



Ricerca di Sistema elettrico

Un roof-top ad anidride carbonica: analisi sperimentale delle prestazioni durante il funzionamento invernale ed estivo

N. Calabrese, G. Zummo, M. Furrer, D. Carmignola

UN ROOF-TOP AD ANIDRIDE CARBONICA: ANALISI SPERIMENTALE DELLE PRESTAZIONI DURANTE IL FUNZIONAMENTO INVERNALE ED ESTIVO

N. Calabrese, G. Zummo, M. Furrer (ENEA), D. Carmignola (UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL SANNIO)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

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

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

Si ringrazia per la fattiva collaborazione l'Università degli Studi del Sannio e l'Università degli Studi di Napoli Federico II. L'attività di ricerca svolta in merito all'analisi del funzionamento invernale del roof top è stata sviluppata all'interno del lavoro di Tesi discussa dall'ing. Carmignola presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. L'interesse mostrato per la tematica in oggetto ha motivato il proseguimento della collaborazione con l'ing. Carmignola, attualmente impegnato con un contratto di ricerca presso l'Università degli Studi del Sannio.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 OBIETTIVO DELL'ATTIVITÀ	5
2 L'ANIDRIDE CARBONICA COME FLUIDO REFRIGERANTE	5
2.1 PROPRIETÀ TERMODINAMICHE DELLA CO ₂	6
2.2 IL CICLO TRANSCRITICO AD ANIDRIDE CARBONICA TRADIZIONALE	7
2.3 LE POMPE DI CALORE A CO ₂ PER LA CLIMATIZZAZIONE E LA PRODUZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA	8
2.4 SISTEMI AVANZATI DI POMPE DI CALORE ACQUA-ACQUA A CO ₂	11
3 SISTEMI ROOF-TOP	14
3.1 CARATTERISTICHE DEI ROOF-TOP	14
3.2 IL MERCATO DEI ROOF-TOP	16
4 POMPA DI CALORE A CO ₂ (R744) ARIA/ARIA DEL TIPO ROOF TOP, DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO CIRCUITERIA E COMPONENTI	19
4.1 DESCRIZIONE DELLA CIRCUITERIA DEL ROOF-TOP NELLE VARIE CONFIGURAZIONI AL VARIARE DELLA MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO 21	
4.2 COMPONENTI DEL ROOF-TOP	33
4.3 STRUMENTAZIONE E SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI, CONTROLLO E GESTIONE IMPIANTO	45
4.4 REGOLAZIONE E GESTIONE DELL'IMPIANTO: BX EINSTEIN	51
4.5 SISTEMA DI CONTROLLO E SUPERVISIONE ELIWELL	57
4.6 CONTROLLO WEB	59
4.7 LOGICA DI REGOLAZIONE	62
5 RILIEVO E ANALISI DATI SPERIMENTALI	64
5.1 METODOLOGIE DI PROVA E FASE DI ACQUISIZIONE	64
5.2 DEFINIZIONE DELLE PRINCIPALI MISURE INDIRETTE	66
5.3 RISULTATI SPERIMENTALI INVERNALI	67
5.4 RISULTATI SPERIMENTALI ESTIVI	70
6 CONCLUSIONI	73
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	74
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	74

Sommario

I sistemi roof-top rivestono un grande interesse nel settore della climatizzazione di grandi edifici e locali commerciali con sistemi a tutt'aria grazie alla loro semplicità di installazione.

Una prospettiva da investigare in questo settore riguarda l'utilizzo del fluido naturale anidride carbonica in luogo delle miscele di HFC. Oltre alla motivazione ambientale legata all'utilizzo di questo fluido, rimangono da effettuare valutazioni sulle prestazioni energetiche. E' sicuramente interessante l'impiego della CO₂ per il funzionamento invernale in quei climi in cui la fase dello sbrinamento risulta occupare un arco di tempo significativo.

Questo lavoro riguarda la valutazione delle prestazioni in regime invernale e estivo di un impianto del tipo roof-top aria/aria ad R744 (CO₂) installato all'ENEA di Casaccia (Roma), funzionante secondo un ciclo transcritico a compressione di vapore con scambiatore interno.

In inverno è stato investigato l'effetto della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso del gas-cooler sulla potenza termica scambiata e sul COP della pompa di calore elettrica, mentre in estate è stato investigato l'effetto della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore sulla potenza frigo scambiata e sull'EER della pompa di calore.

Le prestazioni della macchina oggetto di studio sono risultate dipendenti fortemente dai parametri di regolazione, nelle condizioni operative indagate. L'effetto della riduzione della temperatura di miscela sul miglioramento delle prestazioni è risultato notevole, favorendone l'impiego in situazioni in cui la frazione di aria prelevata dall'esterno debba essere significativa.

1 Introduzione

Il principale obiettivo del progetto “Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione”, che si sta svolgendo nell’ambito del programma di Ricerca di Sistema Elettrico in collaborazione con il Ministero dello Sviluppo Economico, è quello 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:

1. Sfruttamento di fonti rinnovabili (aria, terra, sole) per la produzione di energia elettrica da utilizzarsi per l’alimentazione di macchine per la climatizzazione
2. Utilizzo di fluidi frigoriferi non dannosi per l’ambiente (CO_2) in macchine termiche a compressione di vapore in luogo di quelli attualmente utilizzati;
3. 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_2) consentirebbe di ridurre o addirittura annullare gli effetti diretti in caso di dispersione del fluido frigorifero nell’atmosfera ($\text{GWP}=1$). Un importante sistema che si sta imponendo all’attenzione degli specialisti del settore è l’utilizzo di pompe di calore utilizzando la CO_2 (R744), quindi un fluido naturale con $\text{GWP}=1$ e $\text{ODP}=0$, come fluido 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 tali macchine sono specifiche per zone climatiche “rigide”, dove le tradizionali pompe di calore hanno il problema dello sbrinamento delle batterie esterne.

1.1 Obiettivo dell’Attività

Il risultato di questa attività di ricerca è quello di mettere in evidenza le mappe di funzionamento di un prototipo di pompa di calore ad R744 (CO_2), invertibile del tipo aria-aria (roof-top), durante il periodo invernale ed estivo. Il prototipo realizzato è stato progettato al fine di soddisfare le esigenze di climatizzazione di gallerie commerciali e di grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide. Il prototipo realizzato ed installato a servizio dell’Edificio F-76 (Centro Ricerche ENEA di Casaccia - Roma), è stato costantemente monitorato al fine di acquisire i dati di funzionamento per poterne valutare le prestazioni durante il riscaldamento invernale degli ambienti (COP) e durante la climatizzazione degli stessi (EER). In questo modo è stato possibile ottenere una mappa completa delle prestazioni dell’impianto in inverno e in estate al fine di valutare quali sono i parametri principali che influenzano il comportamento della macchina.

2 L’anidride carbonica come fluido refrigerante

La refrigerazione per usi civili e industriali, e la climatizzazione degli ambienti forniscono un notevole contributo sia in termini di consumi energetici che di impatto ambientale, con effetti negativi sul cambiamento climatico del pianeta. In particolare, l’esercizio di tali impianti contribuisce all’aumento dell’effetto serra e all’assottigliamento dell’ozono stratosferico dovuto ad alcuni fluidi refrigeranti molto diffusi nei circuiti frigoriferi. Da qualche anno, tuttavia, è stata raggiunta l’evidenza scientifica degli effetti

