difference	K		2,74	
O.H.T.C. (available/required)	W/m <sup>2</sup> , °C		1360/1360	
Pressure drop -total*	kPa		0,595	1,02
- in ports	kPa		0,153	0,230
Port diameter	mm		33,0	33,0
Number of channels			67	68
Number of plates			136	
Oversurfacing	%		0	
Fouling factor	m <sup>2</sup> , °C/kW		0,000	
Reynolds number			221	85,4
Port velocity	m/s		0,566	0,683

**FIGURA 1.44:** Scambiatore a piastre caso invernale lato caldo

### Locale asservito all'impianto di climatizzazione

Il locale allestito per la sperimentazione (superficie = 50 m<sup>2</sup>, volume=125 m<sup>3</sup>) è stato dotato di cinque fan coil da 2,5 [kW] ciascuno e di due bocchette per il trattamento dell'aria da parte della UTA. La figura sottostante mostra la disposizione dei principali componenti dell'impianto all'interno e nelle zone circostanti il container (figura 1.45).



**FIGURA 1.45:** Locale e disposizione componenti

I fan coil utilizzati sono delle unità terminali, operanti sia con acqua calda sia con acqua refrigerata e possono essere usati in diverse applicazioni come i centri commerciali, uffici, negozi ed hotel. L'installazione nel contro soffitto permette di nascondere i tubi dell'acqua e i fili elettrici, lasciando muri e pavimenti completamente liberi. In realtà il contro soffitto non è presente perché il locale è utilizzato per lo svolgimento della parte pratica della scuola di climatizzazione presente nell'edificio F92 adiacente. Essi sono caratterizzati da: versatilità di utilizzo in quanto possono essere impiegati in diverse tipologie di edifici, limitato ingombro richiesto dalla posa in opera delle tubazioni dell'acqua, differenziazione del regime di funzionamento (caldo/freddo) in ambienti diversi nello stesso momento, opportunità di poter posizionare l'unità in diverse modalità all'interno del locale (a muro, a soffitto, ecc). Un

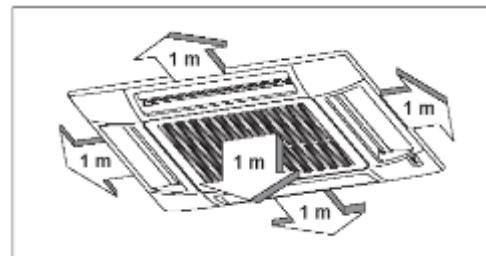
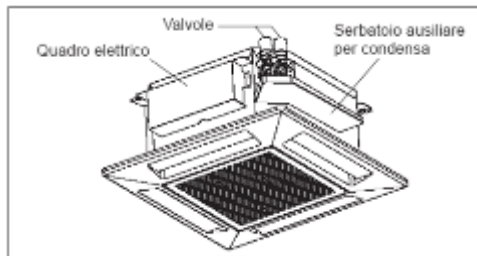
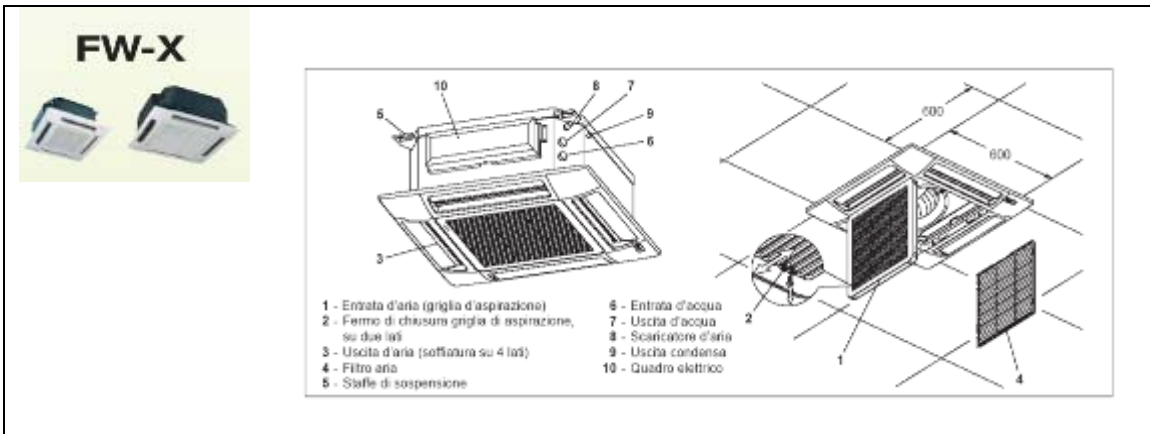
limite riscontrabile negli impianti a soli fan coil risiede nella scarsa o assente possibilità di offrire un soddisfacente rinnovo dell'aria interna e una regolazione dell'umidità dell'aria non propriamente idonea. Tale limite è superato qui con l'utilizzo di un'unità di trattamento aria.



I moderni fan coil si presentano generalmente sotto forma di mobiletto, da installare a pavimento o a soffitto. Essi presentano caratteristiche eccellenti in termini di silenziosità e di resa oltre ad un design che facilmente si sposa con applicazioni esterne in abitazioni civili. Negli edifici civili per abitazione o negli alberghi il singolo ventilconvettore è in grado di sostituire contemporaneamente l'elemento a radiatore per il riscaldamento invernale e lo split per il condizionamento estivo, consentendo un risparmio in termini di spazi occupati all'interno del locale, una semplificazione impiantistica ed un minore impatto ambientale sulle facciate esterne dell'edificio.

Generalmente un ventilconvettore è costituito da una struttura metallica o in materiale plastico che costituisce il mobiletto all'interno del quale trovano alloggio tutti i componenti idraulici. Possono essere presenti uno o due scambiatori di calore, necessari per il

trasferimento del calore dall'acqua all'aria o viceversa. Durante il raffreddamento estivo l'aria che attraversa la batteria fredda deposita parte della sua umidità sulla batteria stessa, deumidificandosi. Tale umidità scende per gravità verso la bacinella di raccolta che è posizionata al di sotto della batteria stessa. Da qui l'acqua viene convogliata al di fuori mediante un'apposita tubazione. All'interno della bacinella è bene non si verificano ristagni d'acqua che, assieme all'inevitabile sporcizia che può penetrare all'interno del ventilconvettore, porterebbe alla formazione di cattivi odori. Nell'installazione del mobiletto è necessario assicurarsi che venga rispettata la corretta pendenza per favorire il deflusso dell'acqua all'esterno. L'acqua calda e fredda vengono convogliate e raccolte dallo scambiatore di calore attraverso un collettore di adduzione che normalmente viene posizionato su di uno dei lati del ventilconvettore. Gli elettroventilatori hanno il compito di aspirare l'aria ambiente dalla parte bassa del mobiletto e di inviarla attraverso la batteria, dove viene trattata, ed in seguito all'esterno del mobiletto attraverso la sua parte superiore. Poiché la depressione causata dal funzionamento degli elettroventilatori richiama anche una certa quantità di polvere e sporcizia, all'ingresso dell'aria nel mobiletto viene posizionato un filtro che ha il compito di evitare che questi elementi possano andare a sporcare la batteria di scambio. Periodicamente tale filtro deve essere pulito, per evitare che si intasi e limiti la portata d'aria che viene trattata dal ventilconvettore. Anche le griglie di entrata e di uscita vanno mantenute costantemente libere da qualsiasi impedimento. I ventilconvettori possono essere a due o a quattro tubi, a seconda se nel mobiletto sono presenti uno o due batterie di scambio termico. Nel primo caso c'è un solo tubo per l'adduzione e un solo tubo per il ritorno; questo implica la conversione manuale dei tubi stagionalmente. Nel secondo caso, nel mobiletto arrivano due tubi per l'adduzione e due per il ritorno, in modo da distribuire separatamente l'acqua calda e l'acqua fredda in funzione delle esigenze dell'ambiente in ogni periodo dell'anno.



Unit size	011	021	031	041	051	061	081	101
<b>4-WAY CEILING CASSETTE</b>								
Cooling capacity (max. fan speed) kW	-	-	2.6	-	4.7	6.0	7.6	9.92
MODEL	-	-	FW-X031EH5	-	FW-X061EH5	FW-X061EH5	FW-X081EH5	FW-X101EH5
Dimensions H/W/D body mm	-	-	296x575x575	-	296x575x575	310x760x760	340x760x1050	340x760x1050
grille panel mm	-	-	41x730x730	-	41x730x730	30x860x860	30x860x1150	30x860x1150

**NOMINAL PERFORMANCE & PHYSICAL DATA**

MODEL	FW-X031EH5
<b>Performance</b>	
Main power supply	V/Ph/Hz
Total cooling capacity	Max/Med/Min* kW
Sensible cooling capacity	Max/Med/Min* kW
Heating capacity	Max/Med/Min* kW
Air flow	Max/Med/Min* m <sup>3</sup> /h
Absorbed power	Max/Med/Min* W
Water flow	Max/Med/Min* l/h
Water pressure drop	Max/Med/Min* kPa
Sound power level (Lw)	Max/Med/Min* dB-A
Sound pressure level (Lp)	Max/Med/Min* dB-A
Water connections	inch
Coil water content	Lt
Kit 3-way valve	diameter
(mandatory accessory separately ordered)	Kvs
<b>Dimensions &amp; Weights</b>	
Dimensions H/W/D	body mm
	grille panel mm
Weight (with grille panel)	Kg

(\*): Fan Speed

**FIGURA 1.47 a):** Ventilconvettori Sanyo, caratteristiche tecniche



**Nominal conditions**

	Cooling	Heating	Sound pressure level
• Entering Air Temperature	27°C (db) 19°C (wb)	20°C	At 2m distance in closed environment
• Entering Water Temperature	7°C	50°C (at same water flow as for cooling)	100m <sup>3</sup> volume with 0.5 sec reverberation time
• Leaving Water Temperature	12°C	60° Maximum water entering temperature	

**COOLING CAPACITY**

Fan speed: **MED**

MODEL	X801	X801	X861	X881	X101	X021	X061	X061	X881	X101	X821	X851	X065	X881	X101	
																Ambient temperature
6/10	Total capacity	kW	2.36	4.10	4.82	5.80	7.88	7.88	4.78	5.70	6.70	9.79	3.22	5.34	6.39	7.80
	Service capacity	kW	1.88	2.97	3.52	4.50	5.92	2.16	3.26	4.52	5.00	6.72	2.45	3.77	4.83	5.59
	Water flow	l/h	400	700	820	1000	1360	890	970	960	1160	1580	550	910	1095	1290
7/12	Total capacity	kW	1.72	3.18	3.79	4.80	6.56	2.25	4.10	5.30	6.00	8.00	2.50	4.42	5.20	6.40
	Service capacity	kW	1.22	2.58	3.12	4.10	5.17	2.08	3.21	3.80	4.70	6.22	2.18	3.38	4.18	5.10
	Water flow	l/h	200	580	690	780	1050	395	690	900	1020	1400	440	780	905	1065
10/15	Total capacity	kW	1.30	2.15	2.52	3.50	4.11	1.50	2.64	3.00	4.00	4.83	1.90	2.95	3.53	4.50
	Service capacity	kW	1.30	2.13	2.52	3.50	4.11	1.58	2.64	3.00	4.00	4.83	1.90	2.95	3.53	4.50
	Water flow	l/h	220	380	430	600	700	270	430	520	700	840	325	500	600	795
12/17	Total capacity	kW	1.01	1.72	2.03	3.00	3.21	1.30	2.12	2.53	3.50	4.12	1.80	2.55	3.03	4.00
	Service capacity	kW	1.01	1.72	2.03	3.00	3.21	1.30	2.12	2.53	3.50	4.12	1.80	2.55	3.03	4.00
	Water flow	l/h	175	295	350	520	570	225	370	430	600	705	277	440	520	700

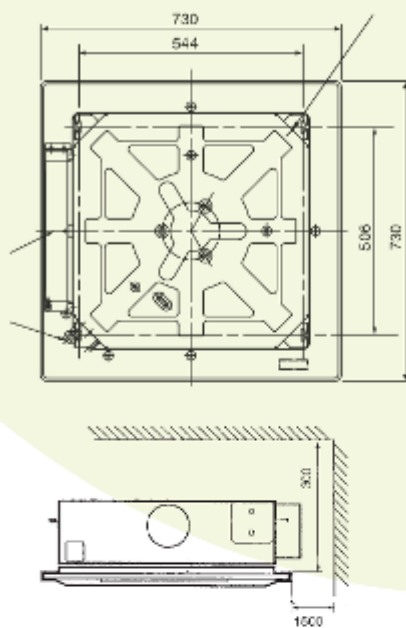
**HEATING CAPACITY**

Fan speed: **MED**

MODEL	X021	X051	X061	X081	X101	X821	X051	X061	X081	X101	X821	X051	X061	X081	X101	
																Ambient temperature
45	Heating	kW	3.08	4.40	5.10	7.10	8.50	2.80	4.00	5.40	6.40	8.50	2.54	3.50	4.80	5.60
	Water flow	l/h	540	860	1300	1500	2150	540	860	1300	1500	2150	540	860	1300	1500
50	Heating	kW	3.40	5.30	7.00	8.40	11.30	3.11	4.85	6.40	7.70	10.80	2.82	4.50	5.80	7.80
	Water flow	l/h	395	690	860	1000	1400	395	690	860	1000	1400	395	690	860	1000
60	Heating	kW	4.82	7.30	10.50	12.30	16.70	4.56	6.60	8.90	11.50	15.60	4.21	6.40	8.25	10.90
	Water flow	l/h	425	700	1060	1220	1710	425	700	1060	1220	1710	425	700	1060	1220

**FIGURA 1.47 b): Ventilconvettori Sanyo, caratteristiche tecniche**

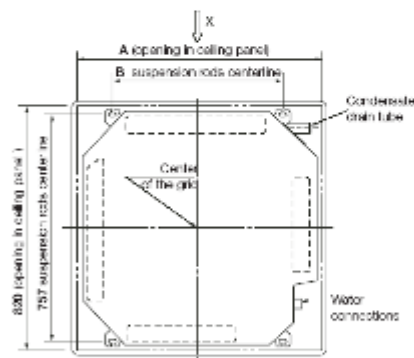
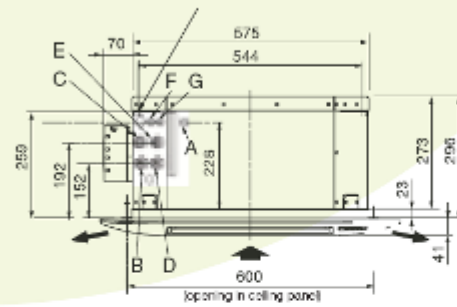
## DIMENSIONS AND MINIMUM CLEARANCE



### FW-X031 - FW-X051

- A** Drain connection: Ø 10 mm
- B** Water inlet: 1/2" (female)
- C** Water outlet: 1/2" (female)
- D** Not utilized
- E** Not utilized
- Weight (without water): body 18 kg FW-X031
- Grille panel 20 kg FW-X051
- 3 kg

Dimensions in mm  
 Condensate water lift above unit top: 200mm

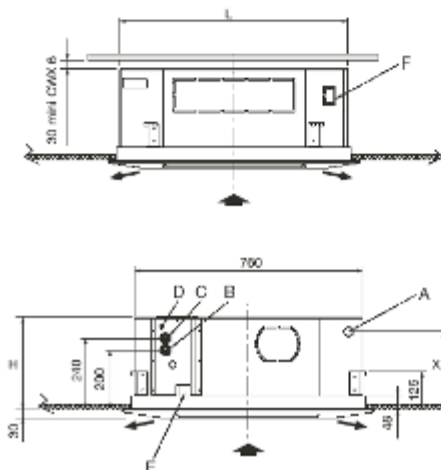
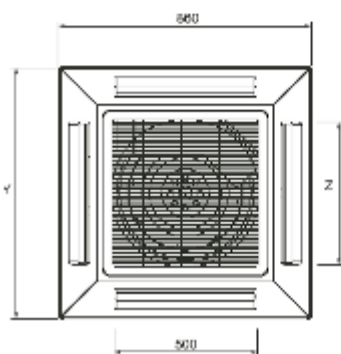


### FW-X061 - FW-X081 - FW-X101

- A** Drain connection: Ø32 mm external
- B** Water inlet: 3/4" (female)
- C** Water outlet: 3/4" (female)
- D** Airvent
- E** Electric cable entrance 60 mm x 55 mm
- F** Fresh air intake:

Dimensions in mm  
 Condensate water lift above unit top: 200 mm

Model	L	H	X	Y	Z
FW-X061	760	310	260	860	500
FW-X081	1050	340	290	1150	750
FW-X101					



**FIGURA 1.48:** Ventilconvettori Sanyo, caratteristiche dimensionali

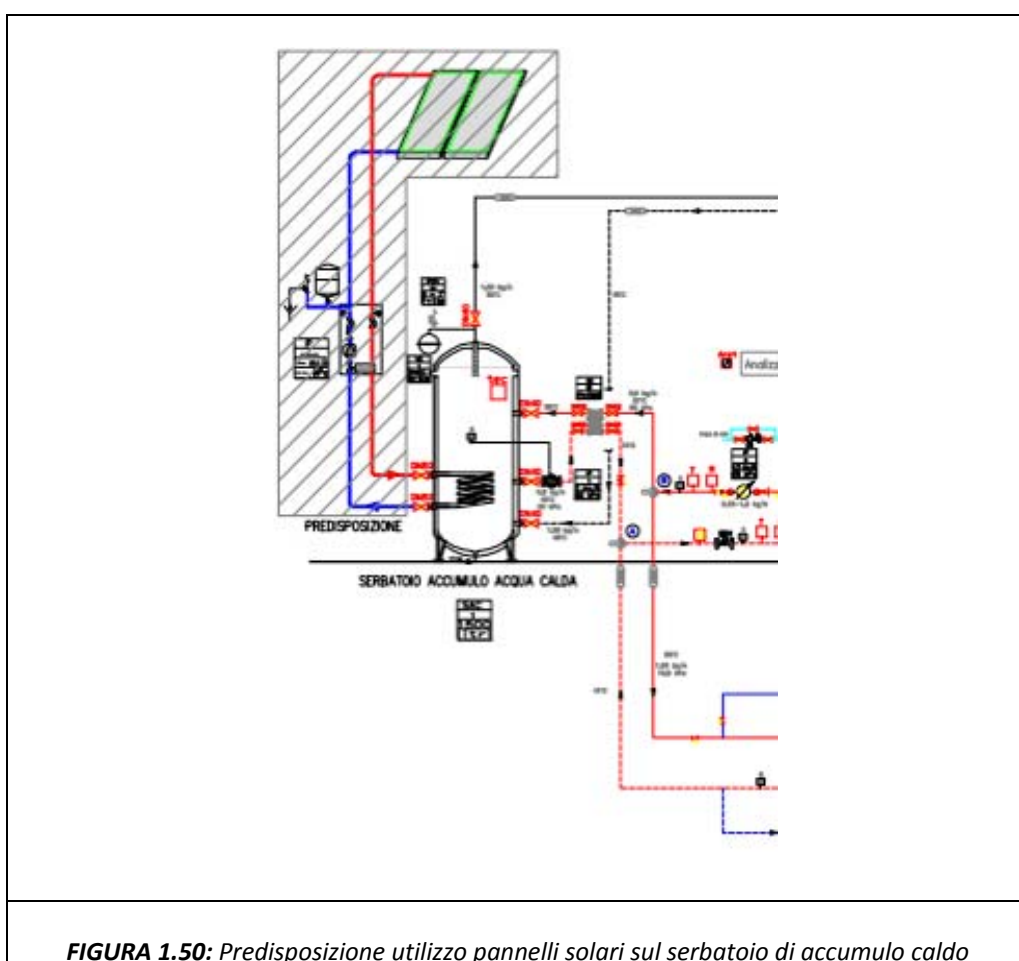
Nel container i vetilconvettori sono a due tubi e installati a soffitto (figura 1.48). Le funzioni da essi svolte sono il raffreddamento mediante lo scambiatore di calore ad acqua a due tubi

e la ventilazione con filtrazione realizzata da un filtro pulibile. È disponibile un comando montato a muro per pilotare da remoto tali unità, settandone la velocità (figura 1.49). I fan coil sono settati in modo tale che in inverno essi partono quando la temperatura in ambiente scende al di sotto dei 21 °C mentre in estate quando la temperatura è superiore ai 25 °C. La loro velocità può essere variata manualmente mediante l'apposito pannello presente in ambiente scegliendo tra alta, media e bassa velocità. Di seguito le caratteristiche dei vetilconvettori.

 <p>RCC 10</p>	
<p><b>Wall Mounted Controls</b></p> <p>MODEL _____</p> <p>Code N° _____</p> <p><b>Function</b> _____</p> <p>On-off _____</p> <p>Fan _____</p> <p>Thermostat _____</p> <p>S/W Changeover _____</p>	<p><b>RCC 10</b></p> <p>70250051</p> <p>Yes</p> <p>3 speed-manual</p> <p>fan and/or valve</p> <p>auto or remote</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p><b>70250051</b></p>  <p>Spia funzionamento riscaldamento</p> <p>Spia funzionamento ventilazione</p> <p>Spia funzionamento raffreddamento</p> <p>Manopola di regolazione temperatura</p> <p>Selettore di messa in funzionamento con selezione delle velocità di ventilazione</p> </div>	
<p><b>FIGURA 1.49:</b> Ventilconvettori Sanyo, modalità di installazione e comando a distanza</p>	

### 1.2.7 Collettori solari (sola predisposizione)

Lo schema d'impianto mostra una possibile implementazione del sistema ausiliario di pannelli solari a servizio del sistema di climatizzazione (figura 1.50). Nel caso rappresentato, il campo solare è collegato direttamente al serbatoio caldo che è dotato di uno scambiatore di calore interno (non estraibile) idoneo per applicazioni solari. In questa configurazione, utilizzabile nel periodo invernale, quando non vi è necessità di produzione di acqua fredda, si potrà produrre acqua calda sfruttando direttamente l'energia solare, tenendo la pompa di calore spenta.



**FIGURA 1.50:** Predisposizione utilizzo pannelli solari sul serbatoio di accumulo caldo

### **1.3 Strumentazione e sistema di acquisizione dati, controllo e gestione impianto**

L'impianto, l'ambiente esterno e quello interno vengono costantemente monitorati e caratterizzati mediante diversi appositi strumenti di misura i quali permettono di determinare le prestazioni dell'impianto in relazione alle condizioni esterne. Mentre per la pompa di calore, quindi lato CO<sub>2</sub>, viene utilizzato il sistema TelevisNet, i parametri relativi all'ambiente esterno e interno e all'impianto vengono acquisiti e memorizzati da un apposito e sofisticato controllore di gestione, BX EISTEIN, il quale permette anche la rielaborazione delle acquisizioni.

In fase di progettazione sono stati individuati le grandezze da misurare e i punti in cui risulta necessario effettuare le misurazioni per monitorare e caratterizzare l'impianto. Nelle tabelle 1.12 -15, viene riportato l'elenco dei materiali e della strumentazione prevista per la realizzazione dell'impianto di supervisione e controllo del sistema di climatizzazione.

La tabella 3.8 riporta l'elenco dei punti controllati dal sistema di supervisione. In particolare, sono acquisite le temperature su tutte le canalizzazioni e sugli accumuli caldo e freddo, le temperature di mandata e di ripresa della pompa di calore, dell'UTA e dei collettori. Sono stati inoltre previsti sensori per la misura dell'umidità esterna, misuratori di portata alla pompa di calore lato caldo e freddo e un sensore per la misura della concentrazione di CO<sub>2</sub> presente nell'aria dell'ambiente interno. I dati provenienti da quest'ultimo sensore sono utilizzati dal sistema di gestione per regolare le modalità di ricircolo dell'aria e quindi il funzionamento dell'UTA.

Per il controllo dei parametri di funzionamento è prevista inoltre l'installazione di manometri e termometri nei punti in corrispondenza dei condotti di mandata e di ripresa della pompa di calore. I componenti in campo montati (schede, sensori, software) appartengono al gruppo Emerson Electric Spa, mentre gli attuatori e valvole sono del gruppo Belimo.

Infine, il sistema di gestione permette all'utente una semplice interazione con l'impianto mediante la creazione di opportune pagine grafiche visualizzate su pc, consultabili sia in locale che in remoto.

Descrizione	AI			AO	DO	Materiale in campo				
	Ala	Alp	Di			Q.tà	Codice 1	Q.tà	Codice 2	
<b>Periferica</b>										
<b>Elenco cavi</b>										
INGRESSI ANALOGICI CAVI SCHERMATI										sezi
Analisi assorbimento elettrico PDC	1					1	TM8			Anal
Analisi assorbimento elettrico UTA	1					1	TM8			
Analisi assorbimento elettrico Utenze elettriche	1					1	TM8			Dry-
Temperatura esterna		1				1	TE-706-B-12			
Umidità esterna		1				1	HU-224-3-VDC			
Luminosità esterna		1				1	PD5-			
Temperatura accumulo caldo		1				1	TE-704-A-12			tec
Temperatura uscita PDC produzione caldo		1				1	TE-704-A-12+G			
Temperatura ingresso PDC produzione caldo		1				1	TE-704-A-12+G			
Misuratore magnetico di portata PDC lato caldo		1				1	MagFluxDn025	1	MagFlux Display	
Temperatura uscita PDC produzione freddo		1				1	TE-704-A-12+G			
Temperatura ingresso PDC produzione freddo		1				1	TE-704-A-12+G			
Misuratore magnetico di portata PDC lato freddo		1				1	MagFluxDn025	1	MagFlux Display	
Temperatura accumulo freddo		1				1	TE-704-A-12			tef
Temperatura ambiente sala riunioni piccola		1				1	TE-205-EU-12			
Temperatura ambiente sala riunioni grande zona 1		1				1	TE-205-EU-12			
CO2 ambiente sala riunioni grande zona 1		1				1	GMN115			
Temperatura mandata UTA		1				1	TE-702-A-12-D			
Temperatura ripresa UTA		1				1	TE-702-A-12-D			
Temperatura miscela serrande UTA		1				1	TE-707-A-12-A2			
Temperatura ingresso collettore freddo		1				1	TE-704-A-12+G			

**TABELLA 1.12: Elenco punti controllati**

Descrizione	AI		DI	AO	DO	Materiale in campo		
	Ala	Alp				Q.tà	Codice 1	Q.tà
Temperatura uscita collettore freddo		1				1	TE-704-A-12+G	
Temperatura ingresso collettore caldo		1				1	TE-704-A-12+G	
Temperatura uscita collettore caldo		1				1	TE-704-A-12+G	
Temperatura uscita DRY COOLER		1				1	TE-704-A-12+G	
Temperatura uscita scambiatore accumulato caldo		1				1	TE-704-A-12+G	
Ingresso disponibile		1						
Ingresso disponibile		1						
<b>INGRESSI DIGITALI CAVI NORMALI STATO</b>								<b>segni</b>
Stato pompa P1 accumulato caldo			1					
Stato pompa P2 primario freddo			1					
Stato pompa P4 scambiatore accumulato freddo			1					
Stato pompa P6a circuito freddo UTA			1					
Stato pompa P6b circuito freddo UTA			1					
Stato pompa P7a circuito caldo/freddo FAN-COLS			1					
Stato pompa P7b circuito caldo/freddo FAN-COLS			1					
Stato pompa P8a circuito caldo UTA			1					
Stato pompa P8b circuito caldo UTA			1					
Stato ventilatore ripresa UTA			1					
Stato ventilatore mandata UTA			1					
Stato alimentazione fan-coils sala riunioni piccoli			1					
Stato alimentazione fan-coils sala riunioni grande			1					
Stato alimentazione luci sala riunioni piccola			1					
Stato alimentazione luci sala riunioni grande			1					
Stato Compensatore 01 PDC			1					

**TABELLA 1.13: Elenco punti controllati**

Descrizione	AI			Materiale in campo					
	Aia	Alp	DI	AO	DO	Q.ta'	Codice 1	Q.ta'	Codice 2
Stato Compressore 02 PDC			1						
Stato conteggio persone sala riunioni ingresso 1			1			1	IRC3020		
Stato conteggio persone sala riunioni ingresso 1			1						
Stato conteggio persone sala riunioni ingresso 2			1			1	IRC3020		
Stato conteggio persone sala riunioni ingresso 2			1						
Stato funzionamento DRY COOLER			1						
Stato posizione valvole E1 lato caldo			1			2	S2A		
Stato posizione valvole E1 lato freddo			1			2	S2A		
Ingresso disponibile			1						
Ingresso disponibile			1						
Stato neli E1			1						
INGRESSI DIGITALI CA/VI NORMALI ALLARME									
Boxeo PDC			1						
Allarme antigelo UTA			1			1	TF30		
Allarme filtri UTA			1			1	DBL-105+DBZ-05		
Allarme pompa P1 accumulo caldo			1						
Allarme pompa P3 primario freddo			1						
Allarme pompa P4 scambiatore accumulo freddo			1						
Allarme pompa P6a circuito freddo UTA			1						
Allarme pompa P6b circuito freddo UTA			1						
Allarme pompa P7a circuito caldo/freddo FAN-COILS			1						
Allarme pompa P7b circuito caldo/freddo FAN-COILS			1						
Allarme pompa P9a circuito caldo UTA			1						
Allarme pompa P9b circuito caldo UTA			1						

**TABELLA 1.14: Elenco punti controllati**



Descrizione	AI			DI	AO	DO	Materiale in campo				
	Ala	Alp					Q.tà	Codice 1	Q.tà	Codice 2	
Allarme ventilatore ripresa UTA				1							
Allarme ventilatore mandata UTA				1							
Allarme funzionamento DRY COOLER				1							
Allarme blocco inverter UTA				1							
Ingressi disponibili				1							
<b>USCITE DIGITALI CAVI NORMALI</b>											<b>sezic</b>
Comando PDC						1					
Comando Compressore 01 PDC						1					
Comando Compressore 02 PDC						1					
Comando ventilatore ripresa UTA						1					
Comando ventilatore mandata UTA						1					
Comando pompa P1 accumulo caldo						1					
Comando pompa P3 primario freddo						1					
Comando pompa P4 scambiatore accumulo freddo						1					
Comando pompa P1a circuito freddo UTA						1					
Comando pompa P1b circuito freddo UTA						1					
Comando pompa P7a circuito caldo/freddo FAN-COILS						1					
Comando pompa P7b circuito caldo/freddo FAN-COILS						1					
Comando pompa P8a circuito caldo UTA						1					
Comando pompa P8b circuito caldo UTA						1					
Comando fan-coils sala riunioni piccola						1					
Comando fan-coils sala riunioni grande						1					
Comando luci sala riunioni piccola						1					
Comando luci sala riunioni grande						1					

Descrizione	AI			DI	AO	DO	Materiale in campo				
	Ala	Alp					Q.tà	Codice 1	Q.tà	Codice 2	
Comando commutazione ER collettore lato caldo						1	2	RQ25		2	LR24A
Comando commutazione ER collettore lato freddo						1	2	RQ25		2	LR24A
Comando serranda aria esterna UTA						1	1	AF24			
Comando serranda fly-pass recuperatore UTA						1	1	AF24			
Comando inverter UTA						1					
Comando commutazione ER						1					
<b>USCITE ANALOGICHE CAVI SCHEMATI</b>											<b>sed</b>
Segnale 0-10 Vcc valvola caldo UTA						1	1	HC208+ZH4525+V/24MF			
Segnale 0-10 Vcc valvola freddo UTA						1	1	HC208+ZH4525+V/24MF			
Segnale 0-10 Vcc valvola segnale caldo/freddo PIC						1	1	M7410E1062		1	V5833C1041
Segnale 0-10 Vcc set point PDC						1	1	PS206		1	Loop Converter
Segnale 0-10 Vcc commutazione primario freddo						1	2	R325+SR24A-MF+JR232			
Segnale 0-10 Vcc commutazione primario caldo						1	2	R325+SR24A-MF+JR232			
Segnale 0-10 Vcc inverter UTA						1	1	Loop Converter			
Segnale 0-10 Vcc recuperatore UTA						1	1	Loop Converter			
SCHEDA PREVISTE							2	Multiflex16SAG		2	Multiflex Prestazioni
SCHEDA PREVISTE							1	Multiflex16R		1	Multiflex Prestazioni
SCHEDA PREVISTE							1	Multiflex16AI		1	Multiflex Prestazioni
SCHEDA PREVISTE							1	SR0-FC		1	Multiflex Prestazioni
ERSTERN							1	E2 BX000		1	E2 SX Prestazioni
<b>Totale</b>	<b>6</b>	<b>22</b>	<b>44</b>	<b>8</b>	<b>24</b>	<b>Totale punti:</b>		<b>104</b>			

**TABELLA 1.15: Elenco punti controllati**

### 1.3.1 Strumentazione di misura lato acqua

L'impianto viene monitorato e caratterizzato attraverso un completo apparato strumentale che permette di rilevare importanti parametri per la descrizione dello stato e delle prestazioni dell'impianto stesso e dei singoli componenti. Vengono misurate temperature, pressioni, portate d'acqua attraverso apposite sonde e strumenti in punti particolari dell'impianto. Per semplicità espositiva e maggior chiarezza, lo schema dell'impianto viene diviso in tre parti (sinistra, centro e destra) su ciascuna delle quali vengono evidenziati i punti in cui viene effettuata la misurazione e la grandezza misurata.

Viene analizzata per prima la parte sinistra dell'impianto, relativa al serbatoio di accumulo caldo e alla pompa di calore (figura 1.51).

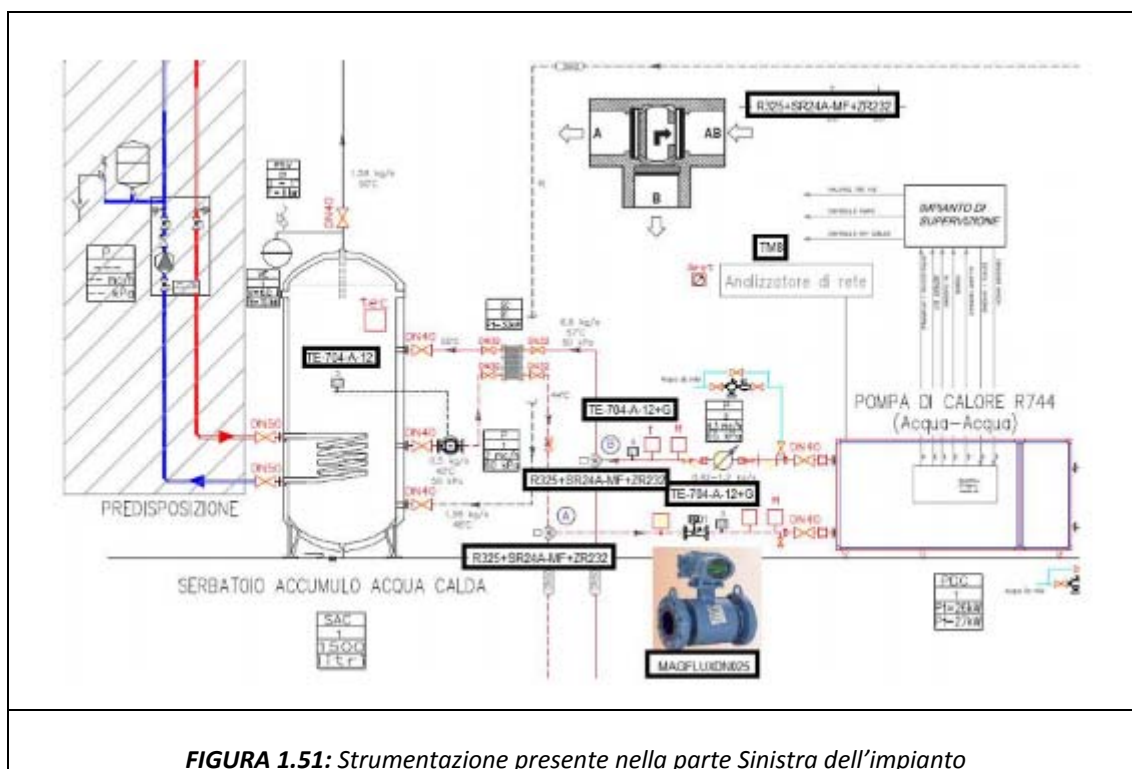


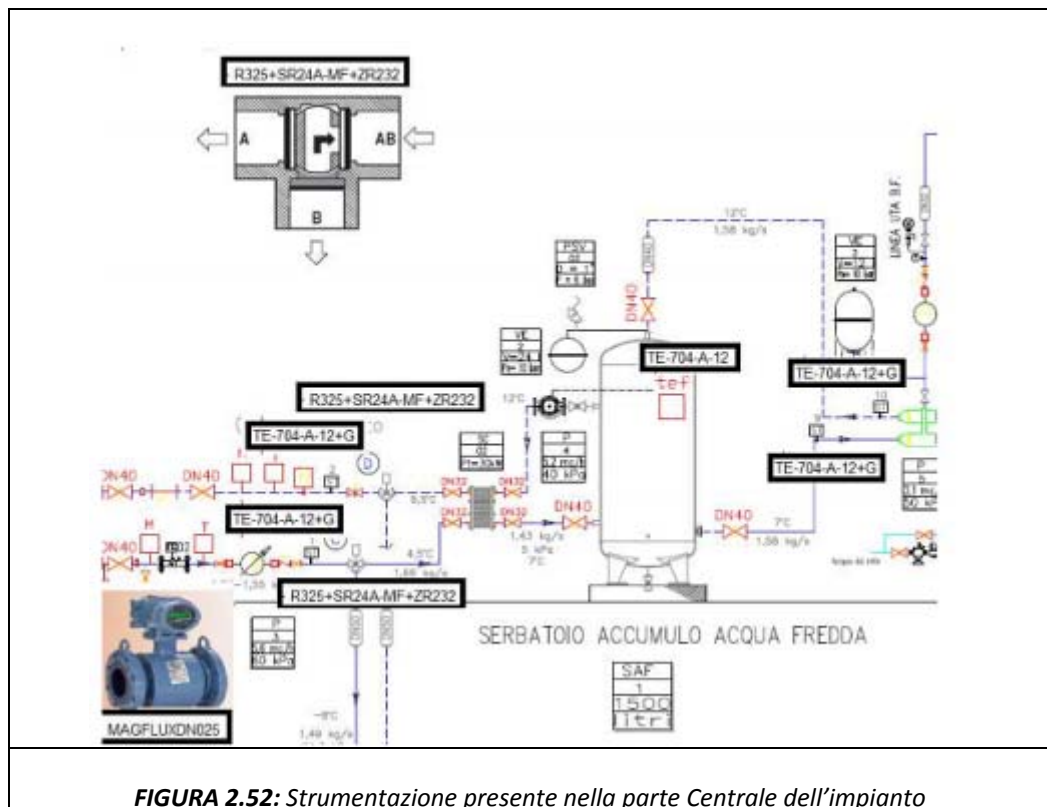
FIGURA 1.51: Strumentazione presente nella parte Sinistra dell'impianto

Vengono misurate le seguenti grandezze:

- temperatura acqua del serbatoio di accumulo caldo tramite la sonda TE-704-A-12 (ST5);
- temperatura acqua uscita pompa di calore lato caldo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST4);
- temperatura acqua ingresso pompa di calore lato caldo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST3);

- portata acqua ingresso pompa di calore lato caldo tramite il misuratore di portata MAGFLUXDN025 (FE01);
- trasduttori isolati per la misurazione della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore, dall'UTA e dalle altre utenze come fan coil, illuminazione, elettropompe, dry-cooler etc (TM8).

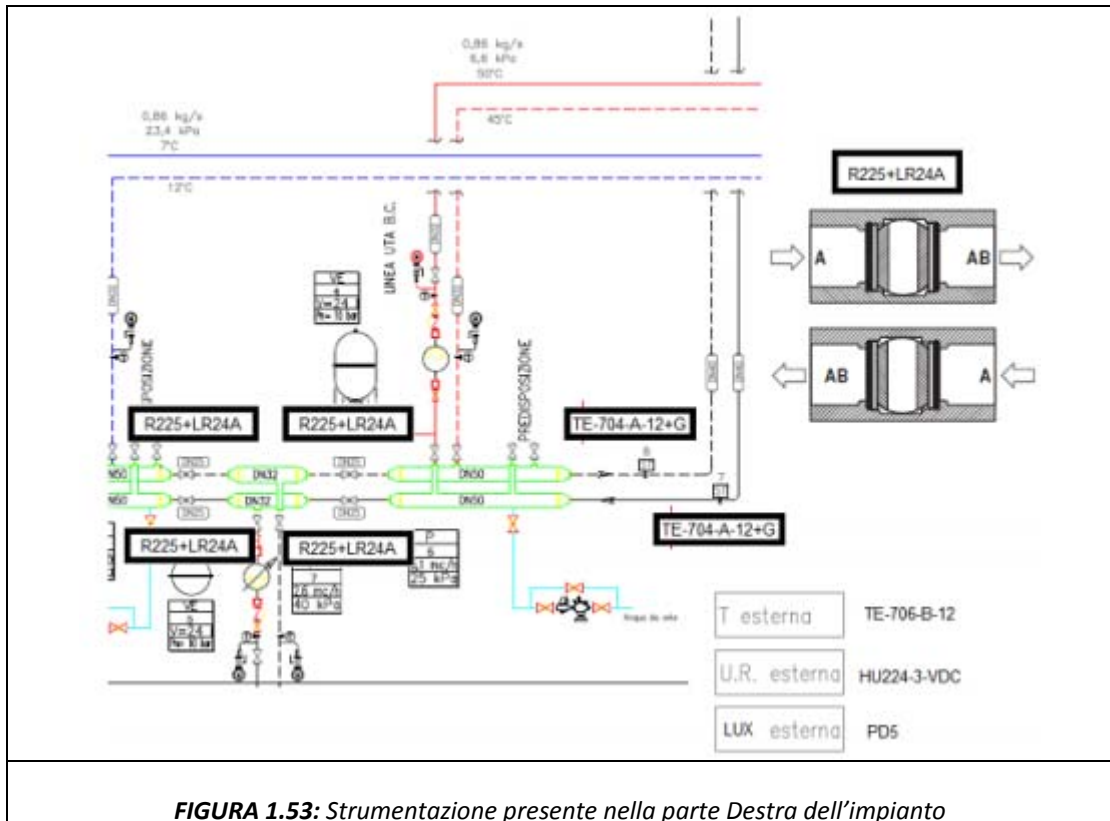
Nella parte centrale dell'impianto vengono monitorate le seguenti grandezze (figura 1.52):



- temperatura acqua del serbatoio di accumulo freddo tramite la sonda TE-704-A-12 (TEF);
- portata acqua uscita pompa di calore lato freddo tramite il misuratore di portata MAGFLUXDN025 (FE02);
- temperatura acqua ingresso pompa di calore lato freddo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST2);
- temperatura acqua uscita pompa di calore lato freddo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST1);

- temperatura acqua ingresso collettore freddo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST9);
- temperatura acqua uscita collettore freddo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST10).

Nella parte destra dell'impianto vengono monitorate le seguenti grandezze (figura 1.53):



**FIGURA 1.53:** Strumentazione presente nella parte Destra dell'impianto

- temperatura aria esterna mediante la sonda TE-706-B-12;
- umidità aria esterna mediante la sonda HU-224-3-VDC;
- luminosità esterna attraverso il sensore luminosità da esterno (PD5);
- temperatura acqua ingresso collettore caldo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST7);
- temperatura acqua uscita collettore caldo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST8);

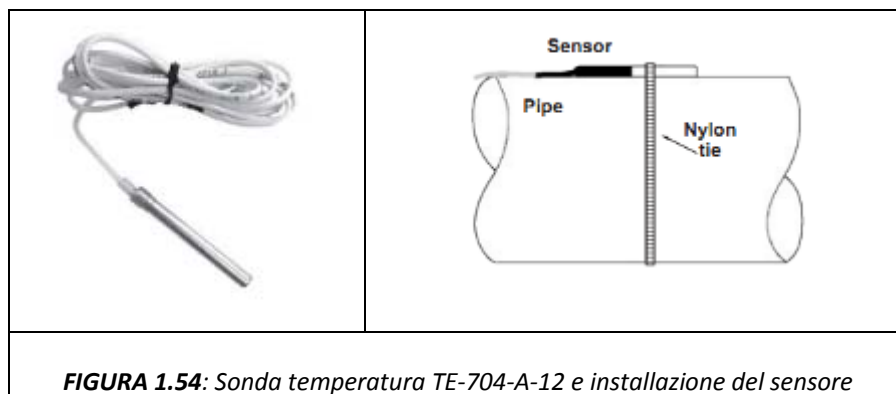
Inoltre vengono misurate le seguenti grandezze:

- temperatura acqua uscita scambiatore lato caldo tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST11);
- temperatura acqua uscita dry- cooler tramite la sonda TE-704-A-12 comprensiva di guaina (ST6);
- concentrazione CO<sub>2</sub> nell'ambiente da condizionare tramite la sonda GMW115.

Verranno ora mostrate nello specifico ciascun strumento di misura precedentemente introdotto.

#### **TE-704-A-12 Sonda di temperatura ad immersione senza guaina**

Essa è una sonda di temperatura ad immersione, senza guaina con sensore da 10,000-Ohm e termistore NTC (figura 1.54).



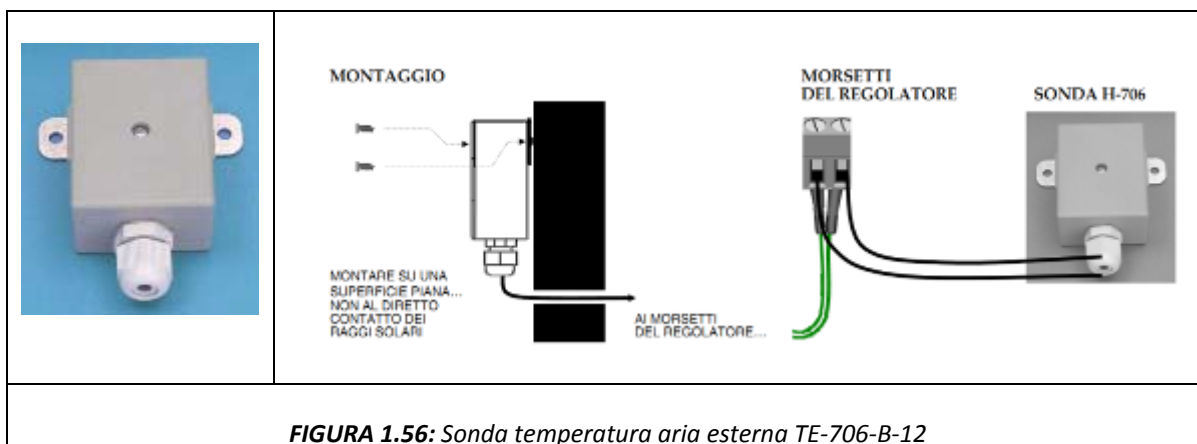
La sonda è costituita da un sensore di 51 mm in acciaio inossidabile e resistente all'acqua posto sulla superficie, tramite fissaggio a strappo, e da un cavo lungo 1,8 m. Il range di temperatura in cui può operare va da -40 a 250 °C. Dei fili di nylon vengono utilizzati per ancorare la sonda alla superficie del serbatoio o del condotto. La suddetta sonda viene montata comprensiva di guaina in alcuni casi (figura 1.54).



**FIGURA 1.55:** Sonda immersione con guaina TE-704-A-12+G

### TE-706-B-12 Sonda di temperatura aria esterna

Il cuore della sonda di temperatura aria esterna in policarbonato è il sensore di temperatura, accuratamente sigillato in una custodia di policarbonato e dal pressacavo, per prevenire infiltrazioni di aria dall'edificio (figura 1.56). La sonda dispone di un sensore sigillato con polyolefin ed è esente da guasti dovuti all'alta umidità, alle contaminazioni, agli sbalzi termici ed alle vibrazioni.



**FIGURA 1.56:** Sonda temperatura aria esterna TE-706-B-12

La sonda, con sensore da 10,000-Ohm e termistore NTC, appartiene alla classe di protezione IP 65, ha l'approvazione CE e permette di disporre di un'ampia scelta di sensori a termistori e RTD (figura 1.56).

### TE-205-EU-12 Sonda di temperatura ambiente NTC 10K

Sonda di temperatura ambiente con termistore NTC 10 K (figura 1.57).



**FIGURA 1.57:** Sonda TE-205-EU-12

### PD5 Sensore luminosità da esterno

Esso è costituito da un sensore a quattro fili analogico a fotodiode con regolazione da remoto (figura 1.58).

	<b>Input Voltage:</b> 12VDC <b>Current:</b> 2mA <b>Low Output:</b> 0VDC <b>High Output:</b> 9VDC <b>Photodiode:</b> Blue Enhanced <b>Fixed Signal Range:</b> 0-9V <b>Adjustment:</b> NONE <b>Tolerance:</b> 12% <b>Wiring:</b> Black: 12VDC Red: Signal Voltage Yellow: Gain Green: Return
	<b>Time Response:</b> Instant <b>Repeatability:</b> +/- 0.5% <b>Linearity:</b> 2% <b>Temperature:</b> +/- 10%

**FIGURA 1.58:** PD5 Sensore luminosità da esterno nella corretta orientazione

Esso fornisce un segnale in ingresso a sistemi di controllo della luminosità in diverse tipologie di costruzioni. Il segnale fornito in uscita può variare in un range di 0-9 VDC, un range massimo di 0-750 e fornisce 429,2 a 0 VDC e 3863 a 9 VDC.

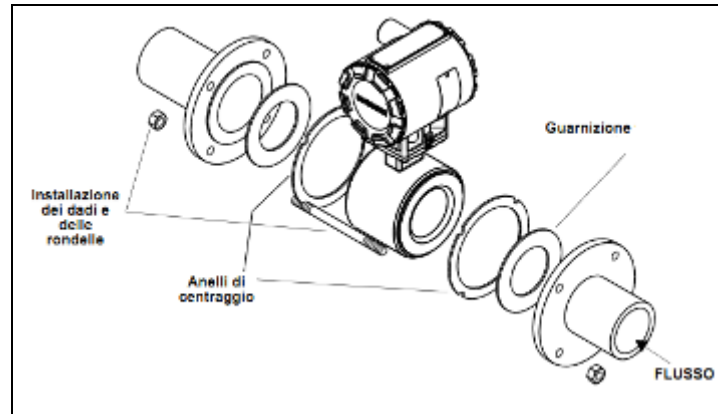
La sonda viene regolata e calibrata tramite il controllore al quale è connessa. Il sensore deve essere installato orizzontalmente, esposto a nord, posizionato in modo tale da captare la luce durante tutto il giorno, da non essere circondato da oggetti che vi fanno ombra e non deve essere esposto all'illuminazione notturna. Inoltre, la sonda deve essere montata con la parte mascherata verso l'alto.

## MagFluxDn025 Misuratore di portata magnetico

Il misuratore di portata magnetico fornito dalla Rosemount è costituito da due componenti ovvero il trasduttore e il sensore (figura 1.59).

Il misuratore è progettato in modo tale che la misura non sia influenzata da vibrazioni, umidità o cambiamenti repentini delle condizioni ambiente. Per quanto riguarda il posizionamento del misuratore, si consiglia di installare il sensore a un minimo di cinque diametri di tubo dritto a monte e due diametri di tubo dritto a valle dalla superficie dell'elettrodo. In particolare il posizionamento degli elettrodi e di tutto lo strumento deve essere effettuato in accordo con quanto riportato sul manuale.

Il sensore richiede una guarnizione per ciascuna delle connessioni con dispositivi o tubazioni adiacenti. Il materiale della guarnizione selezionato deve essere compatibile con il fluido di processo e le condizioni di esercizio. È necessario installare una guarnizione su ciascun lato dell'anello di messa a terra. Il sensore flangiato è stato fabbricato con acciaio al carbonio inossidabile e saldato in modo da realizzare una chiusura ermetica contro l'umidità o qualsiasi altro contaminante.






**FIGURA 1.59:** Montaggio misuratore di portata magnetico



Sensor	General Characteristics
8705	<ul style="list-style-type: none"><li>• Standard Process Sensor</li><li>• Flanged Process Connections</li><li>• Welded, sealed coil housing</li><li>• 1/2-in. (15mm) to 36-in. (900mm)</li><li>• Pulse DC Technology</li><li>• Standard, grounding, and bulletnose electrodes available</li></ul>



	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="746 230 884 264">Transmitter</th> <th data-bbox="884 230 1359 264">General Characteristics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="746 264 884 297">8732E</td> <td data-bbox="884 264 1359 297"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideal for integral mount transmitter installations</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="746 297 884 376">  </td> <td data-bbox="884 297 1359 376"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HART / Analog, FOUNDATION fieldbus, or Profibus-PA fieldbus output available</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td></td> <td data-bbox="884 376 1359 409"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced Diagnostics available</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td></td> <td data-bbox="884 409 1359 443"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optical Switch LOI</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td></td> <td data-bbox="884 443 1359 488"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optional DI/DO available (HART only)</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	Transmitter	General Characteristics	8732E	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideal for integral mount transmitter installations</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• HART / Analog, FOUNDATION fieldbus, or Profibus-PA fieldbus output available</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced Diagnostics available</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optical Switch LOI</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optional DI/DO available (HART only)</li> </ul>
Transmitter	General Characteristics												
8732E	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideal for integral mount transmitter installations</li> </ul>												
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HART / Analog, FOUNDATION fieldbus, or Profibus-PA fieldbus output available</li> </ul>												
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced Diagnostics available</li> </ul>												
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optical Switch LOI</li> </ul>												
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optional DI/DO available (HART only)</li> </ul>												
<p><b>FIGURA 1.60:</b> <i>Trasmettitore e sensore. Misuratore di portata Rosemount completo</i></p>													

### GMW115 Trasmettitore CO<sub>2</sub> ambiente

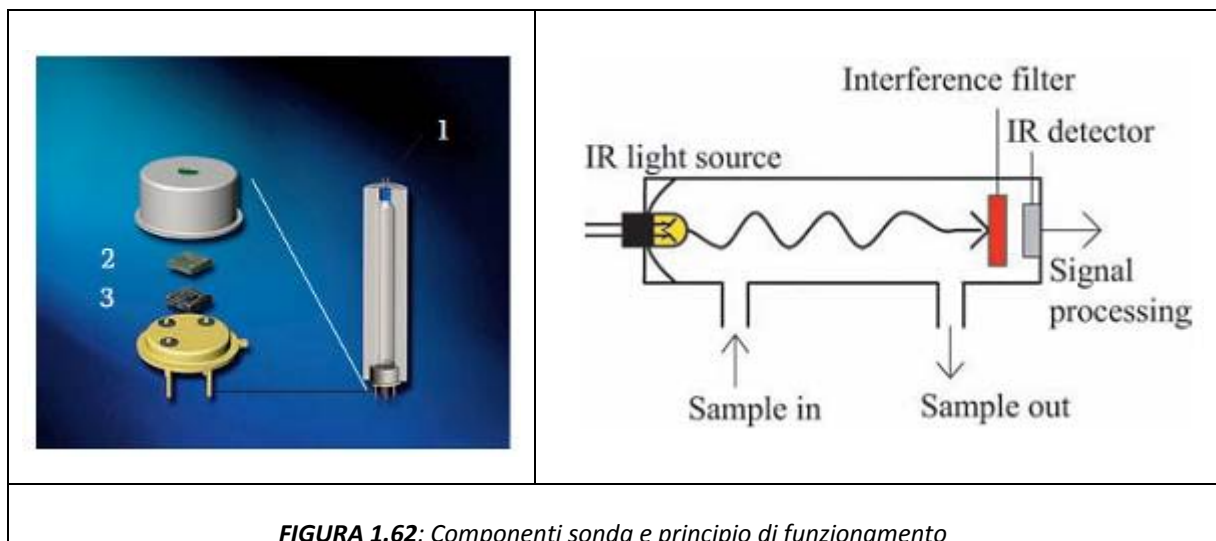
Il sensore CARBOCAP misura la concentrazione di CO<sub>2</sub> in ppm nell'ambiente da climatizzare (figura 1.61). È realizzata in silicene e possiede tre componenti principali: sorgente di raggi infrarossi, filtro e rilevatore di raggi infrarossi. Il principio di funzionamento con il quale opera la sonda è la tecnologia a raggio infrarosso non dispersiva (NDIR). Il problema di tale tecnologia è rappresentato dalla perdita di intensità da parte dei raggi di luce richiesti e, inoltre, ulteriore problema è rappresentato dall'incapacità di identificare l'istante in cui si verifica la contaminazione del raggio luminoso.



La sonda opera nel modo seguente: la sorgente di raggi infrarossi, posta nella parte terminale della camera di misurazione, emette un raggio luminoso nella camera dove si trova il gas. Nella camera ogni molecola di anidride carbonica presente assorbe parte del raggio luminoso alla sua caratteristica lunghezza d'onda. Il filtro ad interferenza è elettricamente accordato così che la sua banda passante coincida con la lunghezza d'onda con cui l'anidride carbonica assorbe il raggio di luce. Il rilevatore misura l'intensità del

segnale che lo attraversa. Successivamente, la banda passante del filtro è spostata verso la lunghezza d'onda dove non c'è assorbimento. Questo fornisce il segnale di riferimento. Il rapporto di questi due segnali, quello riferito alla lunghezza d'onda di assorbimento e quello al segnale di riferimento, indica il grado di assorbimento della luce nel gas e quindi la concentrazione dell'anidride carbonica. Il segnale di riferimento compensa i possibili effetti dell'invecchiamento del sensore e della contaminazione; tutto ciò rende il sensore molto stabile.

La sonda GMW115 è stata ideata specialmente per soddisfare la richiesta di controllare la ventilazione con due range di misurazione rispettivamente di 0÷2000 e di 0÷5000 ppm (figura 1.62). Infatti un'elevata concentrazione di CO<sub>2</sub> è indice di una cattiva ventilazione.



<b>Performance</b>	
CO <sub>2</sub> -measurement range	0 ... 2000 ppm 0.....5000 ppm
Accuracy (including repeatability, non-linearity and calibration uncertainty)	±(2 % of range + 2 % of reading)
Long-term stability	± 5 % of range/5 years
Response time T90	1 min
Temperature dependence, typical	-0,35 % of reading / °C
Pressure dependence, typical	+0,15 % of reading/hPa
Warm-up time	1 min, 10 min for full specification
Product lifetime	> 10 years
<b>Operating environment</b>	
Temperature	-5 ... +45 °C (23 ... 113 °F)
Humidity	0 ... 85 % RH
Pressure	700 ... 1200 hPa
Electromagnetic compatibility	Complies with EMS standard EN61326-1, Generic Environment

**FIGURA 1.63:** Dati tecnici sonda GMW115

### HU-224-3-VDC Sonda umidità a bulbo

La sonda HU-224-3VDC è un trasduttore di umidità estremamente veloce, stabile e accurato, realizzato per ambienti particolarmente soggetti a livelli di umidità alti e variabili (figura 1.64). Essa è calibrata e certificata secondo gli standard NIST. La sonda incorpora un sensore polimerico capacitivo molto sensibile alle variazioni di umidità; tale sensore non risente della presenza di contaminanti, condensazione, nebbia o alti livelli di umidità presenti per un lungo periodo di tempo. Infatti, la sonda potrebbe essere immersa in acqua distillata senza degradare l'accuratezza della calibrazione.




Nel caso in cui polvere o contaminanti dovessero accumularsi sul sensore, la sonda può essere lavata tramite un semplice processo industriale e ritornare in funzione senza alcun cambiamento nella calibrazione.

La sonda viene calibrata in una apposita camera ed è compensata per quanto riguarda la temperatura se essa opera in un range di temperatura tra -30°F e -130°F. sono disponibili due diversi campi di funzionamento: il primo fornisce in uscita un segnale di 0-5 o 0-10 VDC mentre il secondo fornisce un voltaggio di 12-35 VAC o di 12-40 VDC. Il segnale fornito in uscita dalla sonda è completamente protetto dal corto circuito.

### **TM8 Fornitura di gruppo di misura di potenza**

Tale strumento di misura è un trasduttore isolato che permette di avere separatamente l'assorbimento elettrico da parte della pompa di calore, dell'unità di trattamento aria e del resto dei componenti ovvero elettropompe, illuminazione, fan coil e altre utenze (figura 1.65). Il misuratore utilizzato è della IMA, modello TM8P con uscita analogica 4 – 20 mA.

	<i>Accuratezza</i>	± 0.3 fs
	<i>Intervallo di taratura</i>	0 – 103.92 kW
	<i>Temperature di esercizio</i>	-40 - 125 °C
<b>FIGURA 1.65:</b> <i>Trasduttore isolato di potenza elettrica</i>		<b>TABELLA 1.16:</b> <i>Caratteristiche principali trasduttore isolato di potenza</i>

Per il funzionamento dell'unità di trattamento aria UTA è stata installata la seguente strumentazione:

- pressostato differenziale aria on/off (DBL-106+DBZ-06);
- termostato antigelo riarmo automatico (TF30);
- sonda di temperatura con capillare di media (TE-707-A-12-A2);
- sonda da canale di temperatura con flangia di montaggio (TE-702-A-12-D).

#### **DBL-106+DBZ-06 Pressostato differenziale aria**

Il pressostato DBL-106 effettua il controllo della pressione differenziale dell'aria segnalando tramite allarme il raggiungimento del punto di intervento (figura 1.66).



Esso è adatto ad ambienti civili, commerciali o industriali a forte inquinazione su impianti di condizionamento e ventilazione per:

- controllo di intasamento di filtri;
- controllo corretto funzionamento dei filtri;

- controllo di depressione e sovrappressione;
- interruzione dell'alimentazione di batterie in assenza d'aria.

Con un tubicino in gomma trasparente da 6 mm di diametro e 2 m di lunghezza, tramite due attacchi in plastica, viene effettuato l'inserimento nella canalizzazione per il rilevamento differenziale della pressione statica dell'aria ferma o in movimento. Il pressostato rileva pressioni tra 40 e 600 Pa.

### TF30 Termostato antigelo

Il termostato antigelo è realizzato in tecnopolimero che, pur mantenendo la solidità e la robustezza caratteristica degli apparecchi elettromeccanici, risulta essere leggero e indistruttibile, inattaccabile dalla ruggine ed estremamente protetto dalle false commutazioni causate da vibrazioni presenti sull'applicazione. La protezione standard IP65 garantisce un sicuro funzionamento nelle applicazioni più severe.

È un apparecchio di sicurezza che ha il compito di controllare la temperatura delle batterie di riscaldamento e condizionamento, nei canali di ventilazione e in tutte quelle applicazioni dove si debba prevenire possibili danni causati dal gelo (figura 1.67).

	<b>Scala di intervento:</b> -10..+10°C o +14..50°F <b>Tipo di contatto:</b> microinterruttore con contatti in commutazione SPDT (fig. 1) <b>Portata contatto:</b> 24..250 Vca 15 (8) A <b>Precisione:</b> ± 1°K <b>Protezione:</b> Classe I IP 65 <b>Temp. d'impiego:</b> max. +55°C 10...95% u.r. (senza condensa) <b>Temp. max del bulbo:</b> +150°C <b>Stoccaggio:</b> -30..+60°C < 95% u.r. <b>Contenitore:</b> Base in ABS, coperchio PC trasparente <b>Dimensioni:</b> 140x62x65 mm (compreso pressacavo) <b>Peso:</b> 0,32 Kg
	<p align="center"><b>FIGURA 1.67: Termostato antigelo</b></p>

Il contatto in scambio (SPDT) da 15(8)A permette l'utilizzo in svariate funzioni come:

- comandare un ventilatore;
- comandare una serranda;
- aprire o chiudere una valvola del circuito di riscaldamento o raffreddamento;

- comandare una resistenza elettrica;
- avviare o spegnere una pompa del circuito di riscaldamento o raffreddamento;
- spegnere un gruppo frigo o un umidificatore;
- segnalare uno stato di allarme attraverso un dispositivo visivo o acustico.

Il termostato di sicurezza interviene quando il capillare rileva, per una lunghezza di almeno 30 cm, una temperatura inferiore a quella impostata con la manopola di regolazione. Al risalire della temperatura il contatto torna automaticamente nella posizione iniziale. Il termostato ha una isteresi di 2 K, riarmo automatico e una lunghezza di 3 m (figura 1.67). Il gas contenuto all'interno dell'elemento sensibile aumenta di volume all'aumentare della temperatura rilevata e, attraverso un semplice leveraggio, aziona il microinterruttore. Il capillare è sensibile alla temperatura su tutta la sua lunghezza. Il posizionamento della manopola di impostazione della temperatura sotto coperchio impedisce la manomissione involontaria della temperatura predefinita. Il capillare deve essere distribuito uniformemente sulla superficie da controllare. Esso non deve presentare strozzature o pieghe con raggio di curvatura inferiore a 2 cm per cui se ne consiglia l'installazione con le staffe di fissaggio DBZ-05. È necessario evitare inoltre di far passare il capillare attraverso pareti in lamiera senza una idonea protezione.

#### **TE-707-A-12-A2 sonda di temperatura con capillare di media**

La sonda è dotata di un sensore da 10,000-Ohm, e termistore NTC, costituito da un cavo metallico corazzato. Il sensore di temperatura è flessibile e questo permette di ottenere vantaggi rispetto ai sensori rigidi tubulari (figura 1.68). Tali sensori sono facili da installare e in caso di attorcigliamento, in essi non penetrerebbe umidità. Nei sensori flessibili, i nodi sensibili sono chiaramente identificabili e possono essere posizionati in modo da mediare correttamente la temperatura all'interno del tubo.



Invece, i sensori rigidi non sono a diretto contatto con il tubo determinando un maggior tempo di attesa per avere il segnale in uscita. I nodi sensibili nei sensori flessibile hanno una sottile guaina protettiva posta direttamente a contatto con l'elemento sensibile velocizzando la fornitura del segnale in uscita.

Il sensore incorpora quattro nodi sensibili equamente spazati e resistenti all'umidità. La guaina ha il compito di ridurre la rigidità del sensore e di aumentare la conduttività termica attraverso i quattro nodi.

#### **TE-702-A-12-D sonda da canale di temperatura con flangia di montaggio**

La struttura che contiene il sensore è costituita da vetro per il 30% trattato policarbonato e resistente alla corrosione (figura 1.69). La sonda ha un sensore da 10,000-Ohm e termistore NTC ed è lunga 300 mm.






Essa è stata ideata in modo tale da resistere a temperature troppo alte o troppo basse, agli shock meccanici e alle vibrazioni. Tramite l'utilizzo di una mensola esterna viene effettuato il montaggio su superfici irregolari in applicazioni come bocchette d'aria, fan coil, canali etc.

### 1.3.2 Strumentazione di misura lato CO<sub>2</sub>

Per le misure di temperatura vengono utilizzate sonde di temperatura del tipo NTC (Figura 1.70) con tubo in acciaio, mentre il materiale costituente la capsula è AISI 304 con un diametro di 6mm e una lunghezza di 40mm.

	<i>Intervallo di taratura</i>	-30 – +80 °C
	<i>Accuratezza</i>	± 1 °C
<b>FIGURA 1.70:</b> Sonda di temperatura NTC	<b>TABELLA 1.16:</b> Caratteristiche principali delle sonde NTC	

Le misure di temperatura vengono effettuate all'aspirazione del compressore, all'uscita del GasCooler e in corrispondenza dei tre scambiatori di calore interni al ciclo.

Le misure di pressione sono effettuate sia in termini di pressione assoluta che differenziale. Vengono utilizzati trasduttori di pressione della Huba Control serie 511 (Figura 1.71) e il segnale di uscita è di 4 – 20 mA.

	<i>Accuratezza</i>	± 0.3 fs
	<i>Intervallo di taratura</i>	0 – 160 bar
	<i>Temperature di esercizio</i>	-40 - 125 °C
<b>FIGURA 1.71:</b> Trasduttore di pressione Huba Control 511	<b>TABELLA 1.17:</b> Caratteristiche principali trasduttore di pressione	

La potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore viene misurata indipendentemente dal resto delle utenze elettriche installate all'interno dell'impianto attraverso il trasduttore isolato precedentemente illustrato.

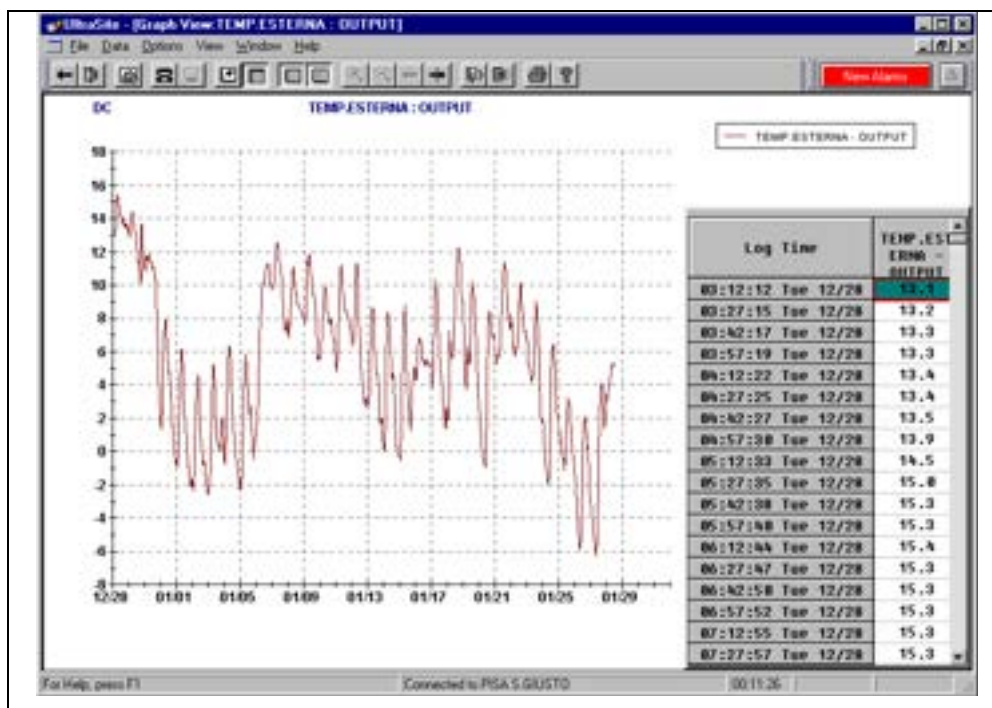
### 1.3.3 Regolazione e gestione dell'impianto: BX EINSTEIN

Il sistema per la gestione e la regolazione digitale dell'impianto Al.CO.WA è BX EINSTEIN prodotto dall'azienda CDZ.T srl facente parte della divisione specialistica che si occupa di efficienza energetica del gruppo EMERSON Electric Spa (figura 1.72).



Il software installato permette di:

- seguire istantaneamente da display o da postazione remota il funzionamento meccanico ed elettrico dell'impianto;
- gestire gli orari di funzionamento delle macchine per il condizionamento;
- consente il monitoraggio dello stato di funzionamento di tutte le apparecchiature;
- controllare lo stato degli allarmi implementati;
- controllare i valori delle grandezze misurate (temperature, portate, ecc.);
- variare, tramite semplici slitte, i SET POINTS (temperatura locale di prova, temperature degli accumuli caldo e freddo);
- veder visualizzata sul monitor il relativo andamento grafico (Log) di tutte le grandezze monitorate quali Temperature, portate ecc (figura 1.73).
- impostare giornate speciali di utilizzo dell'impianto e variare orari di funzionamento di luci o macchine di condizionamento;



**FIGURA 1.73:** Esempio di visualizzazione dell'andamento grafico delle grandezze misurate

Il sistema EINSTEIN accomuna la funzione di controlli precisi e flessibili sulle regolazioni alla funzione di ottimizzazione dei consumi energetici. Il sistema BX si integra alla perfezione con la pianificazione del consumo energetico.

Il software consente di gestire in modo intelligente le accensioni e gli spegnimenti dell'impianto tramite il programma di Optimum Start Stop (O.S.S.). A partire dalle condizioni termoigrometriche rilevate nell'ambiente climatizzato e sulle condizioni termoigrometriche esterne il sistema, basandosi su un proprio archivio statistico ad autoapprendimento calcola il più idoneo tempo di preaccensione degli impianti e di prespegnimento degli stessi cercando di ridurre il più possibile il periodo di funzionamento.

In ogni fase di preaccensione o prespegnimento, il programma calcola il tempo necessario per portare l'ambiente al livello di comfort richiesto e mantenerlo in tali condizioni. Questi calcoli vengono salvati in un'apposita memoria e vengono usati per ricalcolare continuamente i tempi più idonei per l'ambiente gestito. L'utente ha la possibilità di programmare una zona di comfort accettabile al range di preaccensione e prespegnimento. E' inoltre possibile impostare un tempo massimo consentito di preaccensione e prespegnimento.

Il sistema, tramite l'unità centrale e le sue periferiche, può gestire molteplici utenze come pompe, gruppi frigo, caldaie, illuminazione, unità di trattamento aria, refrigerazione. Nella

gestione e regolazione digitale dell'impianto il sistema utilizza una serie di programmi energetici ad autoapprendimento. L'utente deve semplicemente stabilire gli orari di occupazione. Tramite la funzione O.S.S. di gestione intelligente delle accensioni e spegnimenti il sistema calcola, secondo un programma di autoapprendimento, l'intervallo di tempo più conveniente per il passaggio dal regime di occupazione a quello di non occupazione. Il monitoraggio dei consumi energetici riveste particolare importanza nei progetti di risparmio energetico in quanto consente inizialmente di concentrare gli sforzi sulle utenze più energivore e successivamente di valutare i risultati conseguiti con la gestione. Il programma di gestione archivi energetici presente nel sistema Eistein permette di archiviare i dati energetici di molteplici gruppi di misura di potenza quali condizionamento, refrigerazione, illuminazione etc. suddividendoli in orari, giornalieri e mensili. In appositi archivi Logs vengono storicizzati i dati relativi al funzionamento delle varie utenze. In particolare vengono archiviati i valori misurati da tutti i punti fisici connessi al sistema ed i principali parametri software di funzionamento. Ciò permette all'utente di verificare il corretto funzionamento evidenziando eventuali anomalie.



**FIGURA 1.74:** Quadro elettrico e pannello del sistema Eistein

Per effettuare modifiche sui vari punti dell'impianto controllato, quali Comandi, Stati, Programmi Tempo, è necessario accedere al programma di Editing di UltraSite attraverso il quale si possono applicare le variazioni istantaneamente sul controller Einstein. Inoltre c'è la possibilità di forzare dei comandi e di veder visualizzata sul monitor il relativo andamento grafico (Log) di tutti i punti quali Temperature, Comandi, Trand.

I vari loop di regolazione utilizzano più tipologie di sensori quali input delle regolazioni:

- Temperatura ambiente;
- UR% ambiente;
- Temperatura esterna;
- UR% esterna;
- Temperatura mandata;
- valori calcolati da moduli matematici (temperature medie, minime, massime, apparenti, entalpie, ecc.);

Tutti i loop di regolazione utilizzano un modulo **P.I.D.** in cui l'utente può personalizzare i valori di banda proporzionali \ tempo integrale \ tempo di derivativa ,differenziandoli tra curva riscaldamento \ curva serrande freecooling \ curva raffreddamento \ curva umidificazione \ curva deumidificazione.

E' possibile impostare differenti valori di set point, ad esempio :

- set point acqua mandata pompa di calore nel periodo invernale ed estivo;
- set point temperatura ambiente periodo invernale ed estivo;
- tutti i set point possono differenziarsi tra set point diurni e notturni;

Tutti i punti hardware \ software relativi al sistema sono abbinati ad un apposito archivio trends. L'utente ha la possibilità di impostare svariati parametri relativi a ciascun punto :

- tempo di archiviazione tra un punto ed il successivo;
- valore da archiviare (min.\media\max) nel periodo di riferimento;
- archiviazione solo dei cambi di stato (on-off) o delle variazioni analogiche entro una soglia prefissata.

Gli archivi trends possono essere visualizzati localmente direttamente sul display, o da remoto tramite Personal Computer.

I vari archivi trends possono essere visualizzati sia in formato alfanumerico sia in formato grafico.

Il modulo di gestione è dotato di un apposito archivio allarmi in cui sono storicizzati tutti gli interventi di allarme, malfunzionamento, ecc. Ogni intervento viene archiviato con la data e ora di intervento e di ritorno al normale.

In un apposito archivio vengono registrati tutti gli interventi di override, cioè di sovrascrittura alla logica di regolazione preimpostata, effettuati sulle varie utenze e sui vari punti di programma.

In un apposito archivio vengono registrate tutte le operazioni effettuate dai vari operatori abilitati sui vari programmi del sistema.

In particolare viene registrata la data e l'ora d'ingresso dell'operatore, la data e l'ora di uscita dell'operatore ed i programmi su cui detto operatore è intervenuto. Ogni operatore può registrare messaggi (che potranno essere letti da altri operatori localmente direttamente sul display o remotamente tramite Personal Computer) attraverso la funzione Notepad.

I vari punti configurati con soglie di allarme e di segnalazione hanno livelli di priorità diversi.

A seconda delle priorità gli allarmi vengono inviati :

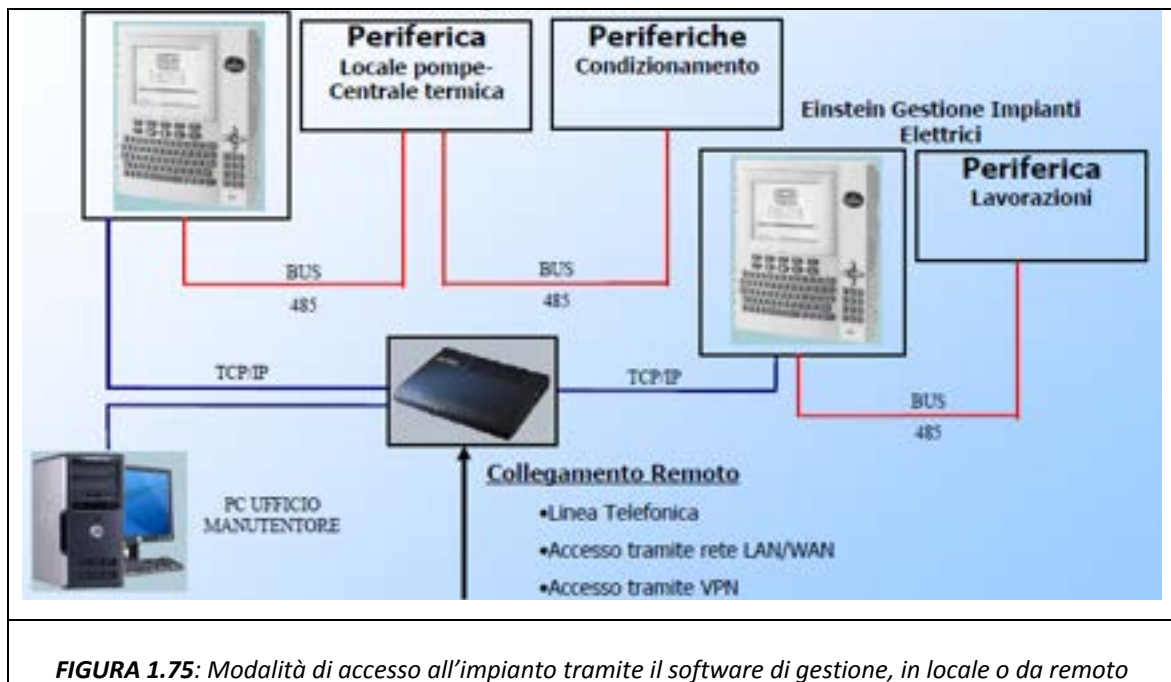
- direttamente sul display;
- direttamente sul PC locale;
- direttamente sul PC remoto;
- su un digital program;
- direttamente su un fax remoto;

E' possibile impostare più numeri telefonici di siti remoti per la trasmissione degli allarmi e configurare in quali siti gli allarmi devono essere inviati nelle ore notturne, diverse o nei vari giorni della settimana.

I vari punti configurati come allarme possono essere di tipo digitale o analogico.

I punti di tipo digitale sono configurati come on-off in caso di allarme ed hanno tempi di ritardo assegnati.

I punti di tipo analogico possono essere configurati come soglie di minima\massima o di variazione graduale della soglia, possono inoltre essere configurati come valori di scostamento dal set point. A ciascun punto inoltre viene abbinato un tempo di ritardo.



Le principali caratteristiche hardware sono di seguito riportate:

- *CPU*, Processore Pentium di ultima generazione con elevata capacità di processare dati;
- *Memoria*, elevatissima capacità di memoria che permette al sistema di storicizzare un elevato numero di dati nei vari archivi logs, energetici, override ed allarmi;
- *Display*, display a colori tipo TFT dotato di interfacce grafiche, che permettono all'utente di navigare facilmente tra i vari programmi;
- *Tastiera*, tastiera dotata di tasti di accesso rapido e diretto ai vari programmi;
- *Schede I/O*, sono state installate le seguenti tipologie di schede I/O per soddisfare tutte le necessità di monitoraggio e gestione dell'impianto:
  - Multiflex 168AO: scheda universale completa di 16 ingressi universali, 8 uscite digitali e 4 uscite analogiche;
  - Multiflex 168: scheda universale completa di 16 ingressi universali, 8 uscite digitali;
  - 16AI: scheda universale completa di 16 ingressi universali.

Vengono di seguito riportate e descritte le quattro pagine grafiche che permettono il monitoraggio e la gestione dell'impianto mediante il software di gestione.

La pagina grafica principale mostra la piantina della stanza con le luci e i fan coil (figura 1.76), in essa presenti, e permette di accedere alle specifiche pagine grafiche riguardanti l'unità di



trattamento aria (UTA Ambiente Figura 1.77), la Centrale FRIGO (figura 1.78) dalla quale si accede alla pagine dei Collettori (figura 1.79).

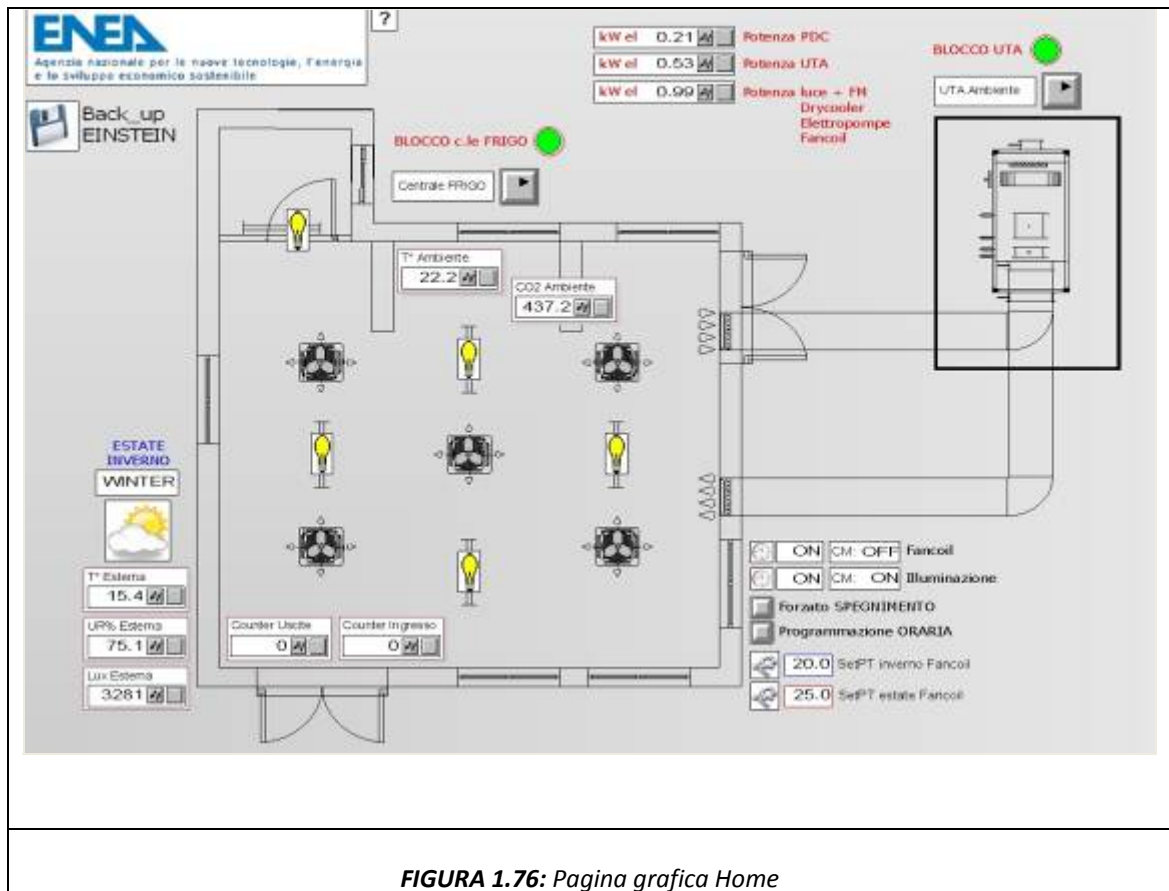


FIGURA 1.76: Pagina grafica Home

In particolare vengono mostrate la stagione di funzionamento, se invernale o estiva, le condizioni esterne in termini di temperatura, umidità relativa e lux. L'ambiente interno invece viene caratterizzato da temperatura, quantità di CO<sub>2</sub> e il numero di persone presenti. Sono tutti questi i parametri su cui si basa la logica di regolazione dell'impianto e dei singoli componenti. Vengono infine mostrati i consumi elettrici, lo stato dei fan coil e dell'illuminazione. Dalla seguente pagina grafica si legge il set point dei fan coil ed è possibile forzare lo spegnimento dell'impianto o scegliere la programmazione oraria.

Dalla precedente pagina grafica si accede a quella riguardante il funzionamento dell'Unità Trattamento Aria.

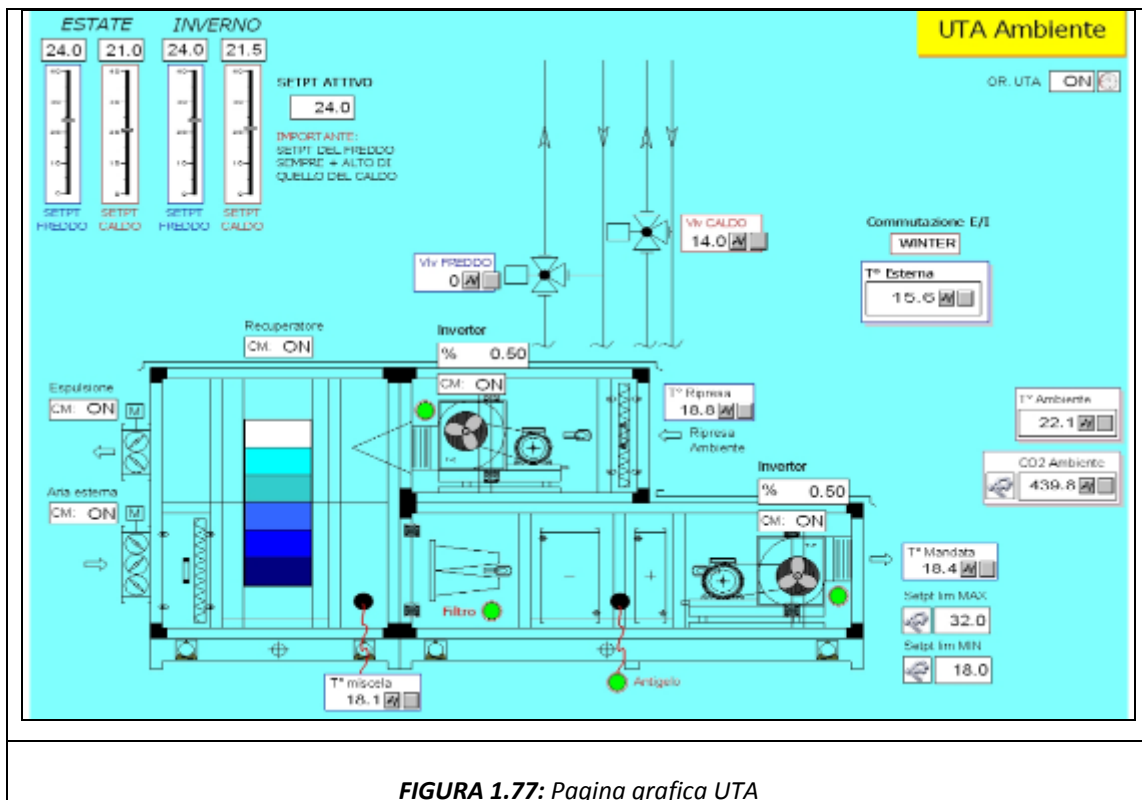
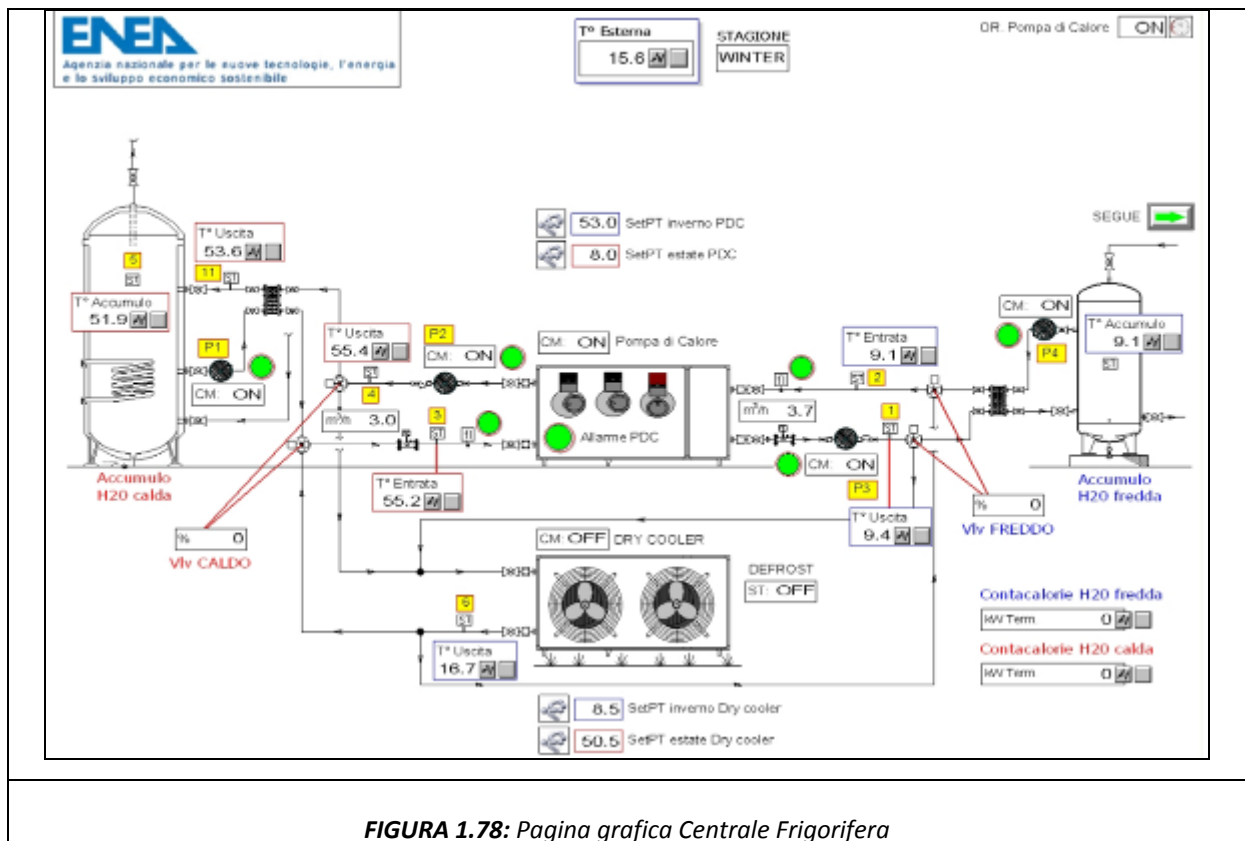


FIGURA 1.77: Pagina grafica UTA

Da tale pagina è possibile visualizzare e agire sui set point che regolano il funzionamento della macchina a seconda della stagione e quindi le temperature che regolano l'apertura e la chiusura delle valvole del caldo e del freddo. Sono qui riportati i tre parametri che regolano il funzionamento dell'UTA, ovvero la temperatura esterna, quella ambiente e la quantità di CO<sub>2</sub> presente in ambiente. È possibile quindi visualizzare la temperatura dell'aria di esterna e di ripresa prima e dopo il passaggio nel recuperatore rotativo entalpico. La richiesta dell'UTA di acqua calda e fredda è relazionata alla percentuale di apertura delle valvole mentre la portata d'aria in mandata e in ripresa dagli inverter presenti sui ventilatori.

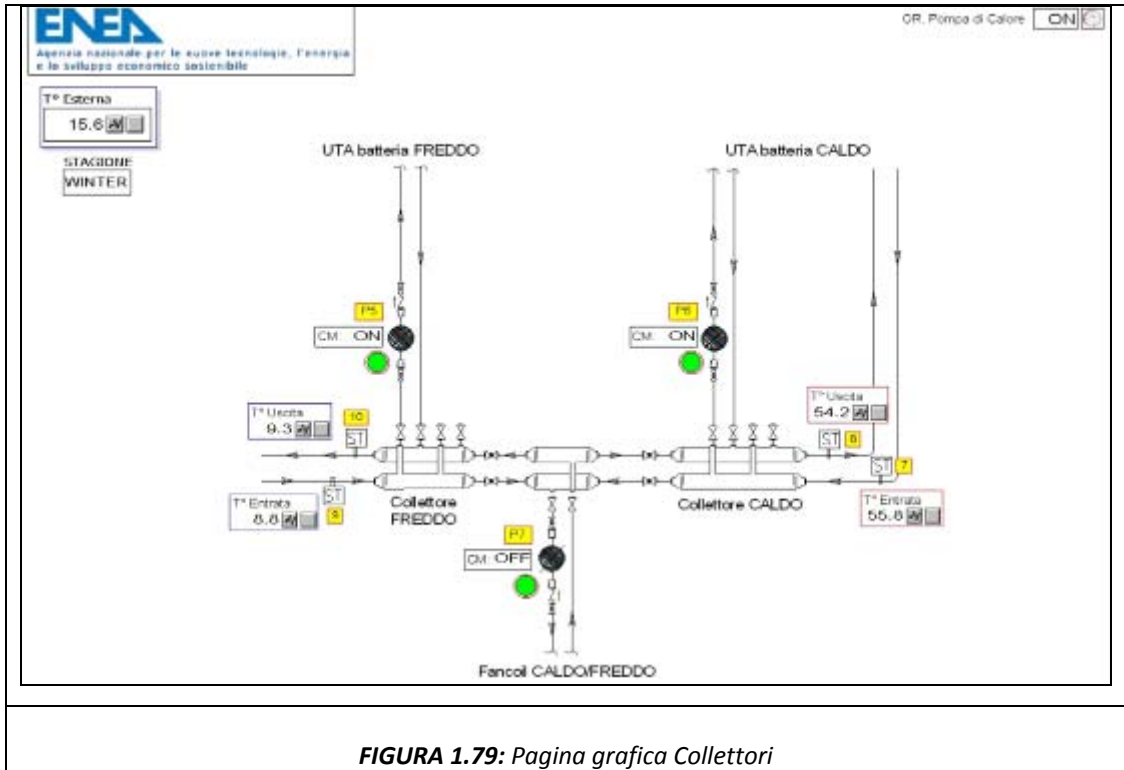
La successiva pagina grafica riguarda la centrale frigo e vi si accede sempre dalla pagina principale. Tale pagina è stata realizzata a partire dallo schema d'impianto e mostra la pompa di calore, il circuito ausiliario dei due scambiatori a piastre, i due serbatoi di accumulo e il dry cooler. Vengono riportate le temperature nelle posizioni corrispondenti al punto in cui è installata la rispettiva sonda e lo stesso viene fatto per la portata. È possibile visualizzare lo stato di ciascuna apparecchiatura, i set point della pompa di calore, del dry cooler, la percentuale di apertura delle valvole a tre vie lato caldo e lato freddo e infine il calcolo dei kW<sub>th</sub> e kW<sub>f</sub> prodotti dalla macchina.



**FIGURA 1.78:** Pagina grafica Centrale Frigorifera

L'ultima pagina grafica rappresenta i collettori che forniscono il circuito dell'unità di trattamento aria e i fan coil, con le rispettive pompe P5, P6 per l'UTA e P7 per i fan coil. In tale pagina grafica vengono riportate le temperature dell'acqua in ingresso e in uscita ai collettori rispettivamente lato caldo e lato freddo (figura 1.79).

La disponibilità di un sistema di controllo potente e prestante come BX EISTEIN abbinata con la più attuale tecnologia dei dispositivi tablet permette di monitorare costantemente e facilmente l'impianto nel palmo di una mano, rendendo il tutto di più facile consultazione non costringendo ad utilizzare un classico notebook o computer.



**FIGURA 1.79:** Pagina grafica Collettori

### 1.3.4 Sistema di monitoraggio della pompa di calore: TelevisNet 4.0

Il sistema TelevisNet permette di monitorare il funzionamento della macchina e di variarne i parametri. La selezione dei set da utilizzare per i singoli compressori può essere infatti effettuata agendo sul tastierino o da remoto tramite il TelevisNet (figura 1.80).



**FIGURA 1.80:** Sistema TelevisNet

Tramite questo ultimo è possibile acquisire i seguenti parametri del ciclo lato CO<sub>2</sub>, permettendo il tracciamento del ciclo stesso anche sul piano pressione – entalpia:

- temperatura aspirazione al compressore bassa pressione;
- temperatura CO<sub>2</sub> uscita gas cooler;
- bassa pressione;
- media pressione;
- alta pressione;
- temperatura ingresso al sottoraffreddatore lato alta pressione;
- temperatura uscita dal sottoraffreddatore lato alta pressione;
- temperatura uscita dal sottoraffreddatore lato media pressione;
- temperatura uscita dal surriscaldatore lato alta pressione;
- temperatura ingresso dell'acqua del circuito della pompa di calore al gas cooler;
- temperatura uscita dell'acqua del circuito della pompa di calore dal gas cooler.

Inoltre è possibile settare i seguenti parametri:

- valore minimo di bassa pressione;
- valore massimo di bassa pressione;
- valore massimo di media pressione;
- valore massimo di alta pressione;
- set di riferimento per ciascun compressore per l'accensione e lo spegnimento diversi nel caso estivo e nel caso invernale;
- tempi di iniezione dell'olio nella tubazione di aspirazione;
- parametri che regolano il defrost (temperatura minima di evaporazione, numero di cicli massimo a tale temperatura, temperatura dell'acqua in uscita dal gas cooler che arresta il defrost e il numero massimi di cicli di defrost):
- tempo dopo il quale la macchina si riavvia dopo un allarme;
- temperatura massima della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler;
- temperatura minima di ingresso al gas cooler per il funzionamento del compressore con inverter;
- temperatura dell'aria per la commutazione del funzionamento da estivo a invernale in modalità automatica (solo in caso di selezione automatica estate/inverno).

Da remoto è possibile operare nell'impianto sfruttando le funzioni di TelevisNet senza installare alcun software, semplicemente utilizzando Internet Explorer sfruttando tutti i canali di comunicazione TCP/IP offerti dalla piattaforma windows (modem, ADSL, Ethernet, ecc.). il TelevisNet offre la possibilità di installare un PC cieco nell'impianto ed operare esclusivamente da remoto. L'interfaccia utente offre leggibilità delle informazioni e una navigabilità fluida.

I vantaggi di una piattaforma web-based sono diversi:

- da remoto è possibile operare nell'impianto sfruttando le funzioni di TelevisNet senza installare alcun software, semplicemente utilizzando Internet Explorer. Questo comporta la riduzione di problematiche relative alla compatibilità degli applicativi e alla necessità di aggiornamento di tutte le copie del software installate.
- Interfaccia web più estesa ed intuitiva che permette di realizzare grafici storici e in tempo reale delle risorse. La visualizzazione dei grafici non richiede l'installazione di

alcun componente aggiuntivo; di visualizzare e modificare tramite apposita pagina i parametri dei controllori (ParamManager); pagina per l'esecuzione dei comandi globali.

#### 1.4 Valutazione delle incertezze di misura

L'operazione di valutazione delle incertezze di misura deve essere considerata come parte integrante del processo di misurazione. Infatti una misura è completa se fornisce la migliore stima del misurando ed una distribuzione di valori ragionevolmente attribuibili al misurando con un determinato intervallo di confidenza. Sia data una grandezza  $Y = Y(x_1, x_2, \dots, x_n)$  funzione di  $n$  grandezze indipendenti e direttamente misurabili, l'incertezza  $e_Y$  associata alla grandezza  $Y$  deve essere determinata considerando tutte le incertezze relative di ciascuno degli  $n$  parametri, come mostrato nella seguente relazione riferita alla norma UNI CEI ENV 13005:

$$e_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial(Y)}{\partial x_1} e_{x1}\right)^2 + \left(\frac{\partial(Y)}{\partial x_2} e_{x2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial(Y)}{\partial x_n} e_{xn}\right)^2}$$

Dal punto di vista qualitativo si può intuire perché le incertezze debbano essere tutte sommate sotto radice quadrata e non in valore assoluto. Se la variabilità casuale delle due grandezze di ingresso non è correlata è abbastanza improbabile che esse siano entrambe e contemporaneamente allo stesso estremo dell'intervallo di variabilità. La somma in valore assoluto sarebbe pertanto penalizzante. Di seguito si riportano alcuni esempi sulla valutazione di incertezze relative ad alcune grandezze di misura indiretta

##### 1.4.1 Incertezza della potenza termica scambiata all'evaporatore

Partiamo dalla determinazione dell'incertezza relativa alla potenza termica scambiata all'evaporatore. Essa è data dal prodotto della portata volumetrica dell'acqua per la differenza di temperatura tra ingresso e uscita dell'evaporatore per il calore specifico dell'acqua a pressione costante.

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_{H2O} * C_{p,H2O} * (T_{in,ev,H2O} - T_{out,ev,H2O});$$

$\dot{m}_{H2O}$  = portata volumetrica dell'acqua [m<sup>3</sup>/s];

$C_{p,H2O}$  = Calore specifico a pressione costante dell'acqua [kJ/KgK];

$T_{in,ev,H2O}$  = Temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore [K];



$T_{out, ev, H_2O}$  = Temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore [K];

$\dot{Q}_{ev}$  = Potenza termica scambiata all'evaporatore [kW].

Relativamente alla portata volumetrica e alle temperature dell'acqua sia in ingresso che in uscita dall'evaporatore conosciamo l'incertezza di misura riportata nei dati del costruttore inerenti al misuratore di portata magnetico e le sonde di temperatura.

Rimane infine da precisare, che nel calcolo dell'incertezza non si è tenuto conto dell'incertezza associata al valore di calore specifico a pressione costante dell'acqua, in quanto questo può essere ritenuto costante.

A questo punto è possibile calcolare l'incertezza relativa della resa frigorifera:

$$\frac{e_{\dot{Q}_{ev}}}{\dot{Q}_{ev}} = \sqrt{\left(\frac{e_{\dot{m}_{H_2O}}}{\dot{m}_{H_2O}}\right)^2 + \left(\frac{e_{T_{in, ev, H_2O}}}{\Delta T_{H_2O}}\right)^2 + \left(\frac{e_{T_{out, ev, H_2O}}}{\Delta T_{H_2O}}\right)^2}$$

Considerando che l'incertezza sulla portata è lo 0,25 % del valore letto, in quanto il misuratore di portata magnetico è dotato di un'elevata accuratezza, si ha:

- Portata volumetrica dell'acqua = 3.1 m<sup>3</sup>/h;  
 $e_{\dot{m}_{H_2O}} = 0.008$ .
- Accuratezza sulla temperatura dell'acqua = 0.2°C, con un  $\Delta T_{H_2O} = 2.15$  °C.

Il valore finale di  $\frac{e_{\dot{Q}_{ev}}}{\dot{Q}_{ev}}$  per queste condizioni evidenziate è pari all' 1,3 %. E' molto

importante sottolineare come il contributo principale a questo valore di incertezza sia dato proprio dall'incertezza sulla resa frigorifera.

### 1.4.2 Incertezza della potenza termica scambiata al gas cooler

Essa è data dal prodotto della portata volumetrica dell'acqua per la differenza di temperatura tra ingresso e uscita del gas cooler per il calore specifico dell'acqua a pressione costante.

$$\dot{Q}_{gc} = \dot{m}_{H_2O} * C_{p,H_2O} * (T_{out,gc,H_2O} - T_{in,gc,H_2O});$$

$\dot{m}_{H_2O}$  = portata volumetrica dell'acqua [m<sup>3</sup>/s];

$C_{p,H_2O}$  = Calore specifico a pressione costante dell'acqua [kJ/KgK];

$T_{in,gc,H_2O}$  = Temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler [K];

$T_{out,gc,H_2O}$  = Temperatura dell'acqua in uscita dal gas cooler [K];

$\dot{Q}_{gc}$  = Potenza termica scambiata al gas cooler [kW].

Relativamente alla portata volumetrica e alle temperature dell'acqua sia in ingresso che in uscita dall'evaporatore conosciamo l'incertezza di misura riportata nei dati del costruttore inerenti il misuratore di portata magnetico e le sonde di temperatura. Rimane infine da precisare, che, nel calcolo dell'incertezza non si è tenuto conto dell'incertezza associata al valore del calore specifico a pressione costante dell'acqua , in quanto questo può essere ritenuto costante. A questo punto è possibile calcolare l'incertezza relativa alla potenza termica scambiata al gas cooler:

$$\frac{\sigma_{\dot{Q}_{gc}}}{\dot{Q}_{gc}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\dot{m}_{H_2O}}}{\dot{m}_{H_2O}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_{in,gc,H_2O}}}{\Delta T_{H_2O}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_{out,gc,H_2O}}}{\Delta T_{H_2O}}\right)^2}.$$

Considerando che l' incertezza sulla portata è lo 0,25 % del valore letto , in quanto si ha a disposizione un misuratore di portata magnetico dotato di un'elevata accuratezza, si ha:

- Portata volumetrica dell'acqua = 2.8 m<sup>3</sup>/h;  
 $e_{m_{H_2O}} = 0.007$ .
- Accuratezza sulla temperatura dell'acqua = 0.2°C , con un  $\Delta T_{H_2O} = 3.90^\circ\text{C}$ .

Il valore finale di  $\frac{e_{Q_{gs}}}{Q_{gs}}$  per queste condizioni evidenziate è pari all' 7.2 %.

### 1.4.3 Incertezza del COP

Il COP è esprimibile come il rapporto tra l'effetto utile quale è la potenza termica scambiata al gas cooler  $Q_{gs}$  e la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore  $\dot{L}$  :

$$COP = \frac{Q_{gs}}{\dot{L}}$$

$\dot{L}$  = potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore [kW]

Avendo già calcolato, precedentemente, l' incertezza associata alla potenza termica scambiata al gas cooler rimane da prendere in considerazione l'incertezza associata alla potenza elettrica assorbita dal compressore che è pari allo 0,3% del valore letto:

- Potenza elettrica = 5.65 kW;
- $e_{\dot{L}} = 0.017$ .

Da cui si ha che l'incertezza relativa del COP è pari al 5.1%, praticamente molto vicina al valore dell' incertezza relativa della potenza termica scambiata al gas cooler:

$$\frac{e_{COP}}{COP} = \sqrt{\left(\frac{e_{Q_{gs}}}{Q_{gs}}\right)^2 + \left(\frac{e_{\dot{L}}}{\dot{L}}\right)^2}$$

## **2 RILIEVO ED ANALISI DATI SPERIMENTALI**

### **2.1 Introduzione**

I dati sperimentali riportati costituiscono la prima campagna sperimentale condotta nel periodo di funzionamento invernale ed estivo della pompa di calore. Tale attività di ricerca ha evidenziato i parametri che maggiormente incidono sulle prestazioni della macchina, ed ha permesso di approfondire la caratterizzazione termodinamica e il funzionamento dei vari componenti della pompa di calore.

I punti sperimentali ottenuti sono stati organizzati in due tabelle, una per il funzionamento invernale ed una per quello estivo, in base alla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler riportata in ordine crescente.

Ciascuna riga presente nella tabella corrisponde ad una prova sperimentale, quest'ultima costituita dalle acquisizioni effettuate con il controllore BX EISTEIN e con il sistema TelevisNet. Si ricorda che i dati acquisiti con il controllore BX EISTEIN riguardano il lato acqua del circuito mentre quelli acquisiti con il TelevisNet riguardano la pompa di calore e quindi i dati relativi al ciclo termodinamico della CO<sub>2</sub>. Vengono riportate esclusivamente le righe relative all'effettivo funzionamento della macchina; sono state infatti escluse le righe rappresentative degli istanti in cui la macchina ha il consenso per funzionare ma non produce kWth (o frigoriferi) a seguito del raggiungimento dei valori di set point impostati.

### **2.2 Rilievo dati sperimentali invernali**

I rilievi invernali si riferiscono a 187 punti sperimentali relativi ai giorni compresi tra il ventidue dicembre 2011 ed il sette gennaio 2012. La centralina della pompa di calore modula la capacità dei compressori attraverso i set point, stabiliti dall'utente per quanto riguarda i due compressori ON/OFF mentre non c'è alcun set point per il compressore con inverter, e quindi per il ciclo di media pressione. Il primo compressore lavora fino a 52 °C e il secondo fino a 55°C. Tali punti sperimentali saranno successivamente utilizzati anche per la validazione del modello di simulazione del funzionamento della pompa di calore. Le grandezze riportate in tabella rilevate attraverso il controllore BX EISTEIN sono quelle

strettamente connesse al funzionamento della sola pompa di calore, tralasciando le altre relative all'impianto e all'ambiente interno ed esterno che il controllore monitora ed elabora. Gli orari di funzionamento dell'impianto, e quindi della macchina, sono stati scelti tenendo conto dell'orario di occupazione del locale e settati tramite il controllore BX EISTEIN. L'impianto funziona dalle 7.40 alle 16.30.

I dati relativi all'intervallo di campionamento considerato sono abbastanza significativi perché essi derivano da una particolare strategia tale per cui il serbatoio di accumulo risulti scarico all'avviamento dell'impianto vale a dire che la temperatura dell'acqua del serbatoio di accumulo sia intorno a 20°C. Così facendo è stato possibile monitorare e descrivere le prestazioni della pompa di calore su un range di temperatura abbastanza ampio. Le grandezze riportate in tabella e rilevate dal BX EISTEIN sono relative al lato caldo dell'impianto (figura 2.1).

### 2.2.1 Scelta dei parametri di prova (Caso invernale)

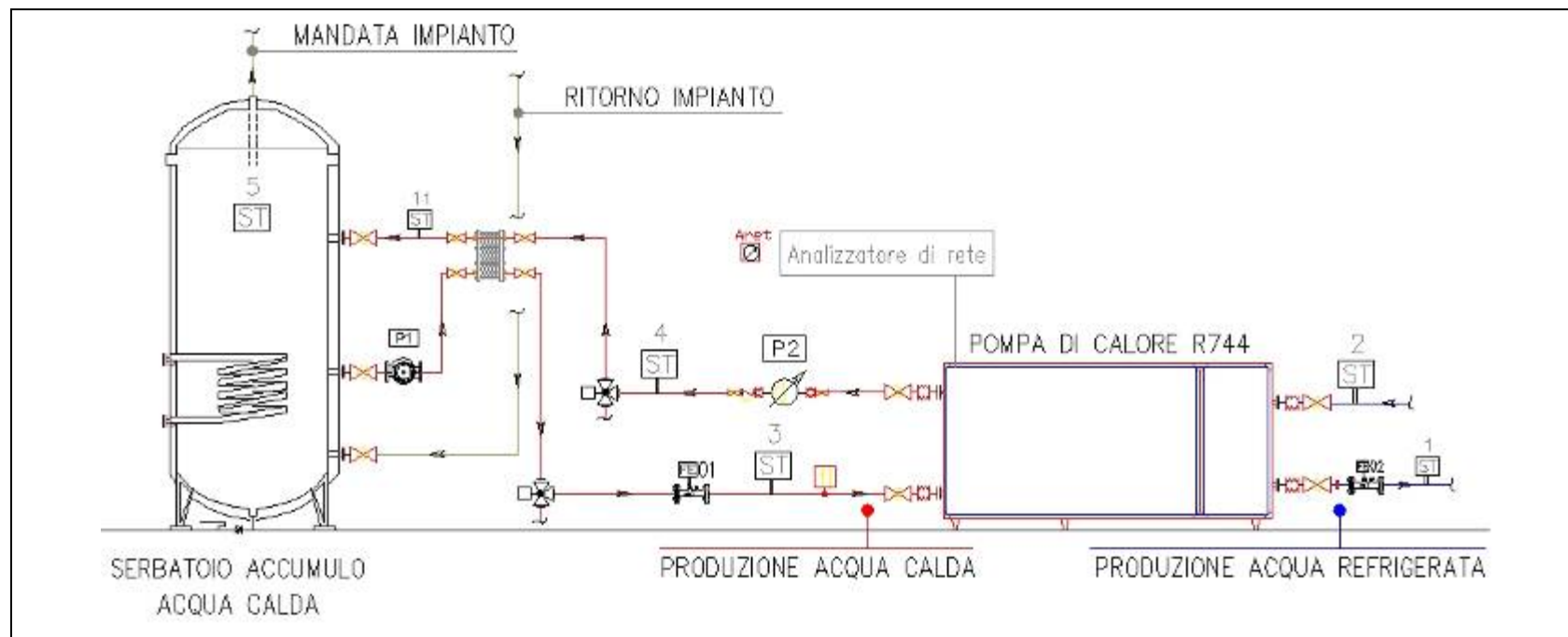
Le grandezze riportate in tabella 2.4 appartengono ad un preciso intervallo di variazione rappresentativo delle condizioni in cui le prove sperimentali sono state effettuate. La pressione al GasCooler varia tra un valore minimo di 57,6 [bar] e uno massimo di 96 [bar]. Alla variazione della pressione al gas cooler corrisponde quella della temperatura di uscita del refrigerante dal GasCooler, imposta dalla valvola principale, il cui valore massimo è pari a 53 °C . A fronte del solo funzionamento invernale, è stato considerato un intervallo di variazione della pressione di evaporazione tra 30,4 e 40,5 [bar] (cui corrisponde una variazione di temperatura di evaporazione tra circa -5°C e 6°C). La pressione del circuito ausiliario varia invece tra 31,4 e 56,5 [bar], che corrisponde al funzionamento del terzo compressore.

Pressione al Gas Cooler -HP	57,6 - 96	[bar]
Pressione di evaporazione -LP	30,4 – 40,5	[bar]
Pressione media -MP	31,4 – 56,5	[bar]
Temperatura in uscita gas cooler- CO <sub>2</sub> OUT GC	19,6 - 53	[°C]
<b>TABELLA 2.1: Condizioni operative invernali</b>		

Oltre alla variazione delle condizioni operative, il funzionamento della pompa di calore dipende dalla variazione delle condizioni al contorno, principalmente per quanto riguarda i parametri che caratterizzano il circuito dell'acqua lato GasCooler. La variazione delle grandezze costituenti le condizioni al contorno sono riportate in tabella (Tabella 2.2)

Portata massica dell'acqua all'evaporatore-FE02	3,1 – 3,7	[m <sup>3</sup> /h]
Portata massica dell'acqua al GasCooler-FE01	2.8 – 2.9	[m <sup>3</sup> /h]
Temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore-ST2	[+1,2 , +10,4]	[°C]
Temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler-ST3	[+18,8 , +52,9]	[°C]
Temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore-ST1	[-2,15 , +6,8]	[°C]
Temperatura dell'acqua in uscita dal gas cooler-ST4	[+22,9 , +58,85]	[°C]
<b>TABELLA 2.2:</b> <i>Variazione delle condizioni al contorno invernali</i>		

Inoltre, è opportuno precisare che le prove sperimentali sono state condotte per un valore di portata massica dell'acqua al GasCooler praticamente quasi costante consentendo di valutare le variazioni sia della potenza termica scambiata al GasCooler, sia del funzionamento della macchina esclusivamente al variare dei livelli di temperatura raggiunti dall'acqua in ingresso e in uscita dal GasCooler.



**FIGURA 2.1:** Schema funzionamento lato caldo pompa di calore

<b>TABELLA 2.3</b>	
<b>ST1</b>	Temperatura Acqua uscita Evaporatore PDC [°C]
<b>ST2</b>	Temperatura Acqua ingresso Evaporatore PDC [°C]
<b>ST3</b>	Temperatura Acqua ingresso Gas Cooler PDC [°C]
<b>ST4</b>	Temperatura Acqua uscita Gas Cooler PDC [°C]
<b>ST5</b>	Temperatura Acqua Accumulo caldo [°C]
<b>FE01</b>	Portata Acqua ingresso Gas Cooler PDC [m <sup>3</sup> /h]
<b>FE02</b>	Portata Acqua uscita Evaporatore PDC [m <sup>3</sup> /h]

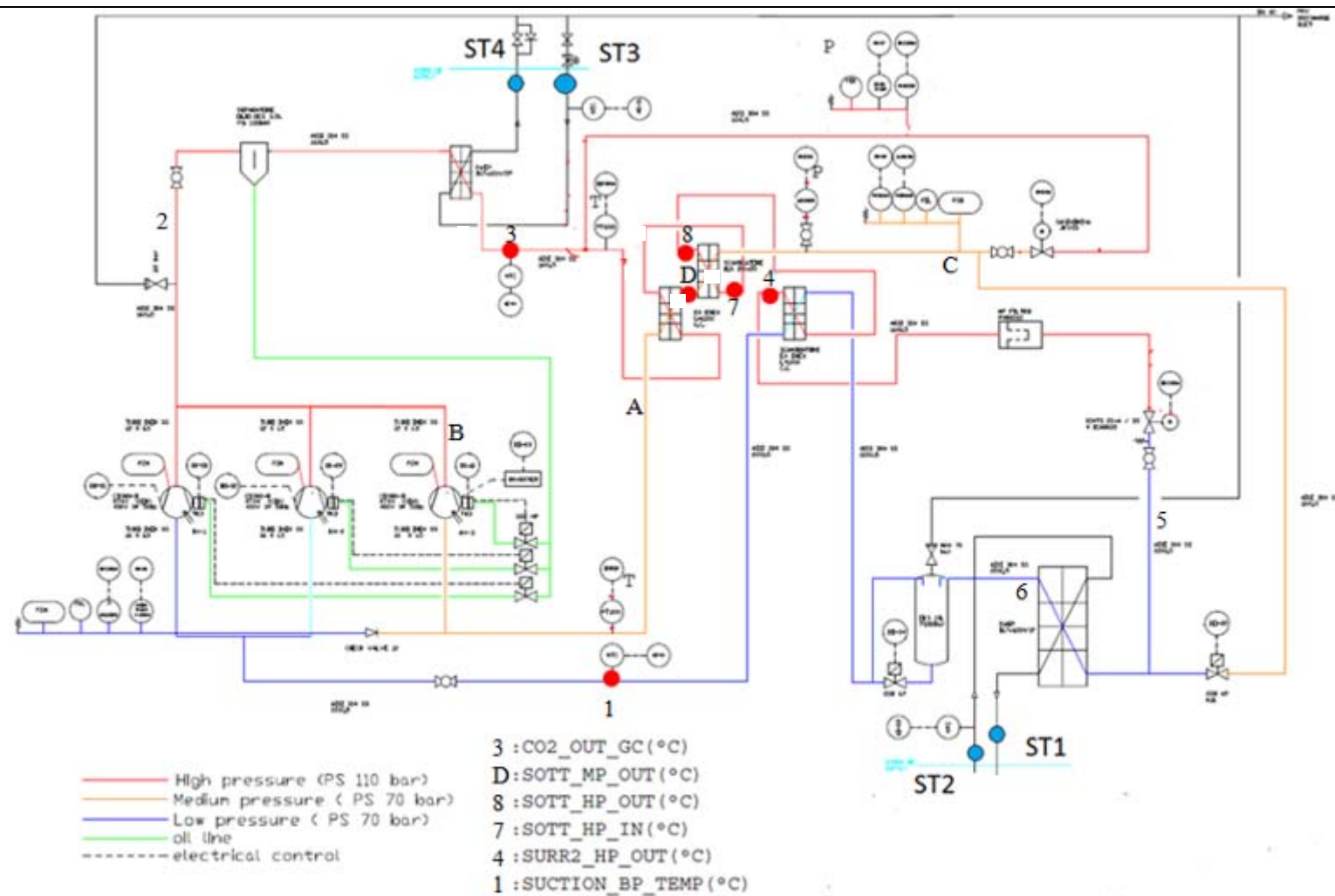


FIGURA 2.2: Grandezze acquisite dal sistema Tevis e rispettivi punti di misurazione



TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
18,8	4,7	5,7	19,6	36,2	57,6	36,8	18,9	18,9	9,7	18,4	Attivo	Attivo	Inattivo	5,4	22,9	2,8	2,20	3,1	13,35	9,01	2,47
20,1	3,4	5,8	21,6	34,1	60,8	35,2	21,1	21	16,1	20,4	Attivo	Attivo	Inattivo	5,65	24,15	2,8	1,51	3,1	13,19	6,83	2,33
20,9	7,7	9,3	21,5	39,4	60,2	40,5	20,9	20,8	12,1	20,3	Attivo	Attivo	Inattivo	5,6	25,2	2,8	5,80	3,7	14,00	8,17	2,50
21	7,2	7,2	21,5	39,4	60,2	40,5	20,7	20,6	10,8	20,1	Attivo	Attivo	Inattivo	5,6	25,2	2,8	5,40	3,7	13,67	7,74	2,44
21,1	2,9	7,8	21,5	34,6	60,8	35,2	20,9	20,8	13,4	20,3	Attivo	Attivo	Inattivo	5,9	25,5	2,8	0,60	3,1	14,33	8,29	2,43
21,2	6,8	8,7	21,9	37,8	60,8	38,4	21,2	21,1	11,6	20,7	Attivo	Attivo	Inattivo	5,7	25,8	2,8	4,40	3,2	14,98	8,93	2,63
21,4	5,2	8,6	21,8	36,8	60,8	37,3	20,9	20,9	12,2	20,4	Attivo	Attivo	Inattivo	5,8	26,1	2,8	2,60	3,2	15,30	9,67	2,64
21,6	3,1	6,4	23,4	33,6	63,4	34,1	23	22,9	18,7	22,1	Attivo	Attivo	Inattivo	6,05	26,4	2,8	0,71	3,1	15,63	8,63	2,58
21,7	4,2	7,6	21,8	36,2	60,2	36,8	20,9	20,9	10,7	20,4	Attivo	Attivo	Inattivo	5,8	25,7	2,8	2,40	3,1	13,02	6,49	2,25
22,2	4,1	9,4	22,5	35,7	61,8	36,2	21,8	21,8	12,6	21,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6	26,4	2,8	1,50	3,1	13,67	9,37	2,28
22,3	1,9	8,8	23,5	32	63,4	32,5	23,1	23	18,5	22,1	Attivo	Attivo	Inattivo	6,1	26,55	2,8	-0,07	3,1	13,84	7,08	2,27
22,4	6,9	9,4	23,7	37,8	64	38,4	23,3	23,1	18,8	22,6	Attivo	Attivo	Inattivo	5,8	26,6	2,8	5,15	3,45	13,67	7,02	2,36
22,7	6,8	8,2	23,7	37,8	63,4	38,4	23,2	23	18,3	22,5	Attivo	Attivo	Inattivo	5,85	26,4	2,8	3,85	3,45	12,05	11,83	2,06
22,8	6,3	9,8	24,1	36,8	64,5	37,3	23,7	23,5	18,6	23	Attivo	Attivo	Inattivo	5,95	27,1	2,8	3,85	3,15	14,00	8,97	2,35
22,9	7,5	10,1	23,8	38,9	64	40	23	22,9	13,7	22,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6	27,8	2,8	5,10	3,7	15,95	10,33	2,66
23	3,4	7,1	24,9	33,6	65,6	34,1	24,5	24,4	20,2	23,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,25	28,2	2,8	0,72	3,1	16,93	9,68	2,71
23,1	3,7	7,8	23,9	35,2	64	35,7	23,5	23,3	17,9	22,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6	26,9	2,8	1,95	3,1	12,37	6,31	2,06
23,3	7,2	10	23,6	38,9	63,4	39,4	22,7	22,7	13,6	22,1	Attivo	Attivo	Inattivo	6	28,2	2,8	5,10	3,2	15,95	7,81	2,66
23,5	3,7	9,3	24	34,6	64	35,2	23,7	23,5	18,7	22,9	Attivo	Attivo	Inattivo	6	27,25	2,8	1,90	3,2	12,21	6,70	2,03
23,6	1,8	9,9	25,2	30,9	66,1	31,4	24,8	24,7	20,8	23,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,35	28,45	2,8	-0,97	3,1	15,79	9,97	2,49
23,7	7,4	9,9	25,3	37,3	66,1	37,8	24,9	24,7	20,5	24,1	Attivo	Attivo	Inattivo	6,1	28,9	2,8	1,90	3,1	16,93	19,83	2,78
23,8	2,7	10,3	24,4	33,6	64,5	34,1	24,1	23,9	19,1	23,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,15	27,6	2,8	0,93	3,1	12,37	6,40	2,01
24	7,3	9,9	25,6	37,3	66,6	37,8	25,2	25	21,2	24,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,15	28,95	2,8	4,25	3,2	16,12	11,35	2,62

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
24,1	3,2	9,4	25,1	34,1	65,6	34,6	24,7	24,5	20,9	23,8	Attivo	Attivo	Inattivo	6,25	28,5	2,8	1,47	3,2	14,33	6,44	2,29
24,3	4	10,8	25,8	33,6	67,2	34,1	25,4	25,2	21,3	24,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,35	29,05	2,8	1,35	3,1	15,47	9,55	2,44
24,4	6	10,8	26	35,7	67,2	36,2	25,6	25,4	21,5	24,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,35	29,35	2,8	3,10	3,15	16,12	10,62	2,54
24,5	3,4	7,8	25,5	34,1	66,6	34,6	25,2	25	20,7	24,3	Attivo	Attivo	Inattivo	6,3	28,95	2,8	1,17	3,1	14,49	8,06	2,30
24,8	8,3	13	25,1	40	65	40,5	24,3	24,2	16,2	23,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,2	29,8	2,8	5,90	3,7	16,28	10,33	2,63
24,9	6,7	11	25,6	37,3	66,1	37,8	25,2	25	20,4	24,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,15	28,8	2,8	3,90	3,4	12,70	11,07	2,06
25	1,6	11,2	26	31,4	67,2	32	25,7	25,5	22,4	24,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,6	30	2,8	-1,40	3,1	16,28	10,81	2,47
25,1	1,6	11,1	26,5	30,9	68,2	31,4	26,1	26	22,2	24,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,5	29,95	2,8	-1,30	3,1	15,79	10,45	2,43
25,2	2,6	11,3	26,2	32,5	67,7	33	25,9	25,7	21,9	24,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,45	29,7	2,8	0,19	3,1	14,65	8,69	2,27
25,4	6,9	10,9	25,8	37,8	66,6	38,4	25,4	25,2	20,3	24,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,15	29,35	2,8	4,75	3,2	12,86	8,00	2,09
25,6	7	10,5	27	36,8	68,8	37,3	26,6	26,4	22,8	25,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,4	30,7	2,8	4,00	3,2	16,60	11,16	2,59
25,8	2	11,4	27,1	32	68,8	32,5	26,7	26,5	23,4	25,3	Attivo	Attivo	Inattivo	6,6	30,8	2,8	0,26	3,2	16,28	6,49	2,47
25,9	3,1	8,9	26,8	33,6	68,2	34,1	26,4	26,2	22	25,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,5	30,45	2,8	0,84	3,1	14,81	8,15	2,28
26,1	6,1	11,8	27,5	35,7	69,8	36,2	27,1	26,9	23,1	26	Attivo	Attivo	Inattivo	6,55	31,15	2,8	3,05	3,2	16,44	11,35	2,51
26,3	1,2	12	27,2	30,9	69,3	31,4	26,9	26,7	23,2	25,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,65	30,7	2,8	-1,30	3,1	14,33	9,01	2,15
26,4	8,7	14,6	26,6	40,5	66,6	41	25,7	25,2	17,5	24,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,3	31,5	2,8	5,40	3,7	16,60	14,20	2,64
26,5	1,6	12,4	27,5	30,9	69,8	31,4	27,2	27	23,4	25,6	Attivo	Attivo	Inattivo	6,7	31,25	2,8	-1,25	3,1	15,47	10,27	2,31
26,7	2,7	12,1	27,5	32,5	69,8	33	27,2	27	23,4	26	Attivo	Attivo	Inattivo	6,65	31,3	2,8	0,02	3,1	14,98	9,66	2,25
26,8	6,9	12,1	27,4	37,3	69,3	37,8	27,1	26,8	23,2	26,3	Attivo	Attivo	Inattivo	6,45	31,4	2,8	4,35	3,2	14,98	9,49	2,32
26,9	7,9	14,3	27,3	38,4	68,8	38,9	27	26,7	22,5	26,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,3	31,1	2,8	5,85	3,7	13,67	8,82	2,17
27,1	3,1	11,8	27,9	33,6	69,8	34,1	27,5	27,3	23,6	26,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,65	31,75	2,8	0,67	3,15	15,14	8,92	2,28
27,2	7,1	11	28,1	37,3	70,4	37,8	27,8	27,5	23,9	26,9	Attivo	Attivo	Inattivo	6,55	32,2	2,8	4,30	3,2	16,28	10,42	2,49
27,3	2,1	12	28,1	32,5	70,4	33	27,8	27,6	24,1	26,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,75	31,95	2,8	-0,55	3,2	15,14	9,84	2,24