nocivi che derivano dall'immissione nell'atmosfera dei CFC (clorofluorocarburi) e, anche se in misura molto più contenuta, degli HCFC (idroclorefluorocarburi). L'incompatibilità ambientale di queste sostanze si manifesta sotto un duplice aspetto: la distruzione dell'ozono stratosferico e il progressivo riscaldamento del clima del pianeta per effetto serra. Nella constatazione che l'azione distruttiva sull'ozono stratosferico da parte dei clorofluorocarburi e degli idroclorefluorocarburi è causata dalla presenza nelle loro molecole di atomi di cloro, sono stati sintetizzati e immessi nel mercato, a partire dagli anni '90, fluidi sintetici sostitutivi privi di atomi di cloro appartenenti alla seguente classe di composti degli idrofluorocarburi (HFC) in cui gli atomi di cloro dell'idrocarburo di partenza sono sostituiti solo parzialmente ed esclusivamente da atomi di fluoro. Il problema però della sostituzione definitiva dei CFC e degli HCFC non è risolto completamente dall'introduzione degli HFC; infatti, sebbene la loro struttura chimica non presenta atomi di cloro, il che li rende innocui verso l'ozono stratosferico, essi contribuiscono in maniera significativa all'incremento dell'effetto serra essendo caratterizzati da un potenziale di riscaldamento globale (GWP) elevato. Il GWP (Global Warming Potential) rappresenta, per un certo orizzonte temporale, la massa in kg di anidride carbonica equivalente, in termini di effetto serra, di 1 kg del refrigerante in questione. Per tale ragione, già sono state adottate misure atte a limitarne l'uso. In conclusione possiamo affermare che i vantaggi e le buone proprietà legate ai CFC, agli HCFC e agli HFC come fluidi refrigeranti si scontrano con le conseguenze negative derivanti dal loro utilizzo (negli impianti di refrigerazione) nei confronti dell'ambiente rendendoli incompatibili sia perché assottigliano sempre di più la fascia di ozono stratosferico, sia perché contribuiscono all'incremento della temperatura del pianeta per effetto serra. La problematica della sostituzione dei fluidi refrigeranti clorurati negli impianti frigoriferi è dunque al centro dell'attenzione della comunità scientifica nazionale ed internazionale. Nel campo della refrigerazione si sta utilizzando sempre di più il fluido CO₂ (R744) come soluzione radicale per eliminare l'effetto serra diretto causato da idrocarburi alogenati appartenenti alla categoria degli HFC. Il GWP della CO₂ è effettivamente molto basso se confrontato con gli HFC (1 su diverse migliaia); inoltre la CO₂ non presenta problemi di tossicità, infiammabilità o impatto sullo strato di ozono.

2.1 Proprietà termodinamiche della CO₂

La CO₂ è presente in atmosfera con una percentuale pari a circa lo 0,0375% in volume, o 375 ppmv (parti per milione in volume), percentuale che aumenta rapidamente, di circa 2 ppmv all'anno, a causa delle attività umane (consumi di combustibili fossili come carbone, petrolio e gas).

A temperatura e pressione normali, essa è un gas naturale, incolore, inodore, e di sapore pungente, e i quantitativi utilizzati nel caso di un impiego massiccio nel settore frigorifero sono comunque irrilevanti rispetto a quelli prodotti dai processi di combustione.

Una delle proprietà che maggiormente caratterizzano l'anidride carbonica e ne definiscono le condizioni di utilizzo è la sua bassa temperatura critica, pari a 31,06°C. Di conseguenza, in un ciclo frigorifero tradizionale a compressione di vapore, il processo di scambio termico con l'ambiente esterno non implica necessariamente la condensazione, ma un progressivo raffreddamento del gas in condizioni supercritiche.

Il raffreddamento avviene idealmente in condizioni di pressione costante. Lo scambiatore di calore impiegato è diverso da quelli comunemente usati perché esso lavora ad alta pressione ed è definito gas cooler. Una caratteristica del ciclo transcritico è l'esistenza di un valore ottimo per la pressione del gas cooler, che rende massimo il COP (**Coefficient of Performance**), una volta che siano state fissate le altre condizioni operative. Un'altra importante caratteristica dell'anidride carbonica è rappresentata dal livello di pressione di lavoro, molto più alto rispetto ai fluidi tradizionalmente utilizzati a parità di temperatura delle sorgenti esterne.

L'elevato valore del calore latente volumetrico, insieme alla densità del vapore nelle condizioni d'aspirazione del compressore, di almeno tre volte superiore a quella del refrigerante tradizionale R404A, consente di operare con portate di massa nettamente inferiori a parità delle altre condizioni. L'elevato valore delle pressioni operative determina, inoltre, una ridotta penalizzazione per ciò che riguarda le perdite di carico. È opportuno ricordare come alcune delle proprietà dell'anidride carbonica, ovvero l'elevata conducibilità termica della fase liquida e del vapore, l'alto calore specifico del liquido e la bassa

viscosità cinematica e tensione superficiale, favoriscano l'ottenimento di coefficienti di scambio termico più elevati rispetto ai fluidi tradizionali.

2.2 Il ciclo transcritico ad anidride carbonica tradizionale

Il ciclo a CO₂ a compressione di vapore è stato utilizzato molto nell'industria della refrigerazione per più di un secolo. In tale ciclo (figura 1), si applica un lavoro di compressione e si effettua una successiva condensazione per far passare un fluido dallo stato gassoso allo stato liquido, la compressione ed il cambiamento di stato producono calore, che viene estratto dal ciclo; successivamente il liquido è fatto espandere ed evaporare, sottraendo calore nel cambiamento di stato inverso, il liquido in evaporazione (ed espansione) produce quindi il voluto effetto frigorifero.

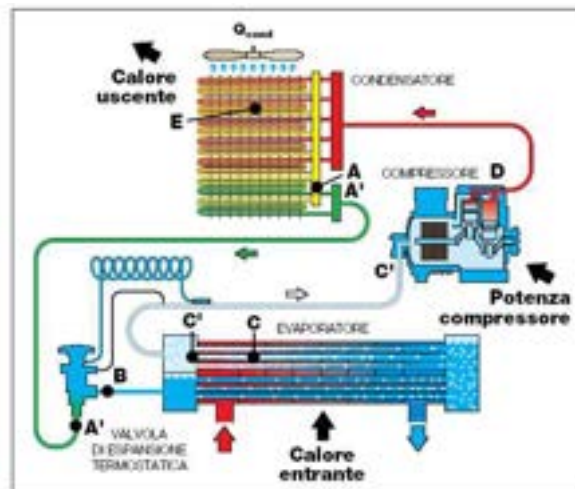


Figura 1 Componenti principali di un impianto frigorifero ad anidride carbonica.

A causa della sua bassa temperatura critica, il raffreddamento del gas avviene in condizioni supercritiche e il ciclo frigorifero che ne risulta è detto transcritico perché, sebbene l'evaporazione continui a restare subcritica, la trasformazione operata dal gas cooler avviene a pressione superiore alla pressione critica (figura 2). Quanto sopra descritto è valido, naturalmente, a patto che non sia disponibile una sorgente di calore a temperatura inferiore a 24°C, nel qual caso il ciclo ad anidride carbonica si riduce ad un tradizionale ciclo con cessione di calore in condizioni isoterme ed isobare (condensazione).

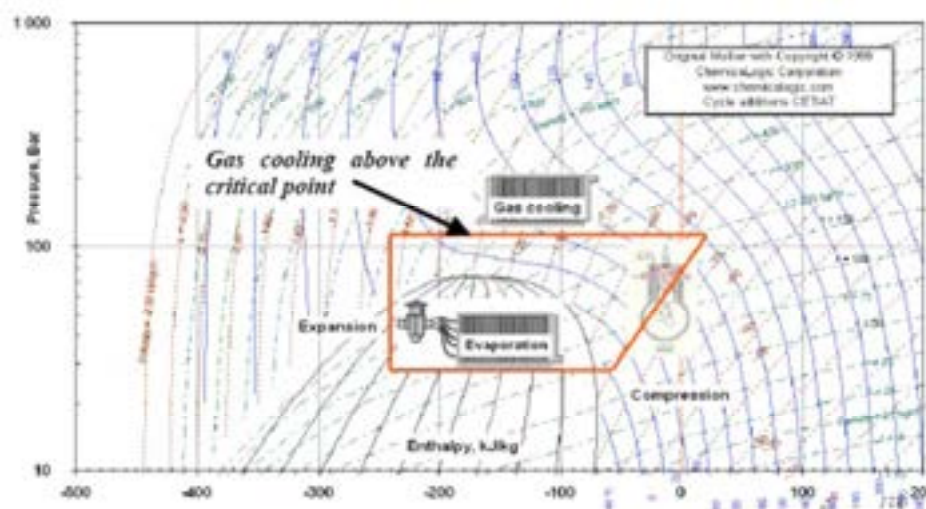


Figura 2 Ciclo transcritico ad anidride carbonica e relativi componenti.

In particolare la figura 3 mostra, nel diagramma pressione - entalpia, due cicli transcritici ideali a due valori di pressione del gas cooler diversi.

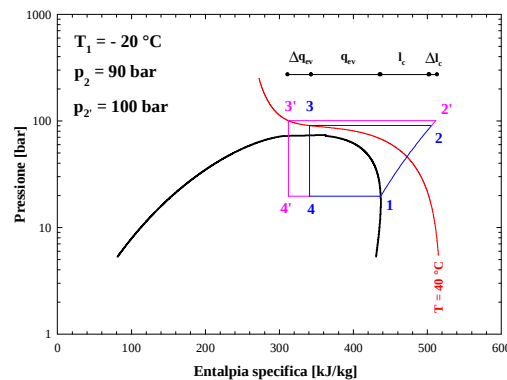


Figura 3 Due cicli transcritici.

In un normale ciclo a compressione di vapore, assegnata la temperatura di condensazione, resta fissata anche la pressione di condensazione; in un ciclo transcritico, invece, la temperatura in uscita dal gas cooler è fissata, ma è possibile scegliere la pressione nel gas cooler a piacimento. È evidente che è possibile scegliere $p_2 = p_3$ in maniera tale da massimizzare il COP. Infatti, come si può osservare dalla figura precedente, passando dal ciclo 1234 al ciclo 12'3'4', si riscontra un aumento modesto del lavoro specifico richiesto dal compressore l_c e un aumento consistente del calore sottratto durante l'evaporazione per unità di portata massica q_{ev} . Se, invece, si lavora nella zona asintotica dell'isoterma a T_3 , al crescere di $p_2 = p_3$ aumenta molto l_c e poco q_{ev} . È, quindi, possibile individuare una pressione di funzionamento del gas cooler che, fissate la temperatura di evaporazione e la temperatura di uscita dal gas cooler, massimizza il coefficiente di prestazione dell'impianto. Una pressione superiore al valore che rende massimo il COP comporta una lieve penalizzazione dell'efficienza, mentre, se la pressione al gas cooler è inferiore al valore ottimale, si registra una brusca e rapida diminuzione sia del COP che della capacità frigorifera.

2.3 Le Pompe di calore a CO_2 per la climatizzazione e la produzione di acqua calda sanitaria

Al fine di sfruttare l'alta temperatura di compressione e le condizioni di funzionamento transcritiche al gas-cooler, è conveniente utilizzare la CO_2 nelle pompe di calore per la produzione di acqua ad alta temperatura. Nell'esempio riportato in figura 4, si osserva come, sfruttando il raffreddamento da 100 °C a 20°C, a 120 bar, subito dall'anidride carbonica nel gas cooler, è possibile riscaldare l'acqua sanitaria da 15 °C a 80 °C mediante uno scambiatore di calore in controcorrente in maniera molto efficiente. Se, infatti, per ottenere lo stesso obiettivo, a parità di superficie di scambio termico, si decidesse di utilizzare una pompa di calore ad R134a, si verrebbe ad avere la condensazione dell'R134a a 80 °C e, quindi, una differenza di temperatura di scambio termico nettamente meno favorevole.

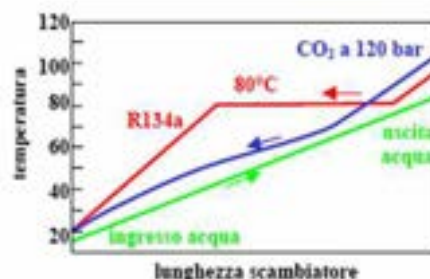


Figura 4: Riscaldamento dell'acqua sanitaria da 15 °C a 80 °C mediante una pompa di calore a CO_2 .

Il vantaggio di avere profili di temperatura bene accordati tra i due fluidi lungo lo scambiatore si traduce in minori perdite di exergia nello scambio termico, che sono da ritenersi approssimativamente proporzionali, a parità di calore scambiato, alla differenza di temperatura tra i due fluidi. La minore perdita exergetica può costituire un fattore decisivo per assicurare alla CO₂ rendimenti migliori rispetto a quelli realizzati da impianti operanti con fluidi tradizionali. Il COP del ciclo è inoltre scarsamente influenzato dalla temperatura di evaporazione, diminuendo molto poco anche con temperature esterne assai basse. In condizioni normali di funzionamento il ciclo sarà tarato al valore ottimale di pressione al gascooler, mentre in condizioni estreme si opererà un aumento di pressione incrementando la resa termica ed evitando l'utilizzo di resistenze elettriche supplementari che penalizzano notevolmente l'impianto.

Da quanto visto si può capire come il ciclo transcritico ad anidride carbonica si adatti molto bene al riscaldamento dell'acqua sanitaria. Se confrontato con i riscaldatori elettrici, questo sistema può dare un risparmio energetico che raggiunge il 75%. L'elevata efficienza di questo sistema è da ascrivere essenzialmente all'ottimo adattamento delle caratteristiche del ciclo all'applicazione, all'efficiente processo di compressione ed alle buone caratteristiche di scambio termico.

Per mezzo delle pompe di calore ad anidride carbonica si può produrre acqua calda fino a 90°C ed oltre, temperature difficilmente raggiungibili con i sistemi tradizionali (pompe di calore con fluidi alogenati in ciclo subcritico). La macchina, per le caratteristiche proprie della CO₂, risulta inoltre molto compatta. Poiché il 20% circa della richiesta di energia in ambito residenziale (impianti di piccola e grossa taglia) nei paesi industrializzati è dovuta proprio al riscaldamento di acqua sanitaria e poiché la domanda è in continuo aumento, l'utilizzo di pompe di calore a CO₂ si prospetta come una buonissima alternativa ai sistemi tradizionali. Sul mercato giapponese esistono già diversi prodotti di pompa di calore ad anidride carbonica. Un esempio è quello prodotto da Sanyo e la figura seguente mostra un suo schema di funzionamento: in questo caso, l'acqua calda, prodotta e stoccata in un serbatoio di accumulo, può essere successivamente utilizzata sia a fini di riscaldamento degli ambienti (per mezzo di corpi scaldanti ad elevata efficienza) che di produzione di acqua calda sanitaria.

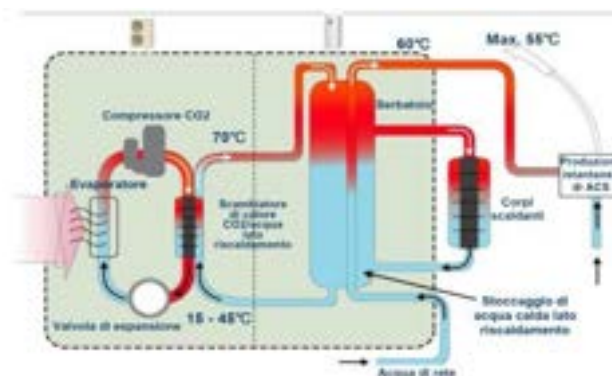


Figura 5 Schema funzionamento pompa di calore a CO₂ della Sanyo.

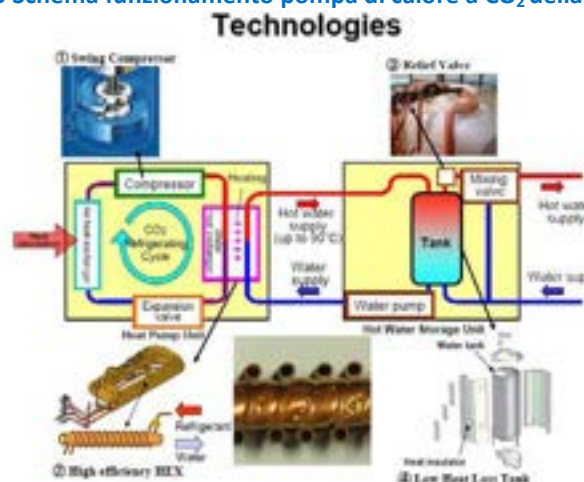


Figura 6 Schema di funzionamento pompa di calore a CO₂ della Daikin.

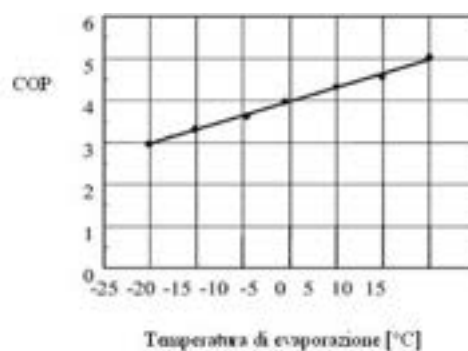
La Daikin ha invece proposto una pompa di calore caratterizzata da un particolare tipo di gascooler, progettato per incrementare significativamente lo scambio termico tra refrigerante e acqua, in particolare il coefficiente di adduzione lato acqua, aumentando la turbolenza del flusso (figura 6).

Studi sul riscaldamento dell'acqua sanitaria mediante pompe di calore a CO₂ furono in realtà già intrapresi dalla metà degli anni '80 al laboratorio SINTEF/NTNU e un prototipo di potenza pari a 50 kW fu completato nel 1996 (figura 7). Tale sistema fu incluso nel progetto "COHEPS" dell'Unione Europea dal 1996 al 1998, dove gruppi di ricerca di importanti università in Austria (Graz University of Technology), Norvegia (laboratorio SINTEF/NTNU), Germania (University of Hanover, Essen University) e Belgio (Catholic University of Leuven) insieme con i loro soci industriali studiarono vari aspetti di numerose applicazioni delle pompe di calore a CO₂.