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
27,4	3,6	9,8	28	34,1	70,4	34,6	27,6	27,3	23,1	26,6	Attivo	Attivo	Inattivo	6,65	31,8	2,8	1,18	3,15	14,33	8,88	2,15
27,5	3,9	12,9	28,4	33,6	70,9	34,1	28	27,8	24,2	26,9	Attivo	Attivo	Inattivo	6,75	32,4	2,8	1,17	3,2	15,95	10,18	2,36
27,6	6,9	13,2	28,4	36,8	70,9	37,3	28,1	27,9	24,6	27,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,65	32,75	2,8	4,25	3,2	16,77	9,86	2,52
27,7	7,2	14,3	28,3	37,3	70,4	38,4	28	27,7	24,3	27,1	Attivo	Attivo	Inattivo	6,55	32,4	2,8	4,80	3,45	15,30	9,63	2,34
27,8	1,9	13,8	28,5	31,4	70,9	32,5	28,2	28	24,5	26,8	Attivo	Attivo	Inattivo	6,8	32,45	2,8	-0,80	3,1	15,14	9,71	2,23
28,2	2,7	13,4	28,6	33	71,4	33,6	28,3	28,1	24,6	27,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,75	32,65	2,8	0,15	3,1	14,49	9,19	2,15
28,4	7,2	15,4	28,9	37,3	71,4	37,8	28,6	28,4	24,9	27,6	Attivo	Attivo	Inattivo	6,6	33,35	2,8	5,35	3,45	16,12	7,42	2,44
28,5	7,6	15,6	28,8	37,8	70,9	38,4	28,5	28,1	23,9	27,4	Attivo	Attivo	Inattivo	6,5	32,75	2,8	4,45	3,7	13,84	13,55	2,13
28,6	3,6	13,2	29	34,1	71,4	34,6	28,7	28,5	24,8	27,6	Attivo	Attivo	Inattivo	6,8	33,1	2,8	1,04	3,2	14,65	9,54	2,15
28,7	5,1	9,4	29,3	36,2	71,4	36,8	28,9	28,5	24,4	27,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,75	33,35	2,8	2,95	3,2	15,14	8,00	2,24
28,8	7,6	12,1	29,2	38,4	72	38,9	28,9	28,5	25	27,9	Attivo	Attivo	Inattivo	6,7	33,55	2,8	4,90	3,2	15,47	10,05	2,31
28,9	4,2	11	29,2	35,2	71,4	35,7	28,7	28,4	24,2	27,6	Attivo	Attivo	Inattivo	6,75	33,15	2,8	1,80	3,15	13,84	8,79	2,05
29	4,7	14,3	29,5	34,6	72,5	35,7	29,2	28,9	25,4	28	Attivo	Attivo	Inattivo	6,85	33,65	2,8	2,00	3,1	15,14	9,73	2,21
29,1	2,4	15,1	29,5	32	72,5	33	29,2	28,9	25,5	27,9	Attivo	Attivo	Inattivo	6,85	33,6	2,8	-0,17	3,1	14,65	9,26	2,14
29,2	4,3	13,7	29,5	34,6	72,5	35,2	29,2	28,9	25,3	28	Attivo	Attivo	Inattivo	6,85	33,65	2,8	1,75	3,2	14,49	9,49	2,12
29,3	7,2	16,1	30	36,8	73	37,3	29,7	29,4	26,4	28,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,9	34,5	2,8	4,05	3,2	16,93	11,72	2,45
29,4	6,8	14	29,9	36,8	73	37,3	29,5	29,2	25,6	28,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,85	34,2	2,8	3,85	3,2	15,63	10,98	2,28
29,6	3	14,4	29,9	33,6	72,5	34,1	29,5	29,2	25,7	28,2	Attivo	Attivo	Inattivo	6,9	33,95	2,8	0,42	3,1	14,16	9,32	2,05
29,7	3,5	14,5	30,1	33,6	73	34,6	29,8	29,5	26,1	28,5	Attivo	Attivo	Inattivo	6,95	34,35	2,8	0,75	3,2	15,14	10,23	2,18
30,1	2,6	14	30,3	33	73,6	33,6	29,9	29,7	26	28,4	Attivo	Attivo	Inattivo	7,1	35	2,8	0,17	3,1	15,95	8,76	2,25
30,2	5,3	9,5	30,6	36,2	73	37,3	30,2	29,8	25,4	28,6	Attivo	Attivo	Inattivo	6,9	34,75	2,8	3,10	3,2	14,81	8,19	2,15
30,3	4,5	11,9	30,6	35,2	73,6	35,7	30,1	29,8	25,5	28,7	Attivo	Attivo	Inattivo	6,95	34,6	2,8	2,15	3,15	14,00	8,61	2,01
30,6	7	16,6	31,4	35,7	75,7	36,2	31,1	30,9	27,4	28,8	Attivo	Attivo	Inattivo	7,2	36	2,8	3,50	3,2	17,58	13,02	2,44

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
30,8	8	16,9	31,7	36,8	76,2	37,3	31,4	31,1	27,6	28,6	Attivo	Attivo	Inattivo	7,2	36,35	2,85	4,50	3,2	18,39	13,02	2,55
30,9	4,8	16	31,5	34,1	75,7	34,6	31,2	30,9	27,4	28,4	Attivo	Attivo	Inattivo	7,2	36,05	2,85	1,85	3,2	17,07	10,98	2,37
31	7,1	15,1	31,5	36,2	75,7	37,3	31,2	30,9	27	29,5	Attivo	Attivo	Inattivo	7,15	36	2,8	3,95	3,2	16,28	11,72	2,28
31,1	3,3	15,2	31,4	33	75,2	33,6	31,1	30,9	26,9	29	Attivo	Attivo	Inattivo	7,2	35,75	2,8	0,47	3,1	15,14	10,20	2,10
31,2	7,3	17,5	32,2	35,2	77,3	35,7	31,9	31,6	28,2	26,1	Attivo	Attivo	Inattivo	7,4	37,05	2,8	2,90	3,2	19,05	16,37	2,57
31,3	3,1	14,7	31,8	32,5	76,2	33,6	31,4	31,2	27,2	28,4	Attivo	Attivo	Inattivo	7,4	37,1	2,8	-0,14	3,1	18,88	11,68	2,55
31,4	5,3	9,7	32,1	35,7	76,2	36,8	31,7	31,4	26,7	29,9	Attivo	Attivo	Inattivo	7,2	36,55	2,85	2,95	3,2	17,07	8,74	2,37
31,5	6,2	16,9	32,3	34,1	77,3	34,6	32	31,7	28,2	27,7	Attivo	Attivo	Inattivo	7,35	36,95	2,8	3,25	3,45	17,74	11,83	2,41
31,6	7,6	15,9	32,4	36,2	77,3	36,8	32	31,8	28	29	Attivo	Attivo	Inattivo	7,35	37	2,8	4,40	3,7	17,58	13,77	2,39
31,8	7,9	13,2	32,5	37,3	77,3	38,4	32,2	31,9	27,6	29,8	Attivo	Attivo	Inattivo	7,3	37,1	2,85	5,05	3,2	17,56	10,60	2,41
32	3,3	15,6	32,7	32,5	78,9	33	32,5	32,2	28,3	25,7	Attivo	Attivo	Inattivo	7,45	37,4	2,8	-0,04	3,2	17,58	12,41	2,36
32,1	7	17,2	33	35,2	79,4	35,7	32,8	32,5	28,8	25,7	Attivo	Attivo	Inattivo	7,55	38	2,85	2,95	3,2	19,55	15,07	2,59
32,2	3,3	17,6	32,8	32	78,4	33	32,5	32,3	28,2	26	Attivo	Attivo	Inattivo	7,5	37,3	2,8	0,25	3,1	16,60	10,99	2,21
32,3	5,3	16,4	32,9	34,1	78,4	34,6	32,6	32,4	28,2	26,8	Attivo	Attivo	Inattivo	7,5	37,5	2,8	2,20	3,2	16,93	11,53	2,26
32,4	4,6	16,3	33	33,6	78,9	34,1	32,7	32,4	28,3	26,8	Attivo	Attivo	Inattivo	7,5	37,55	2,8	1,50	3,2	16,77	11,53	2,24
32,5	4,4	16,8	33,2	33,6	79,4	34,1	32,9	32,7	28,6	25,4	Attivo	Attivo	Inattivo	7,7	38,9	2,9	1,10	3,1	21,58	11,90	2,80
32,8	3,5	16,5	33,4	32,5	80	33	33,1	32,8	28,6	25,6	Attivo	Attivo	Inattivo	7,6	38,1	2,8	0,20	3,1	17,26	11,91	2,27
32,9	7,1	16,3	33,6	35,2	80,5	35,7	33,3	33	28,7	26,5	Attivo	Attivo	Inattivo	7,6	38,35	2,85	3,55	3,2	18,06	13,21	2,38
33	5,6	18	33,7	33,6	81,6	34,1	33,5	33,1	29,4	24,3	Attivo	Attivo	Inattivo	7,7	38,85	2,85	2,10	3,2	19,39	13,02	2,52
33,2	7,8	16,8	34	36,8	82,1	37,3	33,7	33,4	29,4	25,6	Attivo	Attivo	Inattivo	7,75	39,3	2,85	4,10	3,45	20,22	14,84	2,61
33,4	2,8	15,9	33,9	32	82,1	32,5	33,6	33,4	29,4	23,7	Attivo	Attivo	Inattivo	7,75	39	2,8	-0,36	3,2	18,23	11,76	2,35
33,5	5,6	11,5	34,1	34,6	80,5	35,7	33,7	33,4	28,4	28,2	Attivo	Attivo	Inattivo	7,65	38,8	2,9	2,55	3,2	17,87	11,35	2,34
33,6	4,7	14,1	34,2	33,6	81,6	34,6	33,8	33,5	28,7	25,4	Attivo	Attivo	Inattivo	7,75	38,9	2,9	1,60	3,2	17,87	11,53	2,31

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
33,7	6,7	17,6	34,3	34,6	83,2	35,2	34	33,7	30	24,4	Attivo	Attivo	Inattivo	7,85	39,85	2,85	2,65	3,2	20,38	15,07	2,60
33,8	4,6	18,1	34,3	33	83,2	34,1	34,1	33,7	29,9	23,8	Attivo	Attivo	Inattivo	7,85	39,65	2,85	1,15	3,15	19,39	12,64	2,47
33,8	5,2	17,7	34,3	33,6	83,2	34,1	34,1	33,7	30,1	23,8	Attivo	Attivo	Inattivo	7,85	39,75	2,9	1,45	3,2	20,06	13,95	2,56
34	8	18,1	34,7	35,7	83,7	36,8	34,4	34,1	30,3	25,3	Attivo	Attivo	Inattivo	7,95	40,3	2,9	3,90	3,2	21,24	15,26	2,67
34,1	3,6	18,8	34,5	32	83,2	33	34,2	33,9	29,9	23,6	Attivo	Attivo	Inattivo	7,9	39,5	2,85	0,24	3,15	17,90	12,31	2,27
34,2	6,8	17,5	34,7	35,2	83,7	36,2	34,4	34,1	29,8	24,7	Attivo	Attivo	Inattivo	9,35	40,05	2,85	2,50	3,45	19,39	17,25	2,07
34,3	4,8	17,4	34,7	33,6	83,7	34,1	34,4	34,1	30	24,1	Attivo	Attivo	Inattivo	9,2	40,15	2,8	1,25	3,2	19,05	13,21	2,07
34,5	7,1	18,8	34,9	34,6	84,8	35,7	34,7	34,3	30,8	24,1	Attivo	Attivo	Inattivo	9,4	41,1	2,85	1,66	3,15	21,87	19,94	2,33
34,6	3,5	17,2	35	32	84,8	33	34,7	34,4	30,2	23,9	Attivo	Attivo	Inattivo	9,3	40,8	2,85	-0,28	3,1	20,55	13,63	2,21
34,7	5,7	19	35,2	34,1	85,3	34,6	34,9	34,5	30,8	24	Attivo	Attivo	Inattivo	9,4	41,5	2,85	1,75	3,2	22,53	14,70	2,40
34,8	3,7	17,3	35,2	32,5	85,3	33,6	34,9	34,6	30,6	23,8	Attivo	Attivo	Inattivo	9,4	41,25	2,8	-0,25	3,2	21,00	14,70	2,23
34,9	3,5	16,5	35,2	32,5	85,3	33	34,9	34,6	30,3	23,9	Attivo	Attivo	Inattivo	9,35	41,05	2,9	-0,62	3,1	20,74	14,85	2,22
35	8	17,1	35,5	35,7	86,4	39,4	35,2	34,9	30,8	25,5	Attivo	Attivo	Attivo	9,8	42,35	2,9	3,60	3,2	24,78	16,37	2,53
35,3	6,7	17,4	36	34,6	86,4	35,2	35,5	32,8	31,7	21,9	Attivo	Attivo	Attivo	10,95	43,05	2,85	2,00	3,2	25,68	17,49	2,35
35,4	5,6	13,5	36,1	34,1	85,3	35,2	35,6	33,4	30,4	23,4	Attivo	Attivo	Attivo	10,8	42,45	2,9	1,63	3,2	23,77	14,79	2,20
35,4	4,9	19,3	36	33	86,4	36,2	35,6	31,2	32,4	19,3	Attivo	Attivo	Attivo	10,95	42,85	2,85	0,71	3,2	24,69	15,61	2,25
35,5	4,9	15,2	36,2	33	85,8	36,8	35,7	31,5	32,3	19,5	Attivo	Attivo	Attivo	10,9	42,55	2,9	0,96	3,2	23,77	14,66	2,18
35,8	7,9	14,2	36,8	35,7	86,9	41,6	36,4	31	35,3	19,5	Attivo	Attivo	Attivo	11	43,7	2,9	3,65	3,2	26,64	15,81	2,42
36	8	18,7	36,9	35,2	89	46,4	36,6	27,1	35,9	14,9	Attivo	Attivo	Attivo	11,25	44,35	2,9	3,05	3,2	28,16	18,42	2,50
36,2	3,9	19,9	36,9	31,4	89	46,4	36,5	23,2	35,7	10,2	Attivo	Attivo	Attivo	11,15	43,8	2,9	-0,32	3,15	25,63	15,44	2,30
36,5	5,8	18,7	37,4	33	90,1	45,3	36,9	23,9	35,9	11,5	Attivo	Attivo	Attivo	12,8	44,6	2,9	2,00	3,45	27,31	15,24	2,13
36,6	4,9	18,4	37,5	32,5	90,1	45,3	37	21,8	35,3	9,5	Attivo	Attivo	Attivo	12,65	44,65	2,85	0,34	3,2	26,68	16,99	2,11
37,1	3,4	17,8	38,2	30,9	91,2	46,4	36,4	13,6	20,1	3,4	Attivo	Attivo	Attivo	12,65	45,2	2,85	-1,38	3,1	26,84	17,21	2,12

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
37,3	4,1	18,6	38,6	31,4	92,2	47,4	36,5	13,9	19	4	Attivo	Attivo	Attivo	12,75	45,65	2,85	-0,67	3,2	27,67	17,75	2,17
37,5	7,2	17,9	38,9	34,6	92,8	48,5	36,9	14,9	20,3	5,4	Attivo	Attivo	Attivo	12,8	46	2,9	2,35	3,45	28,66	19,46	2,24
37,6	7,3	17,6	39	34,1	93,3	47,4	36,3	14,6	16,3	5,2	Attivo	Attivo	Attivo	13,15	46,7	2,9	2,20	3,2	30,69	18,98	2,33
38	6,3	18,2	39,2	33	94,9	46,9	36	13	13,3	3,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,25	47,35	2,9	0,94	3,2	31,53	19,94	2,21
38,1	4,8	20,3	39,1	32	94,9	45,3	35,4	11,7	11,3	2,5	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	47,35	2,9	0,81	3,45	31,19	16,03	2,18
38,2	5	19,2	39,2	32	94,9	45,8	35,4	11,7	11,5	2,5	Attivo	Attivo	Attivo	14,25	47,55	2,9	-0,24	3,2	31,53	19,50	2,21
38,5	5	14,1	39,6	32,5	94,9	47,4	36,3	12,9	14,1	3,5	Attivo	Attivo	Attivo	14,1	47,2	2,9	0,43	3,2	29,34	17,02	2,08
38,6	4,7	17	39,6	32	95,4	46,9	35,9	12,4	12,7	2,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,2	47,2	2,9	-0,08	3,15	29,00	17,49	2,04
39	7,8	19,6	40,2	34,1	96	48	37,3	14,1	17,6	5,1	Attivo	Attivo	Attivo	13,6	47,75	2,9	2,55	3,2	29,51	19,53	2,17
39,1	7,6	15,1	40,3	34,1	96	50,1	37,3	15	17,8	5,7	Attivo	Attivo	Attivo	11,9	46,9	2,9	3,40	3,2	26,30	15,63	2,21
39,4	5,6	21	40,3	33,6	94,9	45,3	37	12	15,6	2,7	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	48,7	2,9	0,11	3,4	31,36	21,70	2,19
39,6	6,5	20,2	40,6	33	96	48,5	38,2	14,3	20,9	4,7	Attivo	Attivo	Attivo	14,5	49,35	2,9	1,49	3,2	32,88	18,66	2,27
39,8	4,4	19,2	40,7	31,4	96	47,4	37,8	13,1	18,5	3,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,5	49,1	2,9	-0,61	3,2	31,36	18,64	2,16
40	5,8	20,7	41	32,5	95,4	49	38,6	14,5	21,8	4,4	Attivo	Attivo	Attivo	14,45	49,7	2,9	0,53	3,2	32,71	19,63	2,26
40,2	3	18,1	41	30,4	95,4	48	38,1	12,4	19,3	2,3	Attivo	Attivo	Attivo	14,45	49,3	2,85	-2,15	3,1	30,16	18,56	2,09
40,4	3,9	18,9	41,4	31,4	96	49,6	39	14,9	22,9	4,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,45	49,7	2,85	-1,10	3,2	30,82	18,60	2,13
40,5	6,9	17,6	41,5	33,6	96	51,7	39,5	17,4	25,7	6,6	Attivo	Attivo	Attivo	14,5	50,15	2,9	1,45	3,2	32,54	20,28	2,24
40,8	6,2	19,1	41,9	33	96	52,8	39,9	18,1	26,7	7	Attivo	Attivo	Attivo	14,45	50,25	2,9	0,66	3,2	31,87	20,63	2,21
41	5,3	20,2	41,9	32,5	96	52,2	39,9	17,4	25,7	6,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,45	50,25	2,9	-0,02	3,2	31,19	19,78	2,16
41,2	5,6	20,9	42,1	33,6	96	53,3	40,2	18,6	27,1	7,2	Attivo	Attivo	Attivo	14,5	50,5	2,9	0,97	3,45	31,36	18,57	2,16
41,5	8,1	17,3	42,5	35,2	96	53,8	41,7	23,4	37,2	11,6	Attivo	Attivo	Attivo	13,15	49,5	2,9	3,30	3,2	26,98	17,86	2,05
42,4	5,6	21,9	43,2	32	95,4	54,9	41,7	21,7	32,2	9,4	Attivo	Attivo	Attivo	11,75	50,2	2,9	1,10	3,45	26,30	18,07	2,24
42,7	6,9	18,2	42,9	35,2	94,4	44,2	42,3	40,5	36,2	31,3	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	51,7	2,9	2,10	3,2	30,35	17,86	2,11

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
42,8	3	18	43	32,5	90,6	42,6	42,2	39,5	35,9	28,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,25	51,15	2,9	-1,53	3,15	28,16	16,57	1,98
43	6,4	20,2	43,3	35,2	94,9	39,4	42,7	41	36,5	30,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	51,7	2,9	1,57	3,2	29,34	17,99	2,05
43,2	7,2	20,2	43,9	34,1	96	56,5	42,8	26,2	37,1	13,1	Attivo	Attivo	Attivo	13,15	50,2	2,9	2,90	3,2	23,60	16,00	1,80
43,5	6,2	21,9	44,2	33	95,4	56	43	26,3	36,8	12,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	52,15	2,9	1,14	3,2	29,17	18,83	2,03
44	8,2	18,8	44,3	36,8	93,8	45,8	43,7	40,3	40,5	31,3	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	52,8	2,9	3,80	3,2	29,67	16,37	2,06
44	5,5	22	44,6	33	96	56,5	43,5	27,9	38,2	14	Attivo	Attivo	Attivo	12,6	50,5	2,9	2,40	3,2	21,92	11,53	1,74
44,3	7,2	22,1	44,8	34,1	96	56,5	43,9	29,9	39,6	16,4	Attivo	Attivo	Attivo	13,3	51	2,9	3,45	3,2	22,59	13,95	1,70
44,6	5,8	23,4	44,9	33	95,4	51,2	44,3	32,6	42,4	18,6	Attivo	Attivo	Attivo	11,65	51,95	2,9	1,30	3,2	24,78	16,76	2,13
44,9	5,5	22	45,3	33	95,4	54,9	44,4	31,3	41,6	16,7	Attivo	Attivo	Attivo	13	51,6	2,9	1,20	3,15	22,59	15,75	1,74
45	6,9	22,2	45,5	34,1	95,4	56	44,6	31,9	41	18,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	52,65	2,9	2,50	3,2	25,80	16,37	1,79
45,1	7,1	21,2	45,6	34,1	96	56,5	44,7	32,5	41,2	18,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,15	52	2,9	2,95	3,2	23,27	15,44	1,64
45,2	7,4	19,3	45,6	34,6	96	55,4	44,7	32,5	41,2	18,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	53,35	2,9	2,85	3,2	27,48	16,93	1,92
45,4	3,6	19,3	45,7	32	96	56	44,6	30,3	40,8	15,4	Attivo	Attivo	Attivo	12,6	51,3	2,9	0,39	3,2	19,90	11,94	1,58
45,5	7,8	21,3	45,9	35,2	96	56	45	34	42,5	20,5	Attivo	Attivo	Attivo	13,1	52,25	2,9	3,50	3,2	22,76	16,00	1,74
45,6	7,2	23,7	45,7	35,7	94,4	45,8	45,2	42,1	41,8	33,4	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	53,85	2,9	2,70	3,2	27,82	16,74	1,94
46,1	6,4	23,3	46,4	34,1	96	55,4	45,6	34,5	42,7	20,7	Attivo	Attivo	Attivo	13,45	52,7	2,9	2,35	3,2	22,26	15,07	1,65
46,4	5,8	20,9	46,7	33,6	96	55,4	45,7	34,4	42,7	20,4	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	54,15	2,9	1,65	3,2	26,13	15,44	1,81
46,7	8,5	19,3	47	36,2	96	56	46,1	36,4	43,3	24,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	53,85	2,9	4,80	3,2	24,11	13,77	1,69
47	5,9	23,8	47,2	34,1	94,4	50,6	46,5	38,8	45	26,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,25	54,75	2,9	1,75	3,15	26,13	15,20	1,83
47,2	7,6	22,3	47,4	35,2	95,4	55,4	46,5	37	43,9	24,3	Attivo	Attivo	Attivo	14,15	53,8	2,9	3,45	3,2	22,26	15,44	1,57
47,4	8,3	22,6	47,6	36,8	93,8	48	46,9	40,9	45,6	31,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	55,35	2,9	4,20	3,2	26,81	15,26	1,86
47,5	5,7	22,1	47,8	33,6	95,4	56	46,9	36,8	44,1	23	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	54,65	2,9	1,55	3,2	24,11	15,44	1,69
47,6	7,6	19,9	47,9	35,2	96	54,9	46,8	37,4	44	24,7	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	55,4	2,9	3,40	3,2	26,30	15,63	1,83

TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
48,1	10	25,8	48,4	37,3	95,4	54,9	47,6	39	45	28,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	55,65	2,9	6,05	3,2	25,46	14,70	1,77
48,2	7,9	24,5	48,4	35,7	95,4	55,4	47,5	38,4	44,8	26,3	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	55,8	2,9	4,35	3,2	25,63	13,21	1,79
48,3	6,6	18,9	48,5	35,2	96	55,4	47,5	38,2	44,9	26,6	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	55,6	2,9	3,15	3,7	24,62	14,84	1,72
48,4	6,6	25	48,6	34,6	95,4	56	47,7	38,3	45	25,7	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	55,85	2,9	2,75	3,2	25,12	14,33	1,75
48,5	8,6	18,6	48,8	36,8	96	54,9	48	39,2	45,5	28,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	55,65	2,9	5,20	3,2	24,11	12,65	1,68
48,7	6,3	22,5	48,9	34,1	96	54,9	47,9	38,4	45,1	25,7	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	55,95	2,9	2,35	3,2	24,45	14,70	1,70
49,2	6,7	26,6	49,3	34,1	95,4	54,9	48,4	38,9	45,8	26,6	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	56,35	2,9	2,95	3,2	24,11	13,95	1,68
49,4	6,1	23,5	49,6	34,6	96	55,4	48,6	39,2	45,8	26,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	56,65	2,9	2,30	3,2	24,45	14,14	1,71
49,5	8,1	26,3	49,7	35,7	96	54,9	48,8	39,9	46,2	28,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	56,95	2,9	4,40	3,2	25,12	13,77	1,76
49,7	7,6	25	49,9	35,7	95,4	54,9	48,9	39,8	46,3	28,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	56,95	2,9	3,75	3,2	24,45	14,33	1,70
49,8	6,3	23,6	49,9	34,6	96	54,9	48,9	39,7	46,2	27,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	56,95	2,9	2,10	3,2	24,11	15,63	1,68
49,9	7,8	21	50	35,7	96	54,4	48,9	40	46,4	29,4	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	57,3	2,9	4,10	3,2	24,95	13,77	1,73
50,2	8,5	25,8	50,4	36,8	95,4	54,9	49,5	40,6	46,9	30,6	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	57,55	2,9	5,35	3,2	24,78	11,72	1,73
50,3	8,7	26,7	50,4	36,2	96	54,9	49,5	40,7	46,9	30,8	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	57,55	2,9	4,95	3,2	24,45	13,95	1,70
50,4	10,4	27,7	50,5	38,4	95,4	54,9	49,7	41,3	47,2	32,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	57,85	2,9	6,80	3,2	25,12	13,40	1,74
50,6	7	25,8	50,7	35,2	96	54,9	49,8	40,6	47,1	30	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	57,75	2,9	3,55	3,2	24,11	12,84	1,68
50,7	8,6	17,9	50,8	37,3	96	55,4	49,9	41,1	47,3	32,4	Attivo	Attivo	Attivo	14,5	57,95	2,9	5,50	3,2	24,45	11,53	1,69
50,8	6,6	23,7	50,9	35,2	95,4	54,9	49,8	40,5	47,2	29,9	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	57,75	2,9	3,05	3,2	23,44	13,21	1,63
51,4	7	27,8	51,5	34,6	95,4	54,4	50,4	41	47,8	31	Attivo	Attivo	Attivo	14,4	58,3	2,9	3,40	3,2	23,27	13,40	1,62
51,5	7	26,9	51,7	35,2	95,4	54,9	50,5	41,2	47,9	31,1	Attivo	Attivo	Attivo	14,3	58,45	2,9	3,30	3,2	23,44	13,77	1,64
51,6	8,1	24,3	51,7	36,2	96	54,9	50,6	41,6	48	32,5	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	58,7	2,9	4,25	3,2	23,94	14,33	1,67
51,7	8,6	27,7	51,8	36,8	96	54,9	50,8	41,8	48,2	33	Attivo	Attivo	Attivo	14,35	58,85	2,9	5,30	3,2	24,11	12,28	1,68
52,5	8,7	27,7	52,6	36,8	95,4	54,9	51,6	42,4	49	34,1	Attivo	Attivo	Attivo	12,1	58,5	2,9	6,30	3,2	20,23	8,93	1,67



TABELLA 2.4 Dati Sperimentali invernali

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_ Risc [- ]
52,6	9,1	28,7	52,7	36,8	95,4	54,4	51,7	42,5	49,1	34,1	Attivo	Attivo	Attivo	12,15	58,5	2,9	5,50	3,45	19,90	14,44	1,64
52,7	7,8	21,6	52,8	36,8	96	54,9	51,6	42,2	49,1	34,2	Attivo	Attivo	Attivo	12,2	58,5	2,9	5,05	3,2	19,56	10,23	1,60
52,9	9	18,8	53	38,4	95,4	55,4	51,9	42,7	49,4	35,3	Attivo	Attivo	Attivo	12,25	58,65	2,9	6,55	3,2	19,39	9,12	1,58
Dati acquisiti dal sistema TelevisNet				Dati acquisiti dal Controllore Eistein						Grandezze Calcolate											

### 2.3 Analisi e rielaborazione dei dati sperimentali invernali

Le prestazioni della pompa di calore vengono espresse attraverso il COP (Coefficient of Performance) funzione della potenza termica scambiata al gas cooler. L'effetto della pompa di calore è misurato anche attraverso la potenza frigorifera scambiata invece all'evaporatore. Tali grandezze indirette vengono ottenute nella fase di rielaborazione dati, successiva a quella di acquisizione. La fase di rielaborazione dei dati è eseguita attraverso le acquisizioni effettuate dal Televis per quanto riguarda le temperature dell'acqua in ingresso alla macchina e le acquisizioni effettuate dal controllore BX EINSTEIN per quanto riguarda invece le temperature dell'acqua in uscita dalla macchina e la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore (Tabella 2.5)

Potenza termica scambiata all'evaporatore (lato acqua)	$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_{H2O} * C_{p,H2O} * (T_{in,ev,H2O} - T_{out,ev,H2O})$	[W]
Potenza termica scambiata al gas cooler (lato acqua)	$\dot{Q}_{gc} = \dot{m}_{H2O} * C_{p,H2O} * (T_{in,gc,H2O} - T_{out,gc,H2O})$	[W]
Coefficiente di prestazione	$COP = \dot{Q}_{gc} / P_{el}$	[-]
<b>TABELLA 2.5: Calcolo grandezze indirette</b>		

Il parametro che maggiormente influenza il funzionamento della pompa di calore è la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3. Le acquisizioni precedenti vengono infatti rielaborate in funzione di tale parametro in modo tale da estrapolare il comportamento e le prestazioni della macchina su tutto il range di temperature di alimentazione gas cooler acquisite.

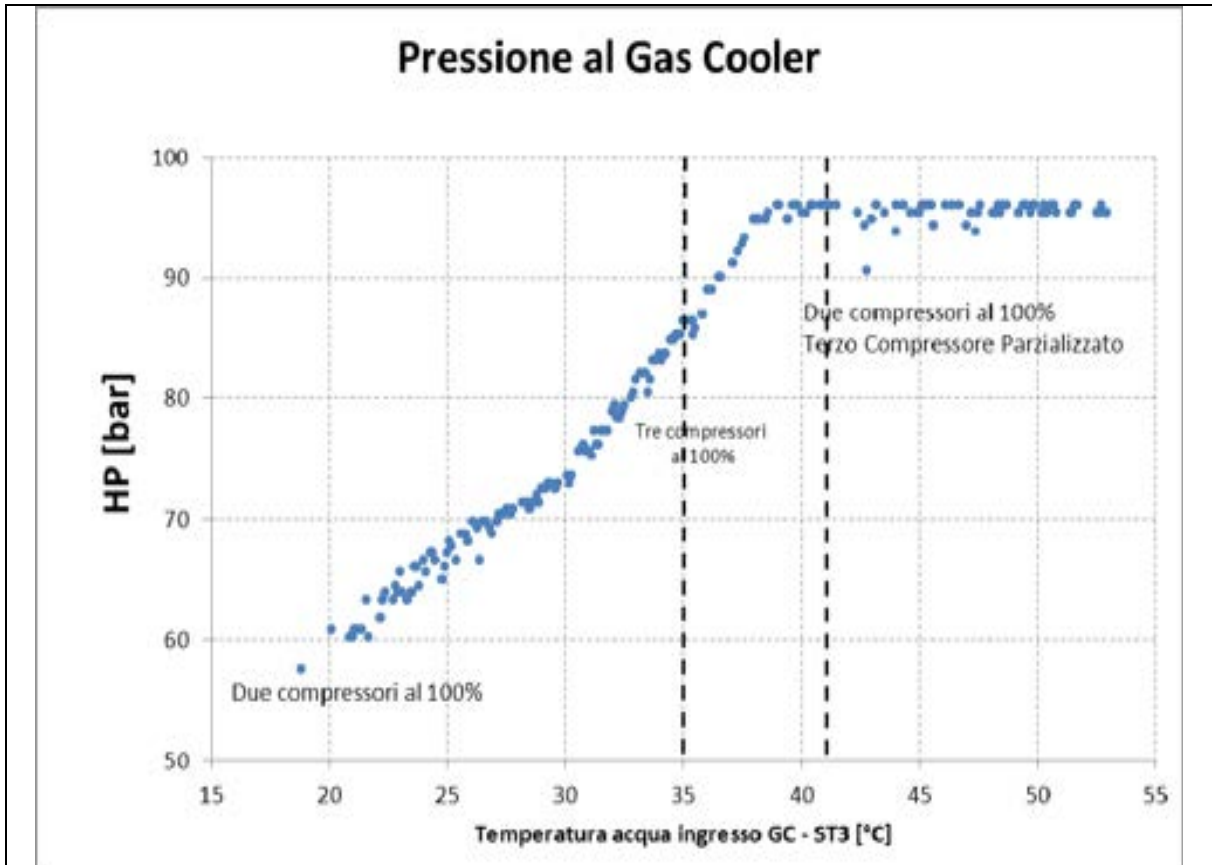
Il comportamento della macchina è rappresentato attraverso i risultati riportati al variare della temperatura dell'acqua in ingresso al GasCooler.

Le grandezze considerate sono: pressione al gas cooler, pressione del circuito ausiliario, temperatura del refrigerante in aspirazione ai compressori di bassa pressione, temperatura del refrigerante in uscita dal gas cooler, potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore, potenza termica scambiata al gas cooler, COP.

La pressione al gas cooler presenta un andamento prevalentemente crescente al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso in quanto man mano che cresce la temperatura dell'acqua in ingresso deve crescere ugualmente la temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita da quest'ultimo (Figura 2.3).

Dal momento che il gas cooler è uno scambiatore di calore in contro corrente, il livello di temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita deve comunque essere più alto del valore della temperatura dell'acqua in ingresso, cioè in corrispondenza della sezione di uscita del refrigerante. Questa considerazione insieme a quella fatta in merito al funzionamento della valvola principale, spiega l'aumento della pressione al gas cooler all'aumentare della temperatura dell'acqua.

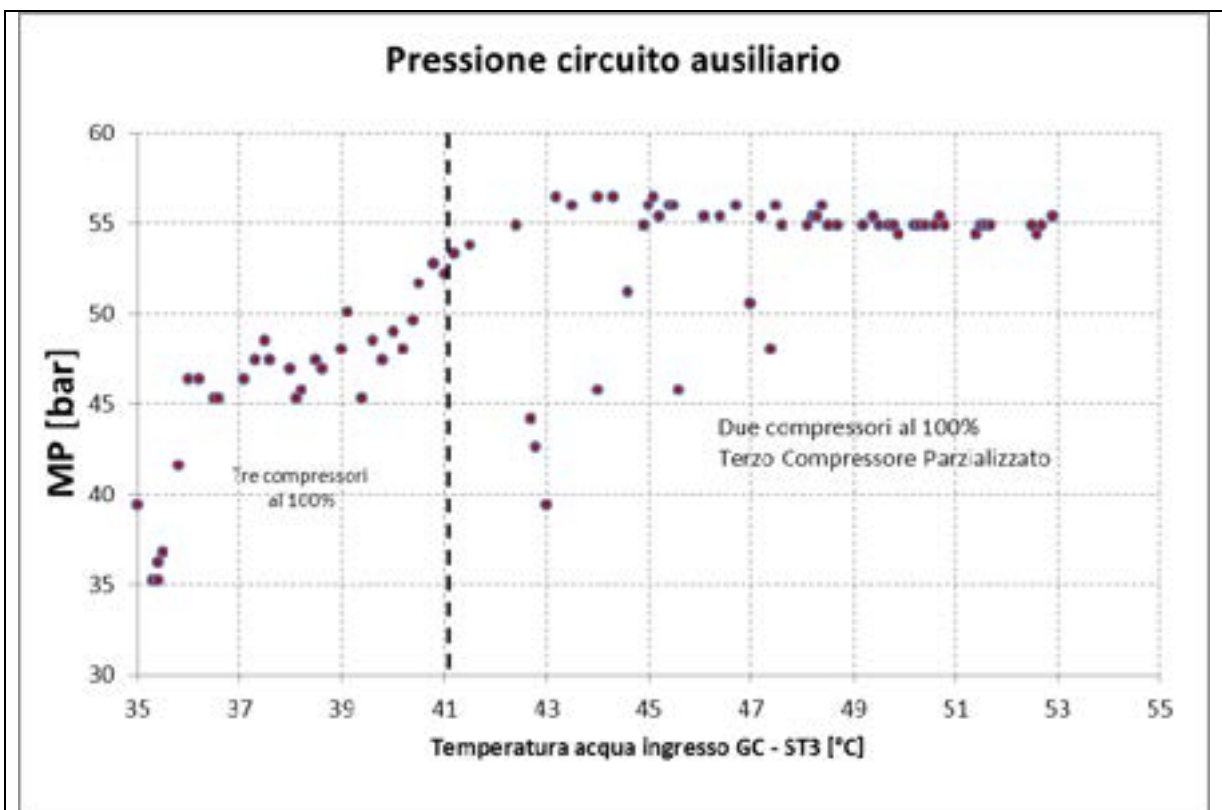
L'andamento crescente della pressione si verifica sia nel funzionamento con due compressori sia nel funzionamento con tre compressori. Infatti l'attivazione del circuito di media pressione, che avviene per valori della temperatura dell'acqua in ingresso superiori a 35°C, non va a compromettere il livello di temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler e quindi il livello di pressione, in quanto la portata massica che evolve al suo interno viene prelevata a valle dello scambiatore e viene nuovamente inserita in corrispondenza del suo ingresso.



**FIGURA 2.3:** Andamento della pressione al gas cooler in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

La presenza del circuito ausiliario è responsabile dell'andamento dell'alta pressione per temperature dell'acqua maggiori di 35°C in ingresso al gas cooler. Infatti, come è possibile vedere dal grafico, dopo un certo valore di pressione, la pressione al gas cooler si attesta attorno al valore di 95-96 [bar] senza aumentare ulteriormente nonostante la temperatura ST3 aumenti. Questo comportamento è dettato da una scelta di tipo impiantistico: per motivi di sicurezza, una volta che la pressione al gas cooler ha raggiunto il valore di circa 96 [bar], l'inverter interviene in modo da stabilizzare la pressione al gas cooler su quei valori e non correre il rischio di arrivare a livelli di pressione troppo elevati.

L'andamento della media pressione è indagabile esclusivamente per temperature ST3 maggiori di 35°C, in quanto al di sotto di tale valore il circuito ausiliario risulta essere inesistente e quindi il terzo compressore è spento (Figura 2.4).



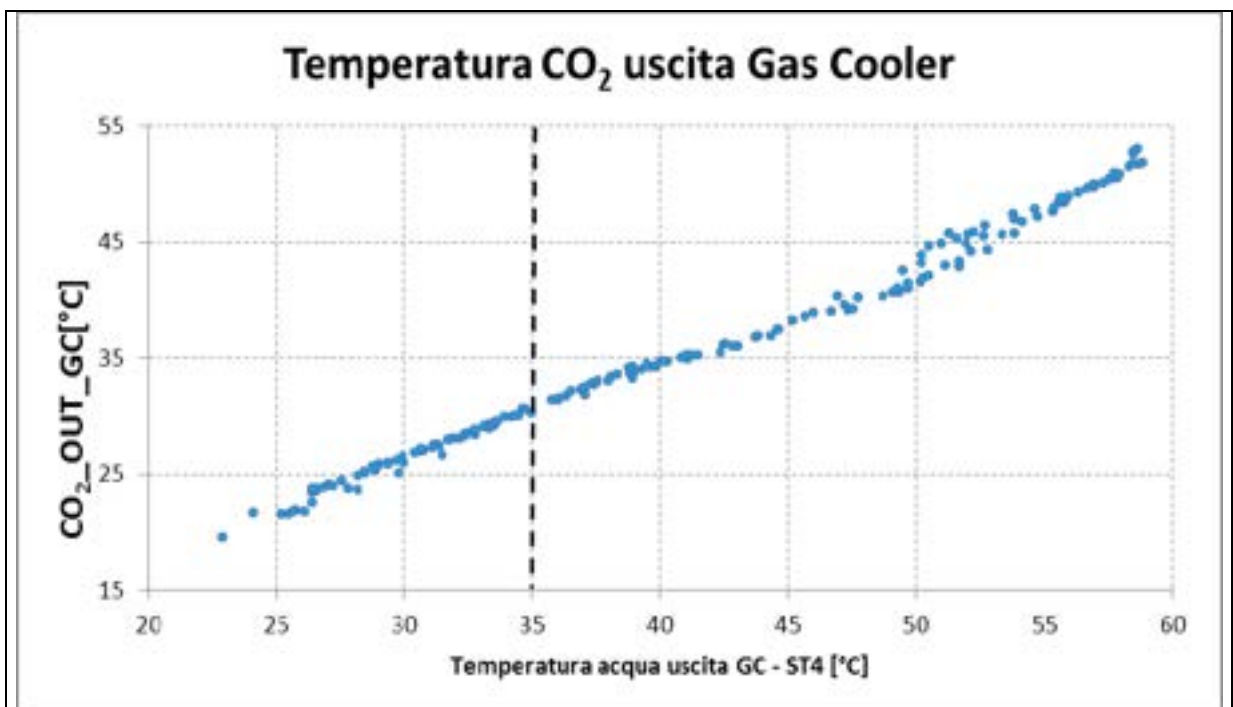
**FIGURA 2.4:** Andamento della pressione del circuito ausiliario in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler

La pressione nel circuito ausiliario presenta un andamento crescente al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler, infatti, al crescere di ST3 si determina un

conseguente aumento della temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler il che presuppone la necessità di avere una potenza termica scambiata al sottoraffreddatore maggiore, con conseguente aumento di portata e quindi di pressione nel circuito ausiliario.

Quando il terzo compressore incomincia ad essere parzializzato dall'inverter, l'andamento è sempre crescente ma con minore pendenza rispetto a quello che si ha quando i tre compressori sono tutti al 100%.

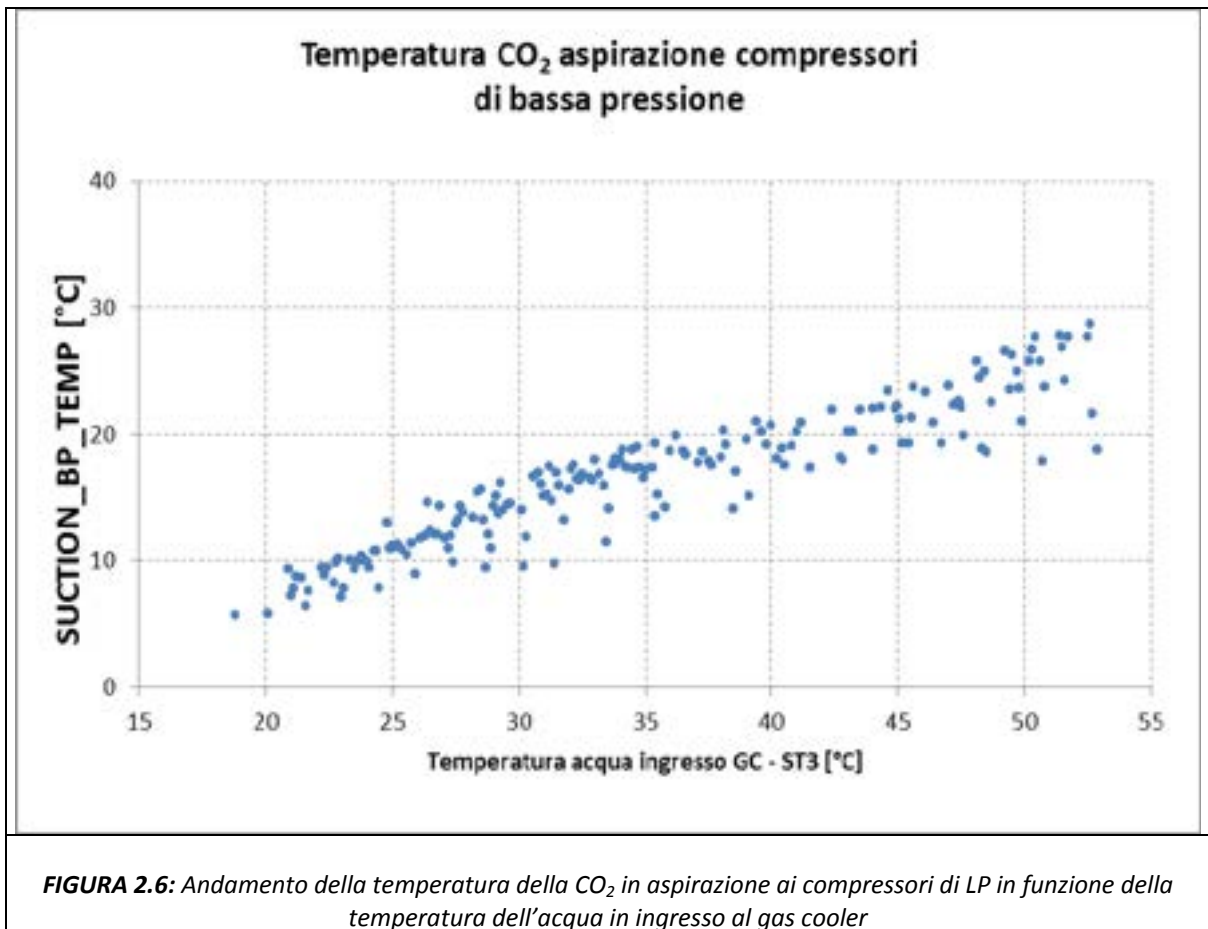
L'andamento della temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler in funzione della temperatura dell'acqua in uscita sempre da tale scambiatore (ST4) è lineare. L'andamento crescente della temperatura del refrigerante in uscita dal gas cooler all'aumentare della ST4 (o della ST3) è legato all'aumento della pressione al gas cooler sempre in funzione della ST3 (Figura 2.5). Tale andamento lineare testimonia la bontà dello scambio termico tra acqua e anidride carbonica che ben riesce a seguire il profilo di temperatura dell'acqua.



**FIGURA 2.5:** Andamento della temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal Gas Cooler in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler

La temperatura del refrigerante in aspirazione ai due compressori di bassa pressione aumenta all'aumentare della temperatura ST3 e quindi della pressione al gas cooler. All'aumentare della pressione al gas cooler, il refrigerante in uscita dal gas cooler ha infatti una temperatura maggiore determinando una CO<sub>2</sub> più calda in aspirazione ai compressori

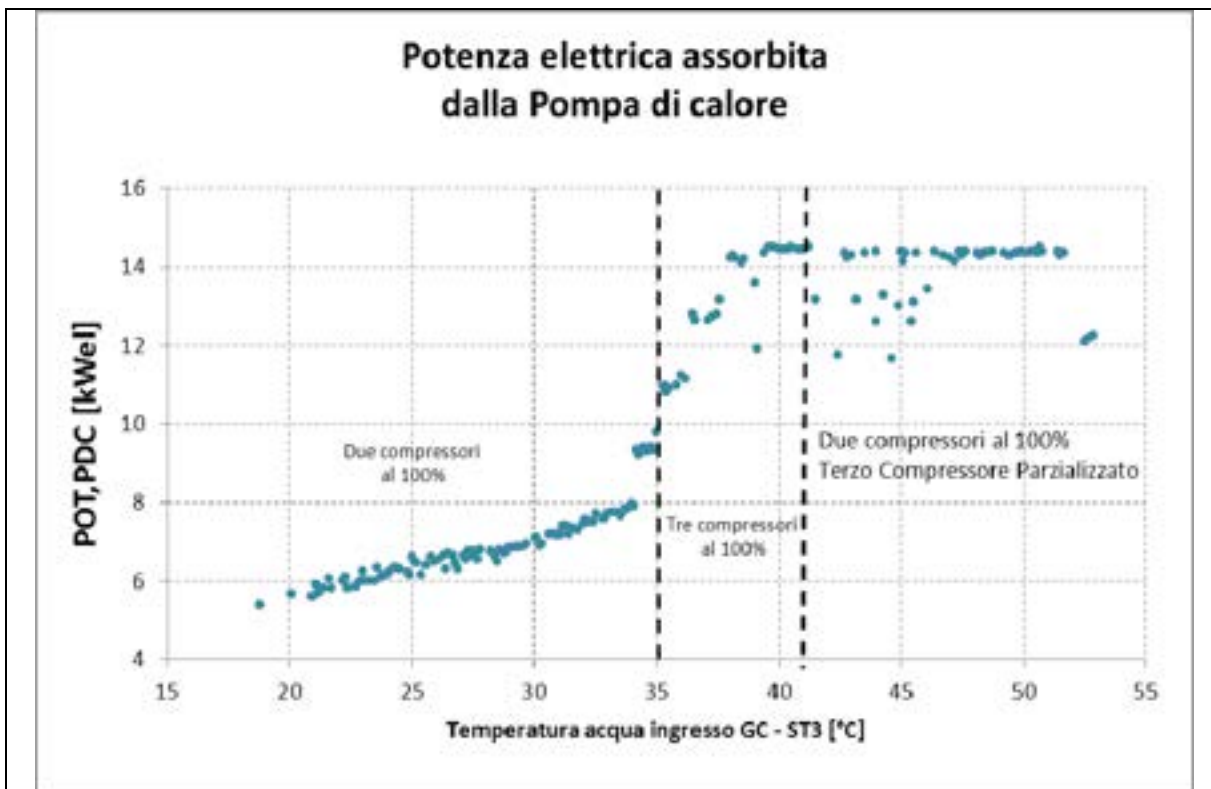
(Figura 2.6). All'aumentare di ST3 e dell'alta pressione, l'intero ciclo termodinamico subisce una traslazione verso l'alto e quindi verso temperature maggiori.



**FIGURA 2.6:** Andamento della temperatura della CO<sub>2</sub> in aspirazione ai compressori di LP in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler

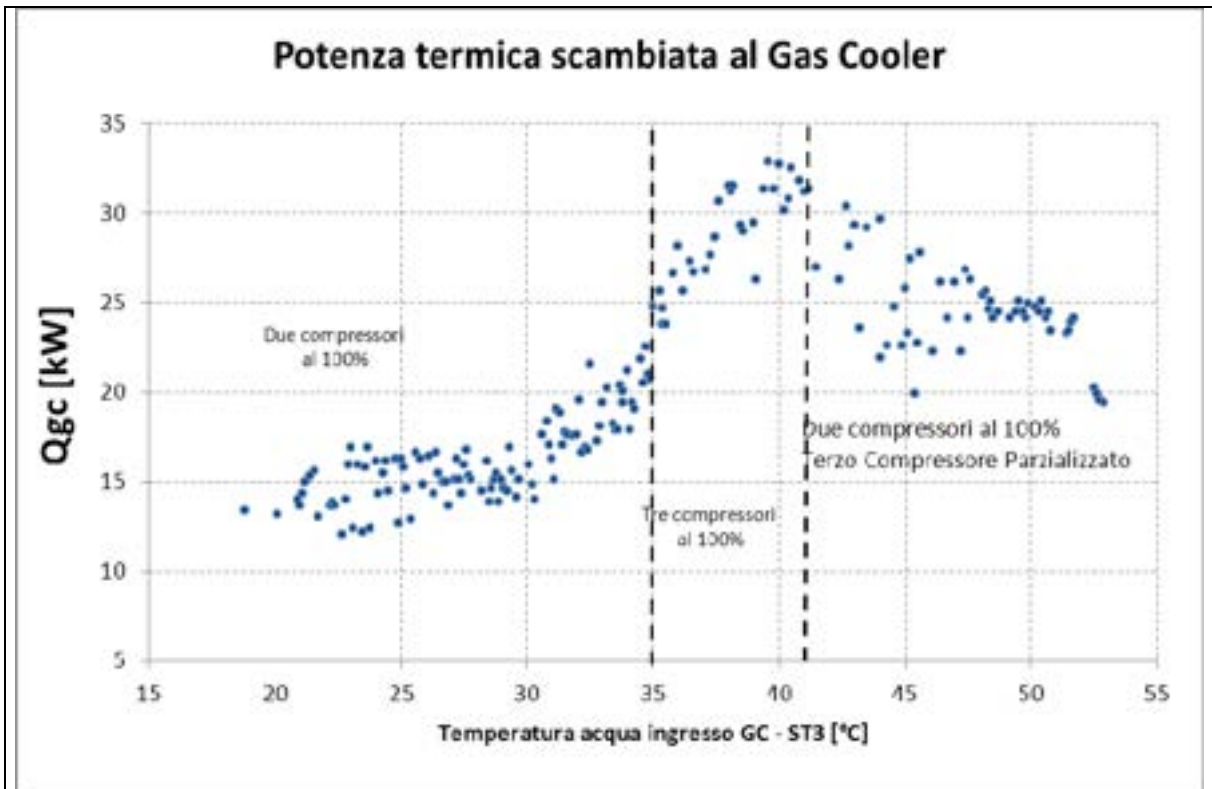
La potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore dipende dal numero di compressori in funzionamento a sua volta stabilito dalla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3. Quando funzionano esclusivamente i due compressori di tipo ON/OFF si ha un andamento crescente della potenza elettrica assorbita al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso, andamento quest'ultimo attribuibile alla variazione della pressione al gas cooler, sempre al crescere della temperatura dell'acqua (Figura 2.7).

L'attivazione del compressore sotto inverter, quando ST3 raggiunge i 35°C, determina un brusco aumento della potenza elettrica assorbita dalla macchina rintracciabile facilmente sul grafico qui riportato. Una volta raggiunto un certo valore di ST3, e quindi di pressione al gas cooler, per motivi di sicurezza l'inverter interviene parzializzando il funzionamento del terzo compressore. L'inverter stabilizza il funzionamento del terzo compressore determinando un assorbimento elettrico pressoché costante da parte della macchina.



**FIGURA 2.7:** Andamento della potenza elettrica assorbita dalla Pompa di calore in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

La potenza termica scambiata al gas cooler dipende essenzialmente dalla pressione e conseguentemente dal valore di temperatura del fluido refrigerante in uscita dal gas cooler. Infatti, al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3 cresce sia la pressione al gas cooler che la temperatura del fluido refrigerante in uscita da quest'ultimo ST4 (Figura 2.8). All'aumentare di ST4 aumentano la pressione al gas cooler e l'entalpia specifica che il fluido possiede alla mandata del compressore, quindi in ingresso al gas cooler. A questo si aggiunge inevitabilmente il contributo in termini di portata elaborata, di avere a disposizione un sistema di compressione che prevede il funzionamento in parallelo di due compressori e poi tre al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler. L'andamento crescente della potenza termica scambiata al gas cooler si ha anche quando entra in funzione il terzo compressore e quindi il recupero interno di calore e l'aumento della portata inviata al gas cooler.



**FIGURA 2.8:** Andamento della potenza termica scambiata al GC in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al Gas cooler

Dopo aver analizzato le grandezze che caratterizzano il funzionamento della pompa di calore, è necessario indagare l'andamento del COP per definire le prestazioni della macchina.

Il COP è il rapporto tra l'effetto utile prodotto, cioè la potenza termica scambiata al gas cooler, e la potenza elettrica assorbita dalla macchina necessaria per produrre tale effetto utile. Di conseguenza l'andamento del COP dipende dall'andamento della potenza termica scambiata al gas cooler e di quella elettrica assorbita dalla macchina.

Come le altre grandezze, anche il COP viene rappresentato in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler (ST3). La parte del grafico relativo all'avvio della macchina è relativa a temperature ST3 minori di 20°C; in tali condizioni, il COP presenta un comportamento crescente in quanto ST3 assume valori inferiori ai 20°C incrementando la potenza termica scambiata al gas cooler.

Per valori bassi di ST3, la potenza termica scambiata al gas cooler ha infatti un andamento crescente con pendenza maggiore rispetto a quello della potenza elettrica.

Quando la temperatura ST3 comincia a salire, la pendenza della potenza elettrica assorbita aumenta principalmente a causa dell'aumento della pressione al gas cooler a sua volta



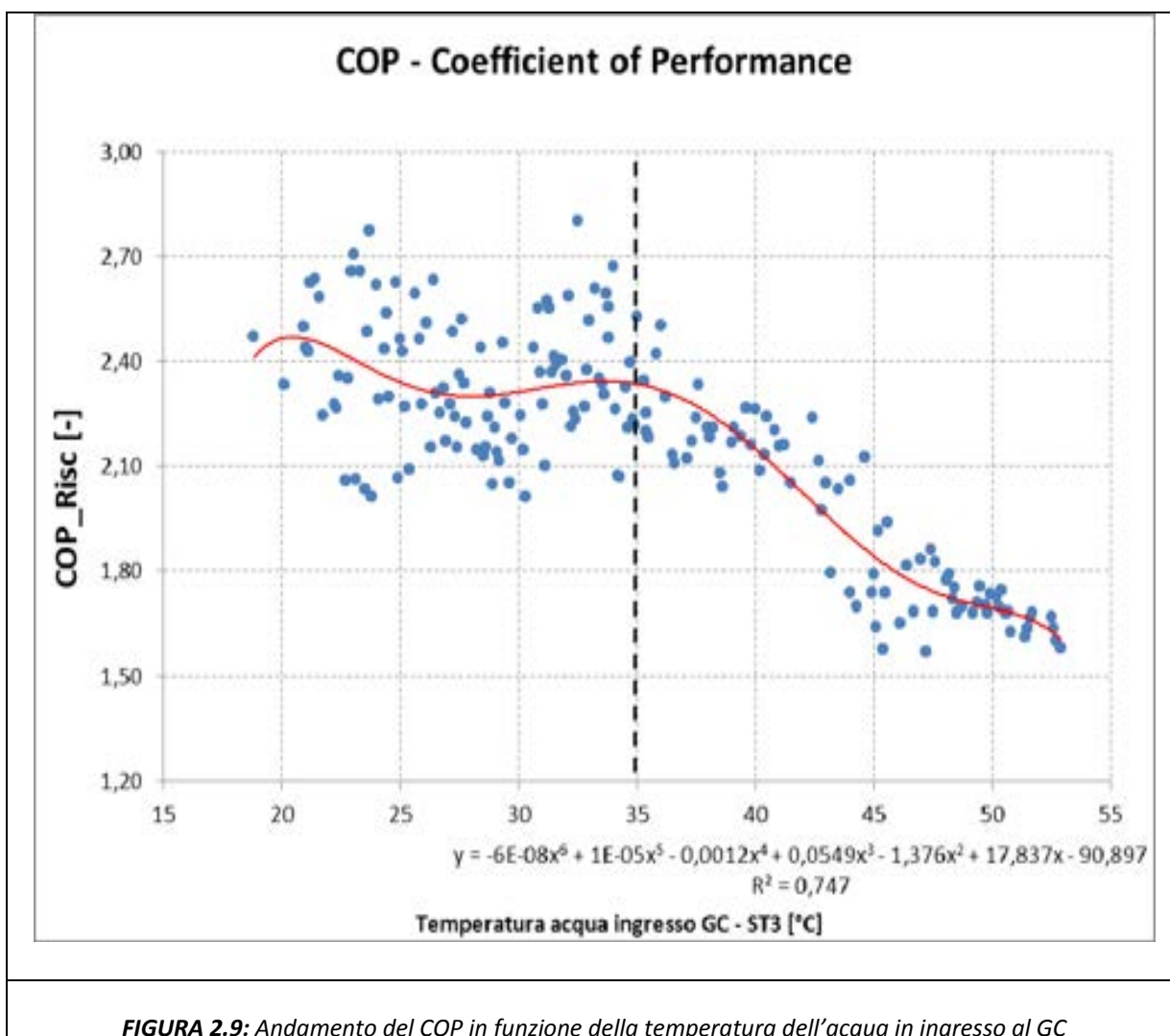
legato all'aumento di ST3, mentre l'andamento della potenza termica rimane sempre crescente senza evidenti cambiamenti di pendenza.

Quando ST3 raggiunge i 35°C entra in funzione il terzo compressore e quindi il circuito ausiliario. Quest'ultimo determina un netto vantaggio rispetto alla configurazione che prevede il funzionamento dei soli primi due compressori per valori della temperatura dell'acqua maggiori di 35°C sia per la potenza termica scambiata al gas cooler sia per l'effetto frigorifero. Per quanto concerne il COP, tale configurazione vede la presenza di tre compressori e quindi si verifica un aumento della potenza elettrica assorbita che determina un andamento decrescente del COP all'aumentare della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler. La presenza del circuito ausiliario comporta un abbassamento del COP inferiore al caso in cui tale circuito non sarebbe presente. Per temperature maggiori di 35°C, l'assorbimento elettrico cresce maggiormente rispetto alla potenza termica (kWth) prodotta dalla macchina determinando un andamento decrescente della curva.

Oltre ai punti sperimentali, il grafico del COP presenta una curva di approssimazione dell'andamento del COP. La curva scelta per l'approssimazione è un polinomio di sesto grado la cui equazione e coefficiente di correlazione vengono riportati direttamente sul grafico stesso.

Il COP oscilla globalmente tra un valore minimo di circa 1,57 ed un massimo di 2,80 attestandosi a valori maggiori di 2 per temperature inferiori a 35°C e a valori inferiori a 2 per temperature ST3 maggiori di 40°C. La macchina raggiunge il COP massimo di 2,80 per una temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler di 32,5°C, minore di 35°C.

A partire da ST3 pari a 35°C, il COP decresce gradualmente in quanto sia la compressione che lo scambio termico al gas cooler risentono negativamente dell'alta temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler. In particolare, il COP decresce con pendenza minore per ST3 pari a 40°C in quanto vengono sfruttati gli effetti positivi dell'attivazione del circuito di media pressione ovvero il raffreddamento della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler e l'ulteriore apporto di portata fornito dal terzo compressore. A partire da ST3 pari a circa 40°C, tali effetti benefici sono meno rilevanti rispetto all'aumento della potenza elettrica assorbita dalla macchina. Tale situazione giustifica il cambio di pendenza che la curva del COP subisce a partire da ST3 pari a circa 40°C: da tale temperatura la pendenza aumenta determinando una più rapida diminuzione del COP rispetto al caso in cui ST3 è compresa tra 35°C e 40°C.



**FIGURA 2.9:** Andamento del COP in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

Il COP diminuisce quindi a partire da temperature maggiori di 35°C per poi raggiungere il suo valore minimo di 1,57 in corrispondenza di 47,2°C.

Il ciclo a massimo COP si ottiene per una temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler di 32,5°C quindi minore di 35°C; in tale prova funzionano soltanto i due compressori principali di tipo on/off, mentre il compressore comandato da inverter è spento. È assente il circuito di media pressione. Questo si ripercuote inevitabilmente sul consumo elettrico della pompa. In particolare, per tale valore della temperatura ST3, la potenza termica aumenta così come aumenta anche quella elettrica assorbita dalla macchina ma quest'ultima aumenta in modo minore rispetto alla potenza termica prodotta in quanto il compressore con inverter non funziona.

Dal grafico si nota come il COP è stato rilevato su un range di temperatura dell'acqua di alimentazione gas cooler ST3 compreso tra 18,8 °C e 52,9°C. Come tutte le grandezze

precedentemente analizzate, i valori del COP si riferiscono a due configurazioni differenti cioè funzionamento con due compressori e con tre compressori quando ST3 supera i 35°C.