Figura 7 Prototipo di pompa di calore a CO₂ da 50 kW.

I risultati ottenuti su questo prototipo hanno evidenziato la possibilità di ottenere un COP maggiore di 4 anche per una temperatura di ingresso dell'acqua fredda di 10 °C e una temperatura di uscita dell'acqua calda di 60 °C (figura 8).



Temperatura di uscita dell'acqua = 60 °C

Figura 8 COP in funzione della temperatura di evaporazione per una temperatura di ingresso dell'acqua di 10 °C.

Un altro impianto sperimentale da 25 kW è stato installato in una fabbrica di trattamento del cibo a Larvik (Norvegia) nel 1999, usando il calore recuperato da un impianto di refrigerazione industriale ad ammoniaca come fonte calda. Le prestazioni ottenute hanno superato le aspettative e tale impianto si è dimostrato un proficuo investimento per la società. Numerose aziende giapponesi hanno immesso sul mercato pompe di calore a CO₂ negli anni 2001-2002. Tali macchine risultavano caratterizzate da valori della potenza di riscaldamento intorno a 4.5 e del COP di circa 3. Questi sistemi riscaldavano l'acqua nelle ore notturne (in

cui l'energia elettrica è disponibile ad un costo minore rispetto al giorno) e immagazzinandola in grossi serbatoi per poterla poi utilizzare per le applicazioni diurne. La figura 9 mostra un'interessante possibilità di abbinamento delle pompe di calore ad un'altra tecnologia legata alle fonti rinnovabili: si tratta di un progetto di impianto di climatizzazione con pannelli fotovoltaici destinati alla produzione di energia per l'alimentazione elettrica della pompa di calore ad anidride carbonica.

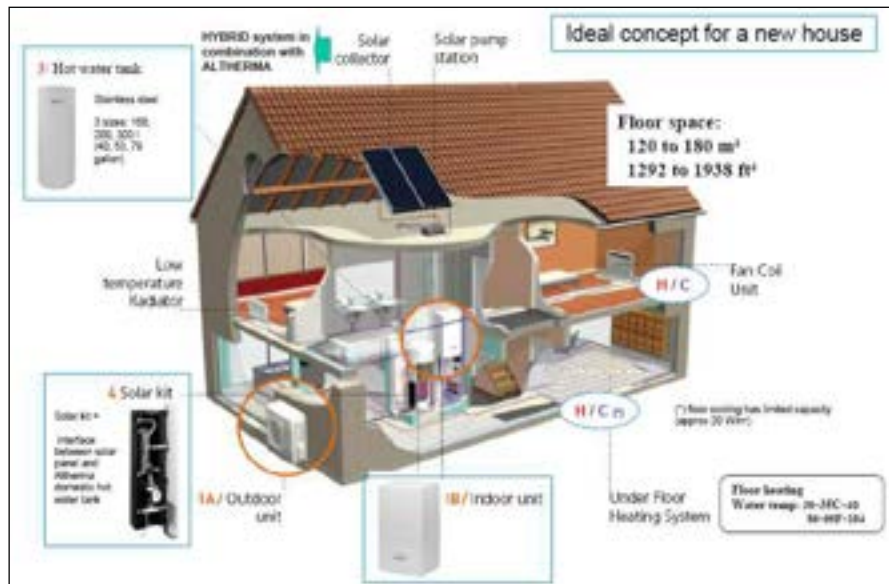


Figura 9 Pompa di calore a CO₂ alimentata da pannelli fotovoltaici in un'abitazione.

2.4 Sistemi avanzati di pompe di calore acqua-acqua a CO₂

Sfruttando la naturale attitudine del ciclo transcritico alla produzione di acqua calda, Neksa nel 1992 propone lo schema di impianto riprodotto in figura 10. A valle del compressore sono montati due scambiatori, che possono lavorare in serie e/o in parallelo per la produzione contemporanea di acqua calda sanitaria (accumulata in un serbatoio di stoccaggio) e per la climatizzazione di ambienti (sia attraverso radiatori, sia per mezzo di fan coils). L'obiettivo di questa soluzione impiantistica è di ridurre la temperatura di ritorno dell'acqua al gas cooler il più possibile, in modo da mantenere il rendimento della pompa di calore a livelli elevati. Dopo aver compiuto alcune verifiche sperimentali Neksa dichiarò che il sistema forniva buone prestazioni stagionali quando oltre il 30% della richiesta termica per il riscaldamento degli ambienti fosse fornita attraverso ventilconvettori. Poiché, nel caso di abitazioni efficientemente coibentate, la richiesta di calore per mezzo di ventilconvettori può raggiungere e superare il 50%, veniva confermato che la CO₂ poteva essere una promettente alternativa per le applicazioni di climatizzazione residenziale. Notiamo che, in questa proposta, non viene sfruttato in alcun modo il flusso termico "freddo" prodotto dall'evaporatore.

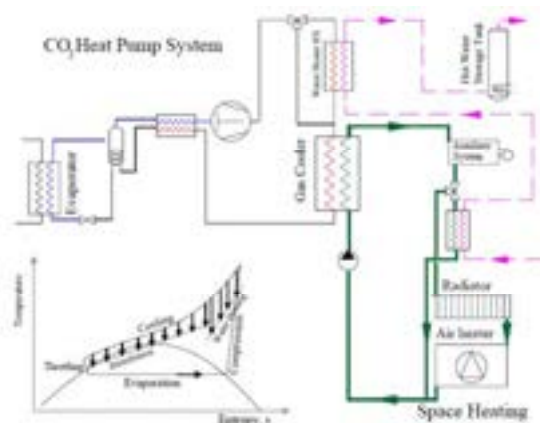


Figura 10 Schema d'impianto per produzione acqua calda e climatizzazione (Neksa, 1992).

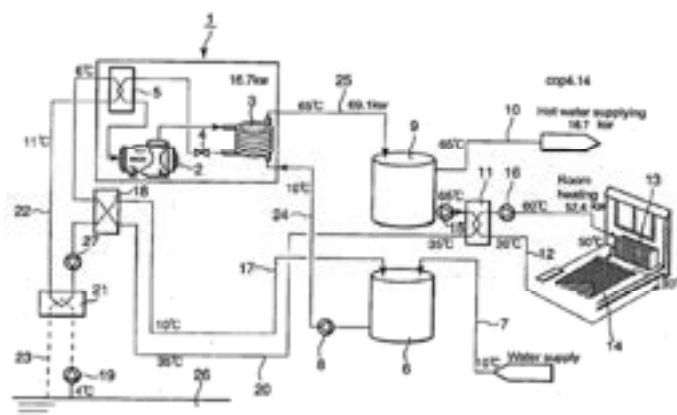


Figura 11 Impianto pdc a CO₂ proposto da Sato et al. (2009): climatizzazione e produzione acqua calda.

Nel 2009, Sato et al. presentano uno schema d'impianto caratterizzato da due serbatoi di accumulo (uno per lo stoccaggio di acqua calda e l'altro per quello di acqua fredda) che si propone come obiettivo quello di fornire acqua calda e fredda nonché di provvedere alla climatizzazione di ambienti. Secondo l'ideatore, adottando lo schema di figura 11, si riescono a mantenere le prestazioni della pompa di calore a livelli elevati in ogni condizione di funzionamento in quanto il gas cooler risulta sempre alimentato da acqua proveniente dal serbatoio di accumulo freddo, mentre l'evaporatore è alimentato da acqua mantenuta a temperatura sufficientemente elevata per l'ottimizzazione del rendimento. Non si conoscono comunque valutazioni sperimentali sull'efficienza effettiva di un siffatto sistema, che richiede tra l'altro la disponibilità di una sorgente fredda per l'ottimizzazione della temperatura dell'acqua di alimento dell'evaporatore.

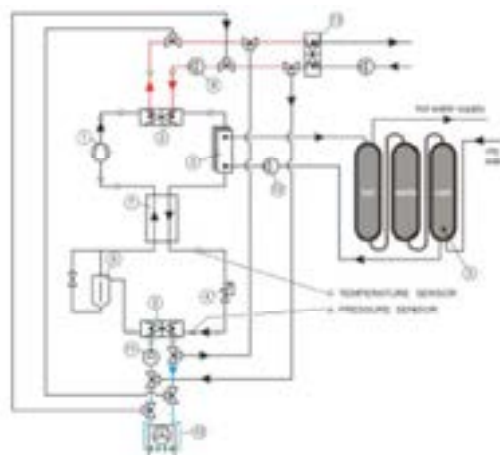


Figura 12 Schema di impianto pdc a CO₂ proposto da Brignoli et al. (2011) – conf. invernale.

Recentemente i ricercatori del dipartimento di Fisica Tecnica dell'università di Padova hanno proposto un sistema molto avanzato per la climatizzazione estiva ed invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. Il sistema prevede una pompa di calore a CO₂ costituita da due gas-coolers, un evaporatore ed uno scambiatore recuperatore. Il sistema proposto è dotato di un circuito secondario contenente una miscela glicolata che effettua gli scambi termici con il primo gas cooler e con l'evaporatore; il secondo gas cooler è invece collegato direttamente ad un sistema di accumulo di acqua calda, costituito da tre serbatoi connessi in serie. L'utilizzo dei tre serbatoi consente di alimentare il secondo gas-cooler sempre con acqua fredda e di evitare il mescolamento tra i due flussi caldo e freddo. Nel funzionamento invernale (figura 12), il sistema si comporta come una pompa di calore tradizionale (che preleva calore all'evaporatore, estraendolo dall'esterno e lo riversa al gascooler), salvo il fatto che gli scambi avvengono attraverso un fluido ausiliario; nel caso di richiesta di acqua calda, è estratto calore dal secondo gas-cooler. Con questo sistema non è possibile produrre contemporaneamente acqua calda e calore per la climatizzazione. Nel funzionamento estivo, in caso di richiesta soltanto di condizionamento (figura 13), si agisce sulle valvole a tre vie in modo da deviare il flusso uscente dall'evaporatore verso il ventilconvettore adibito al condizionamento dell'ambiente e si raffredda il fluido destinato al gas cooler nell'unità esterna.

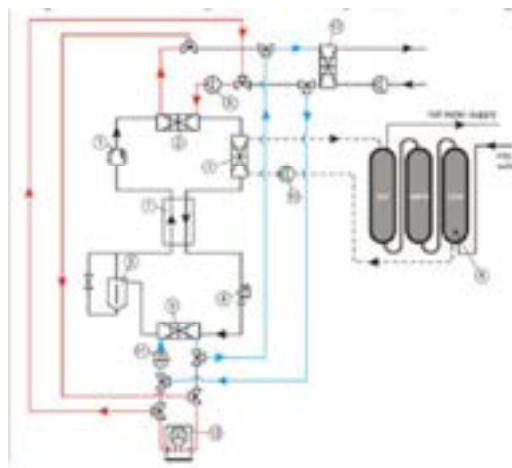


Figura 13 Schema di impianto pdc a CO₂ proposto da Brignoli et al. (2011) – conf. Estiva:solo condizionamento.

Se si ha necessità di produzione contemporanea di freddo per il condizionamento e di acqua calda si può operare secondo quanto indicato sia figura. 14. In questo caso, il calore è asportato dal gas cooler per mezzo dell'acqua proveniente dai serbatoi di accumulo.

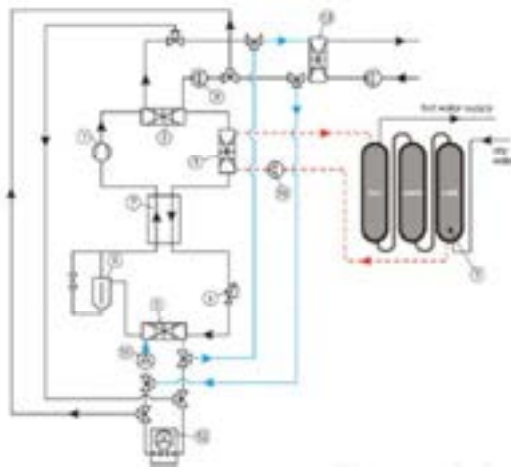


Figura 14 Impianto pdc a CO₂ proposto da Brignoli et al. (2011) – conf. Estiva: condizionamento e acqua calda.

Gli autori della ricerca, a seguito di un'intensa campagna sperimentale, dichiarano che le prestazioni di questa macchina sono peggiori rispetto a quelle operanti con R410A (in particolare in termini di consumo di energia totale) soprattutto in inverno e in estate quando si richiede alla macchina di contribuire anche alle esigenze di climatizzazione, anziché fornire esclusivamente acqua calda[1].

3 Sistemi Roof-Top

Le superfici disponibili sui tetti degli edifici sono sempre più ambite e preziose, in quanto già in passato erano principalmente occupate da componenti d'impianto che erano stati collocati in posti diversi; basti pensare ai serbatoi per l'acqua, ai dry coolers, alle torri di raffreddamento evaporative, ecc. E' evidente che la disposizione sul tetto per eccellenza è riservata alle speciali unità di condizionamento denominate "roof-top", caratterizzate dai canali di ripresa e mandata dell'aria già orientati verso il basso, in modo da poter indirizzare l'aria trattata direttamente nelle canalizzazioni sottostanti il solaio di copertura. Quindi, i roof-top, proprio per la loro caratteristica di poter distribuire e riprendere l'aria condizionata localmente, si prestano ad essere posizionati sui solai direttamente sovrastanti agli ambienti da climatizzare. Nella figura 15 è rappresentata un'unità di condizionamento roof-top nella forma più semplificata, nella quale sono visibili la sezione moto condensante con tre compressori, le batterie di condensazione/evaporazione e i tre ventilatori con mandata verso l'alto. La sezione posteriore, dedicata al vero e proprio trattamento dell'aria, è completamente coperta da un involucro attraverso il quale sporgono esclusivamente le aperture di presa dell'aria esterna e quelle di espulsione.



Figura 15 Unità di condizionamento roof-top.

Gli esempi più tradizionali sono i grandi centri commerciali, i supermercati, gli edifici industriali di grande volumetria, le sale cinematografiche, le piscine, gli autogrill, cioè tutti quegli ambienti di media e grande superficie, ma distribuiti su un solo piano di utilizzo.

Infatti, la prerogativa delle unità roof-top è quella di poter essere facilmente sollevate fino al luogo di installazione e posate su appositi telai, predisposti in anticipo con lo scopo di agevolarne il posizionamento. In questo modo, è immediato il raccordo delle macchine alle canalizzazioni di ripresa e di mandata precedentemente realizzate fino al loro innesto.

3.1 Caratteristiche dei roof-top

I roof-top, nella loro versione più semplificata, si compongono essenzialmente di una sezione di trattamento dell'aria e di una sezione moto-condensante/evaporante del refrigerante (figura 16).

Nella prima sezione sono localizzati: le serrande di ricircolo e dell'aria esterna, i dispositivi filtranti, la batteria di raffreddamento/riscaldamento dell'aria ad espansione o condensazione di refrigerante e infine l'unità ventilante, generalmente costituita da un ventilatore plug-fan (ventilatore a pale rovesce, azionato da un motore direttamente accoppiato quindi senza trasmissione cinghia-puleggia) azionato mediante inverter.



Figura 16 Sezioni roof top.

Nella seconda sezione è localizzato il compressore frigorifero, che può essere di tipo scroll, a vite, semiermetico alternativo e di tipo centrifugo a levitazione magnetica. I compressori possono essere on-off ed in un numero tale da consentire una più rigorosa parzializzazione del carico frigorifero; oppure compressori azionati da inverter, onde ottenere una migliore regolazione della temperatura e, contemporaneamente, un ulteriore risparmio energetico.

Oltre ai compressori, sono applicate tutte le componenti classiche dei circuiti frigoriferi, le batterie di condensazione o evaporazione del refrigerante, i filtri disidratatori, le spie del liquido, le valvole solenoidi e le unità ventilanti, più spesso dotate di ventilatori di tipo assiale a velocità variabile per ottenere un basso impatto acustico e un contenuto consumo di energia elettrica. Tutta la componentistica delle unità roof-top, in virtù del fatto che è applicata sulla sommità degli edifici ed esposta alle intemperie, è racchiusa in un involucro di lamiera ad alta resistenza all'ossidazione e di impermeabilità all'acqua. Spesso la struttura portante è realizzata con profili di acciaio e le pannellature di chiusura possono essere di doppia lamiera di acciaio, con interposto isolamento termoacustico di lana minerale, molto simili a quelle impiegate per realizzare le unità di trattamento dell'aria.