### TRACCIAMENTO DEL CICLO TERMODINAMICO A COP MASSIMO (Caso invernale)

Il ciclo termodinamico relativo al COP massimo (ST3 = 32,5 °C) è riportato in figura 3.12 e corrisponde alla seguente acquisizione (Figura 2.10):

ST3 [°C]	ST2 [°C]	ST5 [°C]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	STTEF [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP Risc [-]
32,5	4,4	29,1	38,9	2,9	1,1	3,1	9,1	21,58	11,90	2,80

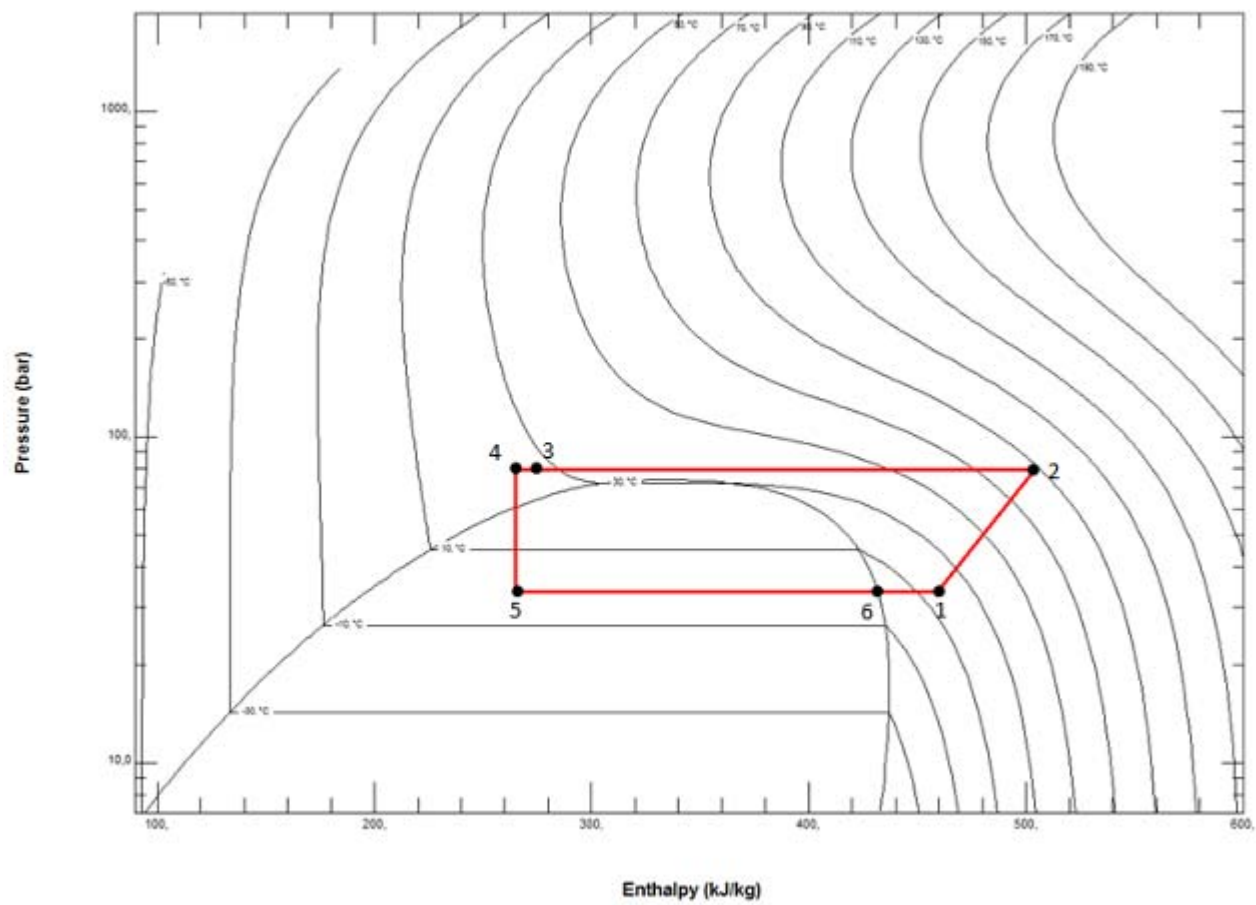
SUCTION BP TEMP [°C]	CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	SOTT HP IN [°C]	SOTT HP OUT [°C]	SOTT MP OUT [°C]	SURR2 HP OUT [°C]	CMP 1	CMP 2	CMP 3	POT PDC [kWel]
16,8	33,2	33,6	79,4	34,1	32,9	32,7	28,6	25,4	Att	Att	Inatt	7,7

**FIGURA 2.10:** Acquisizione relativa al ciclo con COP massimo

Il tracciamento del ciclo nel piano pressione-entalpia è stato effettuato con l'ausilio del software REFPROP (Versione 8.0). il ciclo termodinamico è costituito dai seguenti punti termodinamici, la cui nomenclatura corrisponde a quella utilizzata nello schema della pompa di calore riportato in figura 2.11.

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	16,800	33,600	78,436	459,08	1,9507	Superheated
2	88,097	79,400	150,20	504,05	1,9632	Undefined
3	33,200	79,400	588,94	310,68	1,3595	Undefined
4	25,400	79,400	770,15	264,78	1,2082	Subcooled
5	-1,3748	33,600	259,08	264,78	1,2389	0,28986
6	-1,3748	33,600	93,479	431,66	1,8529	1,0000

**FIGURA 2.11:** Punti termodinamici del ciclo a COP massimo



**FIGURA 2.12:** Ciclo termodinamico a COP Massimo

## **2.4 Rilievo dati sperimentali estivi**

I dati sperimentali riportati costituiscono la prima campagna sperimentale condotta nel periodo di funzionamento estivo della pompa di calore. Tale monitoraggio ha messo in evidenza quali sono i parametri che influenzano il comportamento della macchina in funzionamento estivo. L'analisi congiunta dei dati invernali ed estivi permette di individuare i parametri che regolano globalmente il funzionamento della macchina cioè sia nel funzionamento invernale che in quello estivo.

I punti sperimentali ottenuti sono stati organizzati in un'unica tabella in base alla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler riportata in ordine crescente.

I rilievi si riferiscono a 393 punti sperimentali relativi ai giorni compresi tra il ventinove agosto 2012 ed il sedici settembre 2012 (Tabella 2.8). Ciascuna riga presente nella tabella corrisponde ad una prova sperimentale, quest'ultima costituita dalle acquisizioni effettuate con il controllore BX EISTEIN e con il sistema TelevisNet. Si ricorda che i dati acquisiti con il controllore BX EISTEIN riguardano il lato acqua del circuito mentre quelli acquisiti con il TelevisNet riguardano la pompa di calore e quindi i dati relativi al ciclo termodinamico della CO<sub>2</sub>. Gli orari di funzionamento dell'impianto, e quindi della macchina, sono stati scelti tenendo conto dell'orario di occupazione del locale e settati tramite il controllore BX EISTEIN. Vengono riportate esclusivamente le righe relative all'effettivo funzionamento della macchina; sono state infatti escluse le righe rappresentative degli istanti in cui la macchina ha il consenso per funzionare ma non produce kWfr (o termici) in quanto il valore della temperatura dell'acqua del serbatoio di accumulo freddo è pari al valore di set.

Le grandezze riportate in tabella rilevate attraverso il controllore BX EISTEIN sono quelle strettamente connesse al funzionamento della sola pompa di calore, tralasciando le altre relative all'impianto e all'ambiente interno ed esterno che il controllore monitora ed elabora.

Alcune prove vengono individuate da una temperatura ST3 contrassegnata con un asterisco (\*) in quanto esse sono relative ad un momentaneo mancato funzionamento del sistema Televis. Per tali prove mancano le grandezze che descrivono il ciclo termodinamico svolto dall'anidride carbonica, mentre le prestazioni della pompa di calore (COP ed EER) sono state valutate esclusivamente attraverso i dati rilevati dall'Eistein.

### 2.4.1 Scelta dei parametri di prova (Caso estivo)

Le grandezze riportate in tabella appartengono ad un preciso intervallo di variazione rappresentativo delle condizioni in cui le prove sperimentali sono state effettuate.

Pressione al Gas Cooler -HP	61,8 - 96	[bar]
Pressione di evaporazione -LP	22,9 – 47,4	[bar]
Pressione media -MP	33 – 55,4	[bar]
Temperatura in uscita gas cooler- CO <sub>2</sub> OUT GC	20,5 – 59,7	[°C]

**TABELLA 2.6: Condizioni operative estive**

Oltre alla variazione delle condizioni operative, il funzionamento della pompa di calore dipende dalla variazione delle condizioni al contorno, principalmente per quanto riguarda i parametri che caratterizzano il circuito dell'acqua lato GasCooler e all'evaporatore. La variazione delle grandezze costituenti le condizioni al contorno sono riportate in tabella (Tabella 2.7)

Portata massica dell'acqua all'evaporatore-FE02	3,4 – 3,5	[m <sup>3</sup> /h]
Portata massica dell'acqua al GasCooler-FE01	2.4 – 2.7	[m <sup>3</sup> /h]
Temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore-ST2	[+10 ; +21,3]	[°C]
Temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler-ST3	[+19,3;+67,8]	[°C]
Temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore-ST1	[6,6 ; +18,2]	[°C]
Temperatura dell'acqua in uscita dal gas cooler-ST4	[+24,1 ; +72,9]	[°C]

**TABELLA 2.7: Variazione delle condizioni al contorno estive**

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
19,3	12,4	23,6	22,2	35,2	61,8	35,2	22,2	22	24,5	20	Att	Inat	Inat	3	24,1	2,4	3,5	9,8	13,40	10,58	4,47	3,53
19,5	11,5	23,8	22,3	34,6	62,4	34,6	22,4	22,2	24	19,9	Att	Inat	Inat	3	24,1	2,4	3,5	8,9	12,84	10,58	4,28	3,53
19,6	13,4	24,1	20,5	34,1	62,4	34,6	20,9	20,9	24,8	19,2	Att	Inat	Inat	3	24,7	2,4	3,5	10,7	14,23	10,99	4,74	3,66
20,1	13,4	26,8	23,4	37,8	62,9	37,8	23,7	23,4	24,1	22,6	Att	Inat	Inat	3,1	25,5	2,4	3,5	10,8	15,07	10,58	4,86	3,41
20,4	15	23,2	24	35,2	66,6	35,7	24,1	24	25,6	22,2	Att	Att	Inat	6,2	29,6	2,4	3,5	10,5	25,67	18,31	4,14	2,95
21	16,7	23,6	23,7	35,2	67,7	35,7	23,6	23,2	26	21,9	Att	Att	Inat	6,2	28,4	2,5	3,5	13,9	21,51	11,40	3,47	1,84
21,3	13,3	26,1	24	35,7	64,5	36,2	24,2	24	24,6	21,6	Att	Inat	Inat	3,1	26,1	2,4	3,5	10,6	13,40	10,99	4,32	3,54
21,6	12,2	26,7	24,6	35,2	64,5	35,2	24,7	24,3	23,3	22,5	Att	Inat	Inat	3	25,4	2,5	3,5	11,4	11,05	3,26	3,68	1,09
21,7	11,3	29,2	23,8	35,7	65	35,7	24,2	24,1	28,5	21,4	Att	Inat	Inat	3,1	26,2	2,4	3,5	8,1	12,56	13,02	4,05	4,20
21,8	12,2	30,1	23,9	36,2	65	36,2	24,2	24,1	28,1	21,5	Att	Inat	Inat	3,1	26,4	2,4	3,5	9	12,84	13,02	4,14	4,20
22,1	13,2	31	23,4	36,2	65,6	36,2	23,7	23,7	26,9	21,3	Att	Inat	Inat	3,1	26,7	2,4	3,5	9,9	12,84	13,43	4,14	4,33
22,2	12,9	24	23,1	42,6	61,8	42,6	23,3	22,4	22,2	22,4	Att	Inat	Inat	2,8	24,5	2,5	3,5	11,6	6,69	5,29	2,39	1,89
22,2	11,4	25,4	25,1	35,7	65	35,7	25,2	24,9	24,5	23,8	Att	Inat	Inat	3,1	26,4	2,5	3,5	9,8	12,21	6,51	3,94	2,10
22,3	16,7	34,6	22,9	34,6	71,4	35,2	23,7	24	20,5	22,2	Att	Att	Inat	6,4	32,7	2,5	3,5	10,7	30,23	24,42	4,72	3,82
22,4	11,3	24	24,7	34,6	65,6	35,2	24,8	24,6	24	21,8	Att	Inat	Inat	3,1	26,8	2,5	3,5	8,7	12,79	10,58	4,13	3,41
22,5	11,7	27,7	24,8	34,1	65,6	34,6	24,7	24,1	24,6	21,5	Att	Inat	Inat	3,2	26,7	2,4	3,5	9,5	11,72	8,95	3,66	2,80
22,6	11,4	24,2	25,3	36,8	65,6	36,8	25,3	25,1	23	24,4	Att	Inat	Inat	3,2	26,7	2,5	3,5	9,4	11,92	8,14	3,72	2,54
22,6	18,4	15,7	26,5	41,6	67,2	42,6	26	25,8	19,1	25,7	Att	Att	Inat	6	29,6	2,6	3,5	12,1	21,16	25,64	3,53	4,27
22,7	12,1	23,8	25	35,2	66,1	35,2	25,2	24,8	23,4	22,2	Att	Inat	Inat	3,2	27,2	2,5	3,5	9,7	13,08	9,77	4,09	3,05
23	11,6	28,4	25,2	34,1	66,1	34,6	25,5	25,1	25,5	22,3	Att	Inat	Inat	3,2	27,3	2,5	3,5	9,2	12,50	9,77	3,91	3,05
23	11,2	27,2	24,4	39,4	63,4	39,4	24,5	24,1	24,1	24,1	Att	Inat	Inat	2,9	25,3	2,5	3,5	10,6	6,69	2,44	2,31	0,84
23,4	11,6	24,8	25,3	35,2	66,6	35,2	25,4	25,1	26	22,3	Att	Inat	Inat	3,2	27,8	2,5	3,5	9,2	12,79	9,77	4,00	3,05

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
23,4	14,7	24,4	25,2	35,7	67,2	36,2	25,2	24,8	25,8	22,7	Att	Inat	Inat	3,2	28	2,5	3,5	12,3	13,37	9,77	4,18	3,05
23,4	12,5	24,8	24	41,6	62,9	41,6	24,2	23,3	23,6	23,4	Att	Inat	Inat	2,9	25,5	2,5	3,5	11,3	6,10	4,88	2,11	1,68
23,5	11	24,2	25	39,4	64,5	40	25,1	24,7	24,1	24,5	Att	Inat	Inat	3	26,1	2,5	3,5	10,4	7,56	2,44	2,52	0,81
23,5	12,3	25,2	25,6	35,2	66,6	35,2	25,7	25,5	26	22,9	Att	Inat	Inat	3,2	27,9	2,5	3,5	10	12,79	9,36	4,00	2,93
23,5	15,3	24,4	26,3	36,8	67,2	36,8	26,4	26,2	25,8	25,2	Att	Inat	Inat	3,2	28	2,5	3,5	13,8	13,08	6,10	4,09	1,91
23,5	13,7	24,4	25,4	35,7	67,2	35,7	25,5	25,1	25,8	22,8	Att	Inat	Inat	3,2	28	2,5	3,5	11,2	13,08	10,17	4,09	3,18
23,5	11,6	24,9	24,1	34,1	67,2	34,1	24	23,9	25,7	21,1	Att	Inat	Inat	3,2	27,8	2,5	3,5	9,1	12,50	10,17	3,91	3,18
23,6	11,8	26,1	25,3	39,4	65	40	25,4	25,1	24,5	24,9	Att	Inat	Inat	3,2	27,8	2,4	3,5	9,5	11,72	9,36	3,66	2,93
23,6	12,6	25,4	24,7	34,1	67,2	34,6	25	24,8	25,9	22,3	Att	Inat	Inat	3,2	27,9	2,5	3,5	10,6	12,50	8,14	3,91	2,54
23,6	12,8	24,9	25,4	35,7	67,2	35,7	25,6	25,3	25,8	22,9	Att	Inat	Inat	3,2	28,1	2,5	3,5	10,3	13,08	10,17	4,09	3,18
23,6	11,1	25,1	25,3	35,2	66,6	35,2	25,5	25,2	25,8	22,4	Att	Inat	Inat	3,2	27,9	2,4	3,5	8,6	12,00	10,17	3,75	3,18
23,6	11,2	24,9	25,8	35,2	67,2	35,2	25,9	25,5	24	22,6	Att	Inat	Inat	3,2	28	2,5	3,5	8,7	12,79	10,17	4,00	3,18
23,7	12	25,1	25,9	35,7	67,2	35,7	25,9	25,6	25,8	22,9	Att	Inat	Inat	3,2	28,2	2,5	3,5	9,4	13,08	10,58	4,09	3,31
23,7	13,1	27,8	25,2	35,2	67,2	35,2	25,4	25	26,9	22,5	Att	Inat	Inat	3,2	28,3	2,4	3,5	10,3	12,84	11,40	4,01	3,56
23,8	11	25,4	26,1	35,2	67,2	35,7	26	25,6	24,8	22,6	Att	Inat	Inat	3,2	28,4	2,5	3,5	8,4	13,37	10,58	4,18	3,31
23,8	12,1	25,2	26,1	38,4	66,6	38,4	26	25,7	23,2	25,5	Att	Inat	Inat	3,1	27,5	2,5	3,5	10,6	10,76	6,10	3,47	1,97
23,9	13,2	26	26,6	35,7	67,7	36,2	26,5	26,4	25,2	24,9	Att	Inat	Inat	3,2	28,1	2,5	3,5	12,2	12,21	4,07	3,82	1,27
24	11,7	25,1	26,1	34,6	67,7	34,6	26	25,5	24,5	22,7	Att	Inat	Inat	3,2	28,3	2,5	3,5	9,4	12,50	9,36	3,91	2,93
24	17,1	26	27,3	36,2	70,4	36,8	27,2	26,7	25,9	25,5	Att	Att	Inat	6,5	32,3	2,5	3,5	13,4	24,13	15,06	3,71	2,32
24,1	11	26,4	26,1	35,7	67,7	35,7	26,4	26	25,3	23	Att	Inat	Inat	3,3	28,6	2,5	3,5	8,5	13,08	10,17	3,96	3,08
24,1	11,4	27,9	26,1	35,2	67,7	35,7	26,3	25,9	26,7	23,1	Att	Inat	Inat	3,2	28,7	2,5	3,5	8,7	13,37	10,99	4,18	3,43
24,2	12,3	28,2	26,4	35,7	67,7	35,7	26,6	26,2	26,8	23,5	Att	Inat	Inat	3,2	28,5	2,5	3,5	9,6	12,50	10,99	3,91	3,43
24,2	13,6	25,6	25,8	36,8	68,2	37,3	25,9	25,8	28,8	23,1	Att	Inat	Inat	3,2	28,9	2,4	3,5	10,6	13,12	12,21	4,10	3,82



TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
24,2	13	25,8	25,8	36,8	68,2	36,8	25,9	25,8	28,4	23,1	Att	Inat	Inat	3,2	28,8	2,4	3,5	9,8	12,84	13,02	4,01	4,07
24,2	12,1	26	25,8	36,2	67,7	36,8	26	25,8	28,2	23	Att	Inat	Inat	3,3	28,8	2,5	3,5	8,9	13,37	13,02	4,05	3,95
24,3	11,4	27,8	25,1	40,5	64,5	40,5	25,3	24,7	26,5	24,4	Att	Inat	Inat	3,1	26,7	2,5	3,5	10,2	6,98	4,88	2,25	1,58
24,3	11,2	25,3	25,7	34,6	67,7	34,6	26	25,7	25,4	22,8	Att	Inat	Inat	3,2	28,7	2,5	3,5	8,6	12,79	10,58	4,00	3,31
24,3	13,6	25,6	25,7	36,8	68,2	37,3	25,9	25,7	29,2	23	Att	Inat	Inat	3,2	28,8	2,5	3,5	10,6	13,08	12,21	4,09	3,82
24,4	10,8	24,7	26,6	34,6	67,7	34,6	26,7	26,6	24,5	24	Att	Inat	Inat	3,3	28,6	2,5	3,5	8,7	12,21	8,55	3,70	2,59
24,4	13,7	28,2	25,7	36,8	68,2	37,3	25,9	25,7	30,1	23,1	Att	Inat	Inat	3,2	28,9	2,5	3,5	10,6	13,08	12,62	4,09	3,94
24,4	13,7	27,9	25,7	36,8	68,2	37,3	25,9	25,7	29,9	23,1	Att	Inat	Inat	3,2	29	2,5	3,5	10,6	13,37	12,62	4,18	3,94
24,4	13,7	26,6	25,8	36,8	68,2	37,3	25,9	25,8	29,6	23,1	Att	Inat	Inat	3,3	28,9	2,5	3,5	10,6	13,08	12,62	3,96	3,82
24,5	13,7	28,1	25,9	36,8	68,8	37,3	26,1	26	30,7	23,4	Att	Inat	Inat	3,3	29,1	2,5	3,5	10,6	13,37	12,62	4,05	3,82
24,5	13,7	28,7	25,8	36,8	68,2	37,3	26	25,9	30,4	23,3	Att	Inat	Inat	3,3	29,1	2,5	3,5	10,5	13,37	13,02	4,05	3,95
24,6	11,6	27,5	26,9	37,8	67,7	37,8	27,1	26,7	25,7	26,2	Att	Inat	Inat	3,03	29,1	2,5	3,5	8,8	13,08	11,40	4,32	3,76
24,6	10,4	25,2	25,9	34,6	68,2	34,6	25,8	25,5	26,5	22,3	Att	Inat	Inat	3,3	28,9	2,5	3,5	8	12,50	9,77	3,79	2,96
24,7	11,1	26	26,2	33,6	68,2	34,1	26,3	25,9	25	23	Att	Inat	Inat	3,3	28,9	2,5	3,5	8,9	12,21	8,95	3,70	2,71
24,7	15,8	26,6	27,2	35,2	70,9	35,7	27,4	27	26,6	25,2	Att	Att	Inat	6,6	33,4	2,5	3,5	11	25,29	19,53	3,83	2,96
24,7	13,8	28	25,9	37,3	68,8	37,3	26,2	26,2	31,3	23,4	Att	Inat	Inat	3,3	29,3	2,5	3,5	10,5	13,37	13,43	4,05	4,07
24,7	13,7	28,2	26	37,3	68,8	37,3	26,2	26,2	31,1	23,4	Att	Inat	Inat	3,2	29,3	2,5	3,5	10,6	13,37	12,62	4,18	3,94
24,8	17,7	17,1	28,7	35,7	70,9	36,2	28,5	28,3	23,3	27,4	Att	Att	Inat	6,6	33,1	2,6	3,5	12,2	25,09	22,38	3,80	3,39
24,9	11,1	25,5	25,4	34,1	68,8	34,6	25,8	25,9	26,3	22,9	Att	Inat	Inat	3,3	29,1	2,5	3,5	8,8	12,21	9,36	3,70	2,84
24,9	11,5	25,8	25,4	41	65	41	25,4	24,9	24	24,9	Att	Inat	Inat	3	27,1	2,5	3,5	10,4	6,40	4,48	2,13	1,49
25	11,5	25,4	26,4	35,7	68,8	36,2	26,6	26,4	26,9	23,4	Att	Inat	Inat	3,3	29,4	2,5	3,5	9	12,79	10,17	3,88	3,08
25	11,5	25,7	25,3	34,1	68,8	34,6	25,5	25,5	25,8	22,6	Att	Inat	Inat	3,3	29,3	2,5	3,5	9,3	12,50	8,95	3,79	2,71
25	13,9	28,5	25,9	37,3	69,3	37,3	26,2	26,2	31,2	23,4	Att	Inat	Inat	3,3	29,6	2,5	3,5	10,5	13,37	13,84	4,05	4,19

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
25,1	11,8	26,5	26,8	38,4	67,2	38,9	26,8	26,4	24,6	26,4	Att	Inat	Inat	3,2	28,5	2,5	3,5	10,1	9,88	6,92	3,09	2,16
25,3	11,6	25,5	26,5	36,2	69,3	36,2	26,7	26,5	27,1	23,5	Att	Inat	Inat	3,3	29,6	2,5	3,5	9,3	12,50	9,36	3,79	2,84
25,4	11,8	26,3	26,7	36,2	69,3	36,2	26,9	26,6	27,3	23,6	Att	Inat	Inat	3,3	29,6	2,4	3,5	9,4	11,72	9,77	3,55	2,96
25,4	10,8	27,2	27,3	36,8	68,2	37,3	27,3	27	24,2	26,6	Att	Inat	Inat	3,2	28,4	2,5	3,5	9,3	8,72	6,10	2,73	1,91
25,5	11,6	25,2	27,8	35,7	69,3	36,2	27,8	27,3	24,4	24,8	Att	Inat	Inat	3,3	29,3	2,5	3,5	9,5	11,05	8,55	3,35	2,59
25,5	11	28,1	26,6	34,6	69,3	34,6	27,1	26,9	27,7	23,8	Att	Inat	Inat	3,3	29,8	2,5	3,5	8,8	12,50	8,95	3,79	2,71
25,6	12,1	26,6	26,7	36,2	69,8	36,8	27	26,7	28,4	23,8	Att	Inat	Inat	3,4	30,1	2,5	3,5	9,8	13,08	9,36	3,85	2,75
25,6	11,8	26,6	27,1	36,2	69,8	36,8	27,3	26,9	27,3	24	Att	Inat	Inat	3,3	30	2,5	3,5	9,5	12,79	9,36	3,88	2,84
25,7	11,7	29	26,5	36,2	69,8	36,2	26,8	26,6	29	23,5	Att	Inat	Inat	3,3	30	2,5	3,5	8,8	12,50	11,80	3,79	3,58
25,7	11,9	25,9	26,6	36,2	69,3	36,8	26,9	26,7	27,5	23,7	Att	Inat	Inat	3,3	30	2,5	3,5	9,5	12,50	9,77	3,79	2,96
25,7	10,8	25,1	27,8	35,7	69,3	35,7	27,8	27,4	25,5	24,4	Att	Inat	Inat	3,3	29,9	2,5	3,5	8,4	12,21	9,77	3,70	2,96
25,7	11,1	28,6	27	34,6	69,3	34,6	27,2	27	26,5	23,9	Att	Inat	Inat	3,4	29,6	2,5	3,5	8,9	11,34	8,95	3,33	2,63
25,7	17,2	34,9	26,3	36,8	73,6	36,8	26,5	27	22,7	24,8	Att	Att	Inat	6,6	35,4	2,5	3,5	11,1	28,20	24,83	4,27	3,76
25,7	14	30,8	28,2	36,8	72	36,8	28,5	28,4	31,2	25,8	Att	Att	Inat	3,3	31,2	2,5	3,5	10,1	15,99	15,87	4,84	4,81
25,8	12,6	29,4	26,6	36,2	69,8	36,8	26,9	26,7	29,4	23,8	Att	Inat	Inat	3,3	30,2	2,5	3,5	9,6	12,79	12,21	3,88	3,70
25,8	11,1	27,8	27,2	34,6	69,8	35,2	27,3	27	26,1	24	Att	Inat	Inat	3,4	29,9	2,5	3,5	9,1	11,92	8,14	3,51	2,39
25,8	11,1	28,1	26,4	34,1	69,8	34,1	27,3	27,4	27,2	24,3	Att	Inat	Inat	3,4	30,2	2,5	3,5	9,1	12,79	8,14	3,76	2,39
25,8	15,9	32,8	28,3	37,8	72,5	37,8	28,5	28,6	26,9	26,4	Att	Att	Inat	6,7	35,2	2,5	3,5	10	27,33	24,01	4,08	3,58
25,8	15	32,6	28,4	37,3	72,5	37,3	28,6	28,6	29,6	26,3	Att	Att	Inat	6,6	34,9	2,5	3,5	9,1	26,45	24,01	4,01	3,64
25,9	12	26,1	27,5	36,8	69,8	36,8	27,7	27,3	27,9	24,4	Att	Inat	Inat	3,3	30,3	2,5	3,5	9,6	12,79	9,77	3,88	2,96
25,9	10,3	29,5	27,2	34,6	69,8	34,6	27,4	27,1	28	23,9	Att	Inat	Inat	3,4	30	2,5	3,5	8	11,92	9,36	3,51	2,75
25,9	10,5	27,8	26,6	34,6	69,8	35,2	26,9	26,6	28,1	23,3	Att	Inat	Inat	3,4	30,5	2,5	3,5	8,1	13,37	9,77	3,93	2,87
26	13,5	30	26,7	36,8	70,4	37,3	27,1	26,8	29,9	24,1	Att	Inat	Inat	3,3	30,4	2,5	3,5	10,5	12,79	12,21	3,88	3,70

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
26	12,3	27,2	26,4	36,2	69,8	36,2	26,8	26,7	29	23,8	Att	Inat	Inat	3,4	30,5	2,5	3,5	9,9	13,08	9,77	3,85	2,87
26	10,7	27,7	26,7	34,6	69,8	34,6	26,9	26,7	27,3	23,4	Att	Inat	Inat	3,4	30,1	2,5	3,5	8,3	11,92	9,77	3,51	2,87
26,1	17,5	17,8	29	41,6	70,9	42,6	28,6	28,4	21,4	28,3	Att	Att	Inat	6,4	33,2	2,6	3,5	13,7	21,47	15,47	3,35	2,42
26,2	13,7	30,5	26,8	36,8	70,4	37,3	27,2	27	30,4	24,3	Att	Inat	Inat	3,4	30,6	2,5	3,5	10,9	12,79	11,40	3,76	3,35
26,2	12,6	29	27,1	36,8	70,4	36,8	27,3	27	28,9	24	Att	Inat	Inat	3,4	30,6	2,5	3,5	9,8	12,79	11,40	3,76	3,35
26,3	12,3	28	26,5	34,6	70,9	35,2	27	27,1	30,2	24,1	Att	Inat	Inat	3,4	30,9	2,5	3,5	9,8	13,37	10,17	3,93	2,99
26,3	12,6	29	27,1	36,2	70,4	36,8	27,4	27,2	29,2	24,2	Att	Inat	Inat	3,4	30,7	2,5	3,5	9,8	12,79	11,40	3,76	3,35
26,4	12,3	27,2	27,4	35,2	70,4	35,7	27,6	27,2	27,3	24,3	Att	Inat	Inat	3,4	30,8	2,5	3,5	9,6	12,79	10,99	3,76	3,23
26,5	12,4	26,8	28	35,2	70,4	35,7	28,4	28,3	26,2	25,7	Att	Inat	Inat	3,4	30,4	2,5	3,5	10,2	11,34	8,95	3,33	2,63
26,5	12,4	27,3	27,9	35,7	70,9	35,7	28,1	27,7	26,9	24,8	Att	Inat	Inat	3,4	30,8	2,5	3,5	9,9	12,50	10,17	3,68	2,99
26,5	12,7	29,4	27,2	36,2	70,9	36,8	27,5	27,3	29,5	24,3	Att	Inat	Inat	3,4	30,8	2,5	3,5	9,8	12,50	11,80	3,68	3,47
26,6	14,3	27,5	28,4	40,5	69,8	41	28,4	28,1	26,9	28	Att	Inat	Inat	3,4	30,9	2,5	3,5	12,8	12,50	6,10	3,68	1,80
26,6	10,4	28	28,4	36,2	70,4	36,2	28,1	27,3	28,3	24	Att	Inat	Inat	3,4	30,6	2,5	3,5	8,1	11,63	9,36	3,42	2,75
26,6	12,7	29,4	27	36,2	70,9	36,8	27,4	27,2	29,9	24,2	Att	Inat	Inat	3,4	31	2,5	3,5	9,8	12,79	11,80	3,76	3,47
26,9	17,2	18,2	29,8	37,3	73,6	37,8	29,6	29,3	23,9	27,9	Att	Att	Inat	6,7	35,3	2,6	3,5	12,9	25,40	17,50	3,79	2,61
27	13,9	30,6	28,1	37,3	71,4	37,8	29	28,9	31	26,7	Att	Inat	Inat	3,4	31,6	2,5	3,5	10,8	13,37	12,62	3,93	3,71
27,1	12	28	27,4	35,7	71,4	35,7	27,6	27,4	28,1	24,4	Att	Inat	Inat	3,4	31,4	2,5	3,5	9,9	12,50	8,55	3,68	2,51
27,2	14,8	30,8	29,3	36,8	74,1	37,3	29,7	29,3	31,2	27	Att	Att	Inat	6,8	36	2,5	3,5	9,6	25,58	21,16	3,76	3,11
27,2	13,6	27,5	27,8	35,7	71,4	36,2	28	27,6	27,6	24,9	Att	Inat	Inat	3,4	31,4	2,5	3,5	11,3	12,21	9,36	3,59	2,75
27,3	11,1	30,8	27,7	36,2	71,4	36,8	28,1	27,9	31,3	24,4	Att	Inat	Inat	3,04	31,4	2,5	3,5	8,2	11,92	11,80	3,92	3,88
27,4	15,8	30,9	29,5	37,3	74,1	37,8	29,8	29,5	31,3	27,3	Att	Att	Inat	6,9	36,3	2,5	3,5	10,6	25,87	21,16	3,75	3,07
27,4	13,5	29,6	29,3	36,2	74,1	36,8	29,5	29,2	30,4	26,7	Att	Att	Inat	6,9	36,1	2,5	3,5	8,4	25,29	20,76	3,67	3,01
27,4	12,7	29,3	29,4	38,4	70,9	38,4	29,6	29,2	30,3	26,6	Att	Inat	Inat	3,4	32,7	2,5	3,5	9,4	15,41	13,43	4,53	3,95

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
27,5	19,9	33,5	29,7	37,3	74,6	37,8	30	29,6	29,1	28,2	Att	Att	Inat	7	37,1	2,5	3,5	12,9	27,91	28,49	3,99	4,07
27,5	12,8	28	28,1	36,2	72	36,2	28,1	27,7	28	24,9	Att	Inat	Inat	3,5	31,6	2,5	3,5	10,4	11,92	9,77	3,41	2,79
27,5	10,7	27,6	27,8	35,2	71,4	35,2	28,1	27,8	28,1	24,5	Att	Inat	Inat	3,5	31,8	2,5	3,5	8,2	12,50	10,17	3,57	2,91
27,6	12,3	28,2	28,2	36,2	72	36,2	28,4	28	28,3	25	Att	Inat	Inat	3,4	31,8	2,5	3,5	10,1	12,21	8,95	3,59	2,63
27,6	12,5	30,6	28,1	36,8	72	37,3	28,5	28,2	30,5	25,1	Att	Inat	Inat	3,4	31,8	2,5	3,5	9,8	12,21	10,99	3,59	3,23
27,6	14,3	30,2	29,3	36,2	74,6	36,8	29,6	29,3	30,5	26,8	Att	Att	Inat	6,9	36,4	2,5	3,5	9,2	25,58	20,76	3,71	3,01
27,7	12,4	28,5	28,3	36,2	72	36,8	28,4	28	28,7	25	Att	Inat	Inat	3,4	32,1	2,5	3,5	10,1	12,79	9,36	3,76	2,75
27,7	13,5	28	29,3	36,2	74,1	36,2	29,6	29,3	29,9	26,7	Att	Att	Inat	6,9	36,5	2,5	3,5	9,1	25,58	17,91	3,71	2,60
27,7	10,3	28,2	28,6	35,2	71,4	35,7	28,9	28,5	28,3	25,2	Att	Inat	Inat	3,4	31,1	2,5	3,5	8,1	9,88	8,95	2,91	2,63
27,7	16,2	30,1	29,5	37,3	74,6	37,8	29,8	29,5	30,5	27,3	Att	Att	Inat	6,9	36,6	2,5	3,5	10,9	25,87	21,57	3,75	3,13
27,8	11,2	31	28	36,2	72,5	36,2	28,6	28,5	31,6	24,9	Att	Inat	Inat	3,04	31,8	2,5	3,5	8,2	11,63	12,21	3,82	4,02
27,8	16,9	31,5	29,6	37,8	74,6	37,8	29,9	29,6	31,3	27,5	Att	Att	Inat	6,9	36,6	2,5	3,5	11,6	25,58	21,57	3,71	3,13
27,8	19	24,7	30,2	42,1	72,5	43,2	30	29,7	25,6	29,7	Att	Att	Inat	6,7	35,6	2,6	3,5	14,1	23,58	19,94	3,52	2,98
27,9	12,4	30,6	28,3	36,8	72	37,3	28,7	28,4	31,1	25,2	Att	Inat	Inat	3,5	32,3	2,5	3,5	9,6	12,79	11,40	3,65	3,26
27,9	12,5	30,5	28,3	36,8	72	37,3	28,6	28,4	30,9	25,3	Att	Inat	Inat	3,5	32,1	2,5	3,5	9,8	12,21	10,99	3,49	3,14
27,9	15,3	30,2	29,5	36,8	74,6	37,3	29,9	29,5	30,5	27,2	Att	Att	Inat	6,9	36,6	2,5	3,5	10,1	25,29	21,16	3,67	3,07
27,9	15,6	34,2	29,6	37,8	75,2	37,8	30	29,6	33,9	27,3	Att	Att	Inat	7	36,9	2,5	3,5	9,7	26,16	24,01	3,74	3,43
28	12,4	28,7	28,6	36,2	72	36,8	28,8	28,4	28,5	25,4	Att	Inat	Inat	3,4	32,2	2,5	3,5	10,2	12,21	8,95	3,59	2,63
28	11,6	27,8	29,1	36,2	72	36,2	29,2	28,7	27,8	25,8	Att	Inat	Inat	3,5	31,8	2,5	3,5	9	11,05	10,58	3,16	3,02
28	17,2	30,5	29,7	37,3	75,2	37,8	30	29,7	30,4	27,6	Att	Att	Inat	7	37	2,5	3,5	11,8	26,16	21,98	3,74	3,14
28,1	16,7	34,3	29,6	37,8	75,7	38,4	30	29,7	33,9	27,4	Att	Att	Inat	7	37,1	2,5	3,5	10,6	26,16	24,83	3,74	3,55
28,2	18	31,7	29,8	37,8	75,7	38,4	30,2	29,8	31,2	27,9	Att	Att	Inat	6,9	37,3	2,5	3,5	12,6	26,45	21,98	3,83	3,19
28,2	17,9	29,3	29,9	37,8	75,7	38,4	30,1	29,8	30,4	27,8	Att	Att	Inat	7	37,2	2,5	3,5	12,7	26,16	21,16	3,74	3,02

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
28,3	14,4	28,2	30	36,2	75,2	36,8	30,2	29,9	30	27,5	Att	Att	Inat	7	37	2,5	3,5	10	25,29	17,91	3,61	2,56
28,3	12,6	30,5	28,5	36,2	73	36,2	29,1	29	31,2	25,7	Att	Inat	Inat	3,5	32,4	2,5	3,5	9,7	11,92	11,80	3,41	3,37
28,3	16,6	29,6	29,9	38,4	77,3	39,4	30	29,9	32,1	28	Att	Att	Inat	7	37,3	2,5	3,5	14,6	26,16	8,14	3,74	1,16
28,3	15,2	28,9	29,9	36,2	75,2	36,8	30,1	29,8	30,5	27,5	Att	Att	Inat	7	37,4	2,5	3,5	12,8	26,45	9,77	3,78	1,40
28,4	12,5	29,2	28,5	35,7	72,5	36,2	28,8	28,5	29,5	25,5	Att	Inat	Inat	3,5	32,5	2,5	3,5	10,2	11,92	9,36	3,41	2,67
28,4	12,4	30,8	28,6	36,2	73	36,8	29	28,8	31,3	25,5	Att	Inat	Inat	3,5	32,6	2,5	3,5	9,5	12,21	11,80	3,49	3,37
28,4	16,5	18,9	30,9	37,3	75,2	37,8	30,8	30,5	25,1	29,6	Att	Att	Inat	7	36,3	2,6	3,5	12	23,88	18,31	3,41	2,62
28,5	11,6	31,5	29,8	35,2	75,7	35,7	30,1	29,8	32	26,6	Att	Att	Inat	7	36,9	2,5	3,5	6,6	24,42	20,35	3,49	2,91
28,5	15,1	29,9	29,9	37,3	75,7	37,8	30,2	29,9	30,7	27,5	Att	Att	Inat	7	37,5	2,5	3,5	12,5	26,16	10,58	3,74	1,51
28,6	17,9	34,8	30,1	38,4	76,8	38,9	30,5	30,2	33,5	28	Att	Att	Inat	7	37,5	2,5	3,5	11,7	25,87	25,23	3,70	3,60
28,7	17,4	31,2	29,8	35,7	76,8	36,2	30,1	29,8	31,5	27,9	Att	Att	Inat	7,1	37,6	2,5	3,5	13,7	25,87	15,06	3,64	2,12
28,7	17,9	31,7	30	37,8	76,8	38,4	30,4	30	31,3	27,8	Att	Att	Inat	7	37,3	2,5	3,5	11,1	25,00	27,67	3,57	3,95
28,7	18	28,4	31,3	39,4	74,6	40,5	31,4	31	29,1	30,7	Att	Att	Inat	7,1	37,3	2,5	3,5	14,4	25,00	14,65	3,52	2,06
28,7	13,1	31,2	29,9	35,7	76,2	36,2	30,3	29,9	31,5	27	Att	Att	Inat	7,1	37,3	2,5	3,5	8,1	25,00	20,35	3,52	2,87
28,7	17,5	30,7	30,3	35,7	75,7	36,2	30,4	30	30,8	28	Att	Att	Inat	7	37,7	2,5	3,5	13,5	26,16	16,28	3,74	2,33
28,8	12	32,3	29,1	36,8	73	36,8	29,5	29,1	31	25,9	Att	Inat	Inat	3,5	32,9	2,5	3,5	9,4	11,92	10,58	3,41	3,02
28,8	19,9	31	30	37,3	76,2	37,8	30,4	30	31	28,1	Att	Att	Inat	7,1	37,5	2,5	3,5	12,6	25,29	29,71	3,56	4,18
28,8	16,7	32,5	30,8	40	78,4	40,5	30,6	29,9	31,5	28,2	Att	Att	Inat	7	34,9	2,5	3,5	14,8	17,73	7,73	2,53	1,10
28,9	18	34,9	30,1	35,2	76,2	35,7	30,4	29,8	30,7	28	Att	Att	Inat	7,01	37,8	2,5	3,5	14	25,87	16,28	3,69	2,32
28,9	17	31,6	30,2	37,8	77,3	38,4	30,6	30,2	31,3	27,8	Att	Att	Inat	7,1	37,5	2,5	3,5	12	25,00	20,35	3,52	2,87
28,9	16,9	19	31	37,3	75,7	37,8	30,8	30,5	24,9	29	Att	Att	Inat	7	37	2,6	3,5	12	24,49	19,94	3,50	2,85
29	18,4	37,9	30,1	36,8	76,8	37,3	30,5	30	32,6	28	Att	Att	Inat	7,03	38,6	2,5	3,5	12,9	27,91	22,38	3,97	3,18
29	12,4	32,6	30	35,7	76,2	36,2	30,4	30	32,3	27	Att	Att	Inat	7	37,2	2,5	3,5	7,3	23,84	20,76	3,41	2,97

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
29	16,6	28,6	30,4	36,8	76,8	37,3	30,6	30,2	30	28,1	Att	Att	Inat	7	37,6	2,5	3,5	11,9	25,00	19,13	3,57	2,73
29	12	32,1	29,2	36,8	73,6	36,8	29,7	29,3	31,4	25,9	Att	Inat	Inat	3,5	33,2	2,5	3,5	9,4	12,21	10,58	3,49	3,02
29	12,7	31,7	30,2	35,7	76,2	36,2	30,5	30,1	31,6	27,1	Att	Att	Inat	7,1	37,4	2,5	3,5	7,8	24,42	19,94	3,44	2,81
29	15,5	35,4	30,3	38,4	77,3	38,9	30,6	30,3	32,8	27,7	Att	Att	Inat	7,1	37,9	2,5	3,5	12,6	25,87	11,80	3,64	1,66
29,1	15,5	28,8	30,5	36,8	76,8	37,3	30,8	30,4	30	28,1	Att	Att	Inat	7,1	37,7	2,5	3,5	11	25,00	18,31	3,52	2,58
29,1	16,6	29,8	30,4	38,4	77,8	38,9	30,7	30,4	31,5	28,1	Att	Att	Inat	7,1	37,7	2,5	3,5	12,5	25,00	16,69	3,52	2,35
29,1	18,1	29,9	30,3	38,4	77,3	38,9	30,6	30,3	31,2	28,2	Att	Att	Inat	7,1	37,9	2,5	3,5	11,2	25,58	28,08	3,60	3,96
29,1	16,2	36,7	30,2	38,9	77,8	39,4	30,7	30,4	32,8	27,8	Att	Att	Inat	7,1	38,1	2,5	3,5	10,8	26,16	21,98	3,68	3,10
29,2	15	37,2	30,1	36,2	77,3	36,2	30,8	30,4	32	27,8	Att	Att	Inat	7,01	37,5	2,5	3,5	12,5	24,13	10,17	3,44	1,45
29,2	11,5	29,7	29,3	35,7	74,1	35,7	29,5	29,2	29,9	25,9	Att	Inat	Inat	3,6	33,5	2,5	3,5	9	12,50	10,17	3,47	2,83
29,2	16,7	28,2	30,6	37,8	77,3	38,4	30,8	30,3	29,7	28,2	Att	Att	Inat	7,2	38,1	2,5	3,5	12,3	25,87	17,91	3,59	2,49
29,2	12	33	29,4	36,2	74,1	36,8	29,9	29,5	31,8	26,1	Att	Inat	Inat	3,6	33,3	2,5	3,5	9,4	11,92	10,58	3,31	2,94
29,2	13,4	32,3	30,3	36,2	76,8	36,8	30,6	30,3	31,7	27,4	Att	Att	Inat	7,2	37,7	2,5	3,5	8,4	24,71	20,35	3,43	2,83
29,2	13,9	31,6	30,4	36,2	76,8	36,8	30,7	30,3	31,7	27,5	Att	Att	Inat	7,1	37,7	2,5	3,5	8,9	24,71	20,35	3,48	2,87
29,2	18,5	36,3	30,4	38,9	77,8	39,4	30,9	30,5	32,8	28,2	Att	Att	Inat	7,1	38	2,5	3,5	10,6	25,58	32,15	3,60	4,53
29,3	16,2	28,5	30,5	37,3	76,8	37,3	30,8	30,4	29,8	28,2	Att	Att	Inat	7,1	38	2,5	3,5	13,4	25,29	11,40	3,56	1,60
29,3	15	32,2	30,3	36,8	76,8	37,3	30,7	30,3	31,9	27,7	Att	Att	Inat	7,2	38	2,5	3,5	9,9	25,29	20,76	3,51	2,88
29,3	14,1	32,2	30,3	36,2	76,8	36,8	30,7	30,3	31,8	27,5	Att	Att	Inat	7,2	37,8	2,5	3,5	9,1	24,71	20,35	3,43	2,83
29,3	14,8	31,6	30,6	36,2	77,3	37,3	30,9	30,5	31,8	27,9	Att	Att	Inat	7,2	38	2,5	3,5	9,7	25,29	20,76	3,51	2,88
29,4	13,1	32,6	30,4	35,7	77,3	36,2	30,8	30,4	32,5	27,4	Att	Att	Inat	7,02	37,7	2,5	3,5	8,1	24,13	20,35	3,44	2,90
29,4	12,3	29,4	29,5	36,2	74,6	36,2	29,7	29,4	31,4	26,1	Att	Inat	Inat	3,5	33,1	2,5	3,5	10,1	10,76	8,95	3,07	2,56
29,5	15	36,1	30,4	36,2	77,3	36,8	30,9	30,4	31,4	28	Att	Att	Inat	7,01	37,7	2,5	3,5	13,2	23,84	7,33	3,40	1,05
29,5	13,9	38,5	30,2	36,2	77,8	36,2	30,6	30	32,7	27,4	Att	Att	Inat	7,02	38	2,5	3,5	12,3	24,71	6,51	3,52	0,93

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
29,6	17,2	39,1	30,1	36,2	78,4	36,2	30,7	30,2	33,4	27,8	Att	Att	Inat	7,03	38,7	2,5	3,5	11,8	26,45	21,98	3,76	3,13
29,6	17,6	29	30,8	37,3	77,3	37,3	31,2	30,9	29,9	28,9	Att	Att	Inat	7,1	38,1	2,5	3,5	12,9	24,71	19,13	3,48	2,69
29,6	15,6	31,2	30,6	36,8	77,3	37,3	31	30,6	31,9	28,1	Att	Att	Inat	7,2	38,2	2,5	3,5	10,5	25,00	20,76	3,47	2,88
29,6	18,6	38	30,5	36,8	77,3	37,3	31	30,6	32,9	28,5	Att	Att	Inat	7,1	38,5	2,5	3,5	13,2	25,87	21,98	3,64	3,10
29,7	12,1	29,3	30,5	37,3	74,1	37,3	30,5	30,1	29,7	27,3	Att	Inat	Inat	3,6	33,7	2,5	3,5	9,7	11,63	9,77	3,23	2,71
29,7	17,9	31,9	30,8	37,8	77,8	38,4	31,1	30,8	31,8	28,5	Att	Att	Inat	7,2	38,5	2,5	3,5	12,5	25,58	21,98	3,55	3,05
29,7	16	32,8	30,7	36,8	77,8	37,3	31,1	30,7	31,9	28,2	Att	Att	Inat	7,2	38,2	2,5	3,5	10,8	24,71	21,16	3,43	2,94
29,7	15	32,3	30,8	37,3	78,4	37,8	31,1	30,7	31,6	28,1	Att	Att	Inat	7,2	38,8	2,5	3,5	12,8	26,45	8,95	3,67	1,24
29,7	19,2	38	30,4	39,4	78,9	39,4	31	30,8	32,4	28,5	Att	Att	Inat	7,2	38,6	2,5	3,5	11,8	25,87	30,12	3,59	4,18
29,8	17,6	31,4	30,8	37,8	78,4	38,4	31,1	30,8	31,8	28,3	Att	Att	Inat	7,2	38,4	2,5	3,5	10,8	25,00	27,67	3,47	3,84
29,8	17	32,9	31,1	37,8	77,8	37,8	31,3	30,9	31,8	28,6	Att	Att	Inat	7,2	38,5	2,5	3,5	11,6	25,29	21,98	3,51	3,05
29,8*	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,6	36,2	2,5	3,5	14,6	18,60	10,17	2,45	1,34
29,9	17,3	33,2	30,8	38,9	79,4	39,4	31	30,8	33,3	28,9	Att	Att	Inat	7,3	38,5	2,5	3,5	12,9	25,00	17,91	3,42	2,45
29,9	17,7	32,4	30,8	37,3	78,4	37,8	31,2	30,8	31,8	28,6	Att	Att	Inat	7,2	38,7	2,5	3,5	12,3	25,58	21,98	3,55	3,05
29,9	16,7	32,6	30,9	37,3	77,8	37,8	31,2	30,8	31,9	28,5	Att	Att	Inat	7,2	38,6	2,5	3,5	11,4	25,29	21,57	3,51	3,00
29,9	15,8	39,6	30,4	35,2	78,4	35,2	30,9	30,9	30,3	28,2	Att	Att	Inat	7,2	38,8	2,5	3,5	12,7	25,87	12,62	3,59	1,75
29,9	17,7	34,6	29,9	34,6	87,4	35,2	30,5	28,1	29,4	25,4	Att	Att	Inat	8,2	41,5	2,5	3,5	12,9	33,72	19,53	4,11	2,38
30	14	32,8	30,8	36,2	77,8	36,8	31,2	30,8	32,7	27,9	Att	Att	Inat	7,02	38,2	2,5	3,5	8,9	23,84	20,76	3,40	2,96
30	20,3	32,2	32,1	39,4	77,8	40,5	32,2	31,8	31,3	30,9	Att	Att	Inat	7,4	38,7	2,5	3,5	15,7	25,29	18,72	3,42	2,53
30	14,9	32,6	30,7	37,8	78,4	37,8	31	30,6	32	27,9	Att	Att	Inat	7,3	38,7	2,5	3,5	11,9	25,29	12,21	3,46	1,67
30	18,5	32,1	30,9	36,8	78,4	37,3	31,2	30,9	31,9	28,8	Att	Att	Inat	7,3	38,9	2,5	3,5	12,9	25,87	22,79	3,54	3,12
30	18,4	31,9	31	36,8	77,8	37,3	31,3	30,9	31,7	28,8	Att	Att	Inat	7,2	38,7	2,5	3,5	13,1	25,29	21,57	3,51	3,00
30	18,8	25,6	31,3	36,8	77,8	37,3	31,4	30,9	28,1	29,2	Att	Att	Inat	7,3	38,5	2,6	3,5	13,6	25,70	21,16	3,52	2,90

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
30,1	12,1	33,7	30,3	35,7	76,8	36,2	30,8	30,4	32	26,7	Att	Inat	Inat	3,7	33,8	2,5	3,5	9,3	10,76	11,40	2,91	3,08
30,1	18,7	31,4	31	37,3	78,4	38,4	31,3	31	31,9	28,8	Att	Att	Inat	7,2	38,9	2,5	3,5	13,1	25,58	22,79	3,55	3,17
30,1	17	32,8	30,9	34,6	77,8	35,2	31,2	30,8	32,3	28,6	Att	Att	Inat	7,2	38,9	2,5	3,5	12,5	25,58	18,31	3,55	2,54
30,1	14,1	31,9	31,5	38,4	79,4	38,9	31,8	31,7	32,7	29,4	Att	Att	Inat	7,4	38,3	2,6	3,5	12,3	24,79	7,33	3,35	0,99
30,2	12,5	28,8	30,7	36,2	75,2	36,2	30,8	30,3	29,1	27,3	Att	Inat	Inat	3,6	33,1	2,5	3,5	10,4	8,43	8,55	2,34	2,37
30,2	12,6	33,9	30,9	35,2	77,8	35,7	31,3	30,8	32,1	27,7	Att	Att	Inat	7,3	38,4	2,5	3,5	7,8	23,84	19,53	3,27	2,68
30,2	16,1	33,4	30,8	34,1	77,8	34,6	31,1	30,8	32,6	28,4	Att	Att	Inat	7,2	38,7	2,5	3,5	13,1	24,71	12,21	3,43	1,70
30,2	18,9	33	31,1	37,8	78,9	38,4	31,3	30,9	31,9	28,9	Att	Att	Inat	7,3	38,9	2,5	3,5	13,6	25,29	21,57	3,46	2,95
30,3	14,1	34,1	31,1	35,7	78,9	36,2	31,5	31	32,3	28,1	Att	Att	Inat	7,3	38,8	2,5	3,5	9,2	24,71	19,94	3,38	2,73
30,3	13,3	34,1	31,1	35,7	78,4	36,2	31,5	31	32,2	28,1	Att	Att	Inat	7,3	38,5	2,5	3,5	8,5	23,84	19,53	3,27	2,68
30,3	18,6	31,1	31	37,8	79,4	38,4	31,4	31,1	32,1	28,7	Att	Att	Inat	7,3	38,9	2,5	3,5	13,4	25,00	21,16	3,42	2,90
30,4	14,9	33,1	31,1	36,2	78,9	36,8	31,5	31,1	32,8	28,5	Att	Att	Inat	7,03	38,7	2,5	3,5	9,8	24,13	20,76	3,43	2,95
30,4	11,3	30,4	30,6	35,2	76,8	35,7	30,7	30,3	31,1	26,6	Att	Inat	Inat	3,7	34,6	2,5	3,5	9,3	12,21	8,14	3,30	2,20
30,4	11,6	30,6	30,5	34,6	77,3	35,2	30,6	30,3	31,4	26,6	Att	Inat	Inat	3,7	34	2,5	3,5	9,5	10,47	8,55	2,83	2,31
30,4	16,5	33,7	31,3	34,6	78,4	35,2	31,5	31,1	32,1	29	Att	Att	Inat	7,3	38,9	2,5	3,5	12	24,71	18,31	3,38	2,51
30,6	15,8	33,1	31,3	36,8	78,9	37,3	31,7	31,3	33	28,7	Att	Att	Inat	7,03	39	2,5	3,5	10,6	24,42	21,16	3,47	3,01
30,6	20	34,2	31,1	36,2	79,4	36,8	31,5	31,1	32	29	Att	Att	Inat	7,3	39,1	2,5	3,5	14,2	24,71	23,60	3,38	3,23
30,6	14,9	34,3	31,3	36,2	78,9	36,8	31,7	31,2	32,5	28,5	Att	Att	Inat	7,4	38,9	2,5	3,5	10	24,13	19,94	3,26	2,69
30,6	17,7	41,7	31,2	33	91,7	33	31,7	31,8	23,5	28,6	Att	Att	Inat	7,5	39,2	2,5	3,5	15,2	25,00	10,17	3,33	1,36
30,7	19,6	33,2	31	36,2	80,5	36,8	31,6	31,2	31,9	29,1	Att	Att	Inat	7,4	39,2	2,5	3,5	14,6	24,71	20,35	3,34	2,75
30,7	15,6	34,5	31,5	36,8	79,4	36,8	31,9	31,3	32,2	29	Att	Att	Inat	7,4	39,2	2,5	3,5	11,9	24,71	15,06	3,34	2,03
30,7	16,7	35,6	31,3	38,4	81	38,9	31,8	31,4	34,2	29,3	Att	Att	Inat	7,4	39,2	2,5	3,5	12,7	24,71	16,28	3,34	2,20
30,7	15,9	32,1	31,4	34,1	78,4	34,6	31,6	31,3	32,5	28,9	Att	Att	Inat	7,3	39,3	2,5	3,5	11,9	25,00	16,28	3,42	2,23



TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
30,7	14,9	31,8	31,4	37,8	80	37,8	31,8	31,4	32,3	28,6	Att	Att	Inat	7,3	39	2,5	3,5	12	24,13	11,80	3,31	1,62
30,8	16,2	39,9	31,5	36,2	79,4	36,8	31,9	31,3	34	28,8	Att	Att	Inat	7,05	39,5	2,5	3,5	11	25,29	21,16	3,59	3,00
30,8	16,9	32,9	31,5	37,3	79,4	37,8	31,9	31,5	33,1	29,1	Att	Att	Inat	7,03	39,3	2,5	3,5	11,6	24,71	21,57	3,51	3,07
30,8	15,9	34,5	31,6	36,8	79,4	37,3	31,9	31,4	32,5	28,8	Att	Att	Inat	7,4	39,4	2,5	3,5	10,8	25,00	20,76	3,38	2,80
30,8	15,2	19,6	32,1	36,2	78,4	37,3	32	31,6	26,2	29,6	Att	Att	Inat	7,3	38,6	2,6	3,5	10,6	23,58	18,72	3,23	2,56
30,8	15,1	19,4	32,1	36,2	78,4	36,8	32	31,6	25,8	29,7	Att	Att	Inat	7,3	38,5	2,6	3,5	10,8	23,28	17,50	3,19	2,40
30,9	19,1	37,2	31,9	38,4	80,5	38,9	32,2	31,8	32,3	30,1	Att	Att	Inat	7,6	39,8	2,5	3,5	15	25,87	16,69	3,40	2,20
30,9	12,1	30,7	31	35,7	77,3	35,7	31,1	30,7	32	27,1	Att	Inat	Inat	3,7	34,3	2,5	3,5	10	9,88	8,55	2,67	2,31
30,9	12,2	30,2	31	35,7	77,3	35,7	31,1	30,7	31,8	27,2	Att	Inat	Inat	3,7	34,4	2,5	3,5	10,1	10,17	8,55	2,75	2,31
30,9	18,1	34,8	31,6	35,2	79,4	35,7	31,9	31,5	32,1	29,4	Att	Att	Inat	7,4	39,4	2,5	3,5	12,7	24,71	21,98	3,34	2,97
30,9	14,9	34,5	31,5	36,8	80	36,8	31,9	31,4	32,2	28,8	Att	Att	Inat	7,4	39,1	2,5	3,5	11	23,84	15,87	3,22	2,14
30,9	17,8	34,8	31,5	36,8	79,4	37,3	32	31,5	32,4	29,2	Att	Att	Inat	7,4	39,5	2,5	3,5	12,5	25,00	21,57	3,38	2,91
30,9	16,8	34,7	31,6	36,8	80	37,3	32	31,4	32,5	29	Att	Att	Inat	7,4	39,4	2,5	3,5	11,6	24,71	21,16	3,34	2,86
31,1	18,9	33,1	31,7	36,2	81,6	37,3	32,2	31,8	33,1	29,7	Att	Att	Inat	7,06	40	2,5	3,5	13,9	25,87	20,35	3,66	2,88
31,1	18,7	38,3	31,4	36,8	81,6	36,8	31,8	31,3	33,6	29	Att	Att	Inat	7,6	40	2,5	3,5	13,6	25,87	20,76	3,40	2,73
31,1	17,5	32,3	31,7	35,2	80	35,7	32	31,6	32,9	29,5	Att	Att	Inat	7,4	39,7	2,5	3,5	13	25,00	18,31	3,38	2,47
31,2	14,4	40	31,6	35,2	81	35,7	32	31,4	34,8	28,3	Att	Att	Inat	7,06	40,1	2,5	3,5	9,5	25,87	19,94	3,66	2,82
31,2	17	34,6	31,8	36,8	80,5	37,3	32,2	31,8	32,2	29,3	Att	Att	Inat	7,5	39,6	2,5	3,5	13,1	24,42	15,87	3,26	2,12
31,2	17,4	35,7	31,7	34,1	80,5	34,6	32	31,6	33,7	29,4	Att	Att	Inat	7,5	40	2,5	3,5	14,2	25,58	13,02	3,41	1,74
31,2	19,1	33,3	31,7	35,2	80,5	35,7	32	31,7	33,4	29,6	Att	Att	Inat	7,4	39,7	2,5	3,5	13,9	24,71	21,16	3,34	2,86
31,3	15,3	39,9	31,7	35,7	80,5	36,2	32,2	31,6	34,4	28,8	Att	Att	Inat	7,06	39,9	2,5	3,5	10,2	25,00	20,76	3,54	2,94
31,3	17,9	33,4	31,9	37,3	80,5	37,8	32,3	31,9	33,1	29,5	Att	Att	Inat	7,04	39,7	2,5	3,5	12,6	24,42	21,57	3,47	3,06
31,3	10,9	31	31,4	35,2	77,8	35,2	31,7	31,3	30,4	27,6	Att	Inat	Inat	3,8	35,2	2,5	3,5	8,9	11,34	8,14	2,98	2,14

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
31,4	13,1	40,8	31,9	34,6	81	35,2	32,3	31,8	35,4	28,5	Att	Att	Inat	7,06	40	2,5	3,5	8,4	25,00	19,13	3,54	2,71
31,5	13,7	40,4	31,8	35,2	81,6	35,7	32,2	31,7	35,1	28,3	Att	Att	Inat	7,05	39,3	2,5	3,5	8,8	22,67	19,94	3,22	2,83
31,6	15,1	33,9	32,1	35,2	81	35,7	32,4	32	33,1	29,3	Att	Att	Inat	7,05	40,1	2,5	3,5	13,2	24,71	7,73	3,50	1,10
31,7	15,6	33,3	32,2	37,3	81,6	37,8	32,5	32,1	33	29,6	Att	Att	Inat	7,06	40,2	2,5	3,5	13,6	24,71	8,14	3,50	1,15
31,7	11,8	31,3	31,9	34,6	79,4	35,2	32,1	31,7	31,6	28	Att	Inat	Inat	3,8	35,4	2,5	3,5	9,7	10,76	8,55	2,83	2,25
31,8	11,9	31,1	32	35,2	79,4	35,2	32,1	31,7	32	27,8	Att	Inat	Inat	3,7	34,4	2,5	3,5	9,9	7,56	8,14	2,04	2,20
31,9	12,4	41,5	32,1	34,1	82,6	34,6	32,8	32,3	35,5	28,6	Att	Att	Inat	7,07	40	2,5	3,5	7,8	23,55	18,72	3,33	2,65
32	15,9	38,8	32,3	36,2	83,2	36,8	32,6	32,1	34,3	29,2	Att	Att	Inat	7,7	40,5	2,5	3,5	12,1	24,71	15,47	3,21	2,01
32	17,8	39,5	32,2	36,2	82,6	36,2	32,7	32,2	35,1	29,7	Att	Att	Inat	7,7	40,3	2,5	3,5	12,8	24,13	20,35	3,13	2,64
32,1	18,2	26,9	32,8	37,3	81	37,3	32,9	32,4	28,8	30,4	Att	Att	Inat	7,6	40,3	2,6	3,5	13,6	24,79	18,72	3,26	2,46
32,3	18,3	39	32,6	36,2	83,2	36,8	33	32,7	34,7	30,2	Att	Att	Inat	7,8	40,9	2,5	3,5	13,6	25,00	19,13	3,21	2,45
32,4	13,7	20,3	32,7	35,7	79,4	36,2	32,7	32,4	27,1	29,8	Att	Inat	Inat	3,8	36,5	2,6	3,5	11	12,40	10,99	3,26	2,89
32,5	14,7	31,7	32,9	36,2	82,6	36,8	33	32,6	32,7	30,2	Att	Att	Inat	7,8	40,6	2,6	3,5	11,5	24,49	13,02	3,14	1,67
32,7	12,4	35,4	32,9	36,2	83,2	36,2	33,5	33,1	36	28,9	Att	Inat	Inat	4	36,6	2,5	3,5	10,2	11,34	8,95	2,83	2,24
32,8	11,9	41,2	33	34,1	84,2	34,6	33,5	33,1	35,9	29,2	Att	Att	Inat	7,08	40	2,5	3,5	7,3	20,93	18,72	2,96	2,64
32,8	11,5	42,3	33	34,1	84,2	34,6	33,5	32,9	36,3	29	Att	Att	Inat	7,09	40,7	2,5	3,5	6,8	22,97	19,13	3,24	2,70
32,8	15,5	40,7	33	35,2	84,8	35,7	33,7	33,4	36,2	30,2	Att	Att	Inat	7,9	41,6	2,5	3,5	10,4	25,58	20,76	3,24	2,63
32,8	12,7	34,8	32,9	36,8	82,6	36,8	33,2	32,7	35,7	28,5	Att	Inat	Inat	4	36,8	2,5	3,5	10,3	11,63	9,77	2,91	2,44
32,8	13	20,7	32,9	35,2	81	35,7	32,8	32,4	27,5	29,2	Att	Inat	Inat	3,8	36,5	2,6	3,5	10,6	11,19	9,77	2,94	2,57
32,9	10,9	42,8	33,2	34,6	84,2	35,2	33,9	33,3	37,2	28,3	Att	Inat	Inat	4	37,1	2,5	3,5	8,1	12,21	11,40	3,05	2,85
32,9	11,4	37,6	33	35,2	84,2	35,7	33,5	33,2	36,9	28,4	Att	Inat	Inat	4	36,6	2,5	3,5	8,9	10,76	10,17	2,69	2,54
33	10,9	36,3	33,1	35,7	84,8	35,7	33,4	33,2	37,5	28,3	Att	Inat	Inat	4	36,8	2,5	3,5	8,4	11,05	10,17	2,76	2,54
33	13,9	20,1	33,7	35,7	82,1	36,2	33,5	33,1	26,5	30,6	Att	Inat	Inat	3,9	38,4	2,6	3,5	10,8	16,33	12,62	4,19	3,23