Alcune tipologie di roof-top sono ben più complesse di quelle di tipo base appena descritte e sono composte da altre numerose componenti di trattamento dell'aria. In figura 17 si riportano delle modifiche utilizzate per il trattamento dell'aria:

- A. Camera di miscela a due serrande utilizzata per integrare l'aria di ripresa con una percentuale di aria esterna.
- B. Camera di miscela a tre serrande, per l'espulsione di una certa portata d'aria prima di integrare il flusso con una portata d'aria di rinnovo.
- C. Configurazione simile al caso a, con l'aggiunta di uno o più generatori di calore a condensazione, a scambio diretto e alimentati a gas.
- D. Configurazione simile al caso b con l'aggiunta di uno o più generatori di calore a condensazione, a scambio diretto e alimentati a gas.
- E. Configurazione simile al caso b con l'aggiunta di un recuperatore di calore statico a flussi incrociati ad elevata efficienza, che permette di recuperare energia termica contenuta nel flusso d'aria espulso, in regime sia estivo che invernale. La configurazione si compone, inoltre, di una serranda di by-pass del recuperatore che consente di operare in free-cooling o in free-heating a seconda della stagione.
- F. Configurazione simile al caso e con l'aggiunta di uno o più generatori di calore a condensazione, a scambio diretto e alimentati a gas.

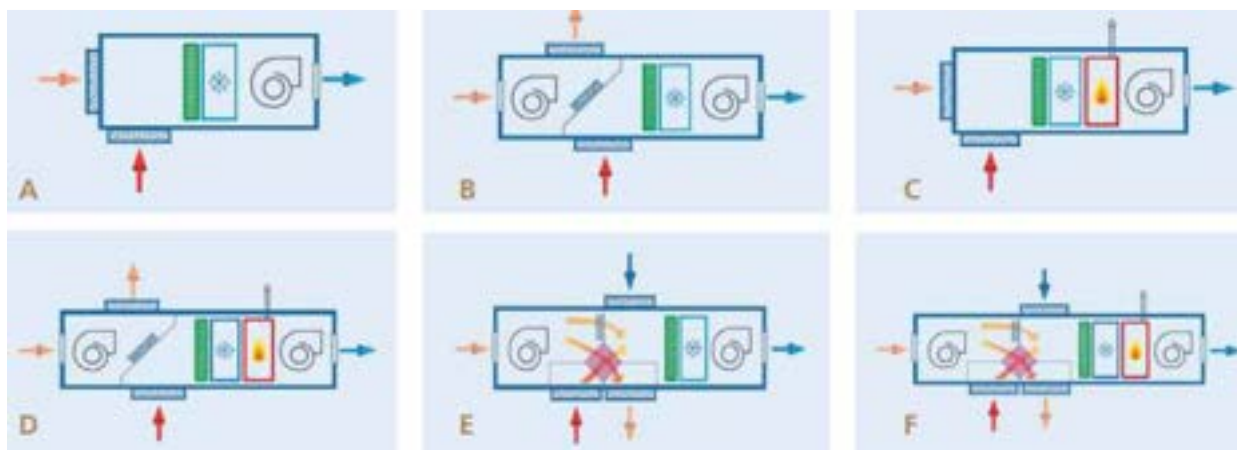


Figura 17 Configurazioni roof top.

Si pensi all'applicazione di dispositivi economizzatori di tipo freecooling, alle sezioni ventilanti di ricircolo ed espulsione dell'aria, ai recuperatori di calore rotativi, a flussi incrociati e a doppia batteria, alle lampade UVGI ultraviolette, al trattamento dell'aria con bruciatori a gas modulanti ecc. In relazione alla portata d'aria trattata, i condizionatori roof-top coprono un campo compreso tra 1.000 m³/h e 70.000 m³/h sia nella versione per il solo condizionamento estivo, sia nella versione a pompa di calore reversibile. Il campo di capacità termica può variare da circa 5 kW fino ad un massimo di 500 kW per unità standardizzate, mentre non è previsto nessun limite per quelle realizzate su misura. Il funzionamento estivo è per lo più garantito in un ambito di temperature dell'aria esterna comprese tra +52 °C e -10 °C; quello in regime invernale tra +45 °C e -20 °C. In talune varianti costruttive, la sezione moto-condensante è anche di tipo evaporativo mediante lo spruzzo controllato di acqua trattata sulle alette delle batterie; in questo modo il roof-top fornisce la medesima capacità di progetto, ma con un consumo inferiore del 25% - 50%.

3.2 Il mercato dei roof-top

Le scelte per il light commercial

Nella fascia delle piccole potenze, Aermec produce unità roof top per il solo raffreddamento e a pompa di calore da 8,4 kW a 47,7 kW, disponibili in nove grandezze, realizzate per funzionare con R-407C, con compressore scroll, ventilatori centrifughi a velocità variabile nell'unità di trattamento e assiali in quelle di condensazione. Tra le altre dotazioni, le unità possono essere dotate di batterie di riscaldamento elettrico a 2 o 3 stadi o di batterie di riscaldamento ad acqua 2 o 3 ranghi con valvola a tre vie modulante già installata. Sempre nella fascia delle potenze medio/piccole si segnalano le unità per solo raffreddamento e a pompa di calore STX in undici modelli da 10 kW a 80 kW di Tecno Confort. Le macchine utilizzano anch'esse compressori scroll funzionanti con refrigerante R-407C. I condizionatori rooftop di Ferroli coprono capacità frigorifere da 35 a 110 kW, sono equipaggiati con due compressori scroll, ciascuno a servizio un circuito frigorifero indipendente, per mantenere il rapporto costante tra potenza totale e sensibile anche ai carichi parziali, con maggiore affidabilità. Anche Carrier offre due serie di roof top di media potenza con capacità frigorifera da 43 kW a 116 kW e a pompa calore, con capacità di riscaldamento da 45 kW a 146 kW. I ventilatori assiali Flying Bird, dotati di anello convogliatore, sono realizzati in materiale plastico composito per un funzionamento silenzioso. a 110 kW.

La gamma di unità con il marchio ET (Expansion Technology) dalla collaborazione tra Sital Klima e ATR Group Air Conditioning copre una fascia di portate dell'aria da 4.000 a 60.000 m³/h, è disponibile in versione solo freddo, pompa di calore, con riscaldamento a gas mediante bruciatori a scambio diretto e con caldaie montate a bordo per l'alimentazione delle batterie ad acqua calda potendo coprire le richieste di qualsiasi tipo di installazione. I roof top ET sono sviluppati, sia con condensazione ad aria, sia ad acqua per installazioni in impianti ad anello chiuso o aperto. Un'altra serie di macchine in grado di adeguarsi ad ampie tipologie di applicazione è la serie Maverik I, di McQuay, con capacità da 10 kW a 150 kW,

funzionante a R-410A con compressori scroll che utilizza sistemi di recupero di calore interconnettendo i flussi d'aria ambiente con quelli del lato condensatori.



Figura 18 Modello Maverik I di Mc Quay capacità da 10 kW a 150 KW ad R-410A.

I modelli per applicazioni medio-grandi

Spostandosi verso le potenze maggiori si segnalano numerosi costruttori e una maggiore ampiezza di diversificazioni costruttive rispetto alla classe precedente, nella quale detengono un ruolo a sé le unità condensate ad acqua per impianti ad anello chiuso. Una gamma di rooftop da 40 a 200 kW è prodotta da ACM Kalte Klima. Si tratta di unità versatili che uniscono alla versione base sezioni di miscelazione dell'aria, riprese con economizzatori di raffreddamento, generatori termici d'aria calda con bruciatori modulanti, dispositivi di umidificazione adiabatica e a vapore. A propria volta, la serie RT di Apen Group consiste in unità di trattamento d'aria monoblocco rooftop caratterizzate nella parte riscaldamento dal modulo scambiatore PCH a condensazione. Il bruciore è realizzato a totale premiscelazione aria-gas.



Figura 19 Unità roof top di grande capacità con generatori termici a gas.

I roof top di Blue Box sono di due tipologie: la serie Gamma con ventilatori assiali e la serie Lambda Echos con ventilatori centrifughi. I primi presentano una capacità frigorifera da 5 kW a 66 kW. La serie Lambda Echos, funzionante con refrigerante R-410A, offre diverse soluzioni tecnologiche volte a massimizzare i valori di efficienza energetica, pertanto è possibile: recuperare il calore contenuto nell'aria espulsa dall'ambiente per il rinnovo; operare in modalità freecooling e freeheating, condizione che nelle stagioni intermedie permette di raffreddare o riscaldare gli ambienti utilizzando l'aria esterna, escludendo anche totalmente il circuito frigorifero. Lo sbrinamento dei due circuiti avviene separatamente, mai contemporaneamente: l'esclusivo sistema "NoFrost", grazie al controllo incrociato dei parametri di temperatura e pressione, riduce al minimo la durata del processo sul totale tempo di funzionamento dell'unità e garantisce l'immissione di aria ad una temperatura moderata. A propria volta Ciat presenta due tipologie di roof top: la serie New Space PF e la New Space Gaz, tutte con capacità di raffreddamento da 20 kW fino a 286 kW e capacità termica da 19 kW fino a 277 kW. Le portate d'aria coprono un campo da 4.000 m³/h fino a 46.000 m³/h. Una gamma molto ampia di roof top è offerta da Climaveneta: le linee di prodotto sono principalmente due, una con condensazione ad aria e la linea Wet idonea ad installazione su

impianti ad anello d'acqua. La prima copre capacità termiche da 37 kW fino a 425 kW, la seconda da 7 kW fino a 468 kW. Nei roof top Compact serie AMC di CMT Clima il riscaldamento dell'aria è realizzato da un innovativo generatore di calore a scambio diretto, corredato di bruciatore a gas premix e di un sistema di gestione e controllo a microprocessore per la modulazione continua della potenza termica erogata, conferendo alle unità Compact flessibilità ed elevate rese termiche alle varie condizioni di funzionamento. Il raffreddamento dell'aria è realizzato mediante uno o due circuiti frigoriferi ad espansione diretta equipaggiati con compressori scroll.

I roof top di Lennox sono applicati soprattutto nel settore retail, negli aeroporti, nei ristoranti, nei cinema, nei teatri, nei centri congressi, negli edifici industriali e in quelli logistici. Le soluzioni con condensazione ad acqua li rendono idonei alle applicazioni in anelli d'acqua a portata variabile (Water Source Heat Pumps). La gamma dei rooftop Lennox comprende le unità Thermodynamic Cooling & Heating con capacità di raffreddamento e riscaldamento da 20 a 230 kW.

Le portate d'aria coprono campi da 2.900 a 43.000 m³/h con ventilatori centrifughi ad inverter oppure plug-fan a velocità variabile. Le macchine possono disporre di dispositivi di free cooling ed economizzatori, controllo e recupero di calore, sistemi di sbrinamento dinamico ed alternato, ecc.

Le unità condensate ad aria serie DX di RC Group coprono capacità frigorifere da 53 kW a 226 kW. I compressori scroll funzionano con refrigerante R-407C. Tra le componenti principali di queste unità si segnalano la linea seriale, il riscaldamento elettrico, ad acqua o con bruciatore a gas, il sistema a 5 serrande con controllo CO2 integrato per utilizzo in ambienti ad elevato affollamento. Cinque sono le serie di rooftop prodotte da Johnson Controls (York) con potenze frigorifere da 10 kW fino a 450 kW, tutte funzionanti con refrigerante R-410A. La serie di roof top RT di UTA è realizzata con potenze frigorifere da 10 kW a 350 kW e portate d'aria fino a 44.000 m³/h, ed in versioni da assemblare per potenze e portate superiori funzionanti con refrigeranti R-407C, R-134a, R-404A, anche in versione a pompa di calore o con generatori termici modulari con potenza da 20 kW a 400 kW.

Le tipologie speciali

Le tipologie di roof-top che possono definirsi "speciali" presentano caratteristiche che le distaccano per gran parte da quelle delle tipologie precedenti, mirate al soddisfacimento di requisiti al di fuori di quelli per il normale benessere. La serie Clivetpack, di Clivet, è una soluzione composta da condizionatori autonomi roof-top che lavorano a tutta aria esterna operandone la filtrazione, il riscaldamento/raffreddamento e la deumidificazione prima dell'immissione nell'ambiente servito. Nelle cucine commerciali ed industriali queste unità sono in grado di compensare il notevole flusso d'aria estratto dalle cappe. Nelle altre applicazioni, qualora il flusso d'aria non sia aggressivo o richieda ulteriori trattamenti di purificazione per motivi igienici, essi stessi sono in grado di effettuare autonomamente l'estrazione e l'espulsione all'esterno. Queste pompe di calore aria-aria hanno peculiarità interessanti, tra le quali: innovative sezioni ventilanti a controllo elettronico; coppie di compressori scroll di taglia diversa sullo stesso circuito frigorifero per massimizzare l'efficienza ai carichi parziali; estrema compattezza per una facile installazione; disponibilità di filtri elettronici in grado di eliminare il 99% di virus e batteri e ridurre i costi di esercizio rispetto ad una soluzione tradizionale. Janitrol-blow, di Janitrol, è una nuova unità monoblocco rooftop progettata appositamente per il trattamento dell'aria in ambienti soggetti ad elevati carichi di umidità e calore latente, quali piscine e palestre. Pure rivolte al settore delle piscine sono le unità prodotte da Menerga e da Desert Aire (ampiamente descritte su questo stesso numero nell'articolo dedicato alle piscine). La serie Applied di McQuay comprende le unità RoofPak con capacità termo-frigorifere da 15 kW a 500 kW. Si tratta di unità complesse complete anche di sistemi di recupero di calore opzionali di tipo rotativo entalpico, generatori termici a gas, ecc. Ma un altro elemento che ne contraddistingue la tecnologia è l'applicazione del sistema evaporativo sulle batterie di condensazione che consente di ottenere una consistente riduzione dei consumi di energia elettrica di compressione. La linea RPS e RDT da 100 kW a 250 kW con refrigerante R-410A, adotta il sistema a portata variabile di serie ed è equipaggiata con batterie di condensazione a microcanali di alluminio ad altissima efficienza. Phon, di Nemesis, è un climatizzatore roof-top per grandi superfici. La sua sezione di trattamento dispone di un dispositivo di riscaldamento con generatore d'aria calda alimentato a gas metano o GPL con potenze che vanno da 20 kW fino a 197 kW. La versione con caldaie fornisce il riscaldamento dell'aria di mandata tramite l'installazione di caldaie che asservono la

batteria ad acqua calda e a richiesta la produzione di acqua calda sanitaria. Ogni caldaia alimenta un circuito indipendente in modo da costituire uno scambiatore modulare con funzionamento a gradini. La produzione di Trane copre un campo di capacità molto ampio attraverso diverse serie di prodotti: da 10,5 kW fino a 35 kW fino a 569 kW. Le unità Voyager hanno caratteristiche di versatilità eccellenti. Infatti, sono disponibili nelle versioni con: solo freddo, gas, pompa di calore, dual fuel, recuperatore a flussi incrociati, recuperatore rotativo, resistenza elettrica, economizzatore, etc. Il corretto funzionamento delle apparecchiature può essere controllato e governato attraverso “Mobilità” con controllore Varitrac facilmente gestito con sistemi BMS come il Tracker o il Tracer SummitTM, oltre a supportare i protocolli aperti standard LonTalk. Una grande versatilità costruttiva è offerta da Zoppellaro con apparecchiature realizzate su misura e per specifici utilizzi di trattamento dell’aria. I condizionatori roof top SO-X-RT sono studiati per climatizzare sale chirurgiche o camere bianche, in grado di mantenere un ambiente in pressione o in depressione semplicemente variando i parametri macchina e di arrivare a classe di filtrazione U16 alla mandata. Il raffreddamento e il riscaldamento vengono modulati anche attraverso tiristori sulle batterie elettriche, oppure con sistemi di riscaldamento a gas a scambio diretto modulanti a condensazione. L’adattabilità del roof-top alle esigenze dei singoli impianti passa anche attraverso le modulazioni della quantità d’aria immessa nell’ambiente: inverter sui motori asincroni trifase dei ventilatori di mandata e di ripresa; nuovi ventilatori con motori direttamente accoppiati di piccola taglia a magneti permanenti con inverter; trasduttori per il controllo dello sporco e delle perdite di carico dei filtri. Grazie a questo sistema si riesce a mantenere costante la portata dell’aria in mandata[2].



Figura 20 Roof top per le imbarcazioni.

4 Pompa di calore a CO₂ (R744) aria/aria del tipo roof top, descrizione dell’impianto circuiteria e componenti

Il roof-top a pompa di calore ad R744 (CO₂) installato nel Centro ricerche Enea di Casaccia (Roma), è stato progettato e realizzato con l’obiettivo di coprire i fabbisogni termici legati alla climatizzazione annuale di un edificio, il suo funzionamento è stato costantemente monitorato al fine di valutarne COP ed EER (**Energy Efficient Ratio**) nelle reali condizioni di funzionamento. L’edificio F76 (figura 21) ha una superficie di 215 m² ed è costituito da 10 uffici dotati di sensori di temperatura e serrande di parzializzazione, che regolano la portata di aria in base ai valori di temperatura rilevati, 2 bagni, una vecchia centrale termica e una frigorifera (figura 22).