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
33,1	16,2	40	33,4	35,7	84,8	36,2	33,8	33,4	35,9	30,4	Att	Att	Inat	7,9	41	2,5	3,5	11,1	22,97	20,76	2,91	2,63
33,1	14,8	40,9	33,3	34,6	86,9	35,2	33,9	33,7	36,4	30,1	Att	Att	Inat	8	41,4	2,5	3,5	9,9	24,13	19,94	3,02	2,49
33,1	19,8	36,3	34	22,9	88,5	45,8	34,8	21,5	22,5	22,8	Att	Att	Inat	11,6	48,7	2,5	3,5	14,4	45,35	21,98	3,91	1,89
33,2	11,8	36,2	33,3	36,2	84,2	36,2	33,5	33,3	36,7	28,7	Att	Inat	Inat	4	36,8	2,5	3,5	9,5	10,47	9,36	2,62	2,34
33,2	11,9	36,3	33,4	35,7	84,8	36,2	34	33,8	36,6	29,2	Att	Inat	Inat	4	36,9	2,5	3,5	9,6	10,76	9,36	2,69	2,34
33,3	12,3	20,9	33,4	35,2	82,1	35,7	33,3	32,9	27,5	29,4	Att	Inat	Inat	3,9	36,9	2,6	3,5	9,9	10,88	9,77	2,79	2,50
33,4	17	39,9	33,6	36,2	85,8	36,2	34	33,5	35,6	30,6	Att	Att	Inat	7,9	41,3	2,5	3,5	12,1	22,97	19,94	2,91	2,52
33,4	11,1	36,6	33,5	35,7	84,8	35,7	33,9	33,5	37,2	28,7	Att	Inat	Inat	4	37	2,5	3,5	8,6	10,47	10,17	2,62	2,54
33,4	11,6	37,1	33,5	35,7	85,3	35,7	34	33,7	36,9	28,9	Att	Inat	Inat	4	37	2,5	3,5	9,1	10,47	10,17	2,62	2,54
33,4	12,3	35	33,5	36,2	84,2	36,2	33,8	33,5	36,2	29	Att	Inat	Inat	4	36,5	2,5	3,5	10,1	9,01	8,95	2,25	2,24
33,5	12,7	36,9	33,7	35,7	86,4	36,2	34,1	33,9	35,8	29,3	Att	Inat	Inat	4,01	37,6	2,5	3,5	10,5	11,92	8,95	2,97	2,23
33,5	12,1	36,5	33,6	35,7	84,8	36,2	34	33,7	36,4	29,1	Att	Inat	Inat	4	37,1	2,5	3,5	9,8	10,47	9,36	2,62	2,34
33,5	12,2	35,7	33,7	36,8	84,2	36,8	33,8	33,2	36,3	28,8	Att	Inat	Inat	4	37,1	2,5	3,5	10	10,47	8,95	2,62	2,24
33,6	11,7	36,4	33,7	36,2	84,8	36,2	33,9	33,4	36,7	28,8	Att	Inat	Inat	4	37,1	2,5	3,5	9,3	10,17	9,77	2,54	2,44
33,7	10,9	37,2	33,8	35,2	83,7	35,7	34	33,5	37,5	29,2	Att	Inat	Inat	4,1	38,2	2,5	3,5	7,7	13,08	13,02	3,19	3,18
33,8	12,7	36,4	34	35,7	86,9	36,2	34,4	34,1	36,3	29,5	Att	Inat	Inat	4,01	37,9	2,5	3,5	10,5	11,92	8,95	2,97	2,23
33,8	11,6	20,8	33,9	35,2	83,2	35,7	33,7	33,3	27,6	29,5	Att	Inat	Inat	4	37,3	2,6	3,5	9,3	10,58	9,36	2,65	2,34
33,9	11,2	39,8	34,1	35,2	86,9	35,7	34,4	34	37,9	29	Att	Inat	Inat	4,01	37,5	2,5	3,5	8,8	10,47	9,77	2,61	2,44
33,9	12	38,1	34,1	35,2	86,9	35,7	34,7	34,3	37,5	29,5	Att	Inat	Inat	4,01	37,9	2,5	3,5	9,8	11,63	8,95	2,90	2,23
33,9	12,2	38,4	34,1	35,7	86,9	36,2	34,6	34,2	37,5	29,4	Att	Inat	Inat	4,01	38,2	2,5	3,5	9,9	12,50	9,36	3,12	2,33
33,9	12,5	37,7	34,1	35,7	86,9	35,7	34,6	34,2	30,7	29,5	Att	Inat	Inat	4,01	37,7	2,5	3,5	10,3	11,05	8,95	2,75	2,23
33,9	11,2	38,1	34,1	34,1	87,4	34,6	34,4	34,1	37,3	29,7	Att	Att	Inat	8	41,8	2,5	3,5	6,7	22,97	18,31	2,87	2,29
34	11,1	40,6	34,2	34,6	87,4	35,2	34,6	34,3	37,6	29,1	Att	Inat	Inat	4,01	37,5	2,5	3,5	8,6	10,17	10,17	2,54	2,54

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
34	17,4	27,4	34,4	36,8	84,8	37,3	34,4	33,9	30	31,5	Att	Att	Inat	8	42	2,6	3,5	12,8	24,19	18,72	3,02	2,34
34	13,4	19,8	34,1	35,7	83,2	36,2	34	33,5	27,3	30,2	Att	Inat	Inat	4	37,6	2,6	3,5	11,3	10,88	8,55	2,72	2,14
34,1	11,4	39,1	34,3	35,2	86,9	35,7	34,6	34,1	37,9	29,1	Att	Inat	Inat	4,01	37,6	2,5	3,5	9,1	10,17	9,36	2,54	2,33
34,1	12,3	38,6	34,4	34,1	88,5	34,6	34,8	34,4	33,2	30	Att	Att	Inat	8,1	42,1	2,5	3,5	7,6	23,26	19,13	2,87	2,36
34,2	12,4	38,1	34,5	35,2	88	35,7	34,9	34,4	24,1	29,4	Att	Inat	Inat	4,01	38,1	2,5	3,5	10,1	11,34	9,36	2,83	2,33
34,2	12,6	38,9	34,4	35,7	87,4	36,2	34,7	34,3	34,2	29,6	Att	Inat	Inat	4,01	37,5	2,5	3,5	10,4	9,59	8,95	2,39	2,23
34,2	11	20,9	34,3	34,6	84,2	35,2	34,2	33,8	28	29,7	Att	Inat	Inat	4	37,7	2,6	3,5	8,7	10,58	9,36	2,65	2,34
34,3	11,6	38,7	34,5	35,7	86,9	35,7	34,7	34,2	37,9	29,2	Att	Inat	Inat	4,01	37,5	2,5	3,5	9,3	9,30	9,36	2,32	2,33
34,3	12,3	38,3	34,4	35,7	87,4	35,7	34,8	34,4	37,5	29,6	Att	Inat	Inat	4	39,3	2,5	3,5	10,3	14,53	8,14	3,63	2,03
34,3	12,7	38,4	34,6	34,6	88	35,2	34,8	34,3	35,7	30,1	Att	Att	Inat	8,1	42,1	2,5	3,4	7,9	22,67	18,98	2,80	2,34
34,4	11,7	37,8	34,6	35,7	87,4	35,7	34,9	34,5	37,8	29,6	Att	Inat	Inat	4,02	38,3	2,5	3,5	9,4	11,34	9,36	2,82	2,33
34,5	10,6	42,1	34,8	34,6	87,4	35,2	35,1	34,4	37,5	29,2	Att	Inat	Inat	4,01	39,4	2,5	3,5	7,8	14,24	11,40	3,55	2,84
34,5	11,8	37,5	34,6	35,7	88,5	35,7	34,9	34,6	37,6	29,6	Att	Inat	Inat	4,02	38,1	2,5	3,5	9,6	10,47	8,95	2,60	2,23
34,5	14,2	41,2	34,9	35,7	87,4	36,2	35,1	34,5	36,8	31	Att	Att	Inat	8,1	42,4	2,5	3,5	9,3	22,97	19,94	2,84	2,46
34,5	11,6	39	34,7	34,6	88	35,2	34,9	34,5	36,9	30,2	Att	Att	Inat	8,1	42	2,5	3,5	7	21,80	18,72	2,69	2,31
34,5	13,1	33,6	35,1	33	83,7	36,2	36,3	33,7	20,8	31,3	Att	Inat	Inat	6,7	39,4	2,5	3,5	10,3	14,24	11,40	2,13	1,70
34,6	10,5	41,3	34,8	34,6	88,5	35,2	35,2	34,4	34,8	28,9	Att	Inat	Inat	4,01	37,4	2,5	3,5	7,9	8,14	10,58	2,03	2,64
34,6	10,8	41,1	34,8	34,6	88,5	35,2	35,1	34,7	36,8	29,4	Att	Inat	Inat	4,02	37,9	2,5	3,5	8,3	9,59	10,17	2,39	2,53
34,7	10	41,8	34,9	34,1	88,5	34,6	34,9	33,8	21,2	27,9	Att	Inat	Inat	4,02	38	2,5	3,5	7,3	9,59	10,99	2,39	2,73
34,7	12	38,6	35	34,6	88,5	35,2	35,2	34,8	35,7	30,5	Att	Att	Inat	8,1	42	2,5	3,5	7,3	21,22	19,13	2,62	2,36
34,8	13,1	39	35,1	35,2	89	35,7	35,3	34,8	33,3	30,7	Att	Att	Inat	8,2	42,3	2,5	3,5	8,3	21,80	19,53	2,66	2,38
34,8	15,6	31,6	35	37,3	88	37,8	35,1	34,7	33,4	31,7	Att	Att	Inat	11,2	44	2,6	3,5	11,9	27,81	15,06	2,48	1,34
34,9	10,2	41,5	35,1	34,6	88,5	35,2	35,3	34,5	29,8	28,9	Att	Inat	Inat	4,02	38	2,5	3,5	7,6	9,01	10,58	2,24	2,63

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
34,9	13	19,3	35,1	35,7	85,8	36,2	35	34,4	27,5	30,8	Att	Inat	Inat	6,6	38,9	2,6	3,5	11	12,09	8,14	1,83	1,23
35,2	13,6	40,5	35,6	33	88	45,3	35,8	33,1	37,3	30	Att	Att	Att	8,2	42,5	2,5	3,5	8,6	21,22	20,35	2,59	2,48
36	16,4	28,1	36,8	29,8	90,1	44,8	35,3	14,4	20	15,3	Att	Att	Att	11,6	45,9	2,6	3,5	11,6	29,93	19,53	2,58	1,68
36,4	12,6	19,5	36,5	27,7	88,5	37,8	28,5	4,3	3,8	7,5	Att	Inat	Att	6,8	41,2	2,6	3,5	10,4	14,51	8,95	2,13	1,32
36,5	15	34,9	37,3	26,1	91,2	45,3	38,9	24,8	34,3	23	Att	Att	Att	11,9	48,3	2,5	3,5	10,4	34,30	18,72	2,88	1,57
36,8	17,8	35,2	36,9	37,8	90,6	41	35	31,7	18,3	28,9	Att	Att	Att	8,3	41,2	2,5	3,5	13,7	12,79	16,69	1,54	2,01
37	16,1	36,1	37	40,5	90,1	50,1	35,5	32,4	28,2	29,2	Att	Att	Att	8,4	41,4	2,5	3,5	11,5	12,79	18,72	1,52	2,23
37,4	11,5	21,9	38	35,2	88,5	38,9	31,8	7,1	8	8,2	Att	Inat	Att	7,1	44,5	2,6	3,5	8,8	21,47	10,99	3,02	1,55
37,5	18,7	32,2	37,8	29,8	94,4	43,2	31,5	10	9,5	12,2	Att	Att	Att	12,2	47,5	2,6	3,5	14,2	30,23	18,31	2,48	1,50
37,5	12,3	19,4	37,7	27,7	92,8	37,8	29,1	3,6	3,5	6,8	Att	Inat	Att	7,1	42,5	2,6	3,5	10	15,12	9,36	2,13	1,32
38,2	15,6	29,2	38,4	28,8	96	42,6	31,4	9,7	9,4	11,4	Att	Att	Att	12,3	47,7	2,6	3,5	12,5	28,72	12,62	2,34	1,03
38,3	15,6	29,5	38,6	28,8	95,4	42,6	31,6	9,5	9,1	11,3	Att	Att	Att	12,3	48,1	2,6	3,5	10,6	29,63	20,35	2,41	1,65
39*	11,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,2	43,8	2,6	3,5	9,6	14,51	8,55	2,02	1,19
40,3	12,2	22	40,6	38,9	90,6	38,9	39,6	35	24,3	32	Att	Inat	Att	7,3	44,6	2,4	3,5	10	12,00	8,95	1,64	1,23
40,8*	15,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	51,7	2,6	3,5	11,8	32,95	15,47	2,34	1,10
40,9*	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	51,7	2,6	3,5	9,2	32,65	18,72	2,30	1,32
41,1*	16,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,4	51,9	2,6	3,5	11,1	32,65	20,76	2,27	1,44
41,3	18,2	36,2	42	38,9	92,8	45,8	42,2	36,1	40,1	32,9	Att	Att	Att	11,8	48	2,5	3,5	12,6	19,48	22,79	1,65	1,93
42,5*	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,3	48,6	2,6	3,5	10,8	18,44	11,40	2,22	1,37
43,6	13,8	31,2	43,8	33,6	95,4	42,6	34,9	9,2	9	10,8	Att	Inat	Att	9,4	49,9	2,6	3,5	10,7	19,05	12,62	2,03	1,34
43,8*	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	54,4	2,6	3,5	11,4	32,05	20,76	2,26	1,46
44,8*	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,1	51,5	2,6	3,5	10,5	20,26	10,99	2,01	1,09
45,9*	13,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	52,5	2,6	3,5	10,6	19,95	10,17	2,00	1,02

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
46,7*	17,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	56,8	2,6	3,5	13,3	30,53	18,31	2,15	1,29
46,8*	17,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	56,6	2,6	3,5	13,1	29,63	16,69	2,09	1,18
47,1*	13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,9	53,5	2,6	3,5	10,6	19,35	10,58	1,95	1,07
48,1*	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	54,6	2,6	3,5	10,6	19,65	11,40	2,01	1,16
48,7*	15,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	57,1	2,6	3,5	13,9	25,40	7,33	1,83	0,53
49*	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	55,5	2,6	3,5	10,7	19,65	10,99	2,01	1,12
49,4*	17,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	58,5	2,6	3,5	13,9	27,51	14,65	1,95	1,04
49,5*	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	58,5	2,6	3,5	13	27,21	15,06	1,92	1,06
50*	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	56,3	2,6	3,5	10,7	19,05	10,99	1,94	1,12
50,8*	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,6	57,1	2,6	3,5	10,9	19,05	10,17	1,98	1,06
51,2*	19,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	59,4	2,6	3,5	14	24,79	21,16	1,75	1,49
51,7*	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	57,7	2,6	3,5	11,2	18,14	9,77	1,85	1,00
51,8*	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	60,3	2,6	3,5	13,9	25,70	12,62	1,82	0,89
51,8	14,4	37	51,9	41	95,4	55,4	50,3	36,1	46,4	30,9	Att	Inat	Att	9,8	58,4	2,6	3,5	11,5	19,95	11,80	2,04	1,20
52*	16,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	60,3	2,6	3,5	13,1	25,09	12,62	1,77	0,89
53,1*	14,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	58,9	2,6	3,5	11,2	17,53	11,80	1,79	1,20
53,5*	20,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	61,4	2,6	3,5	15,1	23,88	20,35	1,69	1,44
53,8*	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,7	59,6	2,6	3,5	12,2	17,53	8,14	1,81	0,84
54*	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	61,9	2,6	3,5	13,9	23,88	11,40	1,69	0,81
54,2*	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	62	2,6	3,5	13,2	23,58	11,40	1,67	0,81
54,3*	14,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,7	59,9	2,6	3,5	13,2	16,93	4,88	1,75	0,50
54,8*	14,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	60,4	2,6	3,5	14,2	16,93	1,63	1,73	0,17
55,4	15,1	35,4	55,5	45,8	96	46,4	54	43,4	50,3	38	Att	Inat	Inat	9,6	59,5	2,6	3,5	13,2	12,40	7,73	1,29	0,81

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
55,6*	15,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,7	61	2,6	3,5	13,1	16,33	8,14	1,68	0,84
55,7*	17,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	63	2,6	3,5	13,9	22,07	14,65	1,55	1,03
56*	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,7	61,4	2,6	3,5	13,4	16,33	8,14	1,68	0,84
56,3*	16,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	63,6	2,6	3,5	13,9	22,07	10,17	1,58	0,73
56,4	15,9	34,3	56,5	47,4	94,4	47,4	55,3	47,2	51,3	41,9	Att	Inat	Inat	9,5	60,5	2,6	3,5	14,1	12,40	7,33	1,30	0,77
56,5*	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	63,8	2,6	3,5	13,4	22,07	9,77	1,57	0,69
56,9*	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	63,9	2,6	3,5	13,5	21,16	9,36	1,51	0,67
57,7*	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	64,5	2,6	3,5	15,2	20,56	5,29	1,48	0,38
57,8*	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	64,6	2,6	3,5	13,6	20,56	8,95	1,47	0,64
58,2*	16,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	64,9	2,6	3,5	14,1	20,26	8,95	1,45	0,64
58,5*	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	65,4	2,6	3,5	13,6	20,86	8,95	1,49	0,64
58,5*	15,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	65,4	2,7	3,5	13,8	21,66	8,55	1,55	0,61
59,1*	16,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	66,2	2,6	3,5	14,2	21,47	7,73	1,54	0,56
59,6*	19,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	66,3	2,7	3,5	17,6	21,03	6,92	1,52	0,50
59,6	17	36,6	59,7	47,4	95,4	55,4	59	50	57,1	44,6	Att	Att	Att	13,9	66,7	2,6	3,5	14,5	21,47	10,17	1,54	0,73
59,9*	16,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	66,8	2,6	3,5	14,3	20,86	8,14	1,49	0,58
60,3*	15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	66,9	2,6	3,5	13,9	19,95	7,73	1,43	0,55
61,3*	21,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	67,9	2,6	3,5	18,2	19,95	12,62	1,44	0,91
61,7*	16,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	68,1	2,6	3,5	14,6	19,35	6,92	1,39	0,50
62,1*	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	68,5	2,6	3,5	14,2	19,35	7,33	1,38	0,52
63,3*	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	69,4	2,6	3,5	14,9	18,44	6,51	1,34	0,47
63,8*	16,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	69,6	2,7	3,5	14,6	18,21	6,10	1,31	0,44
64,7*	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	70,8	2,7	3,5	15,3	19,15	5,70	1,38	0,41

TABELLA 2.8: Dati sperimentali estivi.

ST3 [°C]	ST2 [°C]	[1] SUCTION BP TEMP [°C]	[3] CO <sub>2</sub> OUT GC [°C]	LP [bar]	HP [bar]	MP [bar]	[7] SOTT HP IN [°C]	[8] SOTT HP OUT [°C]	[D] SOTT MP OUT [°C]	[4] SURRE2 HP OUT [°C]	CMP1	CMP2	CMP3	POT, PDC [kWel]	ST4 [°C]	FE01 [m <sup>3</sup> /h]	FE02 [m <sup>3</sup> /h]	ST1 [°C]	Qgc [kW]	Qeva [kW]	COP_Risc [-]	EER [-]
65,3*	16,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	71	2,7	3,5	15	17,90	5,70	1,29	0,41
66,4*	16,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	71,9	2,7	3,5	15,6	17,27	5,29	1,25	0,38
67,8*	17,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	72,9	2,7	3,5	16	16,01	4,88	1,16	0,35

Dati acquisiti dal sistema TelevisNet

Dati acquisiti dal Controllore Eistein

Grandezze Calcolate



## 2.5 Analisi e rielaborazione dei dati sperimentali estivi

L'analisi e la rielaborazione dei dati estivi ha evidenziato che il funzionamento della pompa di calore è regolato dagli stessi parametri che ne determinano il comportamento nel caso invernale. Il basso numero di punti sperimentali per le grandezze rappresentative del comportamento della macchina è conseguenza del mancato funzionamento del sistema di acquisizione TelevisNet della pompa di calore che si è verificato specialmente in corrispondenza di alti valori di ST3 ( $ST3 > 39^{\circ}C$ ).

Le prestazioni della pompa di calore vengono espresse in termini di COP ed EER (Energy Efficiency Ratio) ognuno funzione rispettivamente della potenza termica scambiata al gas cooler e di quella frigorifera scambiata invece all'evaporatore. L'EER è il rapporto tra la potenza frigorifera prodotta dalla macchina e quella la potenza elettrica assorbita dalla stessa per produrre tale effetto utile. Tali grandezze indirette vengono ottenute nella fase di rielaborazione dati, successiva a quella di acquisizione. (Tabella 2.9)

Energy Efficiency Ratio	$EER = Q_{gc}/POT,PDC$	[-]
<b>TABELLA 2.9: Calcolo grandezza indiretta</b>		

Anche nel caso estivo, il parametro che maggiormente influenza il funzionamento della pompa di calore è la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3. Le acquisizioni precedenti vengono infatti rielaborate in funzione di tale parametro in modo tale da estrapolare il comportamento e le prestazioni della macchina su tutto il range di temperature di alimentazione gas cooler acquisite. L'andamento di ciascuna grandezza acquisita viene quindi riportato in funzione della temperatura ST3.

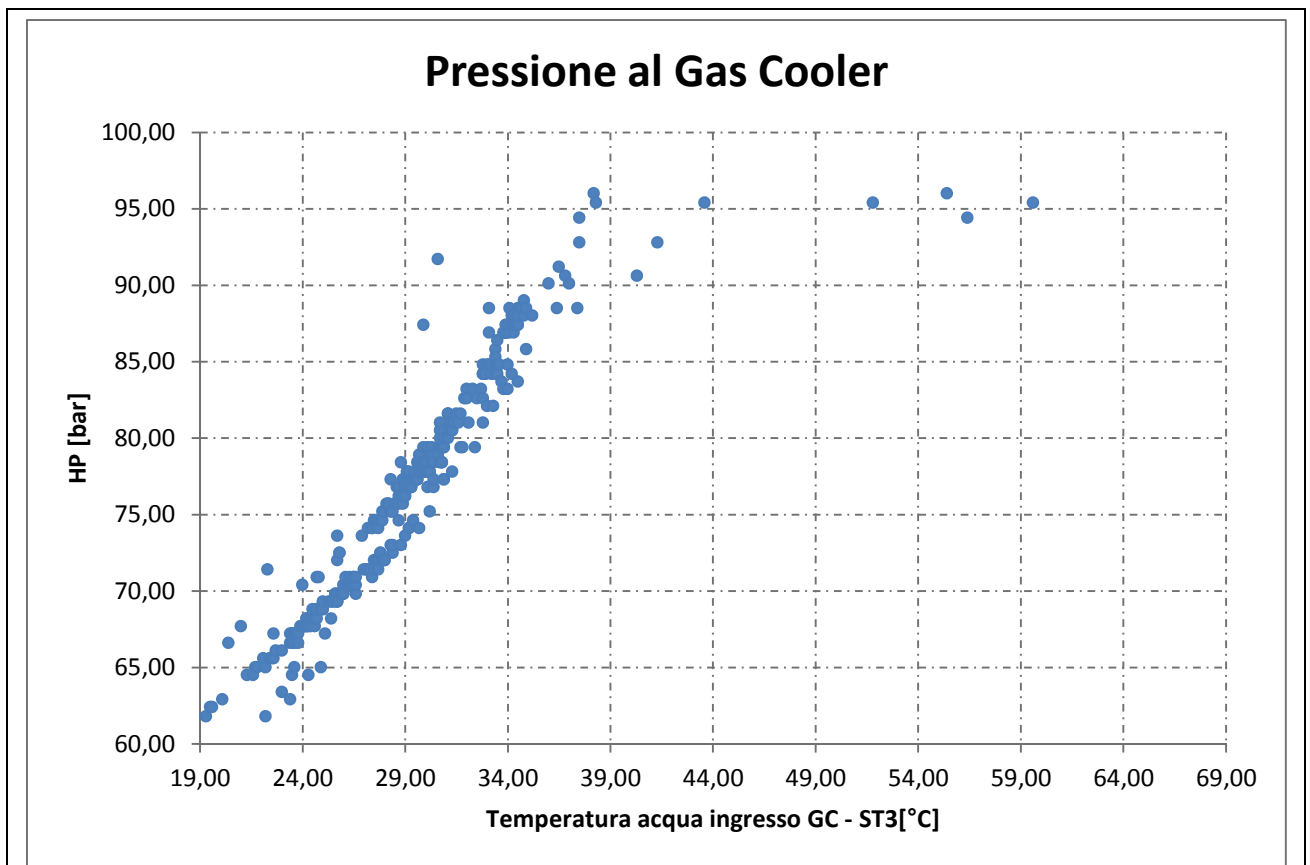
L'andamento di tali grandezze, rappresentativo del comportamento della pompa di calore stessa, è riconducibile alla logica di funzionamento estivo settata per la macchina.

Come nel caso invernale, il compressore sotto inverter si attiva quando ST3 è maggiore di  $35^{\circ}C$  mentre il funzionamento dei due compressori di tipo ON/OFF è regolato dalla temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore ST2. Nel caso estivo, partendo da un alto valore della temperatura dell'accumulo freddo e quindi di ST2, si ha il progressivo spegnimento dei compressori man mano che ci si avvicina al valore di set point impostato

per la temperatura dell'acqua refrigerata prodotta a bordo macchina. Come nel caso invernale, nel funzionamento estivo la macchina lavora fino al raggiungimento dei valori di set point impostati per la temperatura dell'acqua calda e dell'acqua refrigerata prodotte a bordo macchina. In realtà, i set point reali vengono ottenuti variando i set point preimpostati in funzione della temperatura dell'aria esterna. Il set point preimpostato per l'accensione e lo spegnimento è pari a  $ST2 = 9^{\circ}\text{C}$  per il primo compressore e a  $ST2=12^{\circ}\text{C}$  per il secondo compressore. I valori di  $ST2$  per i quali ciascun compressore si accende (e si spegne) sono ottenuti rispettivamente sommando (e sottraendo) al set point preimpostato il valore di isteresi temperatura ON/OFF compressori.

Le grandezze considerate sono: pressione al gas cooler, pressione del circuito ausiliario, temperatura del refrigerante in aspirazione ai compressori di bassa pressione, temperatura del refrigerante in uscita dal gas cooler, potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore, potenza termica scambiata al gas cooler, COP ed EER.

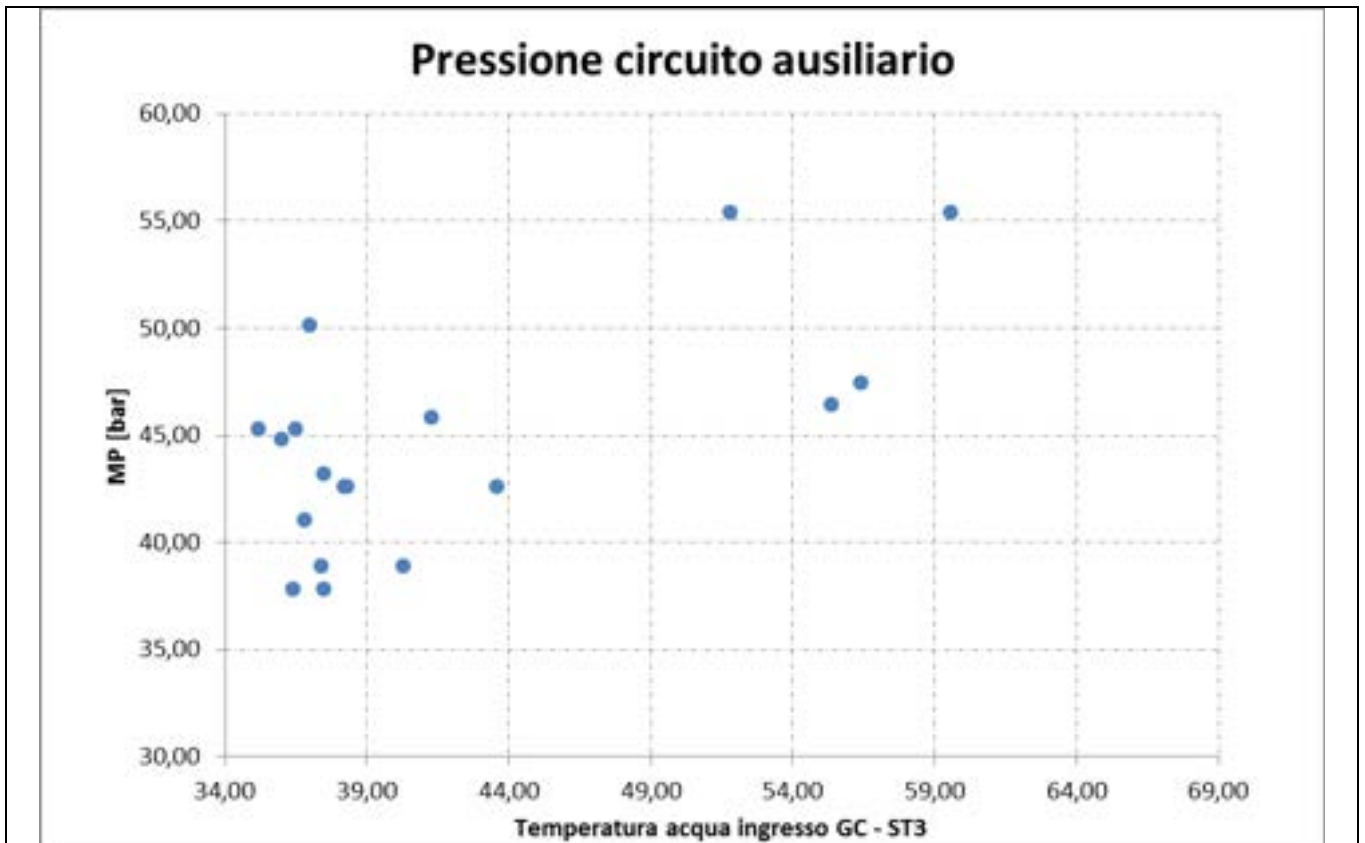
La pressione al gas cooler presenta un andamento prevalentemente crescente al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso in quanto man mano che cresce la temperatura dell'acqua in ingresso deve crescere ugualmente la temperatura della  $\text{CO}_2$  in uscita da quest'ultimo.



**FIGURA 2.13:** Andamento della pressione al gas cooler in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

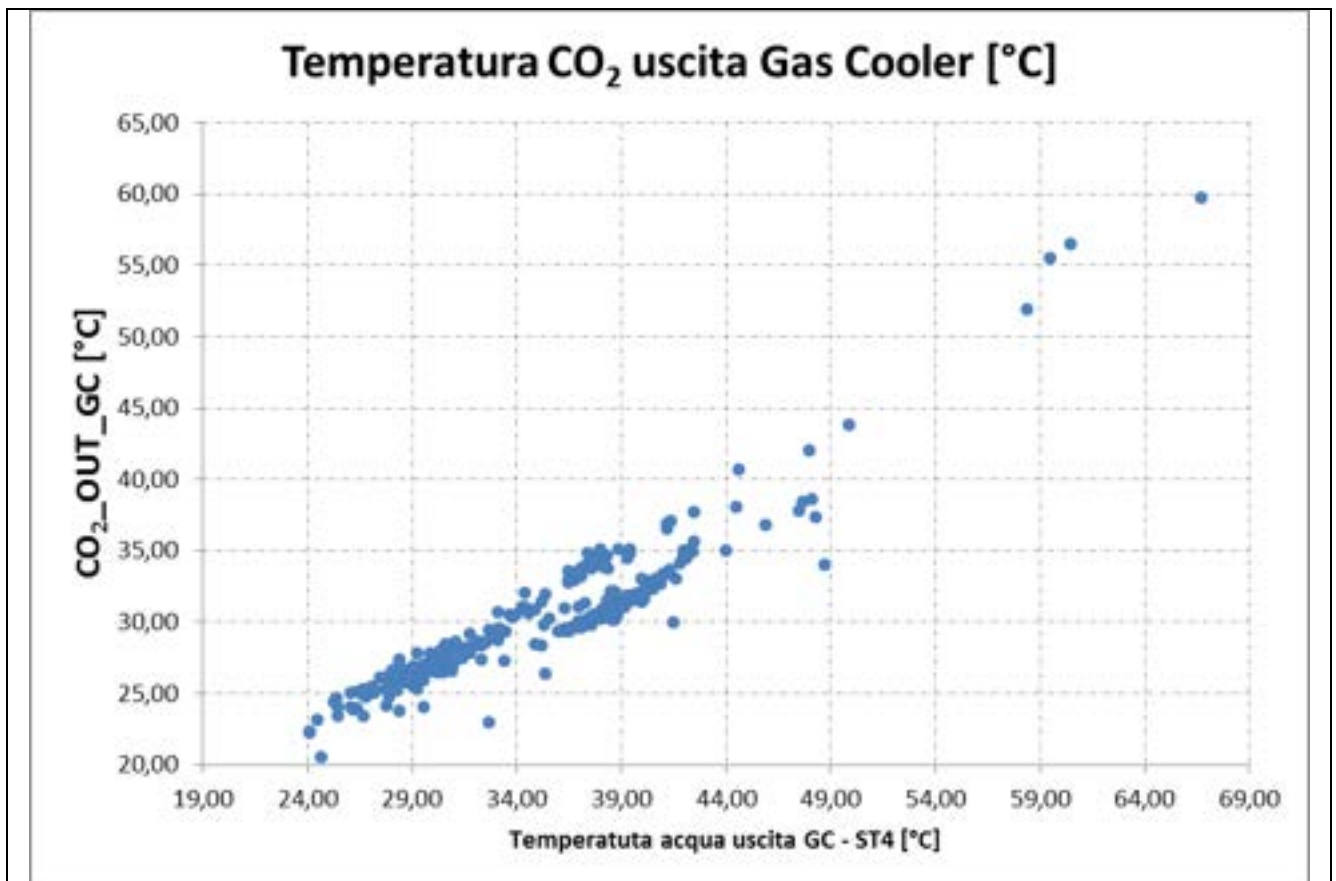
La presenza del circuito ausiliario è responsabile dell'andamento dell'alta pressione per temperature dell'acqua maggiori di 35°C in ingresso al gas cooler (Figura 2.13). Infatti, come è stato già evidenziato nell'analisi dei dati invernali, dopo un certo valore di pressione, la pressione al gas cooler si attesta attorno al valore di 95-96 [bar] senza aumentare ulteriormente nonostante la temperatura ST3 aumenti.

L'andamento della media pressione è indagabile esclusivamente per temperature ST3 maggiori di 35°C, in quanto al di sotto di tale valore il circuito ausiliario risulta essere inesistente e quindi il terzo compressore è spento (Figura 2.14). Il basso numero di punti sperimentali riportati per la MP è conseguenza del mancato funzionamento del sistema di acquisizione TelevisNet della pompa di calore che si è verificato specialmente in corrispondenza di alti valori di ST3. In seguito al verificarsi di tale anomalia nel sistema di acquisizione, l'andamento della media pressione è meglio descritto nel caso invernale.



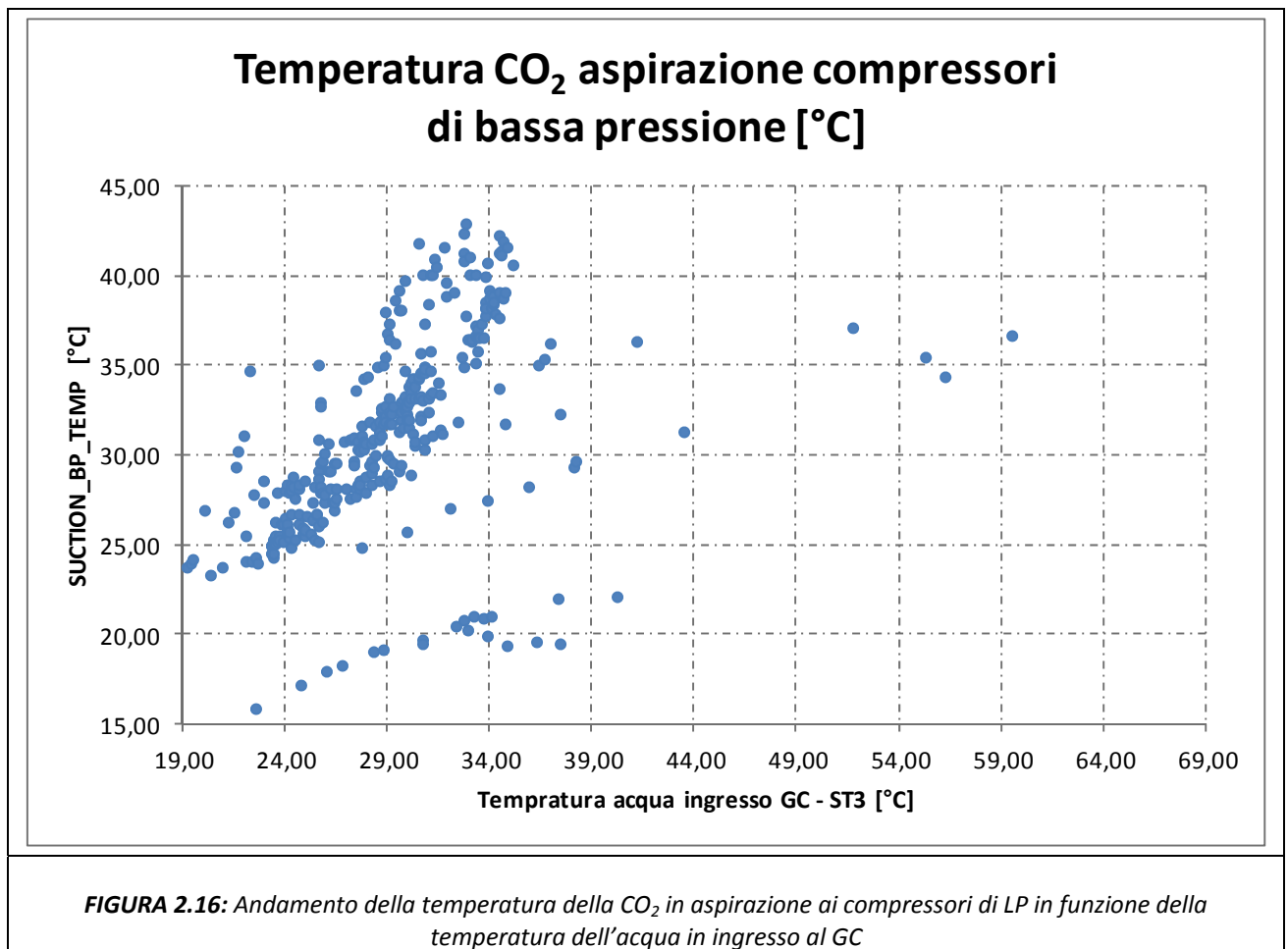
**FIGURA 2.14:** Andamento della pressione del circuito ausiliario in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

Come nel caso invernale, l'andamento della temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler in funzione della temperatura dell'acqua in uscita sempre da tale scambiatore (ST4) è lineare con andamento crescente (Figura 2.15). Tale andamento lineare testimonia la bontà dello scambio termico tra acqua e anidride carbonica anche nel funzionamento estivo.



**FIGURA 2.15:** Andamento della temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal Gas Cooler in funzione della temperatura dell'acqua in uscita dal Gas Cooler

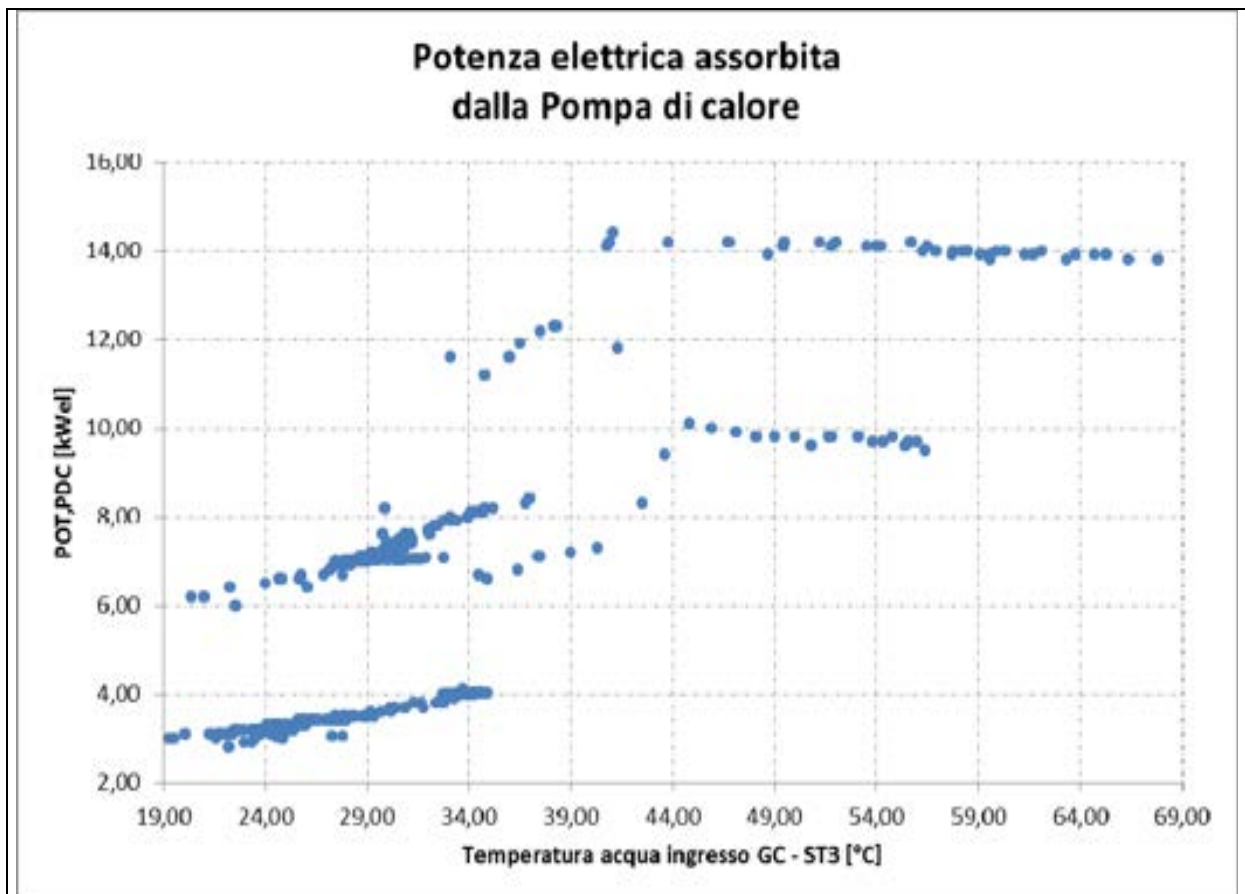
La temperatura del refrigerante in aspirazione ai due compressori di bassa pressione aumenta all'aumentare della temperatura ST3 e quindi della pressione al gas cooler in maniera simile a quanto accade nel funzionamento invernale (Figura 2.16).



La potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore dipende dal numero di compressori in funzionamento a sua volta stabilito dalla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3 e dalla temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore ST2 (Figura 2.17). Quando funzionano esclusivamente i due compressori di tipo ON/OFF si ha un andamento crescente della potenza elettrica assorbita al crescere della temperatura dell'acqua in ingresso.

L'attivazione del compressore sotto inverter, quando ST3 raggiunge i 35°C, determina un brusco aumento della potenza elettrica assorbita dalla macchina rintracciabile sul grafico qui riportato.

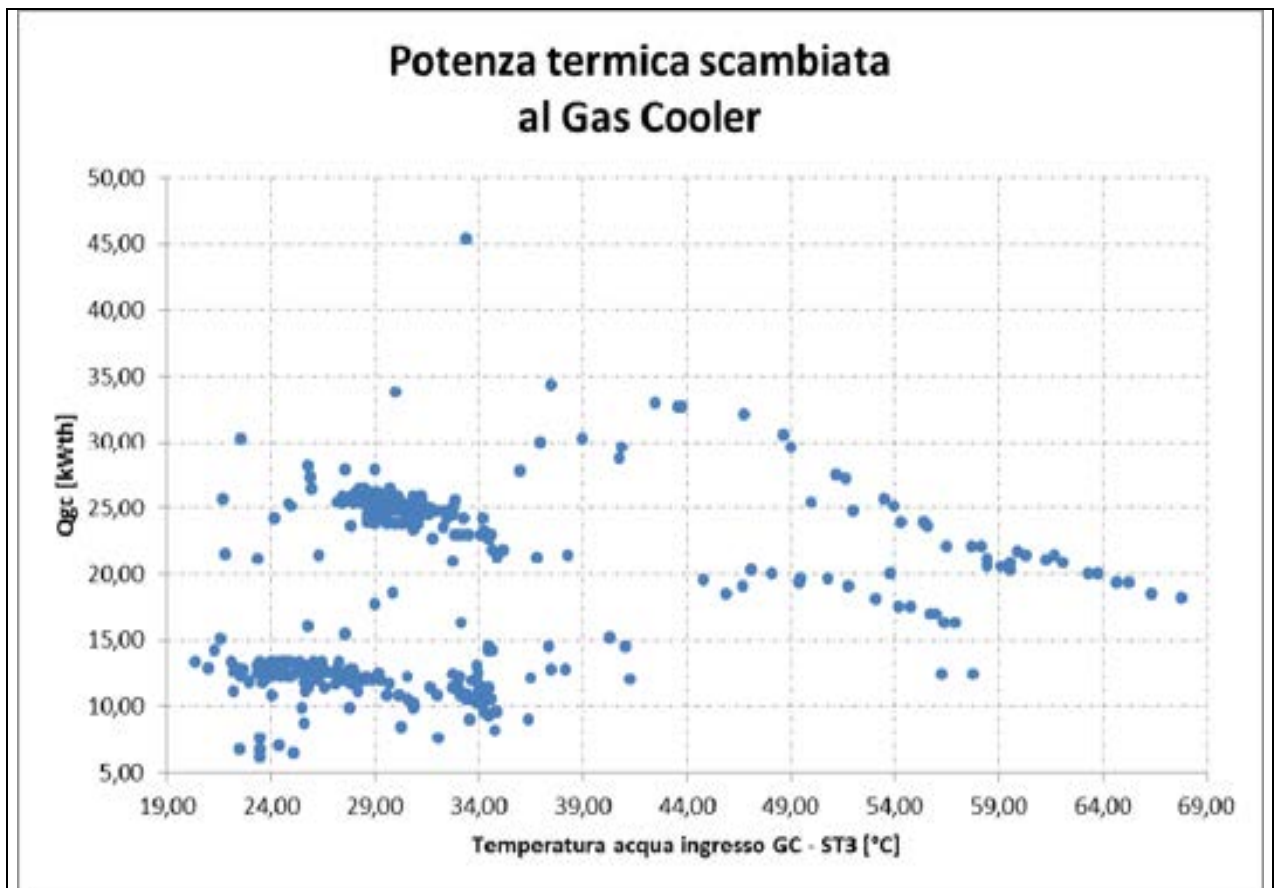
In particolare, non sempre ad una data temperatura ST3 corrisponde un unico valore della potenza elettrica assorbita dalla macchina. Questo accade a causa della logica di funzionamento interna alla macchina che regola il numero di compressori funzionanti: oltre a ST3, il valore di ST2 stabilisce infatti il funzionamento dei due compressori di tipo ON/OFF.



**FIGURA 2.17:** Andamento della potenza elettrica assorbita dalla Pompa di calore in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

La potenza termica scambiata al gas cooler dipende dalla pressione, quindi dal valore di temperatura del fluido refrigerante in uscita dal gas cooler, e dal numero di compressori funzionanti (Figura 2.18). La temperatura ST3 influenza la potenza termica scambiata al gas cooler indipendente dalla modalità di funzionamento della pompa di calore (caso invernale o caso estivo).

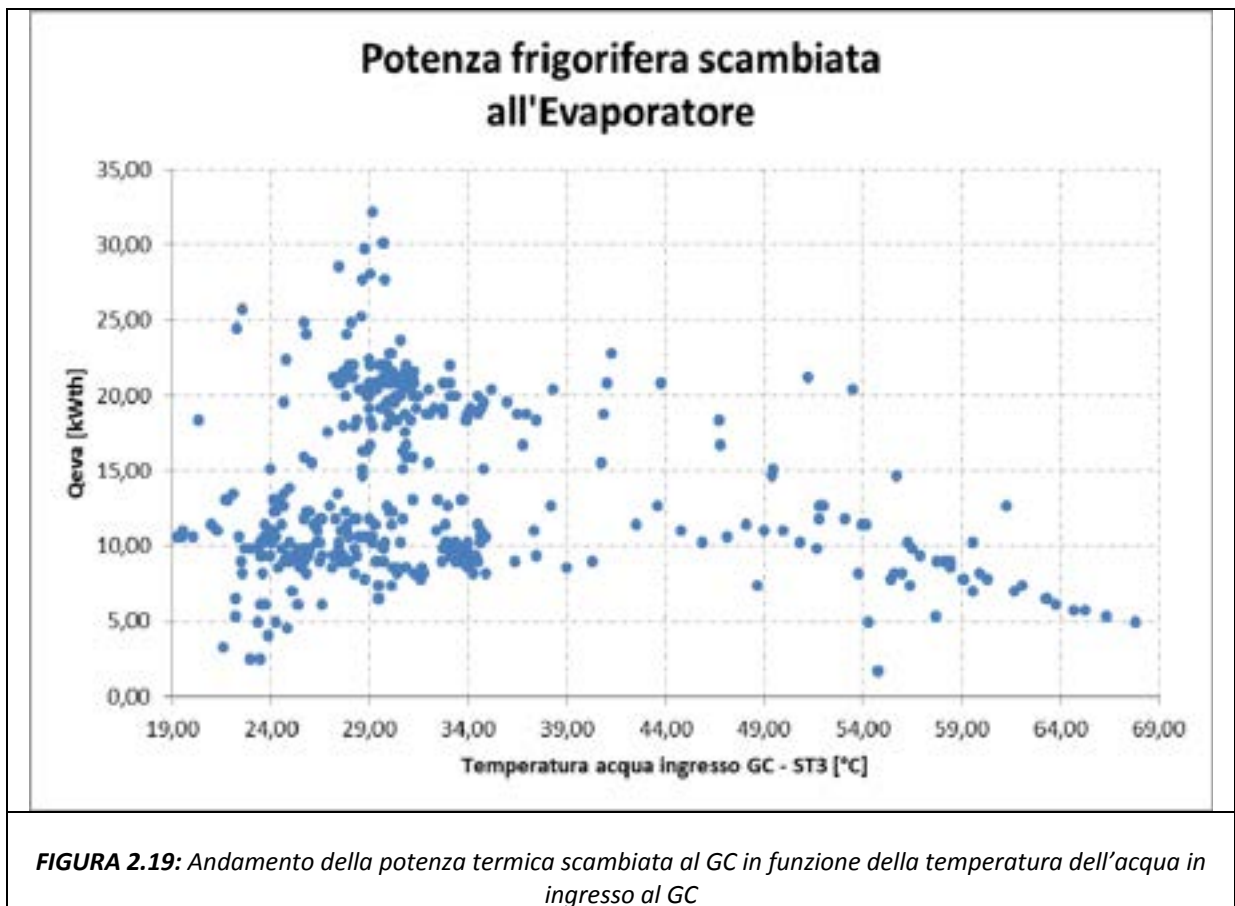
A seconda del valore assunto da ST2, funzionano uno o due compressori di tipo ON/OFF. Quando funzionano entrambi i compressori di tipo ON/OFF, a parità di ST3, la potenza termica scambiata al gas cooler è maggiore rispetto al caso in cui funziona un solo compressore di tipo ON/OFF a seguito soprattutto di una maggiore portata di refrigerante elaborata. L'attivazione del circuito di media pressione ( $ST3 > 35^{\circ}C$ ) determina in un primo momento un aumento della potenza termica scambiata al gas cooler. Per valori alti di ST3 (maggiori di  $49^{\circ}C$ ), tale potenza presenta un andamento decrescente a seguito del conseguente aumento di ST4.



**FIGURA 2.18:** Andamento della potenza termica scambiata al GC in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

La potenza frigorifera scambiata all'evaporatore dipende dalla pressione, quindi dal valore di temperatura del fluido refrigerante in uscita dal gas cooler, e dal numero di compressori funzionanti (Figura 2.19). Quando funzionano entrambi i compressori di tipo ON/OFF, a parità di ST3, la potenza è maggiore rispetto al caso in cui funziona un solo compressore di tipo ON/OFF a seguito soprattutto di una maggiore portata di refrigerante elaborata. L'attivazione del circuito di media pressione ( $ST3 > 35^{\circ}C$ ) determina in un primo momento un aumento della potenza frigorifera. Per valori alti di ST3 (maggiori di circa  $44^{\circ}C$ ), tale potenza presenta un andamento decrescente a seguito del conseguente aumento di ST4. Quando la temperatura della  $CO_2$  in uscita dal gas cooler aumenta, a parità di pressioni, diminuisce l'effetto utile frigorifero del ciclo che si sposta verso trasla verso l'alto e si restringe nel piano pressione – entalpia.





Dopo aver analizzato le grandezze che caratterizzano il funzionamento della pompa di calore, è necessario indagare l'andamento del COP e dell'EER per definire le prestazioni della macchina.

Un'analisi preliminare dei dati sperimentali ha evidenziato che, anche in funzionamento estivo, le prestazioni della macchina sono influenzate dalla temperatura ST3. Da tale analisi non risulta infatti alcuna stretta dipendenza del COP e dell'EER dalla temperatura ST2.

Come le altre grandezze, anche il COP viene rappresentato in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler (ST3). Il COP è stato rilevato su un range di temperatura dell'acqua di alimentazione gas cooler ST3 compreso tra 19,3 °C e 67,8°C (Figura 2.20).

La parte del grafico corrispondente a temperature ST3 minori di 39°C è relativa a prove in cui l'energia termica prodotta dalla pompa di calore è stata dissipata attraverso il dry cooler.

Per valori di ST3 minori di 39°C, il COP presenta un andamento decrescente in quanto la potenza elettrica assorbita dalla macchina ha un andamento crescente con pendenza maggiore rispetto a quella della potenza termica scambiata al gas cooler.

I punti sperimentali ottenuti per ST3 maggiore di 39°C sono relativi a prove effettuate secondo una precisa logica: è stata imposta l'esclusione del dry cooler e la macchina è stata

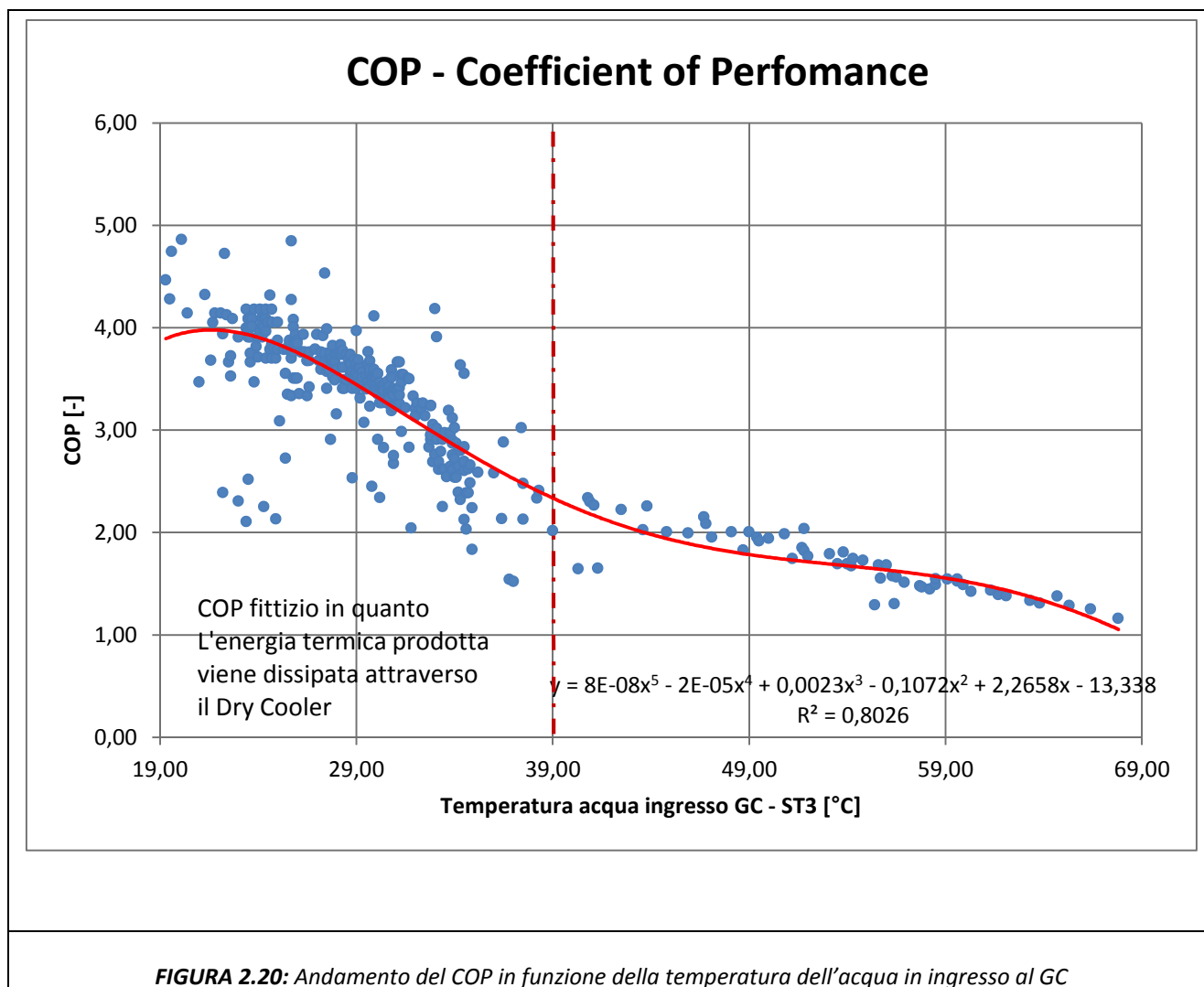
avviata quando sia il serbatoio di accumulo caldo che quello freddo erano opportunamente scarichi ( $ST5 \approx 36^{\circ}\text{C}$  e  $STTEF \approx 20^{\circ}\text{C}$ ). In tale configurazione l'energia termica e frigorifera prodotta dalla macchina non vengono dissipate ma l'acqua calda e refrigerata così prodotte vengono stoccate nei rispettivi serbatoi di accumulo. Inoltre per aumentare la durata della prova, sono stati mantenuti in funzione i vetilconvettori posti in ambiente e l'UTA. I vetilconvettori vengono alimentati attraverso l'acqua refrigerata e stoccata nell'accumulo freddo mentre l'UTA attinge al serbatoio di accumulo caldo.

Oltre ai punti sperimentali, il grafico del COP presenta una curva di approssimazione dei dati. La curva scelta per l'approssimazione è un polinomio di quinto grado la cui equazione e coefficiente di correlazione vengono riportati direttamente sul grafico stesso.

Il COP oscilla globalmente tra un valore minimo di circa 1,16 ed un massimo di 4,86 attestandosi a valori maggiori di 2 per temperature inferiori a  $35^{\circ}\text{C}$  e a valori inferiori a 2 per temperature  $ST3$  maggiori di  $49^{\circ}\text{C}$ . La macchina raggiunge il COP massimo di 4,86 per una temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler di  $20,1^{\circ}\text{C}$ , minore di  $35^{\circ}\text{C}$ .

In particolare, il COP decresce con pendenza minore per  $ST3$  pari a  $40^{\circ}\text{C}$  in quanto vengono sfruttati gli effetti positivi dell'attivazione del circuito di media pressione ovvero il raffreddamento della  $\text{CO}_2$  in uscita dal gas cooler e l'ulteriore contributo in termini di portata fornito dal terzo compressore.

È opportuno ribadire che il COP ottenuto per  $ST3$  minore di  $39^{\circ}\text{C}$  è un COP fittizio in quanto l'energia termica prodotta dalla macchina è stata dissipata attraverso il dry cooler. Tale dissipazione è invece assente per le prove corrispondenti a  $ST3$  maggiore di  $39^{\circ}\text{C}$ .



L'EER è il rapporto tra l'effetto frigorifero utile prodotto, cioè la potenza frigorifera scambiata all'evaporatore, e la potenza elettrica assorbita dalla macchina necessaria per produrre tale effetto utile. Di conseguenza l'andamento dell'EER dipende dall'andamento della potenza frigorifera scambiata all'evaporatore e di quella elettrica assorbita dalla macchina.

Come le altre grandezze, anche l'EER viene rappresentato in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler (ST3). L'EER è stato rilevato su un range di temperatura dell'acqua di alimentazione gas cooler ST3 compreso tra 19,3 °C e 67,8°C (Figura 2.21).

Così come per il COP, i punti sperimentali per temperature ST3 minori di 39°C sono relativi a prove in cui l'energia termica prodotta dalla pompa di calore è stata dissipata attraverso il dry cooler.

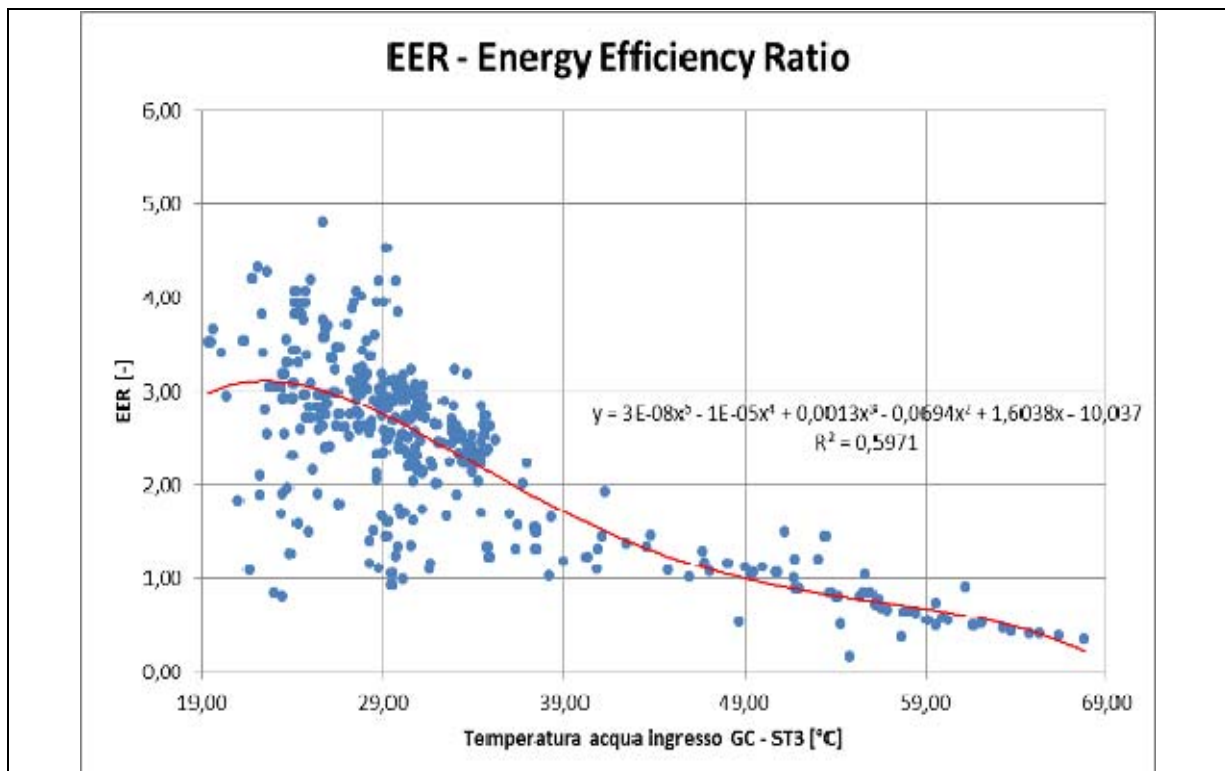
Per valori di ST3 minori di 39°C, l'EER presenta un andamento decrescente in quanto la potenza elettrica assorbita dalla macchina ha un andamento crescente con pendenza maggiore rispetto a quella della potenza frigorifera scambiata all'evaporatore.

I punti per ST3 maggiore di 39°C sono relativi a prove effettuate secondo la particolare logica già precedentemente illustrata nel caso del COP in funzionamento estivo. In tali prove i vetilconvettori vengono alimentati attraverso l'acqua dell'accumulo freddo mentre l'UTA attinge dal serbatoio di accumulo caldo.

Oltre ai punti sperimentali, il grafico dell'EER presenta una curva di approssimazione dei dati. La curva scelta per l'approssimazione è un polinomio di quinto grado la cui equazione e coefficiente di correlazione vengono riportati direttamente sul grafico stesso.

L'EER oscilla globalmente tra un valore minimo di 0,17 ed un massimo di 4,81 per una temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler di 25,7°C, minore di 35°C.

In particolare, l'EER decresce con pendenza minore a partire da ST3 pari a circa 40°C in quanto vengono sfruttati gli effetti positivi dell'attivazione del circuito di media pressione ovvero il raffreddamento della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler e l'ulteriore contributo in termini di portata fornito dal terzo compressore.

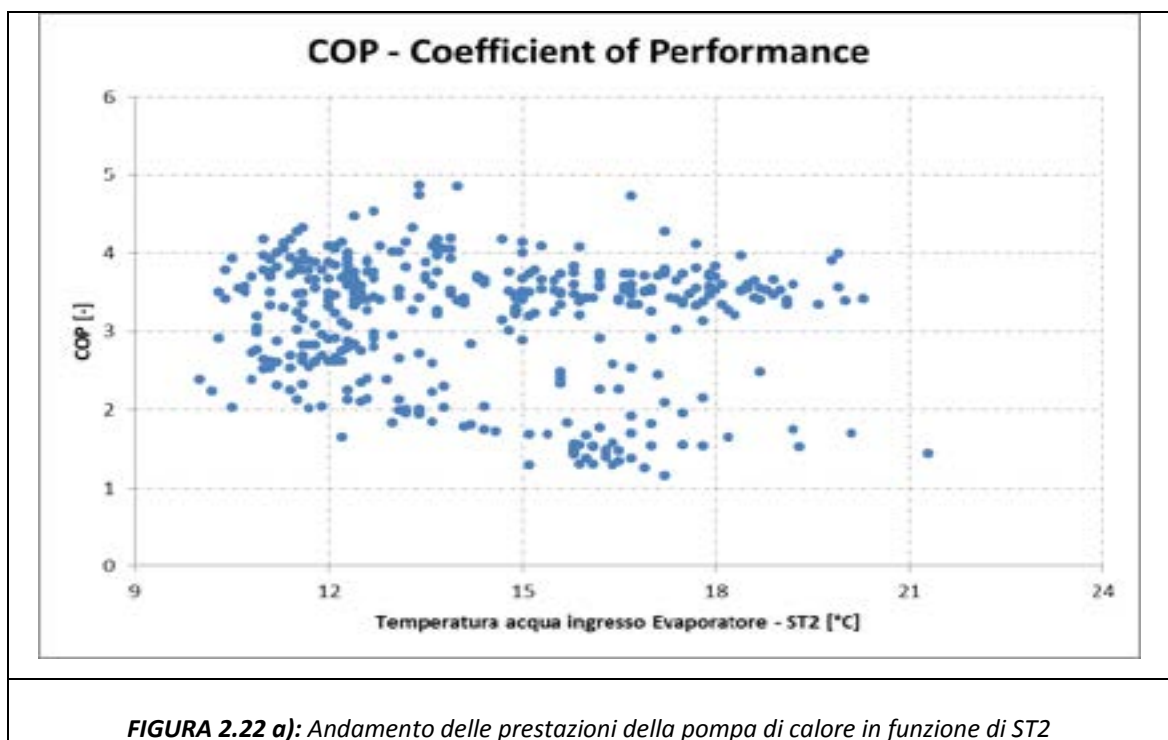


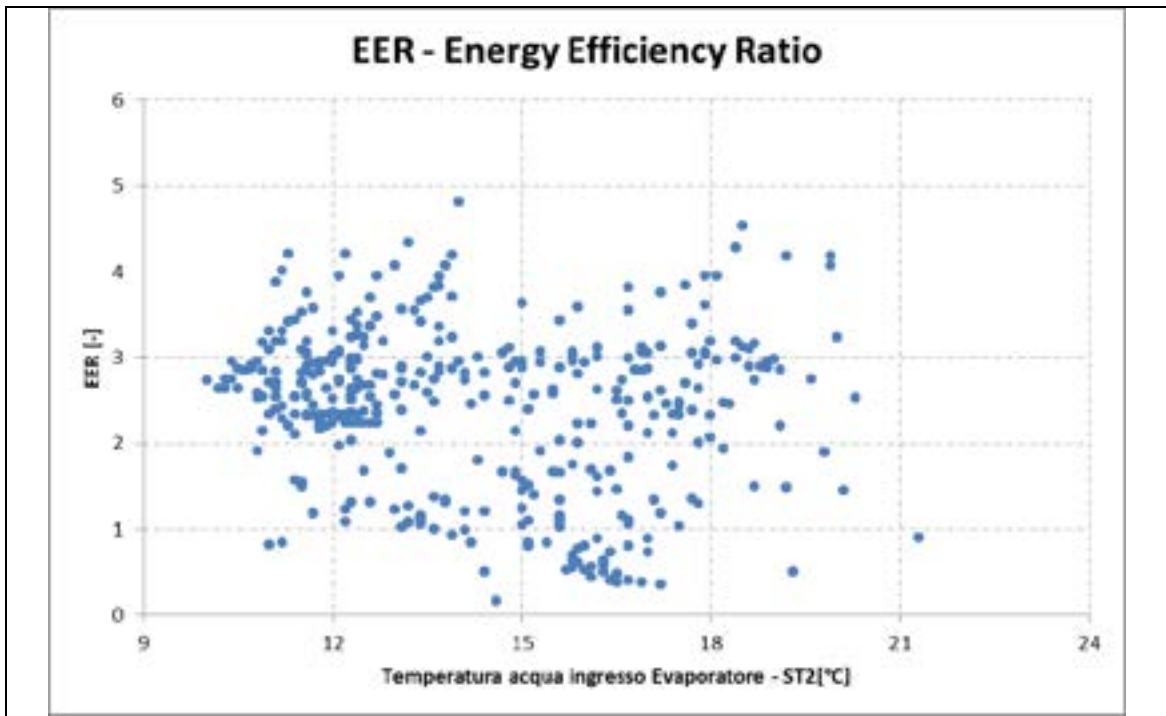
**FIGURA 2.21:** Andamento dell'EER in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC

Le prestazioni della pompa di calore, riassunte nel COP e nell'EER, hanno mostrato una forte dipendenza dalla temperatura dell'acqua di alimentazione al gas cooler ST3, a differenza di quanto accade per la temperatura ST2.

La temperatura ST3 ha, infatti, un'importanza maggiore rispetto alla temperatura ST2 in quanto essa determina le caratteristiche del ciclo termodinamico svolto dall'anidride carbonica. Sia in inverno che in estate, il valore che ST3 assume determina innanzitutto i livelli di pressione ai quali il ciclo avviene e si ripercuote inevitabilmente anche sulle temperature assunte dal refrigerante all'ingresso e all'uscita dei vari componenti. Lo scambio termico all'evaporatore e al gas cooler, nonché il processo di laminazione e il lavoro di compressione sono principalmente determinati dai valori assunti dall'alta e dalla bassa pressione.

La dipendenza del funzionamento della pompa di calore dalla temperatura ST2 è riassunta nei grafici mostrano l'andamento del COP e dell'EER in funzione di ST2 stessa (Figura 2.22).





**FIGURA 2.22 b):** Andamento delle prestazioni della pompa di calore in funzione di ST2

### **3 MODELLO MATEMATICO DI SIMULAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE PROTOTIPO ENEA**

#### **3.1 Introduzione al modello di simulazione**

Il modello matematico per la simulazione della pompa di calore prototipo Enea è stato realizzato dal dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica applicata e condizionamenti ambientali (DETEC) dell'Università di Napoli Federico II.

L'algoritmo che simula il funzionamento della pompa di calore prototipo Enea al variare delle condizioni al contorno in cui si trova a lavorare la macchina, è stato realizzato in ambiente Matlab.

Per la creazione del modello matematico dell'intera macchina è stato necessario realizzare la calibrazione e la modellazione di ogni singolo componente a partire da dati riportati sui cataloghi, nonché da parametri geometrici operativi recuperati direttamente dal costruttore della pompa di calore e successivamente procedere al loro reciproco accoppiamento al fine di determinare una serie di possibili punti di funzionamento della macchina.

È stata effettuata la calibrazione dei seguenti componenti:

- compressori;
- valvola di laminazione principale ICMTS;
- valvola di laminazione secondaria JKV.

Il modello matematico richiede in input i seguenti valori:

- temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler;
- temperatura dell'acqua in uscita al gas cooler;
- temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore;
- temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore;
- potenza scambiata all'evaporatore.

In base alla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler il modello si articola in due parti di cui una relativa al solo funzionamento del circuito principale e l'altra al funzionamento con circuito ausiliario. Una volta determinato il comportamento di tutti i componenti e il reciproco accoppiamento, il programma termina quando la potenza termica scambiata al Gas cooler calcolata secondo l'equazione di progetto di tale scambiatore è uguale a quella calcolata secondo l'equazione di bilancio energetico di tale scambiatore.

Nella modellazione della macchina non è stato considerato il separatore di liquido e la parzializzazione della velocità del terzo compressore realizzata dall'inverter, ipotizzando di fatto una velocità costante per il terzo compressore.



## 3.2 Calibrazione e modellazione dei componenti

### 3.2.1 Compressori

Il sistema di compressione prevede il funzionamento di tre compressori in parallelo di cui due di tipo on/off operanti sul ramo di alta pressione e bassa pressione ed il restante dotato di inverter operante sul ramo di media e alta pressione.

#### CALIBRAZIONE COMPRESSORI

La calibrazione è stata effettuata a partire dalle seguenti ipotesi iniziali:

- velocità di rotazione di tutti e tre i compressori pari a 1450 rpm;
- rendimento isoentropico della trasformazione [ $\eta_{iso}$ ];

La calibrazione dei compressori è stata fatta a partire dai dati di catalogo della casa costruttrice:

- resa frigorifera;
- potenza elettrica assorbita;

Tali grandezze sono relative ad un ciclo frigorifero base di cui sono fissati sia il  $\Delta T$  di surriscaldamento sia quello di sottoraffreddamento, in funzione della temperatura di evaporazione, della temperatura di uscita dal Gas cooler della CO<sub>2</sub>, della pressione di aspirazione e della pressione di mandata.

Attraverso queste informazioni la procedura di calibrazione prevede quindi la determinazione di:

- punti di un ciclo base;
- portata massica elaborata dal compressore nelle condizioni di catalogo;
- cilindrata [C];
- volume nocivo [Vn].

Queste grandezze sono di fondamentale importanza in quanto da esse dipende l'andamento della portata elaborata dal compressore. Questa dipendenza ovviamente non è limitata alle sole caratteristiche geometriche ma anche dal tipo di fluido frigorifero impiegato, dalle condizioni in aspirazione e mandata, dal surriscaldamento all'aspirazione e dal rendimento isoentropico già accennato in precedenza.

Per tutta la fase di calibrazione del compressore, nonché la procedura che ha portato alla costruzione di un modello che restituisca le portate massiche elaborate al variare delle condizioni operative si sono considerate le seguenti ipotesi:

- regime stazionario;
- trascurabilità dello scambio termico con l'ambiente circostante.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento del compressore, ed il calcolo della portata massica da esso elaborata.

$$\dot{m}_{c,in} - \dot{m}_{c,out} = 0 \quad (1)$$

$$h_1 + \frac{(h_{2,iso} - h_1)}{\eta_{iso}} = h_2 \quad (2)$$

$$\dot{m}_c h_2 - \dot{m}_c h_1 = Lc \quad (3)$$

$$\dot{m}_c = \rho_1 C \frac{n}{60} \left[ 1 - \frac{V_n}{C} (\rho_2 / \rho_1 - 1) \right] \quad (4)$$

$$\eta_m = \frac{Lc}{P_{s\_cat}} \quad (5)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

- $\dot{m}_{c,in}$  = portata massica di refrigerante aspirata [Kg/s];
- $\dot{m}_{c,out}$  = portata massica di refrigerante alla mandata [Kg/s];
- $\dot{m}_c$  = portata massica di refrigerante elaborata dal compressore [Kg/s];
- $h_1$  = entalpia specifica del refrigerante in aspirazione [J/Kg];
- $h_2$  = entalpia specifica del refrigerante alla mandata [J/Kg];
- $h_{2,iso}$  = entalpia specifica del refrigerante alla mandata in caso di trasformazione isoentropica [J/Kg];
- $\eta_{iso}$  = rendimento isoentropico del compressore;
- $Lc$  = lavoro reale del compressore [W];
- $\rho_1$  = densità del fluido in aspirazione [Kg/m<sup>3</sup>];

- $\rho_2$  = densità del fluido alla mandata [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ];
- $n$  = velocità di rotazione del compressore [rpm];
- $P_{s\_cat}$  = potenza elettrica assorbita dal compressore da catalogo [W];
- $\eta_m$  = rendimento meccanico del compressore.

Tutte le grandezze termofluidodinamiche presenti all'interno delle equazioni sono state calcolate mediante l'ausilio del software REFPROP7.0 a partire da due grandezze indipendenti. Nello specifico  $[h_1]$  e  $[\rho_1]$ , rispettivamente l'entalpia specifica e la densità del refrigerante in aspirazione al compressore sono state calcolate a partire dalla pressione all'evaporatore e dalla temperatura del fluido in aspirazione. Questa a sua volta è stata calcolata a partire dalla temperatura di saturazione alla pressione di evaporazione più il valore di surriscaldamento.  $[h_{2\_iso}]$  è l'entalpia specifica del refrigerante alla mandata del compressore in caso di trasformazione isoentropica ed è stata calcolata a partire dalla pressione al Gas cooler e dal valore di entropia del fluido alla aspirazione.  $[\rho_2]$  è la densità del fluido refrigerante alla mandata calcolata a partire dalla pressione al Gas cooler e dal valore di entalpia specifico calcolato a sua volta con la (2).

Nello specifico si possono considerare gli andamenti della resa frigorifera e della potenza elettrica che otteniamo dalla calibrazione e confrontarle con quelle da catalogo nelle stesse condizioni di funzionamento (figura 3.1-3.2).

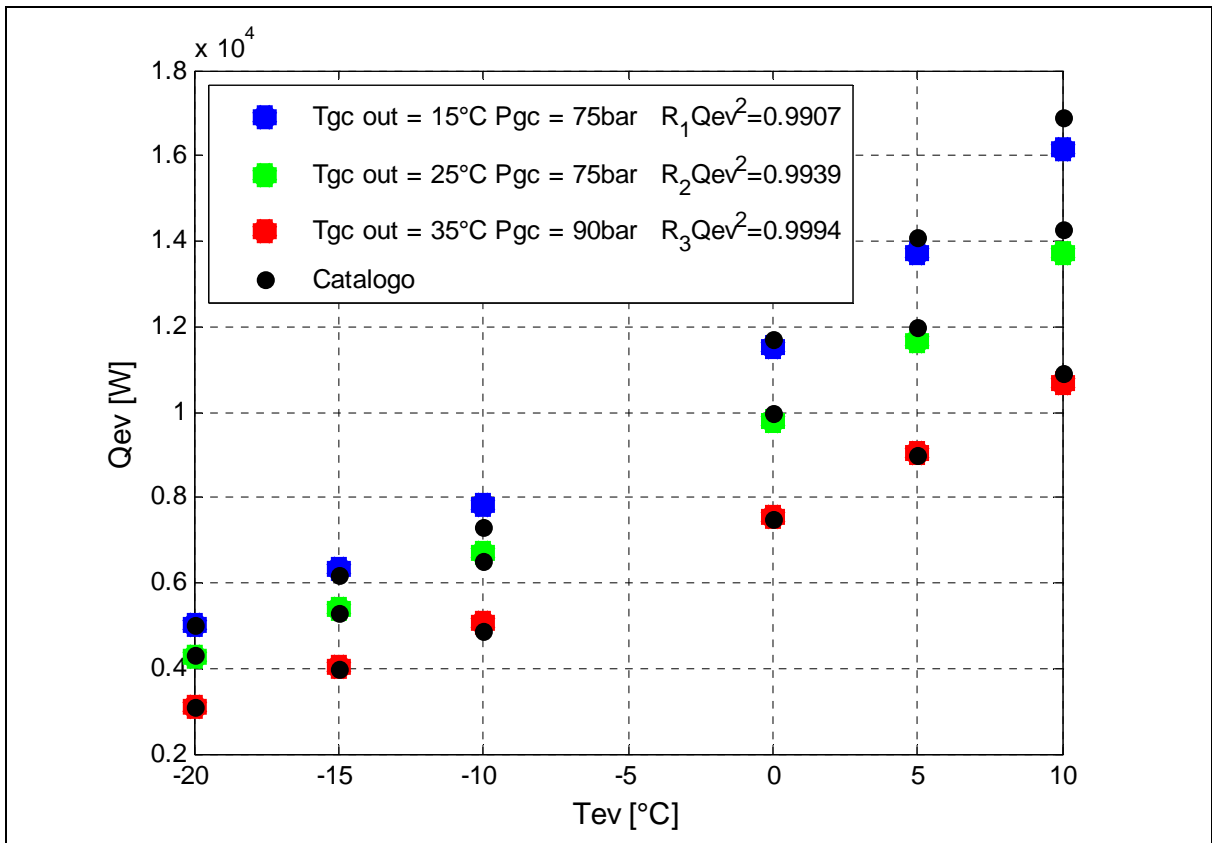


FIGURA 3.1 -Confronto dati di catalogo con quelli del modello con relativo  $R^2$  sulle rese frigorifere

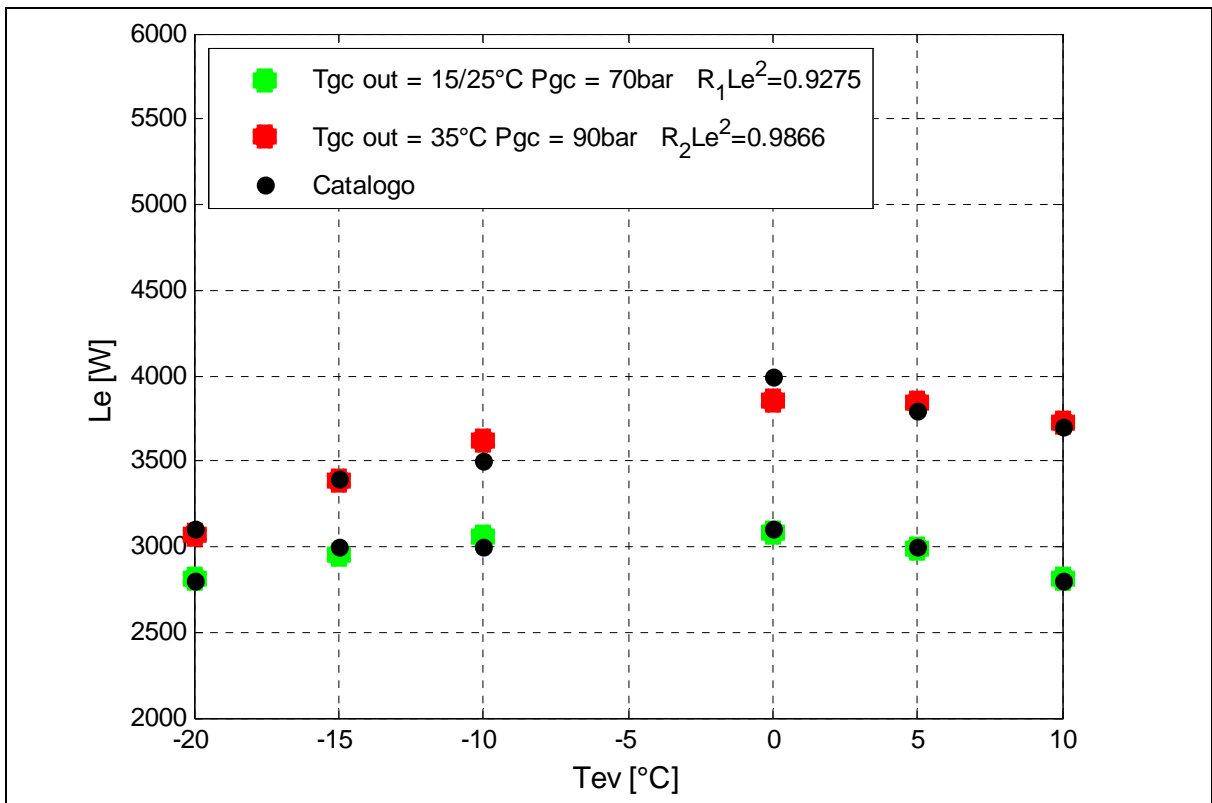


FIGURA 3.2: Confronto dati di catalogo con quelli del modello con relativo  $R^2$  sulla potenza elettrica

### 3.2.2 Valvola di laminazione principale ICMTS

L'attuatore della valvola è governato da un controllore elettronico il quale ne modifica l'apertura in funzione di due soli parametri di input: la pressione al Gas cooler e la temperatura di uscita della CO<sub>2</sub> dal Gas Cooler. Il controllore regola in continuità l'apertura della valvola stabilizzando il livello di pressione alla mandata e facendo tendere sempre la pressione al valore per il quale il COP è massimo.

#### CALIBRAZIONE VALVOLA PRINCIPALE

La logica di funzionamento del controllore, e quindi di apertura e chiusura della valvola, è retta da una propria curva caratteristica, secondo la quale viene stabilito il legame tra la pressione al Gas cooler e la temperatura della CO<sub>2</sub> all'uscita da quest'ultimo. La calibrazione della valvola principale è stata fatta attraverso il catalogo del controllore fornito dal costruttore. Grazie a questo, si è costruita la curva di funzionamento della valvola attraverso una polinomiale del terzo ordine all'interno della quale i rispettivi coefficienti rimangono costanti mentre varia la pressione al Gas cooler. In questo modo si può determinare in ogni condizione operativa la temperatura della CO<sub>2</sub> all'uscita del Gas cooler a partire dal valore di pressione al Gas cooler. Tutta la fase di calibrazione è fatta ipotizzando un regime stazionario di funzionamento.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento della valvola, nonché quella che ha portato alla costruzione della curva caratteristica.

$$\dot{m}_{tot\_in} - \dot{m}_{tot\_out} = 0 \quad (6)$$

$$\dot{m}_{tot} h_{out\_gc} - \dot{m}_{tot} h_{in\_ev} = 0 \quad (7)$$

$$P_1 P_{gc}^3 + P_2 P_{gc}^2 + P_3 P_{gc} + P_4 = T_{out\_gc} \quad (8)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

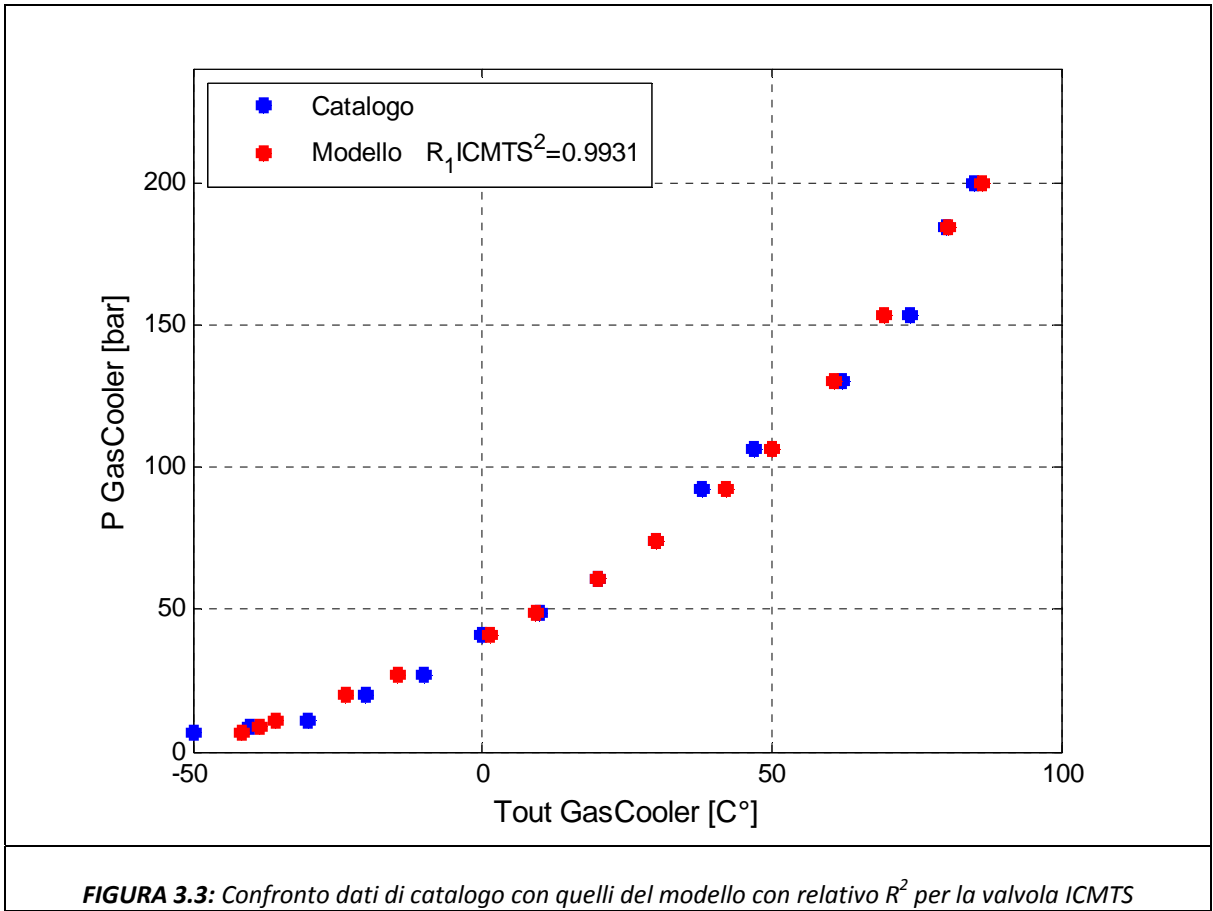
- $\dot{m}_{tot\_in}$  = portata massica in ingresso alla valvola [Kg/s];
- $\dot{m}_{tot\_out}$  = portata massica in uscita dalla valvola [Kg/s];

- $\dot{m}_{tot}$  = portata massica totale che evolve all'interno della valvola [Kg/s];
- $h_{out\_gc}$  = entalpia specifica del fluido in uscita dal Gas cooler cioè alla pressione del Gas cooler [J/Kg];
- $h_{in\_ev}$  = entalpia specifica del fluido in ingresso all'evaporatore cioè alla pressione di evaporazione [J/Kg];
- $T_{out\_gc}$  = temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal Gas cooler [K];
- $P_1 - P_2 - P_3 - P_4$  = coefficienti della polinomiale.

All'interno delle equazioni il termine  $[\dot{m}_{tot}]$ , corrispondente alla portata massica totale evolvente all'interno della valvola che sarà uguale a tutta quella elaborata all'interno del Gas cooler nel caso di funzionamento con due compressori, mentre diminuita del valore di portata che arriva al ramo di media pressione quando è in funzione anche il terzo compressore.

$[h_{out\_gc}]$  è il valore dell'entalpia specifica del fluido all'uscita dal Gas cooler calcolato mediante l'ausilio del software REFPROP7.0 a partire dalla pressione al gas cooler e dal valore di temperatura connesso a quest'ultima.

Infine  $[P_1 - P_2 - P_3 - P_4]$  sono i coefficienti della polinomiale calcolati attraverso la funzione "polyfit" di Matlab a partire dai dati di catalogo. Di seguito si possono considerare gli andamenti della temperatura all'uscita dal Gas cooler al variare della pressione che otteniamo dalla calibrazione e confrontarlo con quello riportato nel catalogo (figura 3.3).



### **3.2.3 Valvola di laminazione secondaria JKV**

La valvola termostatica presente in questa applicazione è caratterizzata da una particolare struttura interna attraverso la quale si riesce a determinare l'apertura e la chiusura della sezione di passaggio per il refrigerante. Con la rotazione di un magnete eccitato da un segnale elettrico, si genera un movimento verticale dell'otturatore il quale garantisce l'opportuna variazione di sezione. Il segnale elettrico che arriva alla valvola, arriva sotto forma di impulsi regolati in maniera standard ed espressi come impulsi al secondo. Il numero di impulsi determina il movimento a tratti dell'otturatore e la variazione della sezione di passaggio per il refrigerante.

Al fine di analizzare il funzionamento della valvola termostatica, lo scambiatore rigenerativo e quello di sottoraffreddamento disposti in serie alla mandata della valvola, possono essere considerati come un unico scambiatore che rappresenta "l'evaporatore" del circuito di media pressione formato a sua volta dal Gas cooler, il terzo compressore e la valvola secondaria. Il surriscaldamento pressoché costante che la valvola secondaria garantisce all'uscita di tali scambiatori permette di lavorare in sicurezza con il terzo compressore.

#### **CALIBRAZIONE VALVOLA SECONDARIA JKV**

I cataloghi relativi a valvole del genere riportano la resa frigorifera in una sola particolare condizione di funzionamento (pressione di evaporazione, pressione al Gas cooler e temperatura di uscita della CO<sub>2</sub> da quest'ultimo), al variare degli impulsi elettrici.

Una volta fissato il valore massimo e minimo di surriscaldamento che la valvola deve garantire si può attribuire il numero di impulsi su cui può lavorare la valvola. In questo caso, il surriscaldamento minimo e massimo sono fissati rispettivamente a 13°C e a 15°C, il che presuppone un surriscaldamento praticamente costante e all'interno di questi due valori, massimo e minimo. In questo modo si conosce il legame tra gli impulsi, quindi la variazione della sezione di passaggio, e il surriscaldamento, quindi la resa frigorifera che possiamo ottenere in quella particolare condizione di funzionamento espressa da catalogo. A queste informazioni si è aggiunto un fattore moltiplicativo [  $F_i$  ] dell'area nominale della valvola espresso come il rapporto tra gli impulsi e il numero massimo di impulsi. Attraverso questi parametri si determina il valore nominale della sezione di passaggio [  $A_0$  ].



Il tutto è stato effettuato con l'ipotesi di regime stazionario.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento della valvola termostatica, e la portata massica che evolve al suo interno.

$$\dot{m}_{valv\_in} - \dot{m}_{valv\_out} = 0 \quad (9)$$

$$\dot{m}_{valv} h_{out\_gc} - \dot{m}_{valv} h_{gr} = 0 \quad (10)$$

$$\sqrt{\frac{2 \rho_g (P_{gc} - P_{media})}{\xi}} * A = \dot{m}_{valv} \quad (11)$$

$$A/\sqrt{\xi} = A_0 * F_t \quad (12)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

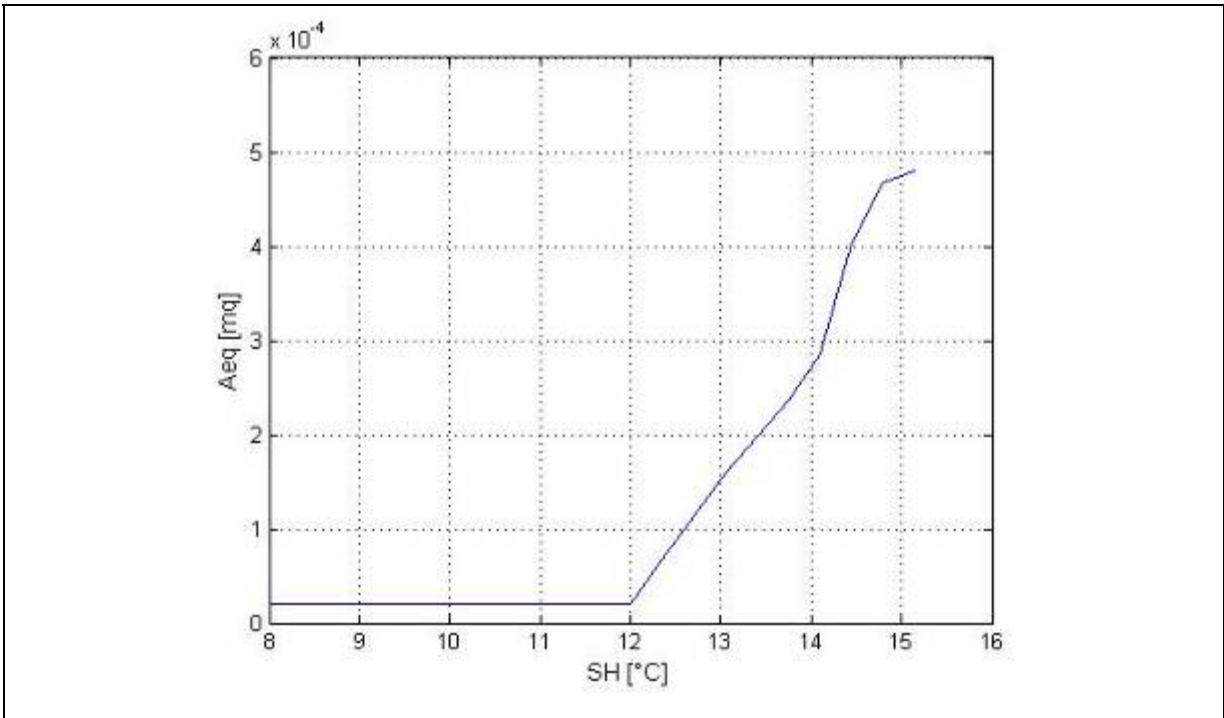
- $\dot{m}_{valv\_in}$  = portata massica in ingresso alla valvola [Kg/s];
- $\dot{m}_{valv\_out}$  = portata massica in uscita dalla valvola [Kg/s];
- $\dot{m}_{valv}$  = portata massica totale che evolve all'interno della valvola [Kg/s];
- $h_{out\_gc}$  = entalpia specifica del fluido in uscita dal Gas cooler cioè alla pressione del Gas cooler e quindi in ingresso alla valvola [J/Kg];
- $h_{gr}$  = entalpia specifica del fluido in ingresso al sottoraffreddatore cioè alla pressione media e quindi in uscita dalla valvola [J/Kg];
- $A$  = area di passaggio effettiva variabile al variare delle condizioni al contorno [m<sup>2</sup>];
- $\xi$  = coefficiente di perdite di carico;
- $F_t$  = coefficiente moltiplicativo dell'area nominale di passaggio che tiene conto degli impulsi che manda il controllore elettronico;
- $A_0$  = valore nominale dell'area di passaggio della valvola [m<sup>2</sup>];
- $\rho_g$  = densità del fluido in corrispondenza della sezione di passaggio [Kg/m<sup>3</sup>];
- $P_{gc}$  = pressione al Gas cooler [bar];
- $P_{media}$  = pressione media del ciclo [bar];

[ $\rho_3$ ] la densità del fluido in testa alla valvola, è stata calcolata mediante l'ausilio del software REFPROP7.0 a partire dai valori di pressione e temperatura del fluido refrigerante in uscita dal Gas cooler.

[A] è il valore effettivo dell'area di passaggio della valvola in una determinata condizione di funzionamento.

[ $\xi$ ] è il coefficiente di perdite di carico, legato essenzialmente al tipo di valvola. Tale coefficiente non viene considerato nel modello di simulazione.

Attraverso la fase di calibrazione e modellazione della valvola termostatica si determina la portata sottratta al flusso principale in uscita dal Gas cooler per ogni valore di surriscaldamento in cui è stato diviso l'intervallo garantito dalla valvola. A questi piccoli valori di surriscaldamento viene associato un certo valore dell'area effettiva di passaggio, calcolata attraverso la variazione del fattore  $Fi$  e quindi al variare del numero di impulsi che arrivano alla valvola. Nello specifico la calibrazione della valvola JKV consiste nella determinazione dell'andamento dell'area effettiva di passaggio in funzione del surriscaldamento all'aspirazione del compressore (Figura 3.4).



**FIGURA 3.4:** Andamento dell'aria di passaggio della valvola JKV in funzione del surriscaldamento in aspirazione al compressore

### 3.2.4 Gas cooler

Tale scambiatore è un elemento molto importante in quanto la temperatura dell'acqua in ingresso e in uscita, determina il funzionamento dell'intera macchina. In particolare la temperatura dell'acqua in ingresso alla macchina lato Gas cooler in modalità di funzionamento invernale rappresenta l'input alla logica di funzionamento dei tre compressori. Al variare di quest'ultima, cioè a mano a mano che l'acqua si riscalda, la macchina adegua il suo funzionamento.

Per procedere all'analisi del Gas cooler al variare delle condizioni operative si sono considerate le seguenti ipotesi:

- regime stazionario;
- scambiatore adiabatico;
- moto unidimensionale;
- assenza di lavoro d'elica all'interno dello scambiatore;
- trascurabilità della variazione di energia cinetica e potenziale tra le sezioni di ingresso ed uscita dello scambiatore.

Per procedere al calcolo della potenza termica scambiata al gas cooler, all'interno del modello vengono utilizzate due modalità di calcolo differenti. La prima modalità fa riferimento al bilancio entalpico applicato a tale scambiatore, mentre la seconda modalità applica una particolare procedura al gas cooler. La procedura prevede di suddividere il gas cooler in un certo numero di elementi pari ad  $Num_{elementi}$  e per ogni tratto elementare calcolare la potenza termica scambiata. La potenza termica totale sarà la somma delle  $Num_{elementi}$  potenze termiche calcolate.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento del Gas cooler con relativa potenza termica scambiata:

$$\dot{m}_{tot,in} = 2 * \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{uvv} \quad (13)$$

$$h_{2,tot} = (2 * \dot{m}_{c1} / \dot{m}_{tot}) * h_2 + (\dot{m}_{acc} / \dot{m}_{tot}) * h_{2'} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{tot} h_{2,tot} - \dot{m}_{tot} h_{out,gc} = Q_{gc} \quad (15)$$

$$\frac{U_{gc} A_{gc} [T_{CO_2}(t) - T_{H_2O}(t)]}{Num_{elementi}} = DQ_{gc} = Q_{gc,progetto} \quad (16)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

- $\dot{m}_{c1}$  = portata massica elaborata dal compressore 1 [Kg/s];
- $\dot{m}_{acc}$  = portata massica di accoppiamento elaborata dal compressore con inverter e dalla valvola secondaria [Kg/s];
- $\dot{m}_{tot}$  = portata massica totale che evolve all'interno del Gas cooler [Kg/s];
- $h_2$  = entalpia specifica alla mandata del compressore 1 [J/Kg];
- $h_{2c}$  = entalpia specifica alla mandata del compressore con inverter [J/Kg];
- $h_{out\_gc}$  = entalpia specifica del fluido in uscita dal Gas cooler [J/Kg];
- $h_{in\_gc}$  = entalpia specifica del fluido in ingresso al Gas cooler [J/Kg];
- $U_{gc}$  = coefficiente globale di scambio termico per il Gas cooler [W/m<sup>2</sup>K];
- $A_{gc}$  = area totale di scambio per il Gas cooler [m<sup>2</sup>];
- $i$  = indice per l'individuazione della posizione dell'elemento costituente il gas cooler considerato.
- $T_{CO_2}(i)$  = temperatura della CO<sub>2</sub> relativa all'elemento i-esimo considerato [K];
- $T_{H_2O}(i)$  = temperatura dell'acqua relativa all'elemento i-esimo considerato [K];
- $Q_{gc}$  = potenza termica totale scambiata al Gas cooler [W];
- $DQ_{gc}$  = potenza termica scambiata al Gas cooler per l'elemento i-esimo [W].

All'interno dell'equazioni il termine  $[A_{gc}]$  che rappresenta l'area totale di scambio del Gas cooler è un valore noto fornito direttamente dal costruttore;

$[U_{gc}]$  è il coefficiente globale di scambio termico per il Gas cooler, mantenuto costante al variare delle condizioni di funzionamento in quanto il fluido termovettore è acqua. Il valore di tale coefficiente è stato ottenuto dai dati sperimentali invernali ed in maniera distinta per il funzionamento con due e con tre compressori.

### 3.2.5 Evaporatore

Per procedere all'analisi dell'evaporatore al variare delle condizioni operative si sono considerate le seguenti ipotesi:

- regime stazionario;
- scambiatore adiabatico;
- moto unidimensionale;
- assenza di lavoro d'elica all'interno dello scambiatore;
- trascurabilità della variazione di energia cinetica e potenziale tra le sezioni di ingresso ed uscita dello scambiatore.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento del evaporatore con relativa potenza termica scambiata.

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \quad (17)$$

$$U_{ev} A_{ev} (T_{mediaW} - T_{eva}) = Q_{ev} \quad (18)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

- $\dot{m}_{in}$  = portata massica in ingresso all'evaporatore [Kg/s];
- $\dot{m}_{out}$  = portata massica in uscita dall'evaporatore [Kg/s];
- $U_{ev}$  = coefficiente globale di scambio termico per l'evaporatore [W/m<sup>2</sup>K];
- $A_{ev}$  = area totale di scambio per l'evaporatore [m<sup>2</sup>];
- $T_{mediaW}$  = temperatura media dell'acqua all'interno dell'evaporatore calcolata come media aritmetica delle temperature in ingresso ed in uscita a tale scambiatore [K];
- $T_{eva}$  = temperatura di evaporazione della CO<sub>2</sub> [K];
- $Q_{ev}$  = potenza termica scambiata all'evaporatore [W];

All'interno dell'equazioni il termine [ $A_{EV}$ ] che rappresenta l'area totale di scambio dell'evaporatore è un valore noto fornito direttamente dal costruttore.

[ $U_{ev}$ ] è il coefficiente globale di scambio termico per l'evaporatore ed è mantenuto costante al variare delle condizioni di funzionamento in quanto il fluido termovettore è acqua. Il

valore di tale coefficiente è stato ricavato direttamente dai dati sperimentali invernali in maniera distinta per il funzionamento a due ed a tre compressori.

### 3.2.6 Sottoraffreddatore

Per ciò che riguarda la schematizzazione dell'impianto, questo è stato identificato come "evaporatore" nel circuito di media pressione in quanto è posizionato, guardando il flusso di massa a media pressione, a valle della valvola secondaria e prima del compressore. Il sottoraffreddatore ed il rigeneratore di media pressione sono considerati nel modello come un unico scambiatore

Per procedere all'analisi del sottoraffreddatore si sono considerate le seguenti ipotesi:

- regime stazionario;
- scambiatore adiabatico ;
- moto unidimensionale;
- assenza di lavoro d'elica all'interno dello scambiatore;
- trascurabilità della variazione di energia cinetica e potenziale tra le sezioni di ingresso ed uscita dello scambiatore.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento del sottoraffreddatore con relativa potenza termica scambiata:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \quad (19)$$

$$\dot{m}_{valv} h_{1'} - \dot{m}_{valv} h_{2'} = Q_{sott} \quad (20)$$

$$T_{int_1} = T_{int_eva} - DT_{surr_int} \quad (21)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

- $\dot{m}_{in}$  = portata massica in ingresso al sottoraffreddatore [Kg/s];
- $\dot{m}_{out}$  = portata massica in uscita dal sottoraffreddatore [Kg/s];
- $\dot{m}_{valv}$  = portata massica totale che evolve all'interno della valvola [Kg/s];
- $h_{1'}$  = entalpia specifica del fluido in uscita dal sottoraffreddatore [J/Kg];
- $h_{2'}$  = entalpia specifica del fluido in ingresso al sottoraffreddatore [J/Kg];
- $T_{int_1}$  = temperatura del refrigerante in uscita dal sottoraffreddatore sulla media pressione [K];

- $T_{\text{int\_eva}}$  = temperatura di evaporazione corrispondente alla media pressione per condizioni di titolo unitarie [K];
- $DT_{\text{surr\_int}}$  = surriscaldamento costante imposto dal rigeneratore posto a valle del sottoraffreddatore e a monte del compressore di media pressione [K].



### 3.2.7 Rigeneratore

Per procedere all'analisi del sottoraffreddatore al variare delle condizioni operative si sono considerate le seguenti ipotesi:

- regime stazionario;
- scambiatore adiabatico.

Nel seguito vengono riportate le relazioni che descrivono il comportamento del sottoraffreddatore con relativa potenza termica scambiata:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \quad (22)$$

$$T_{ev} - s * (T_{2\_rig} - T_{ev}) = T_1 \quad (23)$$

All'interno delle relazioni compaiono i seguenti termini:

- $\dot{m}_{in}$  = portata massica in ingresso al rigeneratore [Kg/s];
- $\dot{m}_{out}$  = portata massica in uscita dal rigeneratore [Kg/s];
- $T_1$  = temperatura di uscita dal rigeneratore che corrisponde alla temperatura in aspirazione dei due compressori on/off [K];
- $T_{ev}$  = temperatura di ingresso al rigeneratore del fluido freddo che corrisponde alla temperatura di saturazione alla pressione di evaporazione [K];
- $T_{2\_rig}$  = temperatura di ingresso nel rigeneratore del fluido caldo corrispondente alla temperatura del flusso principale sotto raffreddato [K];
- $s$  = efficienza dello scambiatore rigenerativo, supposta costante.

L'equazione (23) rappresenta il metodo dell'efficienza per lo studio dello scambio termico all'interno degli scambiatori di calore. Tale equazione è valutata nel caso in cui i due fluidi siano entrambi anidride carbonica e facendo riferimento al lato freddo dello scambiatore, in pratica quello che si trova alla pressione dell'evaporatore. All'interno delle equazioni il termine  $[s]$  rappresenta l'efficienza della scambiatore rigenerativo ed è stato supposto costante al variare delle condizioni operative.

### 3.3 Flow chart e strategia risolutiva

Per procedere alla descrizione dell'algoritmo di calcolo alla base del programma di simulazione della pompa di calore, si riporta di seguito la tabella riepilogativa delle equazioni utilizzate nel programma, applicate poi ai singoli componenti. In questa tabella si è adottata una numerazione e una nomenclatura differente per ogni equazione, già illustrata precedentemente, proprio per facilitare la comprensione dello schema di flusso, che riporterà nel dettaglio i passi principali che portano alla risoluzione del modello attraverso richiami a queste equazioni. Le equazioni di seguito esposte saranno di volta in volta utilizzate e quindi adattate ai diversi componenti presenti nonché alle differenti fasi del programma (tabella 3.1).

<i>TABELLA 3.1: Riepilogo equazioni utilizzate all'interno del modello di simulazione</i>		
<b>Nomenclatura</b>	<b>Equazione</b>	<b>N°</b>
<i>Equazione per il calcolo della condizione reale di mandata del compressore.</i>	$h_1 + \frac{(h_{2\text{ iso}} - h_1)}{\eta_{\text{iso}}} = h_2$	#1
<i>Equazione del bilancio di energia tra ingresso ed uscita del compressore per il calcolo del lavoro reale</i>	$\dot{m}_{\text{c}} h_2 - \dot{m}_{\text{c}} h_1 = Lc$	#2
<i>Equazione per il calcolo della portata massica elaborata dal compressore</i>	$\dot{m}_{\text{c}} = \rho_1 C \frac{n}{60} \left[ 1 - \frac{v_N}{c} \left( \rho_2 / \rho_1 - 1 \right) \right]$	#3
<i>Equazione per il calcolo della temperatura in uscita dal Gas cooler.</i>	$P_1 P_{gc}^{A3} + P_2 P_{gc}^{A2} + P_3 P_{gc} + P_4 = T_{\text{out}_{gc}}$	#4
<i>Equazione per il calcolo della portata massica che passa all'interno della valvola termostatica.</i>	$\sqrt{2 \rho_2 (P_{gc} - P_{\text{int}})} * A_0 * F_1 = m_{\text{valv}}$	#5
<i>Equazione per il calcolo della potenza elettrica assorbita dai compressori attraverso il rendimento meccanico.</i>	$P_e = \frac{Lc}{\eta_m}$	#6

<b>TABELLA 3.1: Riepilogo equazioni utilizzate all'interno del modello di simulazione</b>		
<b>Nomenclatura</b>	<b>Equazione</b>	<b>N°</b>
Equazione per il calcolo della potenza negli scambiatori di calore.	$UA[T_a(t) - T_b(t)] = \Sigma DQ = Q_{gc\_progetto}$	#7
Equazione del bilancio di energia al Gas cooler che tiene conto della portata totale evolvente.	$h_{2\_tot} = (2 * \dot{m}_{c1} / \dot{m}_{tot}) * h_2 + (\dot{m}_{acc} / \dot{m}_{tot})$	#8
Equazione per il calcolo della temperatura in aspirazione del compressore attraverso l'efficienza dello scambiatore rigenerativo	$T_{ev} - \varepsilon * (T_{2\_sott} - T_{ev}) = T_1$	#9
Equazione del bilancio di energia tra ingresso ed uscita negli scambiatori per il calcolo della potenza termica scambiata.	$\dot{m} h_{in} - \dot{m} h_{out} = Q$	#10

## **FLOW CHART**

Di seguito è rappresentato il diagramma di flusso che spiega in maniera dettagliata le varie fasi del calcolo e quindi la logica alla base dell'algoritmo di simulazione. Il programma in ambiente Matlab prevede una serie di istruzioni che seguono un certo ordine, così come indicato nel flow chart (figura 3.5).

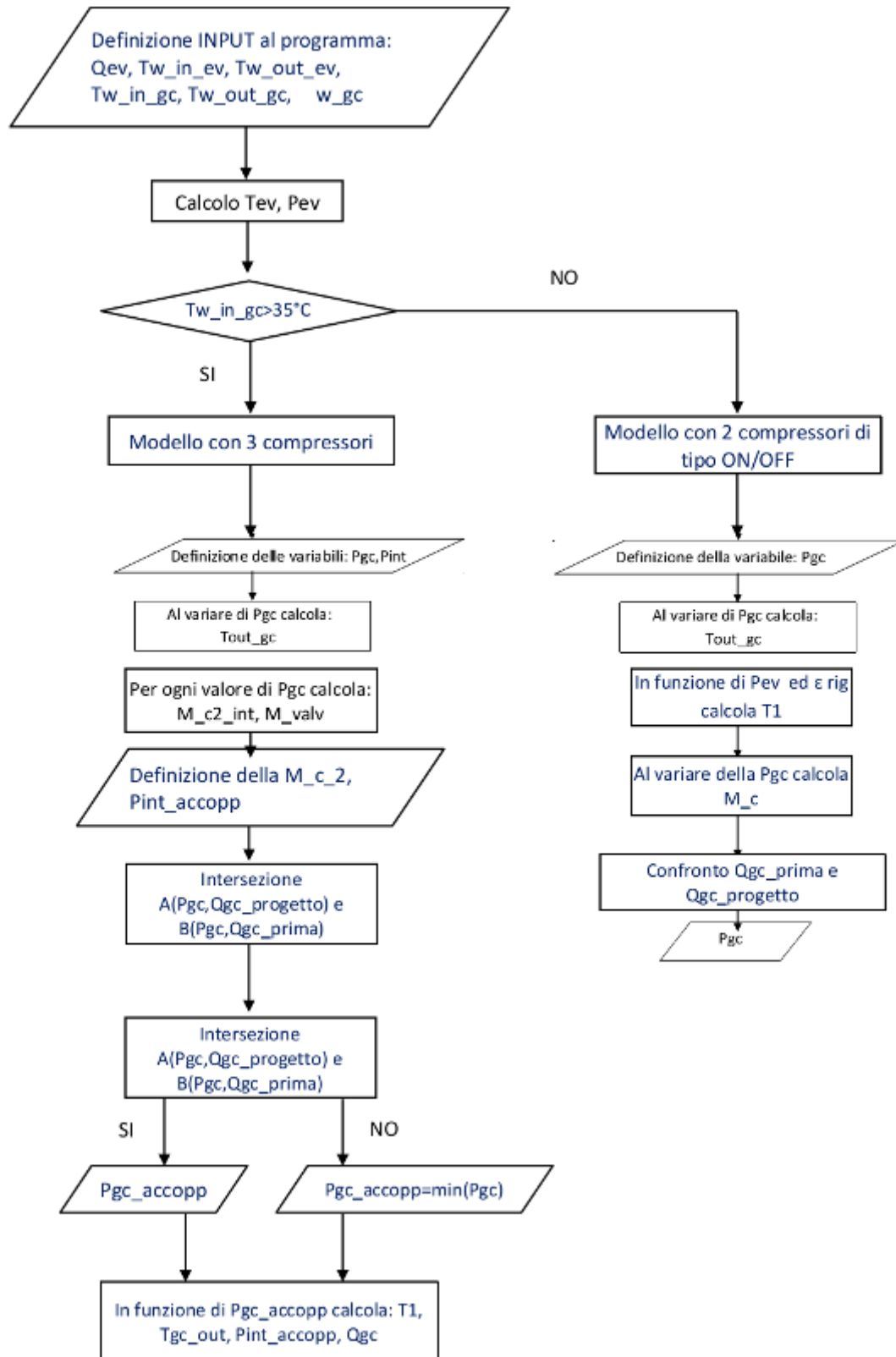


FIGURA 3.5: Flow chart relativo al programma di simulazione del Gas cooler realizzato in ambiente Matlab

## **STRATEGIA RISOLUTIVA**

Nella prima fase del programma vengono inseriti tutti gli input per la macchina cioè le temperature dell'acqua in ingresso e uscita lato gas cooler e lato evaporatore, la portata d'acqua lato gas cooler e, per ciò che concerne la CO<sub>2</sub>, la potenza termica scambiata all'evaporatore.

A valle della fase di introduzione di tutti i parametri necessari alla simulazione segue il programma vero e proprio.

Il primo procedimento porta a calcolare la temperatura di evaporazione [Tev] attraverso l'equazione ( #7), in cui compare la potenza scambiata all'evaporatore. Infatti per ciò che riguarda l'evaporatore abbiamo a disposizione la potenza scambiata, la temperatura dell'acqua in ingresso e in uscita e sono noti i valori dell'area di scambio e del coefficiente di scambio termico globale. Considerando che il fluido refrigerante all'uscita si trovi in condizioni di vapore saturo secco e all'entrata in condizioni di vapore, la temperatura rimane costante e quindi pari proprio alla temperatura di evaporazione del refrigerante, che diventa l'unica incognita dell'equazione. A valle di ciò attraverso la conoscenza della temperatura in condizioni di vapore saturo secco, si calcola anche la pressione corrispondente [Pev].

Il secondo procedimento è di fondamentale importanza in quanto a seconda del valore della temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3, si sceglie se procedere al programma relativo al funzionamento con due compressori (ST3<35°C) o al programma per tre compressori (ST3>35°C). A seconda del numero di compressori in funzione, le varie grandezze verranno calcolate considerando il solo ciclo principale quando in presenza dei soli due compressori ON/OFF, o considerando anche il ciclo di media pressione quando sono tre i compressori funzionanti. Quando il terzo compressore è spento (ST3<35°C) bisogna tralasciare il calcolo delle varie grandezze del ramo di media pressione.

## **FUNZIONAMENTO CON TUTTI E TRE I COMPRESSORI**

Quando la temperatura dell'acqua è maggiore di 35°C si ha l'accensione di tutti e tre i compressori; dal momento che la pressione all'evaporatore è già stata calcolata, le due variabili che governano il funzionamento della macchina sono la pressione al Gas cooler [Pgc] e la pressione nel ramo di media [Pint]. Per ciascuna grandezza viene definito un vettore i cui elementi sono i possibili valori che la grandezza può assumere in accordo con

quanto riportato nei cataloghi dei diversi componenti. All'interno dei vettori definiti  $P_{gc}$  e  $P_{int}$  si dovrà ricercare il valore soluzione di quella particolare condizione di funzionamento.

Il primo passo consiste nel calcolare attraverso l'equazione (#4) la temperatura di uscita della  $CO_2$  dal Gas cooler  $[T_{out\_gc}]$  al variare della pressione al Gas cooler. In seguito, si procede al calcolo della portata elaborata dai due compressori di tipo ON/OFF  $[M_{c\_1}]$  e in seguito a quella elaborata dal compressore posto sul ramo di media pressione  $[M_{c2\_int}]$  e contemporaneamente al calcolo della portata che passa all'interno della valvola secondaria  $[M_{valv}]$ .

Per quanto riguarda il compressore, si calcola la portata elaborata attraverso l'equazione (#3) dove sono presenti la velocità di rotazione, precedentemente fissata in quanto è stato supposto che l'inverter non parzializza, la cilindrata e il volume nocivo, noti dalla calibrazione del compressore; sono inizialmente e momentaneamente incognite le condizioni termiche e fluidodinamiche al punto 1\_1 di aspirazione al compressore con inverter e al punto 2\_1 di mandata del terzo compressore. Per il punto 1\_1 è noto il valore di surriscaldamento imposto dalla valvola secondaria  $DT_{surr\_int}$ ; quindi facendo variare la pressione intermedia, per ogni valore di quest'ultima conosciamo la temperatura di saturazione che, sommata al surriscaldamento, restituisce la temperatura del punto 1\_1. Per ciò che riguarda il punto 2\_1 invece al variare della pressione al Gas cooler, si può prima calcolare il valore dell'entalpia specifica qualora la trasformazione fosse isoentropica  $[h_{2s\_1}]$  e infine attraverso l'equazione (#1) dal momento che il rendimento isoentropico è un valore noto, calcolare l'entalpia specifica del punto 2\_1  $[h_{2\_1}]$ . Con queste informazioni al variare della pressione intermedia e per ogni valore della pressione al Gas cooler è nota la curva corrispondente alla variazione della portata elaborata dal terzo compressore.

La portata che passa all'interno della valvola secondaria, calcolata per ogni singola pressione al Gas cooler, prevede l'utilizzo dell'equazione (#5) all'interno della quale il valore dell'area di passaggio  $[A_{eq}]$  è funzione del surriscaldamento costante  $DT_{surr\_int}$ ; inoltre la portata della valvola JKV dipende dal valore di densità in corrispondenza della sezione di passaggio  $[\rho_2]$ , calcolato a partire dal valore della singola pressione al Gas cooler e quindi dalla corrispondente temperatura, quest'ultima relativa all'uscita del Gas cooler (valore calcolato al precedente step). La conoscenza degli andamenti della portata elaborata dal terzo compressore e di quella che passa all'interno della valvola permette di passare alla definizione delle portate di accoppiamento  $[M_{c\_2}]$  a determinate pressioni intermedie di

accoppiamento [Pint\_accopp] per ogni singolo valore di pressione al Gas cooler. Con questo risultato in termini modellistici siamo a conoscenza di tutte le portate che effettivamente possono passare all'interno del ramo di media pressione fissato il singolo valore di pressione al Gas cooler, mentre in termini numerici si ha un certo numero di accoppiamenti e quindi di portate che passano all'interno del ramo di media pressione sempre differenti al variare della pressione al Gas cooler. Il punto di intersezione tra le curve (Pint,M\_c2\_int) e (Pint,M\_valv) determina il punto di accoppiamento tra terzo compressore e valvola (Pint\_accopp,M\_c\_2).

Una volta noto l'accoppiamento tra valvola JKV e terzo compressore, si determina l'effettivo ingresso del refrigerante al gas cooler, considerando i due contributi dei compressori ON/OFF e del terzo compressore. Di conseguenza, tramite l'equazione (#10), viene calcolata la potenza termica scambiata al gas cooler  $Q_{gc\_prima}$ . Per chiudere il modello e quindi trovare il valore di pressione al Gas cooler e quello di pressione intermedia corrispondenti alle condizioni di input, bisogna esaminare lo scambio termico che avviene al Gas cooler. Per fare ciò si va a valutare la potenza al gas cooler  $Q_{gc\_progetto}$  con una particolare procedura. La procedura prevede di suddividere il gas cooler in un certo numero di elementi pari ad  $Num_{elementi}$  e per ogni tratto elementare calcolare la potenza termica scambiata. La potenza termica totale sarà la somma delle  $Num_{elementi}$  potenze termiche calcolate secondo l'equazione (#7).

Una volta fatto ciò risulta noto l'andamento della  $Q_{gc\_progetto}$  al variare della pressione al gas cooler. Dall'intersezione delle due curve (Pgc,Qgc\_prima) e (Pgc,Qgc\_progetto) si ricava il valore della pressione al gas cooler di accoppiamento  $P_{gc\_accopp}$  e quindi si determina  $Q_{gc\_accopp}$ . Nel caso in cui non esiste intersezione tra queste due curve, viene assegnato inizialmente un valore fittizio alla pressione  $P_{gc\_accopp}$  pari al valore della pressione di taglio al gas cooler ( $P_{gc\_max} = 95,6$  [bar]) e successivamente il minimo tra tale valore e il minimo del vettore Pgc.

Il passo successivo consiste nel calcolare le grandezze del ciclo in funzione del valore di  $P_{gc\_accopp}$  determinato.



## FUNZIONAMENTO CON I DUE COMPRESSORI DI TIPO ON/OFF

Quando la temperatura dell'acqua è minore di 35°C si ha l'accensione dei soli compressori di tipo ON/OFF. dal momento che la pressione all'evaporatore è già stata calcolata, la variabile che governa il funzionamento della macchina è la sola pressione al Gas cooler [Pgc] essendo assente il circuito di media pressione. Per Pgc viene definito un vettore i cui elementi sono i possibili valori che la grandezza può assumere in accordo con quanto riportato nei cataloghi dei diversi componenti. All'interno del vettore definito per Pgc si dovrà ricercare il valore soluzione di quella particolare condizione di funzionamento.

Il primo passo consiste nel calcolare attraverso l'equazione (#4) la temperatura di uscita della CO<sub>2</sub> dal Gas cooler [Tout\_gc] al variare della pressione al Gas cooler. In seguito, si procede al calcolo della portata elaborata dai due compressori di tipo ON/OFF [M\_c].

Per quanto riguarda il compressore, si calcola la portata elaborata attraverso l'equazione (#3) dove sono presenti la velocità di rotazione, precedentemente fissata, la cilindrata e il volume nocivo, noti dalla calibrazione del compressore.

Tramite l'equazione (#10), viene calcolata la potenza termica scambiata al gas cooler Qgc\_prima. Per chiudere il modello e quindi trovare il valore di pressione al Gas cooler corrispondenti alle condizioni di input, bisogna esaminare lo scambio termico che avviene al Gas cooler. Per fare ciò si va a valutare la potenza al gas cooler Qgc\_progetto con una particolare procedura. La procedura prevede di suddividere il gas cooler in un certo numero di elementi pari ad  $Num_{elementi}$  e per ogni tratto elementare calcolare la potenza termica scambiata. La potenza termica totale sarà la somma delle  $Num_{elementi}$  potenze termiche calcolate secondo l'equazione (#7).

Una volta fatto ciò risulta noto l'andamento della Qgc\_progetto al variare della pressione al gas cooler. Qgc\_progetto viene confrontata con Qgc\_prima per la determinazione della soluzione Pgc\_accopp: se essa è minore di Qgc\_prima, allora la soluzione (Pgc\_accopp, Qgc\_accopp) è l'intersezione delle due curve (Pgc, Qgc\_prima) e (Pgc, Qgc\_progetto); se Qgc\_progetto è maggiore di Qgc\_prima Pgc\_accopp è pari al primo valore del vettore Pgc e Qgc\_accopp è posto pari a Qgc\_prima calcolato per tale valore di Pgc.

Il passo successivo consiste nel calcolare le grandezze del ciclo in funzione del valore di Pgc\_accopp determinato.

## **4 VALIDAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE PROTOTIPO ENEA**

### **4.1 Introduzione**

Lo scopo di tale lavoro è la validazione di un modello di simulazione del funzionamento della pompa di calore ad R744 installata presso il Centro Ricerche ENEA di Casaccia (Roma).

La realizzazione del modello si basa sullo studio dei singoli componenti della pompa di calore, per ciascuno dei quali è stato realizzato un sottomodello per la simularne il funzionamento. Successivamente, il modello prevede l'accoppiamento dei vari componenti al fine di determinare il funzionamento globale della macchina.

Il modello realizzato tiene conto della maggior parte delle dinamiche del sistema per il funzionamento a regime quasi-stazionario, tranne la parzializzazione del numero di giri del compressore tra la linea a media pressione e la pressione massima (terzo compressore).

La validazione del modello di simulazione del funzionamento della pompa di calore è stata effettuata sui dati sperimentali presentati precedentemente distinguendo tra le sole due configurazioni di funzionamento, cioè con due compressori per ST3 minore di 35°C, e con tre compressori quando ST3 supera i 35°C. In particolare, il modello è stato utilizzato per riprodurre le condizioni di funzionamento della pompa di calore relative ai 187 punti sperimentali rilevati.

Le effettive potenzialità del modello di simulazione sono state testate in relazione alle due modalità di funzionamento della macchina ovvero con e senza circuito di media pressione, quindi con due o con tre compressori.

Oltre a non tener conto della parzializzazione dell'inverter sul terzo compressore, il modello non considera una terza modalità di funzionamento che si verifica una volta che ST3 raggiunge i 52°C e continua a crescere. In quest'ultima configurazione, il primo compressore viene spento mentre il secondo ed il terzo continuano a rimanere accesi. In fase di progettazione, è stato stabilito il progressivo spegnimento dei tre compressori man mano che ci si avvicina al valore di set point prestabilito.

## 4.2 Risultati forniti dal modello di simulazione per il funzionamento invernale

I risultati forniti dal modello di simulazione sono stati organizzati in numero di tabelle pari al numero di grandezze considerate. La riga dei dati sperimentali e la corrispondente riga dei risultati del modello si riferiscono alla stessa prova e sono accumulate dalla stessa temperatura della acqua in ingresso al gas cooler ST3. Di seguito vengono riportate, per ciascuna grandezza considerata, le tabelle riassuntive con ST3, i valori sperimentali, i valori forniti dal modello e, infine, l'errore relativo tra i dati sperimentali ed i risultati del modello. Ovviamente, la tabella relativa alla pressione del circuito ausiliario viene riportata esclusivamente per ST3 maggiore di 35°C.

Per la generica grandezza  $k$  considerata, sono stati quindi calcolati gli errori relativi commessi (formula 4.1), il valor medio aritmetico (4.2) e assoluto e la deviazione standard (4.3) di quest'ultimi (Tabella 4.1).

$e_{k,t} = \frac{k_{t,exp} - k_{t,mod}}{k_{t,mod}}$	(4.1)
$\bar{e}_k = \frac{\sum_t^N e_{k,t}}{N}$	(4.2)
$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_t^N (e_{k,t} - \bar{e}_k)^2}{N - 1}}$	(4.3)
<b>TABELLA 4.1: Parametri statistici</b>	

L'errore medio aritmetico è una misura dell'asimmetria della distribuzione degli errori relativi e consente, pertanto, di valutare la tendenza del modello a sottostimare o sovrastimare la grandezza in esame; la deviazione standard è invece un indice che caratterizza la dispersione dei risultati, necessario, insieme all'errore medio assoluto, alla stima effettiva delle incertezze del modello di simulazione.

Oltre alla rispettiva tabella, ogni grandezza è accompagnata da un apposito grafico in cui i risultati del modello vengono rappresentati direttamente in funzione dei dati sperimentali a cui si riferiscono. In tal modo si ha una più facile e immediata comprensione dei parametri statistici precedentemente introdotti per la descrizione della bontà del modello.

In particolare, ciascun grafico è dotato di tre rette per delimitare l'intervallo di confidenza scelto per la grandezza trattata. In particolare, per le pressioni è stato scelto un intervallo di

confidenza di ampiezza pari al  $\pm 15\%$ , mentre per le altre grandezze è stato scelto un intervallo di confidenza di ampiezza pari al  $\pm 20\%$ . Così facendo si ha già dal solo grafico una prima approssimata stima del numero di punti che ricadono all'interno dell'intervallo di confidenza.

Infine, su ciascun grafico è riportato uno specchietto riassuntivo dei parametri statistici della grandezza rappresentata nel grafico stesso, cioè si riportano: errore medio assoluto, errore medio aritmetico, deviazione standard e percentuale dei punti che ricadono all'interno dell'intervallo di confidenza.

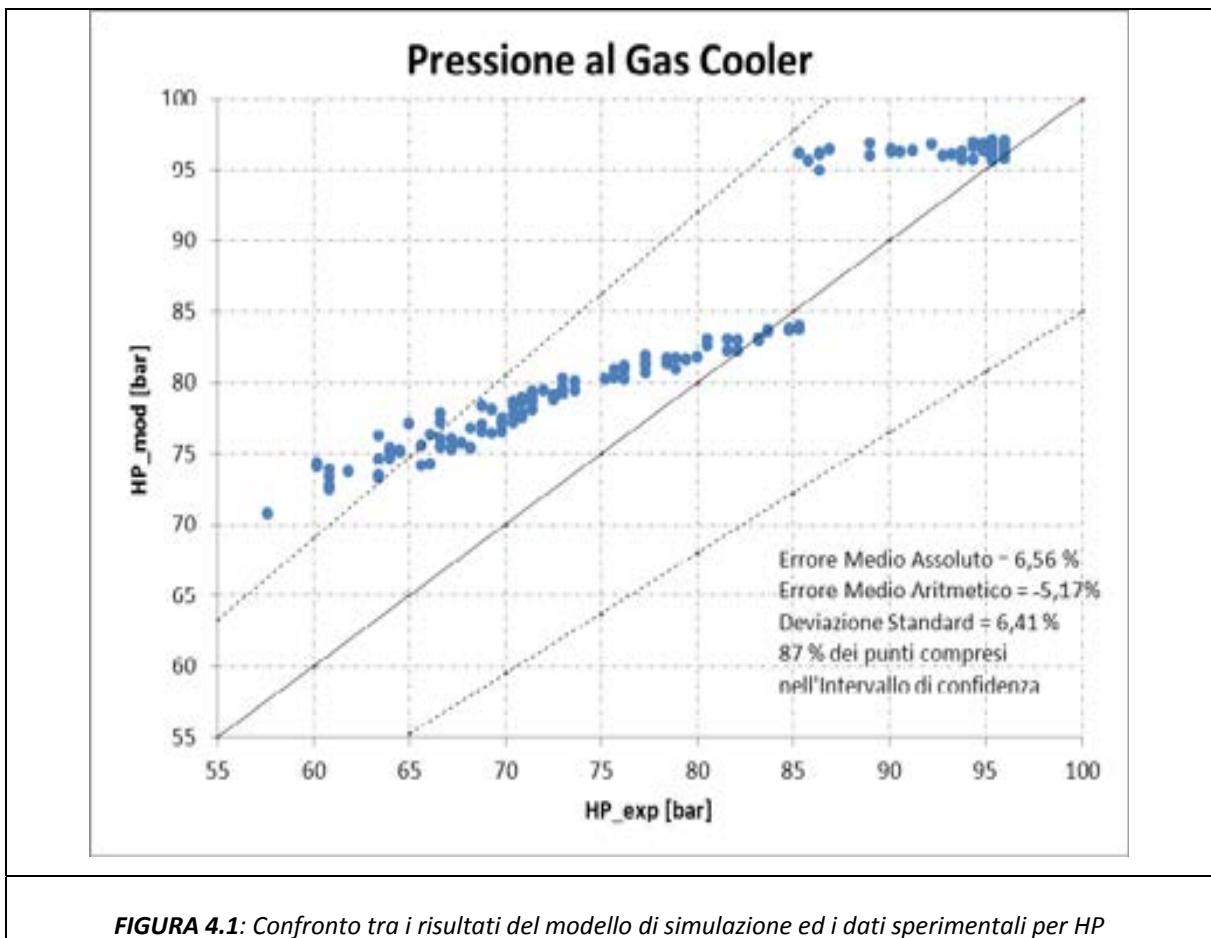
<b>TABELLA 4.2</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>HP_exp [bar]</b>	<b>HP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
18,8	57,6	70,78	-0,211
20,1	60,8	72,51	-0,186
20,9	60,2	74,30	-0,187
21	60,2	74,10	-0,169
21,1	60,8	72,73	-0,180
21,2	60,8	73,86	-0,170
21,4	60,8	73,39	-0,170
21,6	63,4	73,29	-0,147
21,7	60,2	74,15	-0,182
22,2	61,8	73,68	-0,158
22,3	63,4	73,46	-0,160
22,4	64	75,13	-0,141
22,7	63,4	74,59	-0,158
22,8	64,5	75,16	-0,145
22,9	64	75,38	-0,135
23	65,6	74,17	-0,122
23,1	64	74,67	-0,163
23,3	63,4	76,20	-0,153
23,5	64	75,08	-0,136
23,6	66,1	74,25	-0,110
23,7	66,1	74,26	-0,121
23,8	64,5	75,10	-0,153
24	66,6	75,95	-0,118
24,1	65,6	75,55	-0,130
24,3	67,2	75,46	-0,116
24,4	67,2	75,99	-0,109
24,5	66,6	75,49	-0,138
24,8	65	77,05	-0,147
24,9	66,1	76,35	-0,120
25	67,2	75,24	-0,108
25,1	68,2	75,32	-0,099
25,2	67,7	75,69	-0,126
25,4	66,6	77,21	-0,135
25,6	68,8	77,04	-0,099
25,8	68,8	76,46	-0,104
25,9	68,2	76,74	-0,117
26,1	69,8	77,15	-0,086
26,3	69,3	76,41	-0,111
26,4	66,6	77,79	-0,127
26,5	69,8	76,46	-0,094
26,7	69,8	76,99	-0,107
26,8	69,3	78,07	-0,116
26,9	68,8	78,34	-0,110

<b>TABELLA 4.2</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>HP_exp [bar]</b>	<b>HP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
27,1	69,8	77,43	-0,109
27,2	70,4	78,28	-0,087
27,3	70,4	77,18	-0,095
27,4	70,4	77,71	-0,095
27,5	70,9	77,79	-0,099
27,6	70,9	78,57	-0,098
27,7	70,4	78,63	-0,091
27,8	70,9	77,53	-0,092
28,2	71,4	78,04	-0,102
28,4	71,4	79,37	-0,095
28,5	70,9	78,94	-0,097
28,6	71,4	78,59	-0,098
28,7	71,4	79,12	-0,102
28,8	72	79,48	-0,088
28,9	71,4	78,97	-0,097
29	72,5	79,07	-0,079
29,1	72,5	78,72	-0,084
29,2	72,5	79,09	-0,089
29,3	73	79,56	-0,083
29,4	73	79,62	-0,076
29,6	72,5	79,08	-0,085
29,7	73	79,20	-0,081
30,1	73,6	79,44	-0,083
30,2	73	80,19	-0,087
30,3	73,6	80,01	-0,085
30,6	75,7	80,42	-0,064
30,8	76,2	80,82	-0,051
30,9	75,7	80,32	-0,065
31	75,7	80,89	-0,056
31,1	75,2	80,23	-0,068
31,2	77,3	80,66	-0,036
31,3	76,2	80,23	-0,062
31,4	76,2	81,20	-0,061
31,5	77,3	81,16	-0,051
31,6	77,3	81,41	-0,056
31,8	77,3	81,89	-0,044
32	78,9	80,88	-0,033
32,1	79,4	81,58	-0,023
32,2	78,4	81,28	-0,041
32,3	78,4	81,71	-0,040
32,4	78,9	81,67	-0,034
32,5	79,4	81,64	-0,029
32,8	80	81,77	-0,031

<b>TABELLA 4.2</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>HP_exp [bar]</b>	<b>HP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
32,9	80,5	82,55	-0,021
33	81,6	82,25	-0,016
33,2	82,1	82,91	-0,002
33,4	82,1	82,23	-0,011
33,5	80,5	83,00	-0,030
33,6	81,6	83,01	-0,018
33,7	83,2	83,09	0,003
33,8	83,2	82,96	0,003
33,8	83,2	82,97	-0,006
34	83,7	83,69	0,007
34,1	83,2	83,13	-0,004
34,2	83,7	83,49	0,003
34,3	83,7	83,49	0,001
34,5	84,8	83,59	0,013
34,6	84,8	83,75	0,010
34,7	85,3	83,99	0,019
34,8	85,3	83,71	0,016
34,9	85,3	83,97	1,016
35	86,4	96,12	-0,101
35,3	86,4	96,01	-0,100
35,4	85,3	96,12	-0,113
35,4	86,4	94,95	-0,090
35,5	85,8	95,64	-0,103
35,8	86,9	96,41	-0,099
36	89	96,86	-0,081
36,2	89	95,93	-0,072
36,5	90,1	96,37	-0,065
36,6	90,1	96,23	-0,064
37,1	91,2	96,29	-0,053
37,3	92,2	96,74	-0,047
37,5	92,8	95,95	-0,033
37,6	93,3	96,07	-0,029
38	94,9	96,29	-0,014
38,1	94,9	96,68	-0,018
38,2	94,9	96,84	-0,020
38,5	94,9	96,33	-0,015
38,6	95,4	95,85	-0,005
39	96	96,30	-0,003
39,1	96	96,26	-0,003
39,4	94,9	96,65	-0,018
39,6	96	96,99	-0,010
39,8	96	96,68	-0,007
40	95,4	96,00	-0,006

<b>TABELLA 4.2</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>HP_exp [bar]</b>	<b>HP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
40,2	95,4	96,96	-0,016
40,4	96	96,27	-0,003
40,5	96	96,70	-0,007
40,8	96	95,95	0,001
41	96	97,01	-0,010
41,2	96	96,40	-0,004
41,5	96	95,78	0,002
42,4	95,4	96,60	-0,012
42,7	94,4	96,19	-0,019
42,8	90,6	96,27	-0,059
43	94,9	95,69	-0,008
43,2	96	95,73	0,003
43,5	95,4	96,67	-0,013
44	93,8	96,50	-0,028
44	96	96,05	-0,001
44,3	96	96,60	-0,006
44,6	95,4	95,65	-0,003
44,9	95,4	95,77	-0,004
45	95,4	96,80	-0,015
45,1	96	95,88	0,001
45,2	96	97,03	-0,011
45,4	96	95,66	0,004
45,5	96	96,29	-0,003
45,6	94,4	96,92	-0,026
46,1	96	96,89	-0,009
46,4	96	96,19	-0,002
46,7	96	96,42	-0,004
47	94,4	96,35	-0,020
47,2	95,4	96,34	-0,010
47,4	93,8	97,08	-0,034
47,5	95,4	96,10	-0,007
47,6	96	96,26	-0,003
48,1	95,4	95,97	-0,006
48,2	95,4	96,09	-0,007
48,3	96	95,92	0,001
48,4	95,4	95,89	-0,005
48,5	96	97,01	-0,010
48,7	96	96,96	-0,010
49,2	95,4	96,14	-0,008
49,4	96	97,01	-0,010
49,5	96	96,04	0,000
49,7	95,4	96,82	-0,015
49,8	96	96,57	-0,006

<b>TABELLA 4.2</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>HP_exp [bar]</b>	<b>HP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,9	96	95,75	0,003
50,2	95,4	95,83	-0,005
50,3	96	96,53	-0,006
50,4	95,4	96,96	-0,016
50,6	96	96,90	-0,009
50,7	96	96,01	0,000
50,8	95,4	96,36	-0,010
51,4	95,4	96,66	-0,013
51,5	95,4	96,50	-0,011
51,6	96	95,80	0,002
51,7	96	95,68	0,003
52,5	95,4	95,80	-0,004
52,6	95,4	96,84	-0,015
52,7	96	95,81	0,002
52,9	95,4	96,02	-0,006



**FIGURA 4.1:** Confronto tra i risultati del modello di simulazione ed i dati sperimentali per HP

Dal grafico riportato in figura 4.1, si nota come il modello sovrastima il valore della pressione al gas cooler fornendo infatti un valore quasi sempre maggiore del rispettivo valore sperimentale a cui si riferisce. Come sarà mostrato nella successiva analisi dei risultati in funzione della temperatura in ingresso al gas cooler ST3, tale sovrastima è maggiore quando l'inverter inizia a modulare il funzionamento del terzo compressore, modalità trascurata dal modello di simulazione.



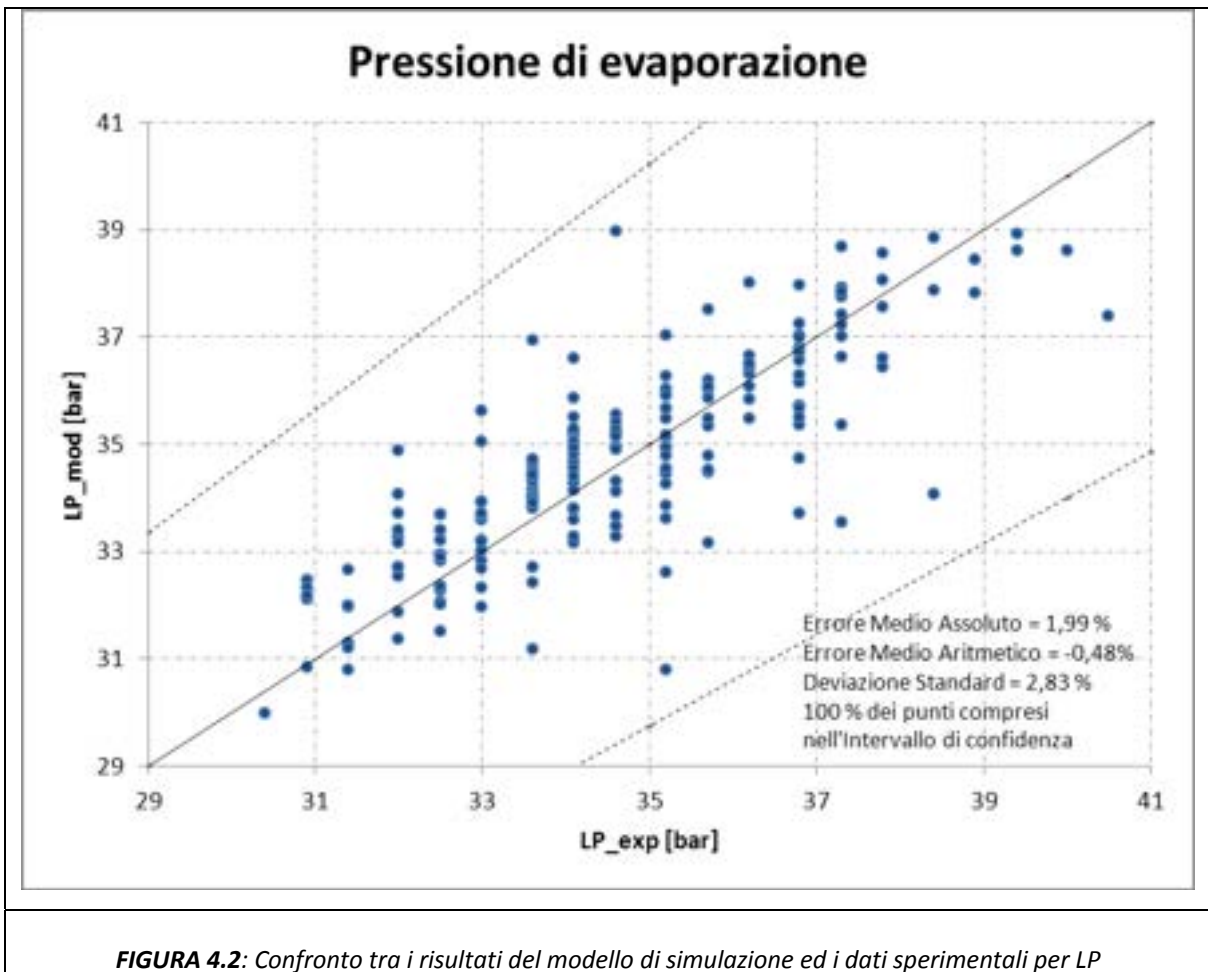
<b>TABELLA 4.3</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>LP_exp [bar]</b>	<b>LP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
18,8	36,2	35,49	0,020
20,1	34,1	35,18	-0,031
20,9	39,4	38,93	0,012
21	39,4	38,61	0,020
21,1	34,6	34,12	0,014
21,2	37,8	37,56	0,006
21,4	36,8	35,72	0,030
21,6	33,6	34,17	-0,017
21,7	36,2	36,07	0,004
22,2	35,7	34,78	0,026
22,3	32	33,71	-0,051
22,4	37,8	38,56	-0,020
22,7	37,8	36,44	0,037
22,8	36,8	37,04	-0,006
22,9	38,9	37,83	0,028
23	33,6	34,01	-0,012
23,1	35,2	35,68	-0,013
23,3	38,9	38,44	0,012
23,5	34,6	35,54	-0,027
23,6	30,9	32,47	-0,048
23,7	37,3	33,54	0,112
23,8	33,6	34,71	-0,032
24	37,3	37,01	0,008
24,1	34,1	35,18	-0,031
24,3	33,6	34,61	-0,029
24,4	35,7	36,05	-0,010
24,5	34,1	34,67	-0,017
24,8	40	38,62	0,036
24,9	37,3	36,64	0,018
25	31,4	31,97	-0,018
25,1	30,9	32,11	-0,038
25,2	32,5	33,69	-0,035
25,4	37,8	38,06	-0,007
25,6	36,8	36,80	0,000
25,8	32	34,06	-0,060
25,9	33,6	34,36	-0,022
26,1	35,7	35,87	-0,005
26,3	30,9	32,32	-0,044
26,4	40,5	37,40	0,083
26,5	30,9	32,18	-0,040
26,7	32,5	33,39	-0,027
26,8	37,3	37,42	-0,003
26,9	38,4	38,85	-0,012

<b>TABELLA 4.3</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>LP_exp [bar]</b>	<b>LP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
27,1	33,6	34,07	-0,014
27,2	37,3	37,22	0,002
27,3	32,5	32,83	-0,010
27,4	34,1	34,54	-0,013
27,5	33,6	34,31	-0,021
27,6	36,8	37,26	-0,012
27,7	37,3	37,74	-0,012
27,8	31,4	32,66	-0,039
28,2	33	33,58	-0,017
28,4	37,3	38,68	-0,036
28,5	37,8	36,60	0,033
28,6	34,1	34,29	-0,006
28,7	36,2	36,32	-0,003
28,8	38,4	37,86	0,014
28,9	35,2	35,13	0,002
29	34,6	35,19	-0,017
29,1	32	33,28	-0,039
29,2	34,6	34,95	-0,010
29,3	36,8	36,76	0,001
29,4	36,8	36,69	0,003
29,6	33,6	33,80	-0,006
29,7	33,6	33,92	-0,009
30,1	33	33,66	-0,020
30,2	36,2	36,43	-0,006
30,3	35,2	35,48	-0,008
30,6	35,7	36,02	-0,009
30,8	36,8	36,97	-0,005
30,9	34,1	34,81	-0,020
31	36,2	36,66	-0,013
31,1	33	33,71	-0,021
31,2	35,2	34,92	0,008
31,3	32,5	32,95	-0,014
31,4	35,7	36,20	-0,014
31,5	34,1	35,87	-0,049
31,6	36,2	36,51	-0,009
31,8	37,3	37,92	-0,016
32	32,5	32,88	-0,012
32,1	35,2	35,17	0,001
32,2	32	33,40	-0,042
32,3	34,1	35,04	-0,027
32,4	33,6	34,40	-0,023
32,5	33,6	34,03	-0,013
32,8	32,5	33,21	-0,021

<b>TABELLA 4.3</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>LP_exp [bar]</b>	<b>LP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
32,9	35,2	36,04	-0,023
33	33,6	34,71	-0,032
33,2	36,8	36,15	0,018
33,4	32	32,70	-0,021
33,5	34,6	35,40	-0,023
33,6	33,6	34,49	-0,026
33,7	34,6	34,89	-0,008
33,8	33	33,93	-0,027
33,8	33,6	33,97	-0,011
34	35,7	36,03	-0,009
34,1	32	33,17	-0,035
34,2	35,2	34,26	0,028
34,3	33,6	33,91	-0,009
34,5	34,6	33,27	0,040
34,6	32	32,54	-0,016
34,7	34,1	34,13	-0,001
34,8	32,5	32,35	0,005
34,9	32,5	32,06	0,014
35	35,7	35,33	0,011
35,3	34,6	33,67	0,028
35,4	34,1	33,79	0,009
35,4	33	32,83	0,005
35,5	33	33,21	-0,006
35,8	35,7	35,47	0,006
36	35,2	34,46	0,021
36,2	31,4	31,99	-0,019
36,5	33	33,92	-0,027
36,6	32,5	32,28	0,007
37,1	30,9	30,84	0,002
37,3	31,4	31,29	0,004
37,5	34,6	33,48	0,034
37,6	34,1	33,59	0,015
38	33	32,32	0,021
38,1	32	32,71	-0,022
38,2	32	31,37	0,020
38,5	32,5	32,35	0,005
38,6	32	31,87	0,004
39	34,1	33,82	0,008
39,1	34,1	35,27	-0,033
39,4	33,6	31,17	0,078
39,6	33	33,01	0,000
39,8	31,4	31,19	0,007
40	32,5	32,01	0,015

<b>TABELLA 4.3</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>LP_exp [bar]</b>	<b>LP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
40,2	30,4	29,98	0,014
40,4	31,4	30,79	0,020
40,5	33,6	32,71	0,027
40,8	33	31,96	0,033
41	32,5	31,52	0,031
41,2	33,6	32,41	0,037
41,5	35,2	34,79	0,012
42,4	32	32,61	-0,019
42,7	35,2	33,69	0,045
42,8	32,5	30,78	0,056
43	35,2	33,19	0,060
43,2	34,1	34,74	-0,018
43,5	33	32,68	0,010
44	36,8	35,51	0,036
44	33	35,06	-0,059
44,3	34,1	35,61	-0,042
44,6	33	33,16	-0,005
44,9	33	33,27	-0,008
45	34,1	34,31	-0,006
45,1	34,1	34,88	-0,023
45,2	34,6	34,53	0,002
45,4	32	33,16	-0,035
45,5	35,2	35,30	-0,003
45,6	35,7	34,43	0,037
46,1	34,1	34,40	-0,009
46,4	33,6	33,70	-0,003
46,7	36,2	36,93	-0,020
47	34,1	33,86	0,007
47,2	35,2	35,35	-0,004
47,4	36,8	36,09	0,020
47,5	33,6	33,61	0,000
47,6	35,2	35,27	-0,002
48,1	37,3	37,97	-0,018
48,2	35,7	36,60	-0,024
48,3	35,2	34,93	0,008
48,4	34,6	34,89	-0,008
48,5	36,8	37,52	-0,019
48,7	34,1	34,46	-0,011
49,2	34,1	35,14	-0,030
49,4	34,6	34,51	0,003
49,5	35,7	36,54	-0,023
49,7	35,7	35,83	-0,004
49,8	34,6	34,07	0,015

<b>TABELLA 4.3</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>LP_exp [bar]</b>	<b>LP_mod [bar]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,9	35,7	36,26	-0,015
50,2	36,8	37,84	-0,027
50,3	36,2	37,04	-0,023
50,4	38,4	38,96	-0,014
50,6	35,2	35,90	-0,020
50,7	37,3	38,02	-0,019
50,8	35,2	35,37	-0,005
51,4	34,6	35,66	-0,030
51,5	35,2	35,50	-0,009
51,6	36,2	36,30	-0,003
51,7	36,8	37,68	-0,023
52,5	36,8	39,30	-0,064
52,6	36,8	37,35	-0,015
52,7	36,8	37,82	-0,027
52,9	38,4	39,52	-0,028



**FIGURA 4.2:** Confronto tra i risultati del modello di simulazione ed i dati sperimentali per LP

Dal grafico rappresentativo della pressione all'evaporatore (Figura 4.2), si evince che l'errore su tale grandezza, e quindi sulla temperatura di evaporazione della CO<sub>2</sub> è accettabile per cui il modello sovrastima anche la pressione di evaporazione. La bontà del modello nel predire il valore della bassa pressione è testimoniato dal fatto che il 100% dei punti ottenuti con il modello ricade all'interno dell'intervallo di confidenza.

<b>TABELLA 4.4</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>SUCTION BP_TEMP_ exp [°C]</b>	<b>SUCTION_BP _TEMP_mod [°C]</b>	<b>Errore Relativo</b>
18,8	5,7	16,98	-0,664
20,1	5,8	17,63	-0,671
20,9	9,3	19,97	-0,534
21	7,2	19,75	-0,635
21,1	7,8	17,26	-0,548
21,2	8,7	19,22	-0,547
21,4	8,6	18,25	-0,529
21,6	6,4	17,53	-0,635
21,7	7,6	18,73	-0,594
22,2	9,4	17,97	-0,477
22,3	8,8	17,40	-0,494
22,4	9,4	20,18	-0,534
22,7	8,2	19,08	-0,570
22,8	9,8	19,57	-0,499
22,9	10,1	19,99	-0,495
23	7,1	17,85	-0,602
23,1	7,8	18,79	-0,585
23,3	10	20,60	-0,514
23,5	9,3	18,91	-0,508
23,6	9,9	17,19	-0,424
23,7	9,9	17,68	-0,440
23,8	10,3	18,56	-0,445
24	9,9	19,91	-0,503
24,1	9,4	18,96	-0,504
24,3	10,8	18,67	-0,422
24,4	10,8	19,52	-0,447
24,5	7,8	18,71	-0,583
24,8	13	21,03	-0,382
24,9	11	19,92	-0,448
25	11,2	17,39	-0,356
25,1	11,1	17,49	-0,365
25,2	11,3	18,37	-0,385
25,4	10,9	20,87	-0,478
25,6	10,5	20,28	-0,482
25,8	11,4	18,86	-0,396
25,9	8,9	19,11	-0,534
26,1	11,8	19,93	-0,408
26,3	12	18,06	-0,335
26,4	14,6	20,85	-0,300
26,5	12,4	18,01	-0,312
26,7	12,1	18,79	-0,356
26,8	12,1	20,97	-0,423
26,9	14,3	21,67	-0,340

<b>TABELLA 4.4</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>SUCTION BP_TEMP_ exp [°C]</b>	<b>SUCTION_BP _TEMP_mod [°C]</b>	<b>Errore Relativo</b>
27,1	11,8	19,27	-0,388
27,2	11	20,97	-0,475
27,3	12	18,61	-0,355
27,4	9,8	19,60	-0,500
27,5	12,9	19,53	-0,340
27,6	13,2	21,11	-0,375
27,7	14,3	21,33	-0,330
27,8	13,8	18,69	-0,261
28,2	13,4	19,31	-0,306
28,4	15,4	22,02	-0,301
28,5	15,6	20,99	-0,257
28,6	13,2	19,86	-0,335
28,7	9,4	20,95	-0,551
28,8	12,1	21,73	-0,443
28,9	11	20,38	-0,460
29	14,3	20,44	-0,301
29,1	15,1	19,46	-0,224
29,2	13,7	20,35	-0,327
29,3	16,1	21,31	-0,245
29,4	14	21,31	-0,343
29,6	14,4	19,84	-0,274
29,7	14,5	19,95	-0,273
30,1	14	19,93	-0,298
30,2	9,5	21,44	-0,557
30,3	11,9	20,96	-0,432
30,6	16,6	21,36	-0,223
30,8	16,9	21,92	-0,229
30,9	16	20,80	-0,231
31	15,1	21,82	-0,308
31,1	15,2	20,28	-0,250
31,2	17,5	20,98	-0,166
31,3	14,7	19,94	-0,263
31,4	9,7	21,75	-0,554
31,5	16,9	21,59	-0,217
31,6	15,9	21,97	-0,276
31,8	13,2	22,74	-0,419
32	15,6	20,17	-0,227
32,1	17,2	21,46	-0,199
32,2	17,6	20,56	-0,144
32,3	16,4	21,46	-0,236
32,4	16,3	21,16	-0,230
32,5	16,8	20,99	-0,200
32,8	16,5	20,68	-0,202

<b>TABELLA 4.4</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>SUCTION BP_TEMP_ exp [°C]</b>	<b>SUCTION_BP _TEMP_mod [°C]</b>	<b>Errore Relativo</b>
32,9	16,3	22,22	-0,266
33	18	21,54	-0,164
33,2	16,8	22,41	-0,250
33,4	15,9	20,63	-0,229
33,5	11,5	22,13	-0,480
33,6	14,1	21,74	-0,351
33,7	17,6	21,95	-0,198
33,8	18,1	21,47	-0,157
33,8	17,7	21,50	-0,177
34	18,1	22,67	-0,202
34,1	18,8	21,20	-0,113
34,2	17,5	21,83	-0,198
34,3	17,4	21,67	-0,197
34,5	18,8	21,43	-0,123
34,6	17,2	21,16	-0,187
34,7	19	21,97	-0,135
34,8	17,3	21,06	-0,178
34,9	16,5	21,03	-0,215
35	17,1	15,51	0,102
35,3	17,4	13,70	0,270
35,4	13,5	13,83	-0,024
35,4	19,3	12,76	0,513
35,5	15,2	13,19	0,152
35,8	14,2	15,67	-0,094
36	18,7	14,57	0,283
36,2	19,9	11,80	0,686
36,5	18,7	13,98	0,338
36,6	18,4	12,13	0,517
37,1	17,8	10,45	0,703
37,3	18,6	10,98	0,694
37,5	17,9	13,49	0,327
37,6	17,6	13,62	0,292
38	18,2	12,18	0,495
38,1	20,3	12,62	0,608
38,2	19,2	11,08	0,733
38,5	14,1	12,21	0,155
38,6	17	11,66	0,458
39	19,6	13,86	0,414
39,1	15,1	15,45	-0,023
39,4	21	10,84	0,937
39,6	20,2	12,96	0,558
39,8	19,2	10,87	0,766
40	20,7	11,82	0,751

<b>TABELLA 4.4</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>SUCTION BP_TEMP_ exp [°C]</b>	<b>SUCTION_BP _TEMP_mod [°C]</b>	<b>Errore Relativo</b>
40,2	18,1	9,43	0,920
40,4	18,9	10,39	0,819
40,5	17,6	12,62	0,394
40,8	19,1	11,76	0,624
41	20,2	11,25	0,795
41,2	20,9	12,28	0,701
41,5	17,3	14,93	0,159
42,4	21,9	12,51	0,751
42,7	18,2	13,73	0,326
42,8	18	10,38	0,734
43	20,2	13,17	0,534
43,2	20,2	14,88	0,357
43,5	21,9	12,59	0,740
44	18,8	15,71	0,197
44	22	15,22	0,445
44,3	22,1	15,82	0,397
44,6	23,4	13,13	0,782
44,9	22	13,26	0,659
45	22,2	14,41	0,541
45,1	21,2	15,04	0,410
45,2	19,3	14,66	0,317
45,4	19,3	13,14	0,469
45,5	21,3	15,48	0,376
45,6	23,7	14,54	0,630
46,1	23,3	14,51	0,606
46,4	20,9	13,74	0,522
46,7	19,3	17,20	0,122
47	23,8	13,91	0,710
47,2	22,3	15,54	0,435
47,4	22,6	16,32	0,385
47,5	22,1	13,64	0,621
47,6	19,9	15,45	0,288
48,1	25,8	18,28	0,412
48,2	24,5	16,86	0,453
48,3	18,9	15,08	0,253
48,4	25	15,05	0,661
48,5	18,6	17,81	0,044
48,7	22,5	14,58	0,544
49,2	26,6	15,32	0,737
49,4	23,5	14,63	0,606
49,5	26,3	16,80	0,565
49,7	25	16,05	0,558
49,8	23,6	14,15	0,668

<b>TABELLA 4.4</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>SUCTION BP_TEMP_ exp [°C]</b>	<b>SUCTION_BP _TEMP_ _mod [°C]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,9	21	16,50	0,273
50,2	25,8	18,14	0,422
50,3	26,7	17,32	0,542
50,4	27,7	19,27	0,437
50,6	25,8	16,13	0,600
50,7	17,9	18,32	-0,023
50,8	23,7	15,56	0,523
51,4	27,8	15,87	0,751
51,5	26,9	15,70	0,713
51,6	24,3	16,55	0,469
51,7	27,7	17,98	0,540
52,5	27,7	19,61	0,412
52,6	28,7	17,63	0,627
52,7	21,6	18,12	0,192
52,9	18,8	19,83	-0,052

TABELLA 4.5			
ST3_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_ GC_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_GC_ mod [°C]	Errore Relativo
18,8	19,6	27,84	-0,296
20,1	21,6	29,14	-0,259
20,9	21,5	30,45	-0,294
21	21,5	30,31	-0,291
21,1	21,5	29,30	-0,266
21,2	21,9	30,14	-0,273
21,4	21,8	29,79	-0,268
21,6	23,4	29,72	-0,213
21,7	21,8	30,35	-0,282
22,2	22,5	30,00	-0,250
22,3	23,5	29,84	-0,212
22,4	23,7	31,06	-0,237
22,7	23,7	30,67	-0,227
22,8	24,1	31,08	-0,225
22,9	23,8	31,23	-0,238
23	24,9	30,36	-0,180
23,1	23,9	30,72	-0,222
23,3	23,6	31,83	-0,258
23,5	24	31,02	-0,226
23,6	25,2	30,42	-0,172
23,7	25,3	30,43	-0,168
23,8	24,4	31,03	-0,214
24	25,6	31,65	-0,191
24,1	25,1	31,36	-0,200
24,3	25,8	31,29	-0,176
24,4	26	31,67	-0,179
24,5	25,5	31,31	-0,186
24,8	25,1	32,43	-0,226
24,9	25,6	31,93	-0,198
25	26	31,13	-0,165
25,1	26,5	31,19	-0,150
25,2	26,2	31,46	-0,167
25,4	25,8	32,53	-0,207
25,6	27	32,42	-0,167
25,8	27,1	32,01	-0,153
25,9	26,8	32,21	-0,168
26,1	27,5	32,50	-0,154
26,3	27,2	31,97	-0,149
26,4	26,6	32,95	-0,193
26,5	27,5	32,00	-0,141
26,7	27,5	32,38	-0,151
26,8	27,4	33,14	-0,173
26,9	27,3	33,33	-0,181

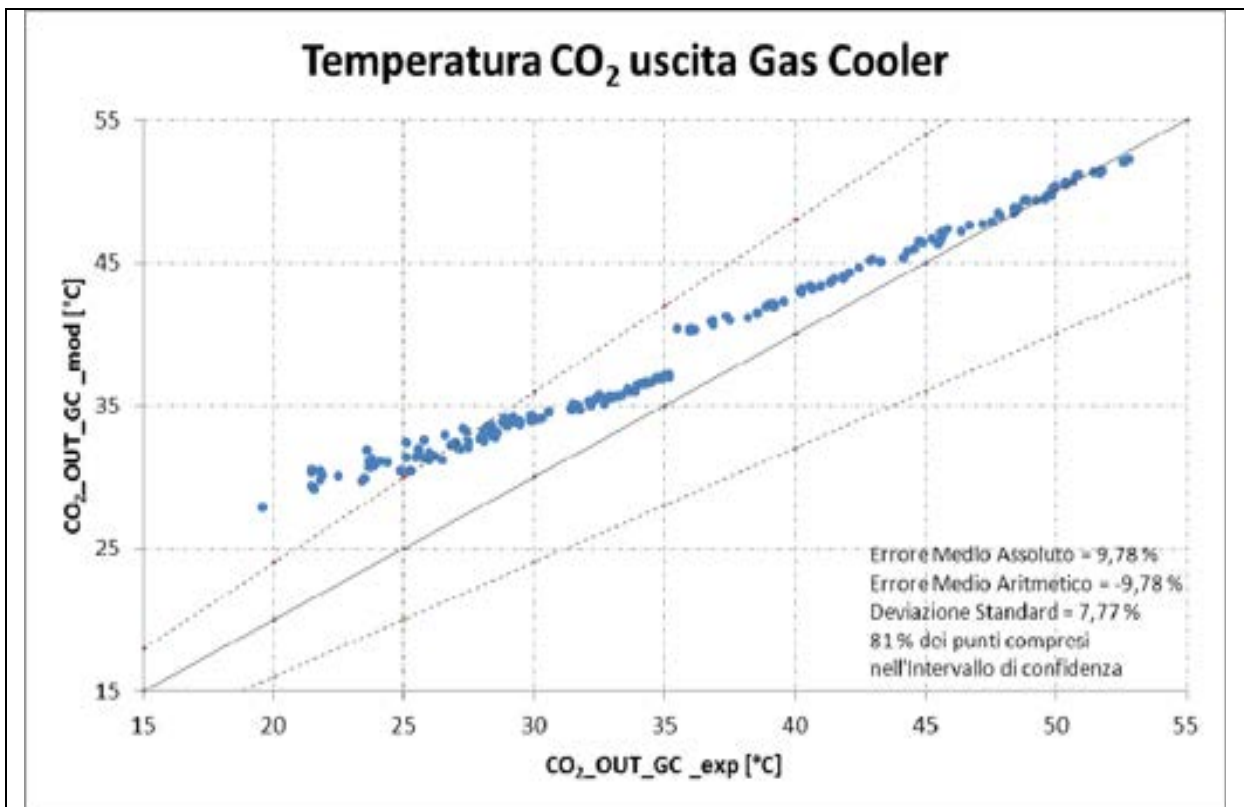
TABELLA 4.5			
ST3_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_ GC_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_GC_ mod [°C]	Errore Relativo
27,1	27,9	32,70	-0,147
27,2	28,1	33,29	-0,156
27,3	28,1	32,51	-0,136
27,4	28	32,89	-0,149
27,5	28,4	32,95	-0,138
27,6	28,4	33,49	-0,152
27,7	28,3	33,53	-0,156
27,8	28,5	32,76	-0,130
28,2	28,6	33,12	-0,137
28,4	28,9	34,04	-0,151
28,5	28,8	33,75	-0,147
28,6	29	33,50	-0,134
28,7	29,3	33,87	-0,135
28,8	29,2	34,11	-0,144
28,9	29,2	33,77	-0,135
29	29,5	33,83	-0,128
29,1	29,5	33,59	-0,122
29,2	29,5	33,85	-0,128
29,3	30	34,17	-0,122
29,4	29,9	34,21	-0,126
29,6	29,9	33,84	-0,116
29,7	30,1	33,93	-0,113
30,1	30,3	34,09	-0,111
30,2	30,6	34,61	-0,116
30,3	30,6	34,48	-0,113
30,6	31,4	34,76	-0,097
30,8	31,7	35,03	-0,095
30,9	31,5	34,69	-0,092
31	31,5	35,08	-0,102
31,1	31,4	34,63	-0,093
31,2	32,2	34,92	-0,078
31,3	31,8	34,63	-0,082
31,4	32,1	35,29	-0,090
31,5	32,3	35,26	-0,084
31,6	32,4	35,43	-0,085
31,8	32,5	35,75	-0,091
32	32,7	35,07	-0,068
32,1	33	35,54	-0,072
32,2	32,8	35,34	-0,072
32,3	32,9	35,63	-0,077
32,4	33	35,60	-0,073
32,5	33,2	35,59	-0,067
32,8	33,4	35,67	-0,064



TABELLA 4.5			
ST3_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_ GC_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_GC_ mod [°C]	Errore Relativo
32,9	33,6	36,19	-0,072
33	33,7	35,99	-0,064
33,2	34	36,43	-0,067
33,4	33,9	35,98	-0,058
33,5	34,1	36,49	-0,065
33,6	34,2	36,50	-0,063
33,7	34,3	36,54	-0,061
33,8	34,3	36,46	-0,059
33,8	34,3	36,47	-0,059
34	34,7	36,94	-0,061
34,1	34,5	36,57	-0,057
34,2	34,7	36,81	-0,057
34,3	34,7	36,81	-0,057
34,5	34,9	36,87	-0,054
34,6	35	36,98	-0,054
34,7	35,2	37,14	-0,052
34,8	35,2	36,95	-0,047
34,9	35,2	37,13	-0,052
35	35,5	40,30	-0,119
35,3	36	40,18	-0,104
35,4	36,1	40,26	-0,103
35,4	36	40,37	-0,108
35,5	36,2	40,21	-0,100
35,8	36,8	40,87	-0,099
36	36,9	40,95	-0,099
36,2	36,9	40,62	-0,092
36,5	37,4	41,25	-0,093
36,6	37,5	40,96	-0,084
37,1	38,2	41,14	-0,071
37,3	38,6	41,46	-0,069
37,5	38,9	41,90	-0,072
37,6	39	41,99	-0,071
38	39,2	41,94	-0,065
38,1	39,1	42,08	-0,071
38,2	39,2	42,09	-0,069
38,5	39,6	42,30	-0,064
38,6	39,6	42,29	-0,064
39	40,2	42,95	-0,064
39,1	40,3	43,12	-0,065
39,4	40,3	42,90	-0,061
39,6	40,6	43,28	-0,062
39,8	40,7	43,17	-0,057
40	41	43,28	-0,053

TABELLA 4.5			
ST3_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_ GC_exp [°C]	CO <sub>2</sub> _OUT_GC_ mod [°C]	Errore Relativo
40,2	41	43,28	-0,053
40,4	41,4	43,54	-0,049
40,5	41,5	43,83	-0,053
40,8	41,9	43,81	-0,043
41	41,9	44,03	-0,048
41,2	42,1	44,24	-0,048
41,5	42,5	44,62	-0,047
42,4	43,2	45,13	-0,043
42,7	42,9	45,24	-0,052
42,8	43	45,09	-0,046
43	43,3	45,34	-0,045
43,2	43,9	45,77	-0,041
43,5	44,2	45,89	-0,037
44	44,3	46,44	-0,046
44	44,6	46,36	-0,038
44,3	44,8	46,64	-0,039
44,6	44,9	46,25	-0,029
44,9	45,3	46,53	-0,026
45	45,5	47,09	-0,034
45,1	45,6	47,02	-0,030
45,2	45,6	47,29	-0,036
45,4	45,7	46,90	-0,026
45,5	45,9	47,16	-0,027
45,6	45,7	47,56	-0,039
46,1	46,4	47,72	-0,028
46,4	46,7	47,81	-0,023
46,7	47	48,47	-0,030
47	47,2	48,30	-0,023
47,2	47,4	48,48	-0,022
47,4	47,6	48,81	-0,025
47,5	47,8	48,64	-0,017
47,6	47,9	48,80	-0,019
48,1	48,4	49,34	-0,019
48,2	48,4	49,31	-0,018
48,3	48,5	49,33	-0,017
48,4	48,6	49,41	-0,016
48,5	48,8	49,65	-0,017
48,7	48,9	49,65	-0,015
49,2	49,3	50,12	-0,016
49,4	49,6	50,28	-0,014
49,5	49,7	50,36	-0,013
49,7	49,9	50,61	-0,014
49,8	49,9	50,57	-0,013

<b>TABELLA 4.5</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>CO<sub>2</sub>_OUT_ GC_exp [°C]</b>	<b>CO<sub>2</sub>_OUT_GC_ mod [°C]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,9	50	50,67	-0,013
50,2	50,4	51,06	-0,013
50,3	50,4	51,16	-0,015
50,4	50,5	51,33	-0,016
50,6	50,7	51,29	-0,011
50,7	50,8	51,47	-0,013
50,8	50,9	51,41	-0,010
51,4	51,5	52,00	-0,010
51,5	51,7	52,07	-0,007
51,6	51,7	52,21	-0,010
51,7	51,8	52,27	-0,009
52,5	52,6	53,13	-0,010
52,6	52,7	53,16	-0,009
52,7	52,8	53,23	-0,008
52,9	53	53,49	-0,009



**FIGURA 4.3:** Confronto tra i risultati del modello di simulazione ed i dati sperimentali per CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC

Gli errori relativi ai risultati forniti dal modello sul valore calcolato della temperatura del refrigerante in uscita dal gas cooler sono accettabili. L'81 % dei punti calcolati dal modello ricade all'interno di un intervallo di confidenza di ampiezza pari al 20 % (Figura 4.3).

<b>TABELLA 4.6</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>POT,PDC_exp [kWel]</b>	<b>POT,PDC_mod [kWel]</b>	<b>Errore Relativo</b>
18,8	5,4	5,76	-0,062
20,1	5,65	5,95	-0,050
20,9	5,6	5,96	-0,061
21	5,6	5,96	-0,060
21,1	5,9	6,00	-0,017
21,2	5,7	5,99	-0,048
21,4	5,8	6,02	-0,036
21,6	6,05	6,05	0,000
21,7	5,8	6,08	-0,046
22,2	6	6,07	-0,012
22,3	6,1	6,08	0,004
22,4	5,8	6,08	-0,046
22,7	5,85	6,11	-0,043
22,8	5,95	6,15	-0,032
22,9	6	6,14	-0,023
23	6,25	6,14	0,019
23,1	6	6,15	-0,024
23,3	6	6,20	-0,032
23,5	6	6,19	-0,031
23,6	6,35	6,16	0,031
23,7	6,1	6,15	-0,008
23,8	6,15	6,21	-0,009
24	6,15	6,23	-0,013
24,1	6,25	6,24	0,001
24,3	6,35	6,24	0,017
24,4	6,35	6,26	0,014
24,5	6,3	6,25	0,009
24,8	6,2	6,28	-0,013
24,9	6,15	6,28	-0,021
25	6,6	6,24	0,058
25,1	6,5	6,24	0,041
25,2	6,45	6,28	0,028
25,4	6,15	6,32	-0,027
25,6	6,4	6,35	0,009
25,8	6,6	6,34	0,041
25,9	6,5	6,36	0,022
26,1	6,55	6,38	0,027
26,3	6,65	6,33	0,050
26,4	6,3	6,40	-0,016
26,5	6,7	6,34	0,058
26,7	6,65	6,39	0,041
26,8	6,45	6,43	0,003

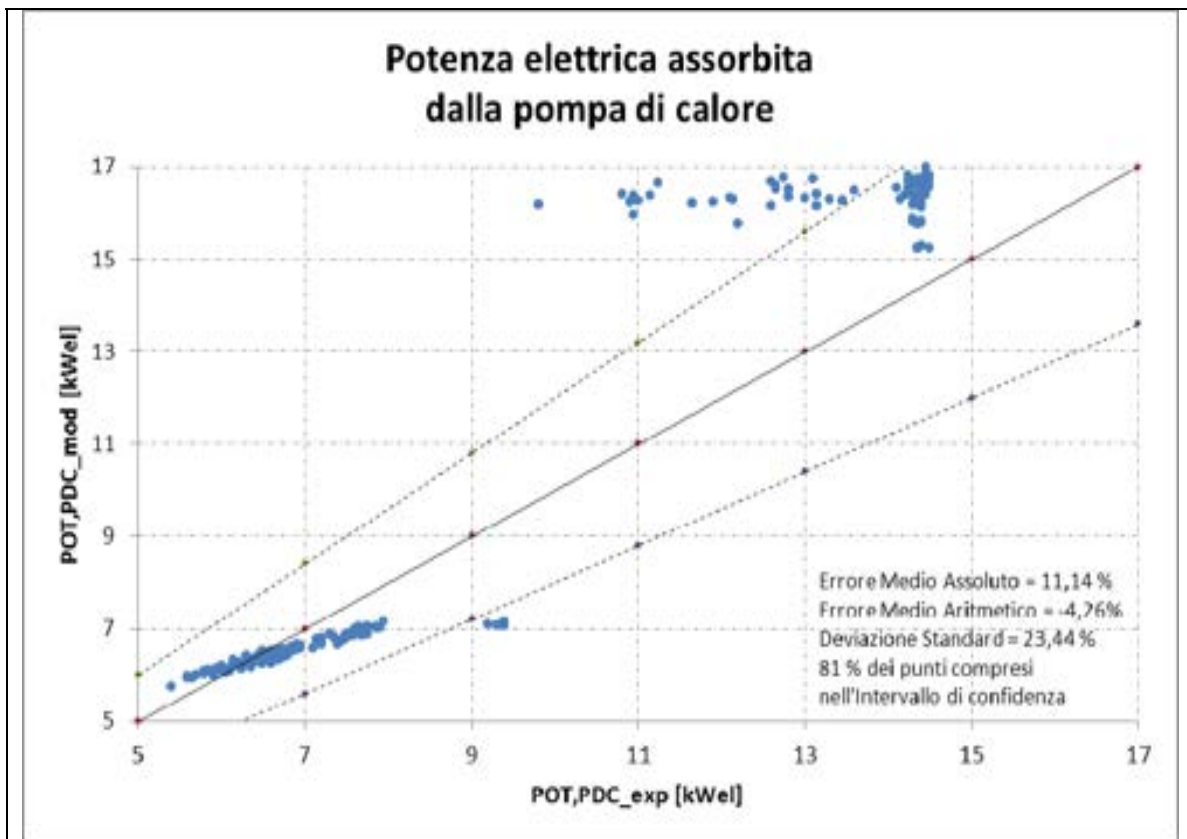
<b>TABELLA 4.6</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>POT,PDC_exp [kWel]</b>	<b>POT,PDC_mod [kWel]</b>	<b>Errore Relativo</b>
26,9	6,3	6,41	-0,017
27,1	6,65	6,42	0,035
27,2	6,55	6,46	0,015
27,3	6,75	6,40	0,055
27,4	6,65	6,45	0,032
27,5	6,75	6,45	0,046
27,6	6,65	6,48	0,026
27,7	6,55	6,48	0,012
27,8	6,8	6,43	0,058
28,2	6,75	6,47	0,043
28,4	6,6	6,52	0,012
28,5	6,5	6,53	-0,005
28,6	6,8	6,52	0,043
28,7	6,75	6,55	0,030
28,8	6,7	6,56	0,022
28,9	6,75	6,55	0,030
29	6,85	6,56	0,044
29,1	6,85	6,53	0,050
29,2	6,85	6,56	0,044
29,3	6,9	6,59	0,047
29,4	6,85	6,59	0,039
29,6	6,9	6,56	0,052
29,7	6,95	6,57	0,058
30,1	7,1	6,59	0,078
30,2	6,9	6,66	0,036
30,3	6,95	6,64	0,046
30,6	7,2	6,70	0,075
30,8	7,2	6,74	0,068
30,9	7,2	6,68	0,077
31	7,15	6,75	0,058
31,1	7,2	6,66	0,081
31,2	7,4	6,73	0,100
31,3	7,4	6,65	0,113
31,4	7,2	6,80	0,058
31,5	7,35	6,80	0,081
31,6	7,35	6,83	0,076
31,8	7,3	6,88	0,061
32	7,45	6,73	0,107
32,1	7,55	6,85	0,102
32,2	7,5	6,79	0,105
32,3	7,5	6,87	0,092
32,4	7,5	6,86	0,094
32,5	7,7	6,85	0,124

<b>TABELLA 4.6</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>POT,PDC_exp [kWel]</b>	<b>POT,PDC_mod [kWel]</b>	<b>Errore Relativo</b>
32,8	7,6	6,85	0,110
32,9	7,6	6,99	0,087
33	7,7	6,94	0,110
33,2	7,75	7,04	0,101
33,4	7,75	6,89	0,125
33,5	7,65	7,05	0,086
33,6	7,75	7,04	0,102
33,7	7,85	7,05	0,113
33,8	7,85	7,02	0,119
33,8	7,85	7,02	0,118
34	7,95	7,15	0,112
34,1	7,9	7,02	0,126
34,2	9,35	7,09	0,318
34,3	9,2	7,08	0,299
34,5	9,4	7,08	0,328
34,6	9,3	7,07	0,315
34,7	9,4	7,16	0,314
34,8	9,4	7,06	0,332
34,9	9,35	7,07	0,322
35	9,8	16,16	-0,394
35,3	10,95	16,36	-0,330
35,4	10,8	16,40	-0,341
35,4	10,95	15,96	-0,314
35,5	10,9	16,22	-0,328
35,8	11	16,25	-0,323
36	11,25	16,65	-0,324
36,2	11,15	16,38	-0,319
36,5	12,8	16,49	-0,224
36,6	12,65	16,49	-0,233
37,1	12,65	16,59	-0,238
37,3	12,75	16,75	-0,239
37,5	12,8	16,34	-0,217
37,6	13,15	16,39	-0,197
38	14,25	16,52	-0,137
38,1	14,3	16,68	-0,143
38,2	14,25	16,79	-0,151
38,5	14,1	16,54	-0,147
38,6	14,2	16,35	-0,132
39	13,6	16,47	-0,174
39,1	11,9	16,24	-0,267
39,4	14,35	16,72	-0,142
39,6	14,5	16,81	-0,137
39,8	14,5	16,73	-0,133

<b>TABELLA 4.6</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>POT,PDC_exp [kWel]</b>	<b>POT,PDC_mod [kWel]</b>	<b>Errore Relativo</b>
40	14,45	16,41	-0,119
40,2	14,45	16,99	-0,149
40,4	14,45	16,59	-0,129
40,5	14,5	16,68	-0,131
40,8	14,45	16,39	-0,118
41	14,45	16,85	-0,143
41,2	14,5	16,56	-0,125
41,5	13,15	16,13	-0,185
42,4	11,75	16,64	-0,294
42,7	14,35	16,43	-0,126
42,8	14,25	16,59	-0,141
43	14,3	16,24	-0,120
43,2	13,15	16,12	-0,184
43,5	14,35	16,67	-0,139
44	14,4	16,28	-0,116
44	12,6	16,20	-0,222
44,3	13,3	16,30	-0,184
44,6	11,65	16,23	-0,282
44,9	13	16,27	-0,201
45	14,4	16,64	-0,135
45,1	14,15	16,16	-0,124
45,2	14,35	16,72	-0,142
45,4	12,6	16,23	-0,224
45,5	13,1	16,24	-0,194
45,6	14,35	16,68	-0,140
46,1	13,45	16,67	-0,193
46,4	14,4	16,43	-0,124
46,7	14,3	15,81	-0,096
47	14,25	16,49	-0,136
47,2	14,15	16,25	-0,129
47,4	14,4	16,38	-0,121
47,5	14,3	16,40	-0,128
47,6	14,4	16,24	-0,113
48,1	14,35	15,25	-0,059
48,2	14,3	15,78	-0,094
48,3	14,3	16,17	-0,115
48,4	14,35	16,16	-0,112
48,5	14,35	15,86	-0,095
48,7	14,4	16,70	-0,137
49,2	14,35	16,21	-0,115
49,4	14,3	16,71	-0,144
49,5	14,3	15,78	-0,094
49,7	14,35	16,34	-0,122

<b>TABELLA 4.6</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>POT,PDC_exp [kWel]</b>	<b>POT,PDC_mod [kWel]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,8	14,35	16,56	-0,134
49,9	14,4	15,75	-0,086
50,2	14,35	15,24	-0,058
50,3	14,4	15,82	-0,090
50,4	14,4	15,31	-0,059
50,6	14,35	16,35	-0,122
50,7	14,5	15,25	-0,049
50,8	14,4	16,26	-0,114
51,4	14,4	16,31	-0,117
51,5	14,3	16,28	-0,122
51,6	14,35	15,75	-0,089
51,7	14,35	15,23	-0,058
52,5	12,1	14,69	-0,176
52,6	12,15	15,85	-0,233
52,7	12,2	15,24	-0,199
52,9	12,25	14,69	-0,166

Il modello fornisce buoni risultati della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore alle basse pressioni, mentre ne fornisce una sovrastima per valori alti di HP, essendo tralasciata la parzializzazione della velocità di rotazione del terzo compressore (Figura 4.4).



**FIGURA 4.4:** Confronto tra i risultati del modello di simulazione ed i dati sperimentali per POT,PDC

<b>TABELLA 4.7</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>Qgc_exp [kW]</b>	<b>Qgc_mod [kW]</b>	<b>Errore Relativo</b>
18,8	13,35	22,00	-0,393
20,1	13,19	21,11	-0,375
20,9	14,00	22,50	-0,378
21	13,67	22,44	-0,391
21,1	14,33	20,35	-0,296
21,2	14,98	21,94	-0,317
21,4	15,30	21,05	-0,273
21,6	15,63	20,14	-0,224
21,7	13,02	20,91	-0,377
22,2	13,67	20,35	-0,328
22,3	13,84	19,79	-0,301
22,4	13,67	21,78	-0,372
22,7	12,05	20,88	-0,423
22,8	14,00	20,91	-0,330
22,9	15,95	21,23	-0,249
23	16,93	19,67	-0,139
23,1	12,37	20,40	-0,393
23,3	15,95	21,05	-0,242
23,5	12,21	20,10	-0,392
23,6	15,79	18,69	-0,155
23,7	16,93	19,34	-0,124
23,8	12,37	19,60	-0,369
24	16,12	20,45	-0,212
24,1	14,33	19,64	-0,271
24,3	15,47	19,36	-0,201
24,4	16,12	19,90	-0,190
24,5	14,49	19,38	-0,253
24,8	16,28	20,49	-0,205
24,9	12,70	19,96	-0,364
25	16,28	17,93	-0,092
25,1	15,79	17,97	-0,121
25,2	14,65	18,72	-0,217
25,4	12,86	20,09	-0,360
25,6	16,60	19,56	-0,151
25,8	16,28	18,47	-0,119
25,9	14,81	18,46	-0,197
26,1	16,44	18,99	-0,134
26,3	14,33	17,53	-0,183
26,4	16,60	19,32	-0,141
26,5	15,47	17,42	-0,112
26,7	14,98	17,77	-0,157
26,8	14,98	19,13	-0,217

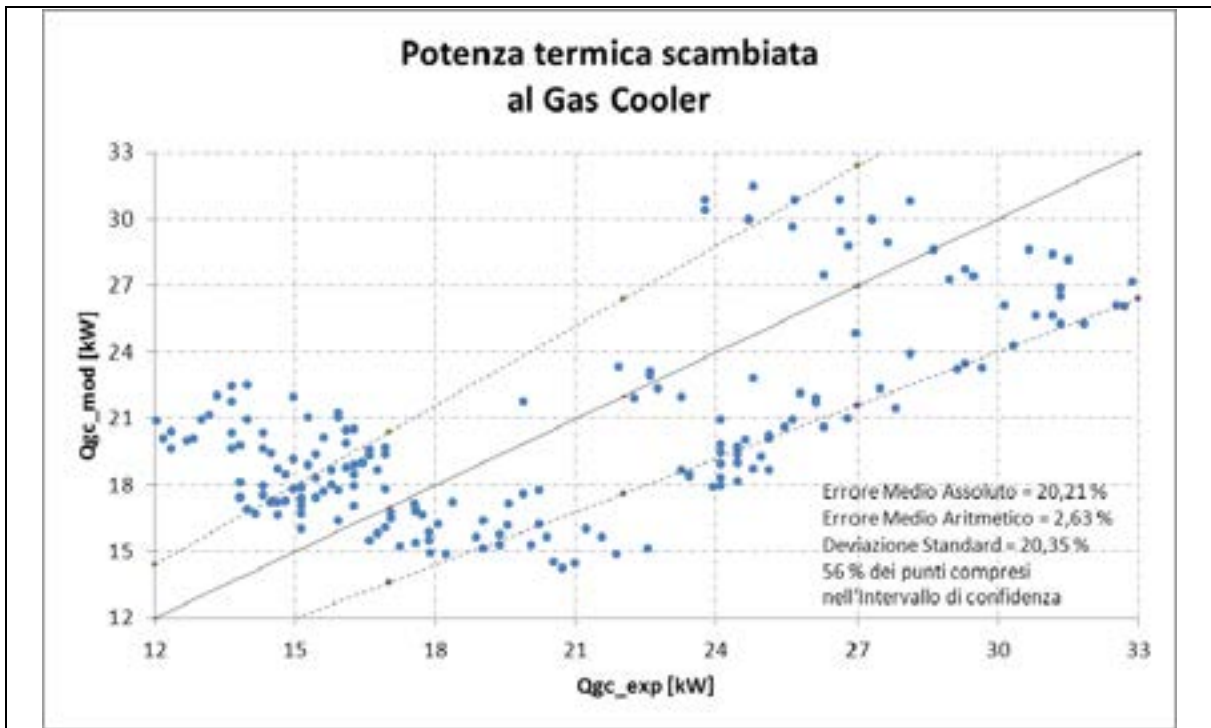
<b>TABELLA 4.7</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>Qgc_exp [kW]</b>	<b>Qgc_mod [kW]</b>	<b>Errore Relativo</b>
26,9	13,67	19,62	-0,303
27,1	15,14	17,85	-0,152
27,2	16,28	18,88	-0,138
27,3	15,14	17,35	-0,127
27,4	14,33	17,93	-0,201
27,5	15,95	17,75	-0,101
27,6	16,77	18,69	-0,103
27,7	15,30	18,89	-0,190
27,8	15,14	17,05	-0,112
28,2	14,49	17,22	-0,158
28,4	16,12	18,77	-0,142
28,5	13,84	18,12	-0,236
28,6	14,65	17,23	-0,150
28,7	15,14	17,87	-0,153
28,8	15,47	18,32	-0,156
28,9	13,84	17,40	-0,205
29	15,14	17,36	-0,128
29,1	14,65	16,65	-0,120
29,2	14,49	17,24	-0,160
29,3	16,93	17,76	-0,047
29,4	15,63	17,70	-0,117
29,6	14,16	16,69	-0,151
29,7	15,14	16,67	-0,092
30,1	15,95	16,40	-0,027
30,2	14,81	17,24	-0,141
30,3	14,00	16,89	-0,171
30,6	17,58	16,97	0,036
30,8	18,39	17,23	0,068
30,9	17,07	16,46	0,037
31	16,28	17,07	-0,046
31,1	15,14	16,00	-0,054
31,2	19,05	16,39	0,162
31,3	18,88	15,64	0,208
31,4	17,07	16,74	0,019
31,5	17,74	16,62	0,068
31,6	17,58	16,80	0,047
31,8	17,56	17,19	0,022
32	17,58	15,39	0,143
32,1	19,55	16,16	0,210
32,2	16,60	15,48	0,073
32,3	16,93	16,05	0,055
32,4	16,77	15,79	0,062



<b>TABELLA 4.7</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>Qgc_exp [kW]</b>	<b>Qgc_mod [kW]</b>	<b>Errore Relativo</b>
32,5	21,58	15,63	0,381
32,8	17,26	15,23	0,133
32,9	18,06	16,24	0,112
33	19,39	15,75	0,231
33,2	20,22	16,21	0,247
33,4	18,23	14,87	0,226
33,5	17,87	15,88	0,126
33,6	17,87	15,49	0,153
33,7	20,38	15,65	0,302
33,8	19,39	15,27	0,270
33,8	20,06	15,28	0,313
34	21,24	15,99	0,329
34,1	17,90	14,90	0,201
34,2	19,39	15,29	0,268
34,3	19,05	15,15	0,257
34,5	21,87	14,85	0,473
34,6	20,55	14,50	0,417
34,7	22,53	15,14	0,489
34,8	21,00	14,43	0,455
34,9	20,74	14,25	0,455
35	24,78	31,47	-0,213
35,3	25,68	30,83	-0,167
35,4	23,77	30,87	-0,230
35,4	24,69	29,96	-0,176
35,5	23,77	30,39	-0,218
35,8	26,64	30,87	-0,137
36	28,16	30,80	-0,086
36,2	25,63	29,64	-0,135
36,5	27,31	29,93	-0,088
36,6	26,68	29,43	-0,094
37,1	26,84	28,78	-0,067
37,3	27,67	28,90	-0,043
37,5	28,66	28,62	0,002
37,6	30,69	28,60	0,073
38	31,53	28,16	0,120
38,1	31,19	28,37	0,100
38,2	31,53	28,14	0,120
38,5	29,34	27,71	0,059
38,6	29,00	27,25	0,064
39	29,51	27,39	0,077
39,1	26,30	27,47	-0,043
39,4	31,36	26,85	0,168

<b>TABELLA 4.7</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>Qgc_exp [kW]</b>	<b>Qgc_mod [kW]</b>	<b>Errore Relativo</b>
39,6	32,88	27,16	0,210
39,8	31,36	26,50	0,184
40	32,71	26,04	0,256
40,2	30,16	26,11	0,155
40,4	30,82	25,61	0,204
40,5	32,54	26,10	0,247
40,8	31,87	25,27	0,261
41	31,19	25,62	0,217
41,2	31,36	25,23	0,243
41,5	26,98	24,85	0,086
42,4	26,30	24,28	0,083
42,7	30,35	23,87	0,271
42,8	28,16	23,48	0,199
43	29,34	23,24	0,262
43,2	23,60	23,27	0,014
43,5	29,17	23,35	0,249
44	29,67	23,09	0,285
44	21,92	22,78	-0,038
44,3	22,59	22,90	-0,013
44,6	24,78	22,11	0,121
44,9	22,59	21,94	0,030
45	25,80	22,36	0,154
45,1	23,27	21,73	0,071
45,2	27,48	22,33	0,230
45,4	19,90	21,45	-0,073
45,5	22,76	21,90	0,039
45,6	27,82	21,93	0,269
46,1	22,26	21,71	0,025
46,4	26,13	21,00	0,245
46,7	24,11	20,92	0,152
47	26,13	20,61	0,268
47,2	22,26	20,58	0,081
47,4	26,81	20,92	0,281
47,5	24,11	20,04	0,203
47,6	26,30	20,22	0,301
48,1	25,46	19,83	0,284
48,2	25,63	19,70	0,301
48,3	24,62	19,47	0,264
48,4	25,12	19,38	0,297
48,5	24,11	20,08	0,201
48,7	24,45	19,69	0,242
49,2	24,11	18,93	0,273
49,4	24,45	19,23	0,272

<b>TABELLA 4.7</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>Qgc_exp [kW]</b>	<b>Qgc_mod [kW]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,5	25,12	18,73	0,341
49,7	24,45	18,97	0,289
49,8	24,11	18,68	0,291
49,9	24,95	18,28	0,365
50,2	24,78	18,16	0,365
50,3	24,45	18,47	0,323
50,4	25,12	18,66	0,346
50,6	24,11	18,37	0,312
50,7	24,45	17,90	0,366
50,8	23,44	17,92	0,308
51,4	23,27	17,71	0,314
51,5	23,44	17,56	0,335
51,6	23,94	17,16	0,395
51,7	24,11	17,05	0,414
52,5	20,23	16,61	0,218
52,6	19,90	17,05	0,167
52,7	19,56	16,50	0,185
52,9	19,39	16,46	0,178



**FIGURA 4.5:** Confronto tra i risultati del modello di simulazione ed i dati sperimentali per  $Q_{gc}$

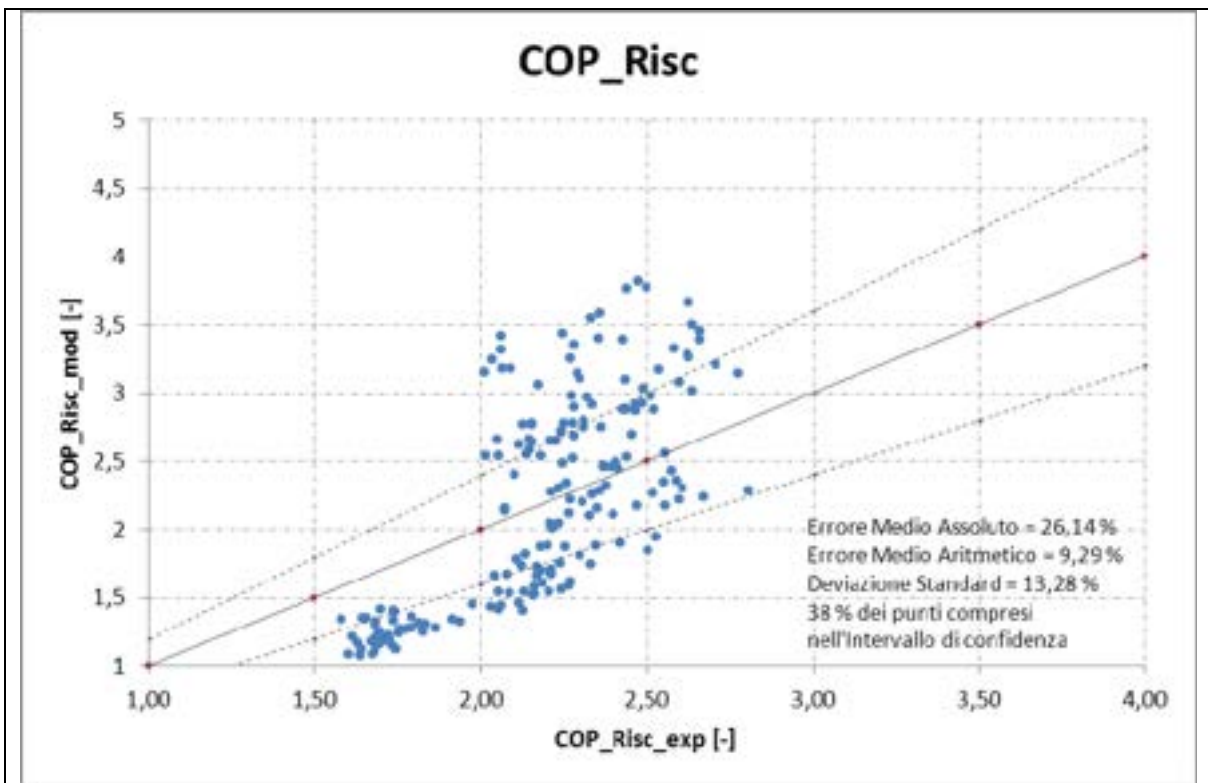
<b>TABELLA 4.8</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>COP_Risc_ exp [-]</b>	<b>COP_Risc_ mod [-]</b>	<b>Errore Relativo</b>
18,8	2,47	3,82	-0,353
20,1	2,33	3,55	-0,342
20,9	2,50	3,77	-0,337
21	2,44	3,77	-0,351
21,1	2,43	3,39	-0,284
21,2	2,63	3,66	-0,283
21,4	2,64	3,50	-0,246
21,6	2,58	3,33	-0,224
21,7	2,25	3,44	-0,347
22,2	2,28	3,35	-0,320
22,3	2,27	3,26	-0,303
22,4	2,36	3,58	-0,342
22,7	2,06	3,42	-0,397
22,8	2,35	3,40	-0,308
22,9	2,66	3,46	-0,231
23	2,71	3,21	-0,155
23,1	2,06	3,32	-0,379
23,3	2,66	3,39	-0,217
23,5	2,03	3,25	-0,373
23,6	2,49	3,04	-0,181
23,7	2,78	3,14	-0,117
23,8	2,01	3,16	-0,363
24	2,62	3,28	-0,201
24,1	2,29	3,15	-0,272
24,3	2,44	3,10	-0,215
24,4	2,54	3,18	-0,201
24,5	2,30	3,10	-0,259
24,8	2,63	3,26	-0,195
24,9	2,06	3,18	-0,350
25	2,47	2,87	-0,142
25,1	2,43	2,88	-0,156
25,2	2,27	2,98	-0,238
25,4	2,09	3,18	-0,342
25,6	2,59	3,08	-0,158
25,8	2,47	2,91	-0,153
25,9	2,28	2,90	-0,214
26,1	2,51	2,98	-0,157
26,3	2,15	2,77	-0,222
26,4	2,64	3,02	-0,126
26,5	2,31	2,75	-0,161
26,7	2,25	2,78	-0,191
26,8	2,32	2,98	-0,220

<b>TABELLA 4.8</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>COP_Risc_ exp [-]</b>	<b>COP_Risc_ mod [-]</b>	<b>Errore Relativo</b>
26,9	2,17	3,06	-0,291
27,1	2,28	2,78	-0,181
27,2	2,49	2,93	-0,150
27,3	2,24	2,71	-0,173
27,4	2,15	2,78	-0,225
27,5	2,36	2,75	-0,141
27,6	2,52	2,88	-0,126
27,7	2,34	2,92	-0,199
27,8	2,23	2,65	-0,161
28,2	2,15	2,66	-0,193
28,4	2,44	2,88	-0,152
28,5	2,13	2,77	-0,232
28,6	2,15	2,64	-0,185
28,7	2,24	2,73	-0,177
28,8	2,31	2,80	-0,174
28,9	2,05	2,66	-0,228
29	2,21	2,65	-0,165
29,1	2,14	2,55	-0,162
29,2	2,12	2,63	-0,195
29,3	2,45	2,70	-0,090
29,4	2,28	2,68	-0,150
29,6	2,05	2,54	-0,193
29,7	2,18	2,54	-0,141
30,1	2,25	2,49	-0,097
30,2	2,15	2,59	-0,171
30,3	2,01	2,54	-0,208
30,6	2,44	2,53	-0,036
30,8	2,55	2,56	0,000
30,9	2,37	2,46	-0,038
31	2,28	2,53	-0,099
31,1	2,10	2,40	-0,124
31,2	2,57	2,44	0,057
31,3	2,55	2,35	0,085
31,4	2,37	2,46	-0,037
31,5	2,41	2,45	-0,013
31,6	2,39	2,46	-0,027
31,8	2,41	2,50	-0,037
32	2,36	2,29	0,032
32,1	2,59	2,36	0,098
32,2	2,21	2,28	-0,029
32,3	2,26	2,34	-0,034
32,4	2,24	2,30	-0,029

<b>TABELLA 4.8</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>COP_Risc_ exp [-]</b>	<b>COP_Risc_ mod [-]</b>	<b>Errore Relativo</b>
32,5	2,80	2,28	0,228
32,8	2,27	2,22	0,021
32,9	2,38	2,32	0,023
33	2,52	2,27	0,109
33,2	2,61	2,30	0,133
33,4	2,35	2,16	0,090
33,5	2,34	2,25	0,037
33,6	2,31	2,20	0,047
33,7	2,60	2,22	0,170
33,8	2,47	2,18	0,135
33,8	2,56	2,18	0,174
34	2,67	2,24	0,194
34,1	2,27	2,12	0,067
34,2	2,07	2,16	-0,038
34,3	2,07	2,14	-0,032
34,5	2,33	2,10	0,109
34,6	2,21	2,05	0,077
34,7	2,40	2,12	0,133
34,8	2,23	2,04	0,093
34,9	2,22	2,01	0,101
35	2,53	1,95	0,299
35,3	2,35	1,89	0,244
35,4	2,20	1,88	0,169
35,4	2,25	1,88	0,201
35,5	2,18	1,87	0,164
35,8	2,42	1,90	0,275
36	2,50	1,85	0,353
36,2	2,30	1,81	0,270
36,5	2,13	1,82	0,176
36,6	2,11	1,78	0,182
37,1	2,12	1,73	0,224
37,3	2,17	1,73	0,258
37,5	2,24	1,75	0,279
37,6	2,33	1,75	0,337
38	2,21	1,70	0,298
38,1	2,18	1,70	0,282
38,2	2,21	1,68	0,320
38,5	2,08	1,68	0,242
38,6	2,04	1,67	0,226
39	2,17	1,66	0,304
39,1	2,21	1,69	0,306
39,4	2,19	1,61	0,361

<b>TABELLA 4.8</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>COP_Risc_ exp [-]</b>	<b>COP_Risc_ mod [-]</b>	<b>Errore Relativo</b>
39,6	2,27	1,62	0,403
39,8	2,16	1,58	0,366
40	2,26	1,59	0,426
40,2	2,09	1,54	0,358
40,4	2,13	1,54	0,382
40,5	2,24	1,56	0,435
40,8	2,21	1,54	0,430
41	2,16	1,52	0,420
41,2	2,16	1,52	0,420
41,5	2,05	1,54	0,332
42,4	2,24	1,46	0,535
42,7	2,11	1,45	0,455
42,8	1,98	1,42	0,396
43	2,05	1,43	0,434
43,2	1,80	1,44	0,244
43,5	2,03	1,40	0,452
44	2,06	1,42	0,453
44	1,74	1,41	0,237
44,3	1,70	1,40	0,209
44,6	2,13	1,36	0,562
44,9	1,74	1,35	0,289
45	1,79	1,34	0,334
45,1	1,64	1,35	0,223
45,2	1,92	1,34	0,434
45,4	1,58	1,32	0,195
45,5	1,74	1,35	0,289
45,6	1,94	1,31	0,475
46,1	1,65	1,30	0,271
46,4	1,81	1,28	0,420
46,7	1,69	1,32	0,274
47	1,83	1,25	0,467
47,2	1,57	1,27	0,242
47,4	1,86	1,28	0,458
47,5	1,69	1,22	0,379
47,6	1,83	1,25	0,467
48,1	1,77	1,30	0,364
48,2	1,79	1,25	0,436
48,3	1,72	1,20	0,429
48,4	1,75	1,20	0,460
48,5	1,68	1,27	0,327
48,7	1,70	1,18	0,440
49,2	1,68	1,17	0,439

<b>TABELLA 4.8</b>			
<b>ST3_exp [°C]</b>	<b>COP_Risc_ exp [-]</b>	<b>COP_Risc_ mod [-]</b>	<b>Errore Relativo</b>
49,4	1,71	1,15	0,486
49,5	1,76	1,19	0,480
49,7	1,70	1,16	0,468
49,8	1,68	1,13	0,490
49,9	1,73	1,16	0,493
50,2	1,73	1,19	0,449
50,3	1,70	1,17	0,454
50,4	1,74	1,22	0,431
50,6	1,68	1,12	0,496
50,7	1,69	1,17	0,436
50,8	1,63	1,10	0,477
51,4	1,62	1,09	0,488
51,5	1,64	1,08	0,520
51,6	1,67	1,09	0,532
51,7	1,68	1,12	0,501
52,5	1,67	1,13	0,478
52,6	1,64	1,08	0,522
52,7	1,60	1,08	0,481
52,9	1,58	1,12	0,413

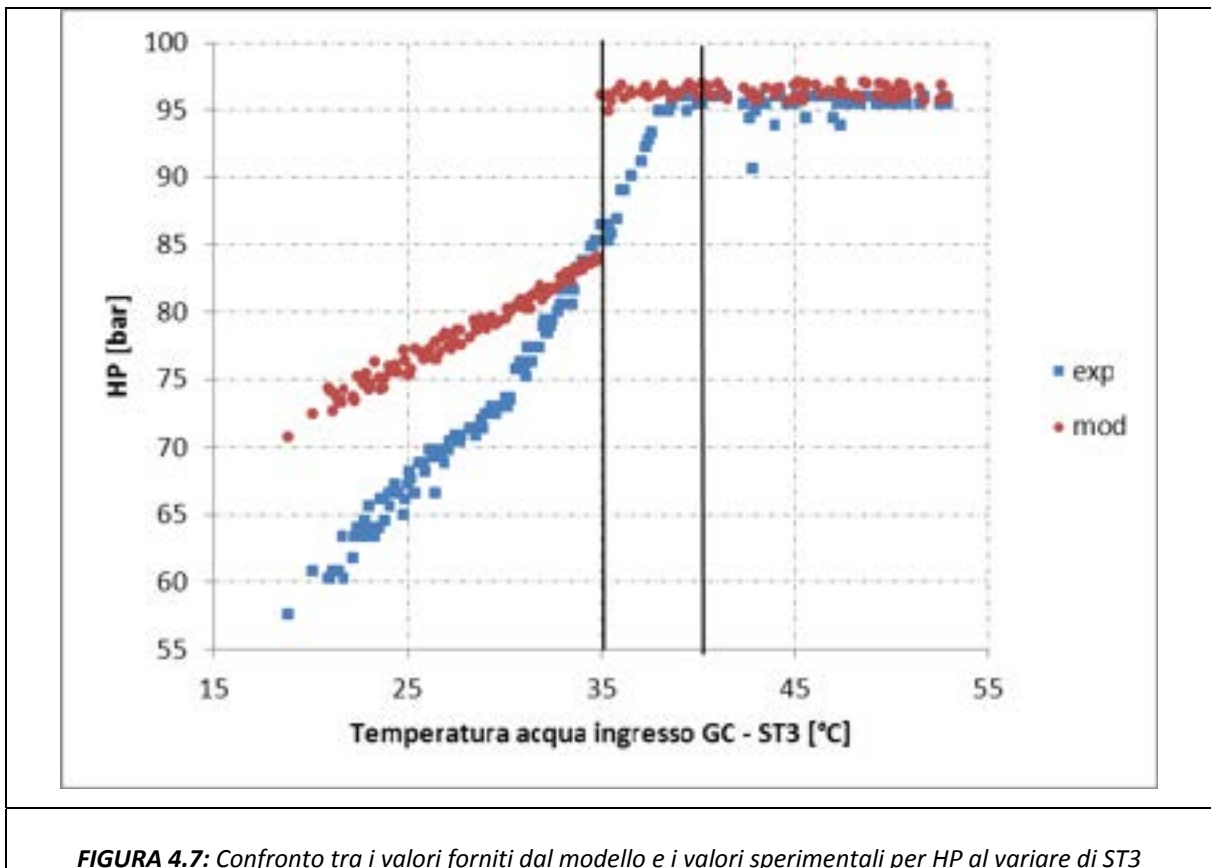


**FIGURA 4.6:** Confronto tra i risultati del modello di simulazione ed i dati sperimentali per COP\_Risc

L'entità degli errori presenti nei risultati che il modello fornisce per il COP sono direttamente connessi agli errori della potenza termica scambiata al gas cooler e della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore (Figura 4.6). Solo il 38 % dei risultati forniti dal modello ricade all'interno dell'intervallo di confidenza (ampiezza 20 %).

Per meglio indagare le potenzialità del modello di simulazione del funzionamento della pompa di calore, è opportuno confrontare i risultati forniti dal modello e i dati sperimentali in relazione alla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3. Considerare la ST3 permette di rilevare le criticità del modello di simulazione in modo distinto per le due modalità di funzionamento ( con due e con tre compressori) simulate dal modello stesso.

Il modello non prevede la presenza e quindi il funzionamento dell'inverter a comando del terzo compressore. Tale limitazione è palesemente rintracciabile nel confronto tra i risultati forniti dal modello e i dati sperimentali al variare di ST3 per quanto riguarda la potenza elettrica assorbita dalla macchina (Figura 4.7).

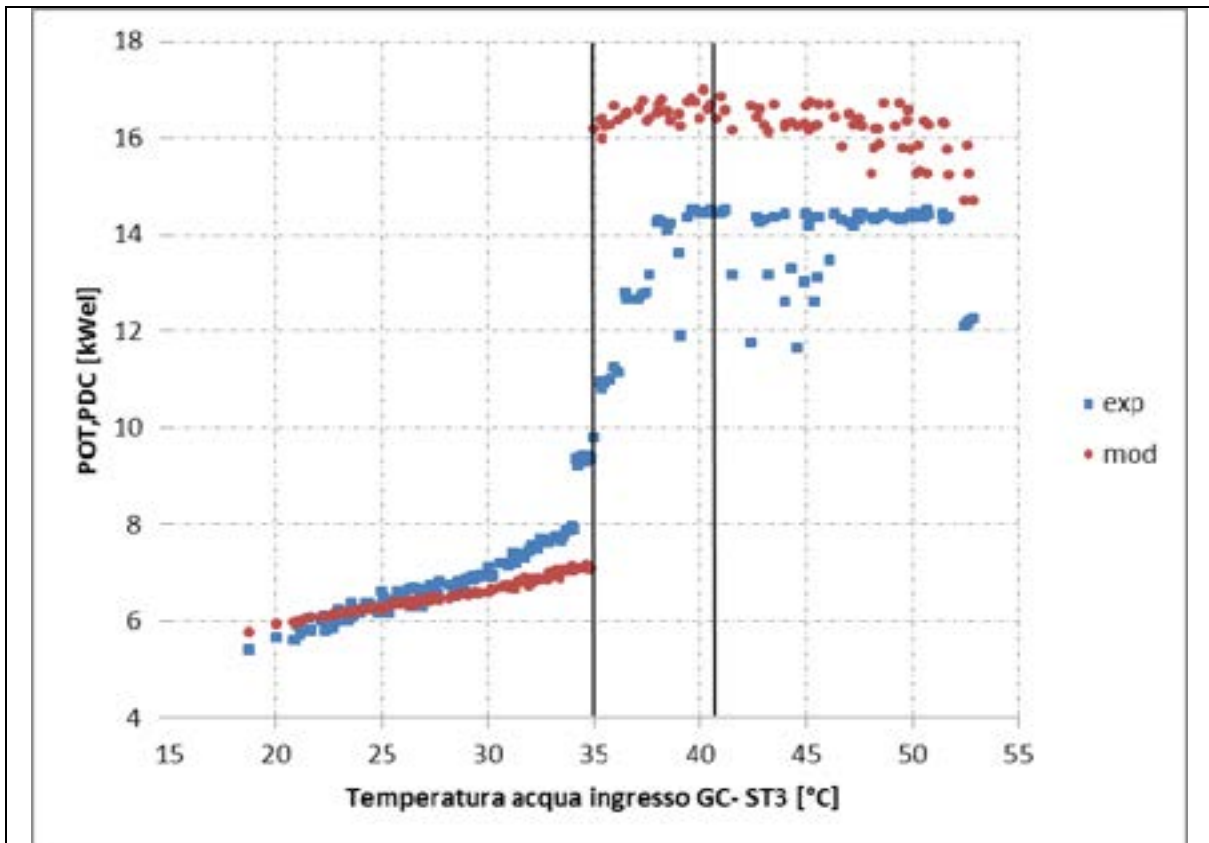


**FIGURA 4.7:** Confronto tra i valori forniti dal modello e i valori sperimentali per HP al variare di ST3

Nel confronto riportato in figura per l'alta pressione, il modello sovrastima il valore di HP fornito per temperature ST3 minori di 35°C quindi per il funzionamento con i due compressori di tipo ON/OFF. Sia i dati sperimentali che i risultati del modello si attestano attorno ad un valore di circa 96 bar come valore di pressione massima possibile.



La potenza elettrica assorbita fornita dal modello di simulazione è soggetta ad errori bassi per ST3 minore di 35°C mentre ciò non accade per ST3 maggiore di 35 °C in quanto il modello sovrastima il valore di potenza elettrica (Figura 4.8).

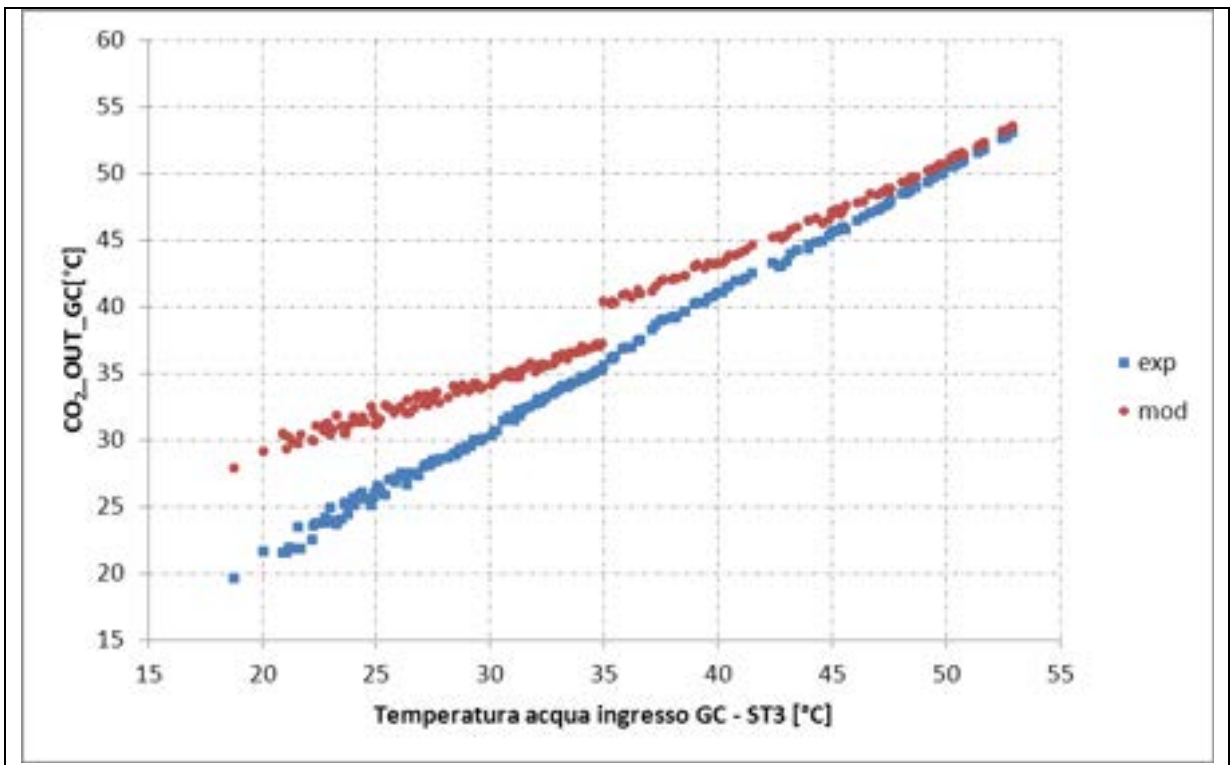


**FIGURA 4.8:** Confronto tra i valori forniti dal modello e i valori sperimentali per POT,PDC al variare di ST3

In particolare, il modello sovrastima il valore di potenza elettrica assorbito dalla macchina quando ST3 raggiunge il valore di circa 41 °C perché considera, da tale temperatura in poi, tutti e tre i compressori funzionanti al 100 %, trascurando la parzializzazione effettuata dall'inverter sul funzionamento del terzo compressore. In tali condizioni, il modello calcola quindi un assorbimento elettrico maggiore di quello reale influenzando negativamente il calcolo del COP.

La potenza termica scambiata al gas cooler dipende dalle condizioni della CO<sub>2</sub> in ingresso al gas cooler, quindi dalla fine compressione, e dalle condizioni in uscita dal gas cooler, quindi da HP e dalla temperatura del refrigerante in uscita dal gas cooler CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC. La sovrastima della pressione al gas cooler (per ST3 minore di 35°C) fornita dal modello si ripercuote negativamente sulla temperatura CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC, di conseguenza maggiore

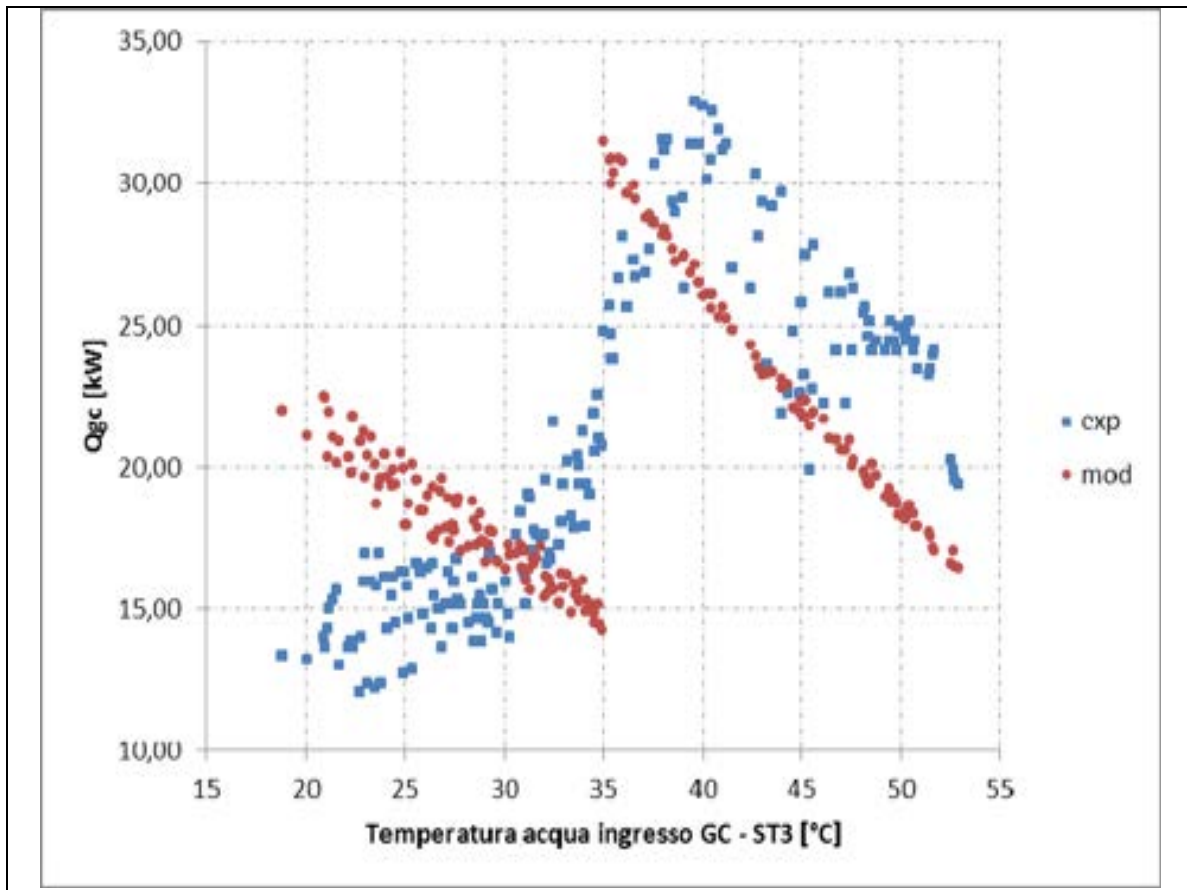
rispetto ai valori sperimentali (Figura 4.9). Ciò determina a sua volta una  $Q_{gc}$  (calcolata) maggiore rispetto al valore sperimentale, sempre per ST3 minore di 35°C.



**FIGURA 4.9:** Confronto tra i valori forniti dal modello e i valori sperimentali per la temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler al variare di ST3

Il modello non considera l'effettivo funzionamento dell'inverter e quindi non è in grado di calcolare con un grado di accuratezza accettabile sia la media pressione sia la portata elaborata dal terzo compressore che contribuirà a  $Q_{gc}$ . Inoltre, le condizioni di inizio e fine compressione del terzo compressore dipendono anche dalla calibrazione degli scambiatori rigenerativi presenti all'interno della macchina.

L'impossibilità di determinare il corretto accoppiamento con il terzo compressore, quando l'inverte entra in funzione, comporta un valore calcolato per  $Q_{gc}$  dissimile dal corrispondente dato sperimentale; in particolare, quando l'inverter inizia a parzializzare la velocità di rotazione del terzo compressore, la potenza termica scambiata al gas cooler fornita dal modello sottostima quella reale (Figura 4.10).

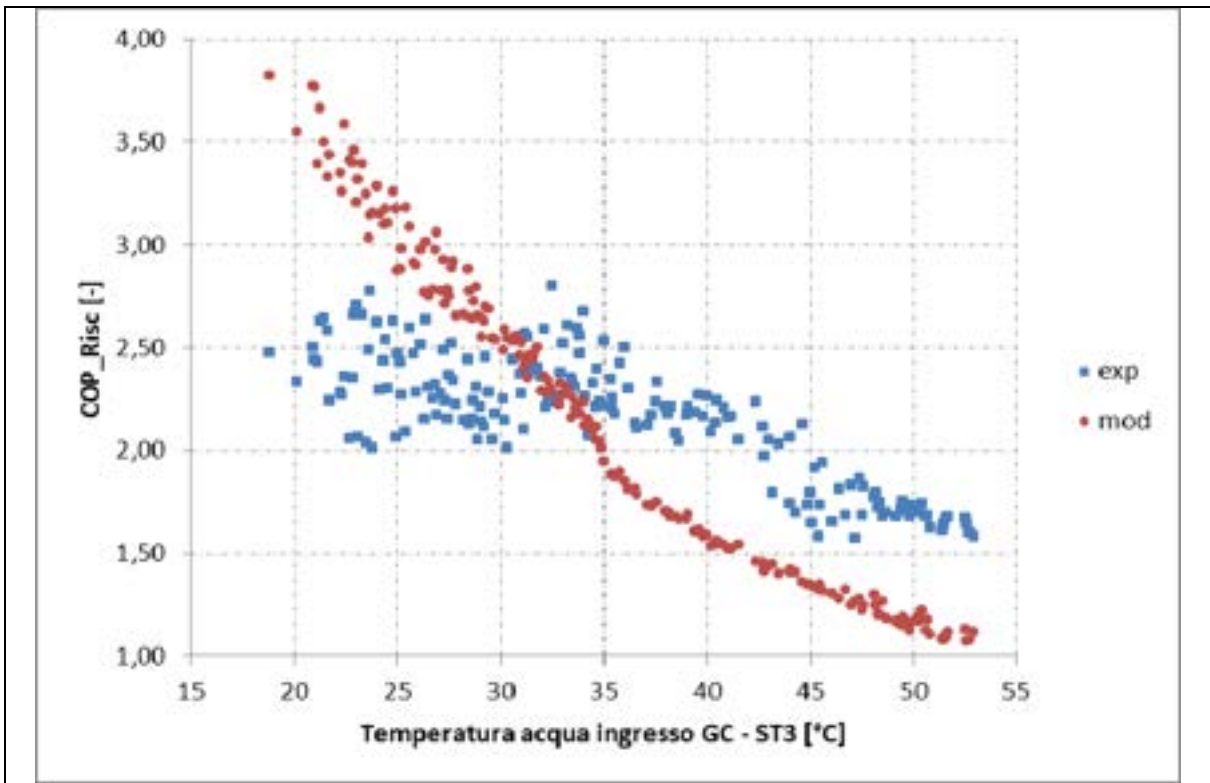


**FIGURA 4.10:** Confronto tra i valori forniti dal modello e i valori sperimentali per  $Q_{gc}$  al variare di  $ST3$

L'andamento della potenza elettrica e della potenza termica al gas cooler calcolati dal modello influiscono direttamente sull'andamento del COP.

Mentre per  $ST3$  minori di  $30^{\circ}\text{C}$  la potenza elettrica calcolata con il modello ben rispecchia i dati sperimentali, la potenza termica  $Q_{gc}$  calcolata risulta essere sovrastimata determinando per il COP valori calcolati maggiori dei rispettivi dati sperimentali.

Per  $ST3$  maggiori di  $35^{\circ}\text{C}$ , il modello sottostima il COP in accordo con i risultati forniti per la potenza elettrica e la potenza termica al gas cooler. L'andamento decrescente del COP per  $ST3$  maggiori di  $35^{\circ}\text{C}$  è giustificato da un andamento altrettanto decrescente per  $Q_{gc}$ , anche essa sottostimata, e da una potenza elettrica calcolata maggiore di quella reale. L'andamento del COP per  $ST3$  maggiore di  $35^{\circ}\text{C}$  è conseguenza della mancata considerazione della presenza dell'inverter da parte del modello di simulazione (Figura 4.11).



**FIGURA 4.11:** Confronto tra i valori forniti dal modello e i valori sperimentali per il COP al variare di ST3

## **5 VERIFICA DELLE PRESTAZIONE DELLA POMPA DI CALORE IN FUNZIONAMENTO POLIVALENTE**

### **5.1 Introduzione**

La pompa di calore è una macchina polivalente cioè in grado di produrre contemporaneamente sia acqua calda che acqua refrigerata. Come già spiegato nei capitoli precedenti, la macchina rende al massimo quando viene prodotta sia acqua calda che acqua refrigerata quindi quando non c'è alcuna dissipazione e il dry cooler non funziona. Durante il periodo di monitoraggio della macchina, ovvero tra i mesi di ottobre 2011 e gennaio 2012, a causa della non bassa temperatura dell'aria esterna e della temperatura dell'acqua dell'accumulo freddo maggiore del valore di set point, la macchina ha lavorato a regime producendo sia acqua calda che acqua refrigerata.

È necessario analizzare il comportamento della macchina in un giorno tipo in cui si ha tale contemporanea produzione, rimandando alla campagna di climatizzazione estiva per un'analisi più accurata.

### **5.2 Analisi dati sperimentali**

La descrizione delle prestazioni della macchina in funzionamento estivo consiste nell'indagare l'EER (Energy efficiency ratio) della pompa ovvero l'indice di efficienza energetica in funzionamento estivo. L'EER è definito come il rapporto tra l'effetto utile prodotto, quindi l'effetto frigorifero (kWf), e il dispendio necessario per produrre tale effetto utile ovvero la potenza elettrica assorbita dalla macchina per il proprio funzionamento. L'analisi è stata condotta scegliendo un giorno tipo tra i vari giorni monitorati.

Vengono di seguito riportati parte dei dati relativi al tre gennaio 2012 (Tabella 5.1):

**TABELLA 5.1**

Log Time	POT PDC [kWel]	T,ACC, CALD [°C]	Qgc [kWth]	T,USC, CALD,PDC [°C]	FLUX,PDC, CALD [m3/h]	T,USC,FRE PDC [°C]	FLUX,PDC,F RED [m3/h]	T,ACC,FRE D [°C]	Qeva [KWf]	WATER_IN GC[°C]	WATER_IN_E V[°C]	CMP1	CMP2	CMP3
07:40	6,1	23,3	13,02	29,90	2,80	6,60	3,70	9,80	10,11	24,9	9	Attivo	Attivo	Inattivo
07:50	6,3	23,75	14,33	31,10	2,80	5,85	3,70	9,40	8,17	26,9	7,9	Attivo	Attivo	Inattivo
08:00	6,6	24,9	16,44	33,35	2,80	5,35	3,45	8,65	7,82	28,4	7,2	Attivo	Attivo	Inattivo
<b>08:10</b>	<b>6,85</b>	<b>26,05</b>	<b>17,42</b>	<b>34,85</b>	<b>2,80</b>	<b>5,20</b>	<b>3,20</b>	<b>8,35</b>	<b>11,16</b>	<b>29,4</b>	<b>8,4</b>	<b>Attivo</b>	<b>Attivo</b>	<b>Inattivo</b>
08:20	7,2	27	19,06	36,35	2,85	4,50	3,20	8,40	12,28	30,8	8	Attivo	Attivo	Inattivo
08:30	7,6	28,2	21,08	38,40	2,90	4,05	3,20	8,45	13,95	32,4	8	Attivo	Attivo	Inattivo
08:40	7,95	29,65	21,75	40,30	2,90	3,90	3,20	8,55	14,33	34	8	Attivo	Attivo	Inattivo
08:50	11,25	31,45	28,33	44,35	2,90	3,05	3,20	8,70	17,12	36	8	Attivo	Attivo	Attivo
09:00	13,6	33,85	31,36	47,75	2,90	2,55	3,20	8,85	18,79	39	7,8	Attivo	Attivo	Attivo
09:10	10,95	36,4	27,99	49,40	2,90	3,00	3,20	9,00	19,72	41,4	8,1	Attivo	Attivo	Attivo
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Dall'analisi delle prime tre righe si nota come la macchina produce contemporaneamente sia acqua calda che acqua refrigerata; ciò accade in quanto all'avviamento dell'impianto, i due serbatoi di accumulo non sono quasi mai in temperatura. Il serbatoio di accumulo lato caldo ha infatti una temperatura minore di 20°C, quindi minore del valore di set point imposto di 50 °C, e allo stesso modo, l'acqua contenuta all'interno del serbatoio freddo ha una temperatura maggiore del valore di set point. Questo implica il mancato funzionamento del dry cooler in quanto non è necessario effettuare alcuna dissipazione.

Essendo la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler della pompa di calore minore di 35°C, temperatura di attivazione del circuito di media pressione e quindi del compressore con inverter, risultano funzionanti i due compressori di tipo on/off.

Nel calcolo prestazionale della macchina è necessario considerare i due effetti utili quindi il COP relativo alla produzione di acqua calda e l'EER relativo alla produzione di acqua refrigerata.

Il coefficiente di prestazione totale è la somma del COP e dell'EER; se si fa riferimento all'acquisizione effettuata alle ore 7:50. La macchina produce rispettivamente 17,42 kWth e 11,16 kWf a fronte di un assorbimento elettrico di 6,85 kWel. Si ricava un COP di 2,54 e un EER di 1,63; sommando il COP e l'EER si ricava il coefficiente di prestazione totale:

$$\text{COP} + \text{EER} = 2,54 + 1,63 = 4,17$$

Il valore così ottenuto è decisamente rilevante. In particolare, durante la produzione contemporanea di acqua calda e di acqua fredda, la macchina ha un indice prestazionale totale che dimostra l'effettiva convenienza dell'utilizzo della pompa di calore nel pieno delle sue funzioni, verificando anche le prestazioni della pompa di calore nel raffrescamento.

## 6 CONSIDERAZIONI ECONOMICHE SULLA CONVENIENZA DI UNA POMPA DI CALORE A CO<sub>2</sub>

### 6.1 Introduzione

Conoscere i costi del kWh elettrico e del gas serve per poter valutare se costa meno riscaldare con una pompa di calore oppure con una caldaia a gas metano. Rispetto ad una caldaia a gas, una pompa di calore lavora in modo conveniente solo con COP non inferiori al rapporto fra il costo del kWh elettrico e quello del kWh prodotto col gas.

Il costo del kWh elettrico è il costo unitario di vendita dell'energia elettrica e dipende dalle condizioni di fornitura stipulate con l'ente erogatore. Può dipendere solo dai consumi (tariffa monomia) oppure anche dall'impegnativo (tariffa binomia).

Il costo del gas è normalmente costituito da una quota fissa (indipendente dai consumi) e da una quota correlata ai consumi.

Il costo del suo kWh termico può essere calcolato con la seguente formula:

$$C(\text{kWh.g}) = \frac{C_{\text{gas}}}{\text{PCI} \cdot \eta}$$

dove:

$C_{\text{gas}}$  = costo Nm<sup>3</sup> gas;

PCI = potere calorifico inferiore gas [kWh/Nm<sup>3</sup>];

$\eta$  = rendimento di combustione;

Il valore del potere calorifico inferiore è indicato, per legge, sui contratti di fornitura e sulle bollette di pagamento del gas. Il rapporto costi fra il kWh elettrico e il kWh gas, in termini algebrici, è esprimibile attraverso la seguente espressione:

$$R = \frac{C(\text{kWh.e})}{C(\text{kWh.g})}$$

Tale rapporto si calcola esplicitando il costo del [kWh.g] con la relazione ricavata in precedenza risulta:

$$R = \frac{C(\text{kWh.e}) \cdot \text{PCI} \cdot \eta}{C_{\text{gas}}}$$

dove:

$C(\text{kWh.e})$  = costo kWh elettrico;



$C_{\text{gas}}$  = costo  $\text{Nm}^3$  gas;

PCI = potere calorifico inferiore gas [ $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ ];

$\eta$  = rendimento di combustione;

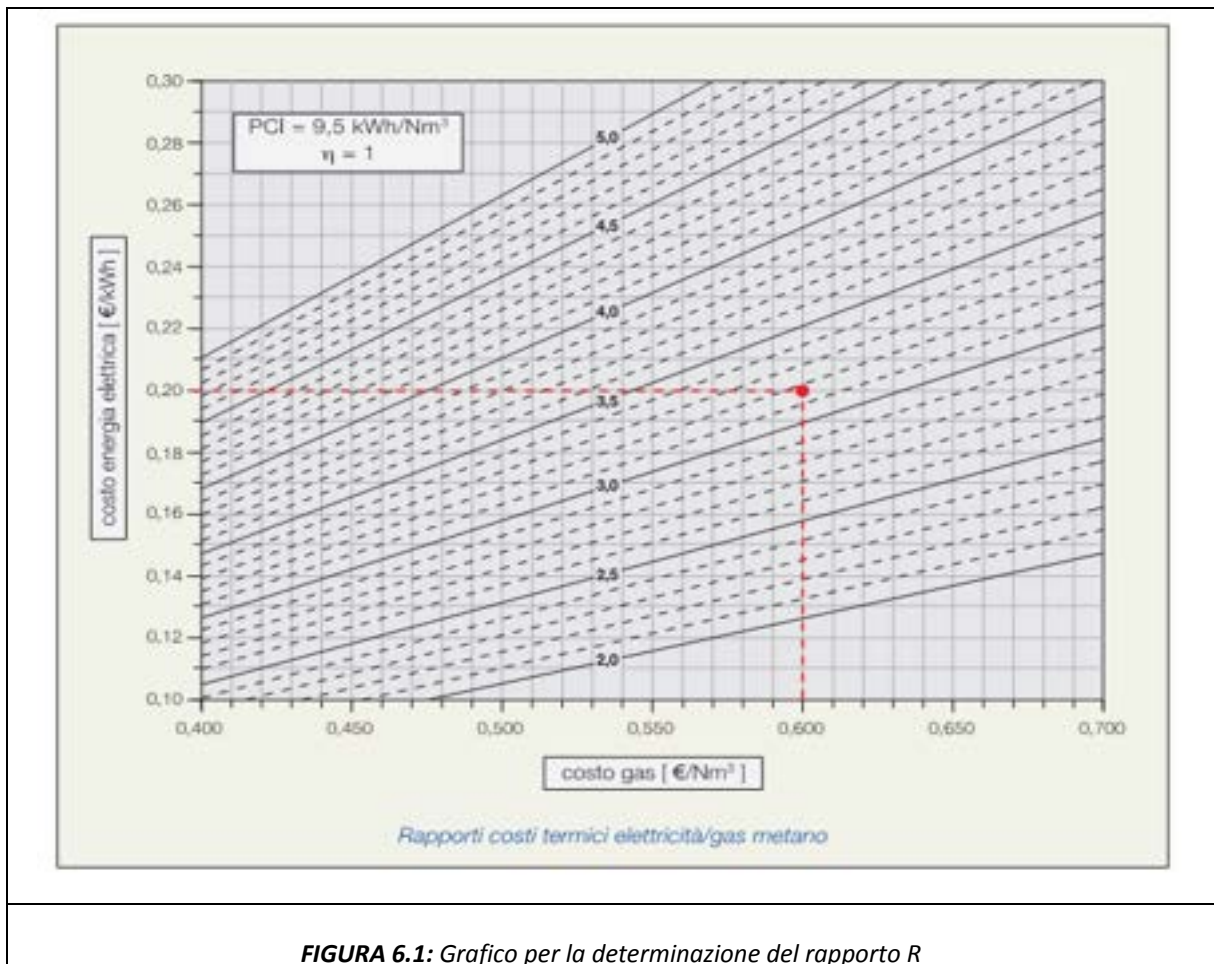
I rendimenti di combustione variano generalmente nell'ambito dei seguenti valori:

$\eta = 0,70 \div 0,80$  caldaie vecchie;

$\eta = 0,90 \div 0,95$  caldaie nuove non a condensazione;

$\eta = 0,95 \div 1,05$  caldaie nuove a condensazione;

Con accettabile approssimazione, il valore di R può essere determinato anche con un semplice grafico (figura 6.1).



Il grafico è sviluppato, in base ai costi dell'energia elettrica e del gas, ipotizzando:

- PCI =  $9,50 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$  valore medio miscele gas vendute in Italia;
- $\eta = 1,00$ ;
- Se  $\eta$  è diverso da quello ipotizzato, è sufficiente moltiplicare il valore di R per quello di  $\eta$  effettivo.

## 6.2 Caso applicativo

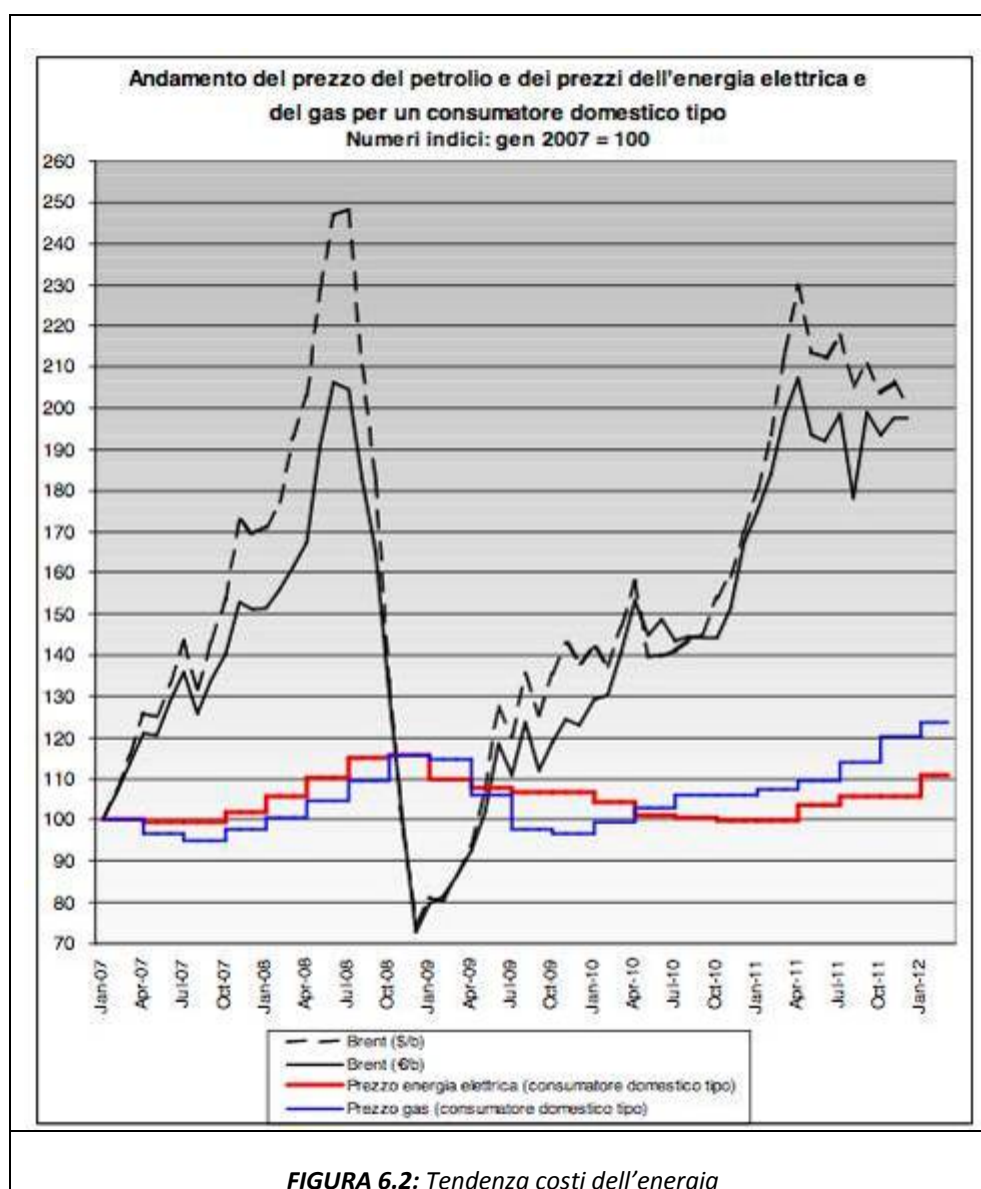
Di seguito viene riportato un semplice esempio applicativo di quanto detto nel paragrafo precedente. Il valore di R viene determinato in base ai costi dell'energia elettrica e del gas aggiornati ad oggi (figura 6.2).

### Costo energia elettrica: aggiornamento trimestrale nel dettaglio.

Dal 1° gennaio 2012, il prezzo di riferimento dell'energia elettrica sarà 17,305 centesimi di euro per kilowattora, tasse incluse ( <http://www.casaclima.com>).

### Costo del gas metano: aggiornamento trimestrale nel dettaglio.

Dal 1° gennaio, i prezzi di riferimento del gas saranno di 86,38 centesimi di euro per metro cubo, con un aumento di 2,31 centesimi di euro per metro cubo, tasse incluse.



**FIGURA 6.2:** Tendenza costi dell'energia

Queste condizioni di fornitura si applicano ai clienti domestici (condomini inclusi) ed agli altri clienti con consumi inferiori ai 200.000 metri cubi annui, non ancora passati al mercato libero.

Nel caso in esame quindi si ha:

- 0,17305 costo energia elettrica [€/kWh];
- 0,8638 costo gas [€/Nm<sup>3</sup>];
- 9,50 PCI gas [kWh/Nm<sup>3</sup>];
- 0,95 rendimento caldaia;

Si ottiene:

$$R = \frac{0,17305 \cdot 9,50 \cdot 0,95}{0,8638} = 1,80$$

R è ottenibile anche con il grafico sopra riportato dal quale, in relazione ai costi dell'esempio, si può ricavare il valore di R ma con rendimento di combustione unitario.

Considerando, invece, il rendimento effettivo si ottiene il valore di 1,80 ricavato in precedenza.

Dunque il valore del rapporto fra il costo del kWh elettrico e quello del kWh prodotto col gas è in questo caso pari a 1,80, come già poteva dedursi, senza tener conto del rendimento effettivo della caldaia dal grafico.

Dunque, nell'esempio considerato, il costo del calore prodotto direttamente con l'energia elettrica è 1,80 volte superiore a quello prodotto col gas.

In base alle definizioni di COP e di R, una pompa di calore produce energia termica a minor costo di una caldaia solo se il COP è maggiore del rapporto R (COP > R). In altri termini, è conveniente utilizzare una pompa di calore, rispetto ad una caldaia a gas, solo se la pompa di calore è in grado di lavorare con COP più elevati di R. Il valore di R ottenuto nell'esempio può, con buona approssimazione, essere assunto come valore di riferimento del rapporto che sussiste attualmente in Italia fra i costi del kWh elettrico e del kWh termico prodotto col gas.

In Europa tale rapporto è generalmente più basso perché l'energia elettrica ha costi meno elevati. Ad esempio in Francia, i costi del gas sono più o meno come i nostri, ma l'energia elettrica costa solo 0,10 ÷ 0,12 €/kWh. Il che comporta valori di R, e quindi di COP minimi, variabili da 1,5 a 1,8.

In conclusione la convenienza dell'utilizzo di una pompa di calore dipende non soltanto dalla tecnologia della macchina ma anche dai costi dell'energia vigenti nel luogo geografico in cui la Pompa di calore è installata.

## CONCLUSIONI

Dall'analisi e dalla rielaborazione dei dati sperimentali invernali ed estivi, risulta che maggiore è la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3, peggiori sono le prestazioni della macchina, quindi la temperatura di ritorno dell'acqua dall'impianto, o dal circuito servito, alla pompa di calore ne determina fortemente il COP e l'EER: nei cicli transcritici l'efficienza è fortemente legata alla temperatura di ingresso dell'acqua, a differenza di un ciclo comune in cui la temperatura di condensazione è legata alla temperatura massima dell'acqua. Come dimostrato dai grafici riportati nel capitolo due relativo all'analisi e alla rielaborazione degli stessi, tutti i parametri operativi dipendono da ST3.

Nel funzionamento invernale, a causa della logica di funzionamento della macchina, il ruolo di tale temperatura è ancora più decisivo perché determina l'attivazione e la disattivazione di tutti e tre i compressori della pompa di calore. In particolare, si è costatato che il coefficiente di prestazione della pompa risente in maniera determinante del livello di temperatura raggiunto dall'acqua in ingresso al gas cooler, e presenta un punto di massimo pari a 2,80 per una temperatura di ingresso dell'acqua pari a 32,5°C (Caso invernale).

Un elevato COP per una pompa di calore a CO<sub>2</sub> a singolo stadio senza recupero dell'energia di espansione, può essere ottenuto soltanto se la CO<sub>2</sub> ha una temperatura in uscita dal gas cooler relativamente bassa. Questo presuppone quindi che il fluido secondario, ovvero l'acqua, abbia una temperatura bassa all'ingresso nel gas cooler.

La sperimentazione nel periodo invernale di tale pompa di calore evidenzia come **sia importante la scelta dei terminali da abbinare alla macchina**: essi devono essere in grado di assicurare una bassa temperatura di ritorno dall'impianto in modo da migliorare le prestazioni della macchina. È opportuno quindi studiare una strategia adeguata di regolazione o selezionare degli opportuni terminali d'impianto ad elevato salto termico, cercando di mantenere la temperatura ST3 al di sotto dei 35°C. Dall'analisi dei dati sperimentali risulta infatti evidente che una maggiore temperatura dell'acqua in ingresso alla macchina corrisponde ad un peggioramento delle prestazioni della pompa di calore e quindi ad un abbassamento del COP, soprattutto se ST3 è maggiore di 35°C.

La pompa di calore, in un eventuale intervento di riqualificazione energetica di un edificio esistente o di pregio storico, è sicuramente in grado di alimentare un tradizionale radiatore

che necessita di una temperatura in ingresso compresa tra 70°C e 60°C, in funzione della temperatura dell'aria esterna. Bisogna però porre particolare attenzione alla temperatura dell'acqua di ritorno in macchina che deve essere necessariamente inferiore a 35°C per ottenere un COP significativo. L'evoluzione delle strategie di termoregolazione dei "vecchi" radiatori consentirà sicuramente l'ottenimento di terminali ad elevato salto termico. Nel caso di nuovi edifici e quindi di nuovi impianti, questa macchina si sposa evidentemente molto bene ad impianti di tipo radiante che tipicamente lavorano con un elevato salto termico.

L'analisi dei dati estivi ha evidenziato l'importanza della temperatura ST3 anche per quanto riguarda il funzionamento estivo della pompa di calore. Così come accade nel caso invernale, ST3 stabilisce il funzionamento del compressore sotto inverter mentre i due compressori di tipo ON/OFF sono gestiti dalla temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore ST2. In realtà tale temperatura, e quindi le condizioni che si hanno all'evaporatore, è legata alla temperatura ST3, cioè alle condizioni raggiunte invece al gas cooler. Garantendo una temperatura ST3 prossima a 30°C si ha un EER della macchina pari a circa 3: in funzionamento polivalente, la macchina dovrà produrre acqua calda a temperature superiori a 30°C solo nel caso ci sia una richiesta di quest'ultima. In assenza di richiesta di carico termico (es. produzione acqua calda sanitaria, sterilizzazione in applicazioni dell'industria alimentare, etc.) sarà sicuramente conveniente dissipare l'energia termica prodotta dalla pompa di calore mediante l'utilizzo di un Dry Cooler, senza fornire apporto termico al serbatoio di accumulo caldo.

In conclusione, risulta necessario fornire l'acqua in ingresso alla pompa di calore lato gas cooler in condizioni opportune tali da garantire un efficiente scambio termico tra acqua e anidride carbonica e un basso assorbimento elettrico: questo si traduce in inverno nel garantire una ST3 inferiore a 35°C ed in estate, qualora non ci sia necessità di energia termica, nel mantenere ST3 al di sotto dei 30°C.

Il modello di simulazione del funzionamento della pompa di calore consente di tener conto della maggior parte delle dinamiche del sistema per il funzionamento a regime quasi-stazionario, tranne della parzializzazione del numero di giri del terzo compressore comandato da inverter e presente sulla media pressione.

Tale modello ha mostrato un buon riscontro nel confronto con i dati sperimentali soprattutto per quanto concerne alcune grandezze quali l'alta e la bassa pressione; per quanto riguarda invece le altre grandezze, per ottenere risultati più accurati sarebbe opportuno una rivalutazione delle relazioni e delle calibrazioni dei vari componenti effettuate per la loro determinazione.

Il modello di simulazione non è in grado di predire in modo molto accurato il valore assunto dalla media pressione: i valori calcolati dal modello per tale grandezza presentano un alto valore della deviazione standard. La deviazione standard è infatti un indice di dispersione delle misure sperimentali, vale a dire è una stima della variabilità dei risultati forniti dal modello. Un alto valore di deviazione standard implica una cattiva dispersione dei dati intorno al valore atteso cioè attorno al rispettivo dato sperimentale.

Il modello non è in grado di predire con un buon grado di accuratezza il valore assunto dalla temperatura del refrigerante in aspirazione ai compressori ON/OFF. Il modello sovrastima il valore della temperatura del refrigerante in aspirazione ai compressori di bassa pressione per valori bassi di ST3 mentre ne sottostima il valore per ST3 maggiore di 35°C. Ciò è causa di una cattiva dispersione dei risultati del modello attorno ai valori sperimentali determinando la presenza di pochi punti all'interno dell'intervallo di confidenza.

Quando il terzo compressore funziona sotto inverter viene variata la velocità di rotazione del terzo compressore e la pressione al gas cooler si stabilizza al valore massimo possibile pari a circa 96 bar. In tali condizioni, la temperatura del refrigerante in uscita dal gas cooler diventa indipendente dalla pressione, quindi cessa la validità della relazione polinomiale che lega HP e CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC fornita per il funzionamento della valvola di laminazione principale.

La valvola di laminazione prova a fissare il valore di pressione in funzione di CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC ma al contempo il controllore dell'inverter interviene per limitare o aumentare il numero di giri del compressore.

Pertanto, il funzionamento non è a regime stazionario ed è difficile prevedere l'accoppiamento con il compressore alla pressione intermedia e determinare, di conseguenza, il valore assunto da quest'ultima. Da tale situazione deriva la differenza tra i valori forniti dal modello e quelli sperimentali.

Il modello sovrastima il valore della temperatura della CO<sub>2</sub> in aspirazione ai due compressori di bassa pressione (SUCTION\_BP\_TEMP) per ST3 minore di 35°C. Tale temperatura dipende dalla pressione al gas cooler, quindi dalla temperatura del refrigerante in uscita dal gas

cooler (CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC) calcolata secondo la relazione della valvola ICMTS, e dalla calibrazione dello scambiatore posto a valle dell'evaporatore. La sovrastima che il modello effettua della pressione al gas cooler (per ST3 minore di 35°C) e la mancata considerazione del funzionamento con inverter si ripercuotono negativamente sulla temperatura della CO<sub>2</sub> in aspirazione ai due compressori di LP, essendo l'accoppiamento con il terzo compressore non corretto. La SUCTION\_BP\_TEMP è inoltre legata alla CO<sub>2</sub>\_OUT\_GC dall'equazione che definisce il rendimento dello scambiatore posto a monte dei compressori presenti sulla bassa pressione quindi potrebbe essere necessaria un'ulteriore valutazione dell'efficienza di tale scambiatore.

Un'eventuale fonte di miglioramento per i risultati forniti dal modello per la SUCTION\_BP\_TEMP, potrebbe essere la rivalutazione della relazione tra HP e la temperatura della CO<sub>2</sub> in uscita dal gas cooler che regola il funzionamento della valvola di laminazione principale ICMTS, stabilendo anche il campo di validità di tale relazione in base alla pressione HP.

Per migliorare la capacità predittiva del modello ad alte pressioni HP è necessario modellare opportunamente il funzionamento a numero di giri variabile del terzo compressore. Inoltre, potrebbe essere interessante inserire nel modello le resistenze allo scambio termico lato fluido refrigerante e fluido termovettore in entrambi gli scambiatori, determinando le correlazioni più indicate per lo scopo.

Dal punto di vista economico, in relazione a quanto è stato esposto nel capitolo, "Considerazioni economiche sulla convenienza di una pompa di calore a CO<sub>2</sub>", l'utilizzo di tale pompa di calore risulta economicamente conveniente in quanto il valore del COP massimo calcolato supera il valore limite del parametro R il quale tiene conto dei costi del kWh elettrico e del kWh termico in Italia.



## Bibliografia

- W.S. Bodinus. The rise and fall of carbon dioxide systems. In: Will HM, editor. *The first century of air conditioning*. Atlanta, GA: ASHRAE, pp. 29–34, 1999.
- G. Lorentzen. *Trans-critical vapour compression cycle device*. International Patent Publication WO 90/07683; 1990.
- A. Cavallini, *Properties of CO<sub>2</sub> as a Refrigerant*, European Seminar-Carbon Dioxide as a Refrigerant, Milano, Italia; 2004.
- J. Pettersen, P. Neksa. *CO<sub>2</sub> refrigeration, air conditioning and heat pump technology development in Europe*. Mag Soc Air-Conditioning Refrig Engrs Korea, Vol. 31, n.7, pp. 53–64, 1991.
- P. Neksa, H. Rekstad, G. Zakeri, P. Schiefloe. *CO<sub>2</sub>-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results*. International Journal of Refrigeration. Vol. 21, pp. 172–9, 1998.
- JRAIA, *JRA Standard 4050: heat pump water heaters using carbon dioxide refrigerant*. The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association; 2001.
- F. Billiard. *Use of Carbon Dioxide in Refrigeration and Air Conditioning*, International Journal of refrigerant, Vol. 25, pp. 1011-1013, 2002.
- E Schmidt, K Klocker, N.Flacke. *Heat pumps for dehumidification and drying processes in residential and commercial applications*. IEA/IZWe.V./IIR Workshop on CO<sub>2</sub> Technology in Refrigeration. Heat Pump and Air Conditioning Systems, Mainz, Germany; 1999.
- F. Steimle. *CO<sub>2</sub>-drying heat pumps. CO<sub>2</sub> Technology in Refrigeration. Heat Pump and Air Conditioning Systems*, Trondheim, Norway; 1997.
- V. Casson, L. Cecchinato, M. Corradi, E. Fornasieri, S. Girotto, S. Minetto, L. Zamboni e C. Zilio: *"Optimisation of the throttling system in a CO<sub>2</sub> refrigerating machine"*, International Journal of Refrigeration, Vol. 26 (2003), pp. 926-935
- A.Cavallini, *Properties of CO<sub>2</sub> as a Refrigerant*, European Seminar-Carbon Dioxide as a Refrigerant, Milano, Italia (2004).
- Caleffi, *Idraulica* N. 41 Dicembre 2011 (pag. 20-21).
- <http://www.casaclima.com>