Come già accennato nel capitolo precedente, il roof-top è una macchina frigorifera del tipo aria/aria che, nel nostro studio per motivi di sperimentazione è stato posto a livello del suolo (figura 23), ed è dotato già delle predisposizioni per i canali di mandata e ripresa dell’aria.



Figura 21 Edificio F76 presso l'Enea di Casaccia.

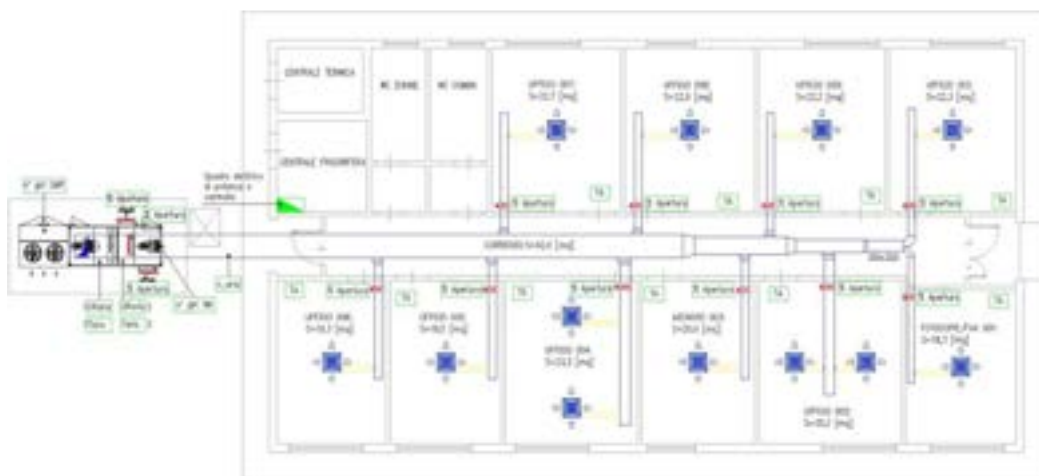


Figura 22 Pianta Edificio.

Durante il suo funzionamento, sia invernale che estivo, l'obiettivo è quello di garantire nell'ambiente climatizzato il comfort termo-igrometrico previsto dalle normative, a seconda della stagione considerata. Per comprendere fino in fondo quali sono le caratteristiche della pompa di calore aria/aria oggetto di studio, di seguito viene prima illustrata la scelta progettuale alla base del funzionamento della macchina e le varie configurazioni di circuiteria che può assumere, e successivamente l'elenco di tutti i componenti presenti.

La scelta impiantistica e la componentistica riportata di seguito è la soluzione progettuale scelta a seguito di una procedura progettuale iterativa, che ha previsto diverse fasi per la determinazione degli scambiatori di calore, dei distributori e della particolare circuiteria. In tale procedura, essendo il sistema reversibile, al cambiare della modalità di funzionamento (ad esempio nel caso invernale) il gas-cooler costituito dalla batteria interna cede calore all'aria da immettere negli ambienti, mentre l'evaporatore, (batteria esterna), chiude il ciclo facendo evaporare la CO_2 prelevando calore dall'aria esterna, il tutto a spese del lavoro di compressione; invece in estate, mediante il posizionamento delle valvole motorizzate a tre vie, la batteria interna funge da evaporatore, la CO_2 evapora raffreddando l'aria da immettere negli ambienti mentre il gas-cooler (batteria esterna) chiude il ciclo cedendo calore all'esterno. In questa inversione delle batterie, nella progettazione, si deve assicurare che esse siano in grado di garantire lo scambio termico richiesto con l'aria, a seconda del carico.



Figura 23 Roof-top posizionato al suolo per motivi di sperimentazione.



Figura 24 Quadro elettrico di potenza e controllo del roof-top.

L'impianto è dotato di un evoluto sistema BMS (Building Management System) in grado di gestire le corrette condizioni termoigrometriche dei vari ambienti, variando la portata d'aria immessa nei vari locali e modificandone anche la temperatura d'immissione

Tutti gli apparati di regolazione e controllo che gestiscono il funzionamento del roof-top, ne effettuano il monitoraggio, permettono il controllo in remoto del sistema edificio - impianto sono installati all'interno del quadro elettrico di potenza e controllo mostrati in figura 24.

4.1 Descrizione della circuiteria del roof-top nelle varie configurazioni al variare della modalità di funzionamento

In questo paragrafo si riportano due rappresentazioni tridimensionali, ottenute al CAD, rappresentative l'una (figura 25) della circuiteria interna del roof-top, nella quale si può apprezzare la disposizione spaziale dei condotti e di tutti componenti costituenti l'impianto a meno delle due batterie, mentre nell'altra (figura 26) si può osservare una vista complessiva della macchina costituita da tutti i componenti oltre che dal cassone contenitore che funge anche da basamento di quest'ultima. Dalla figura 27 è possibile osservare, come anticipato, che la batteria esterna è formata da due circuiti. A seconda della modalità di funzionamento questi due circuiti possono lavorare entrambi in serie sia rispetto all'aria che alla CO₂, oppure si può verificare che dei due, uno venga by-passato dal fluido refrigerante; si osserva ancora la presenza di due rigeneratori per garantire il loro utilizzo indipendentemente dall'inversione del ciclo; la

presenza della resistenza elettrica integrativa sulla batteria interna al fine di scongiurare la formazione della brina.

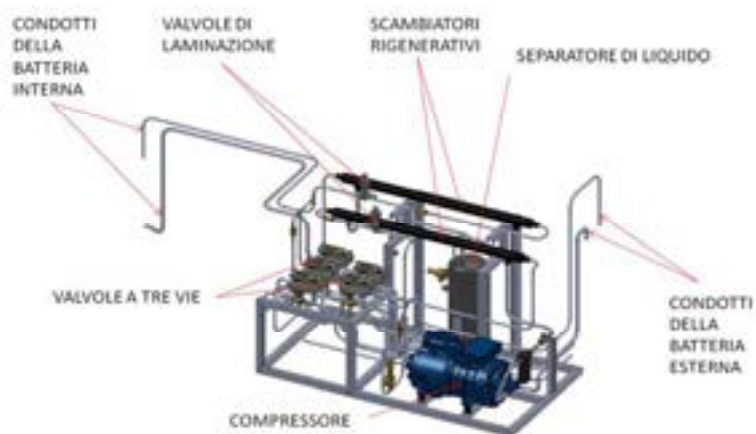


Figura 25 Vista tridimensionale della circuiteria interna del roof-top.

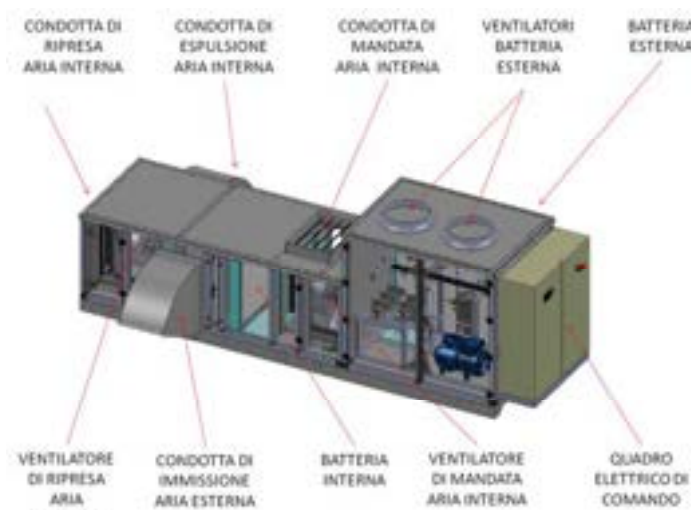


Figura 26 Vista tridimensionale complessiva del roof-top.

Tabella 1 Configurazione delle valvole al variare della modalità di funzionamento.

MODALITA' DI FUNZIONAMENTO	CONFIGURAZIONE VALVOLE						
	1	2	3	4	A	B	5
ESTATE	a	a	/	a	/	/	a
INVERNO CLASSICO	b	a	b	b	/	/	a
INVERNO 2 EVAP. IN SERIE	b	b	b	b	/	/	a
INVERNO CON 2 RIGENERATIVI	b	a	a	b	/	/	a
DEFROSTING CLASSICO	b	a	b	b	100%	/	b
DEFROSTING CON 2 RIGENERATIVI	b	a	a	b	100%	/	b
DEFROSTING INVERSO	a	b	/	a	100%	100%	b
DEFROSTING INVERSO 2	a	a	/	a	100%	/	b

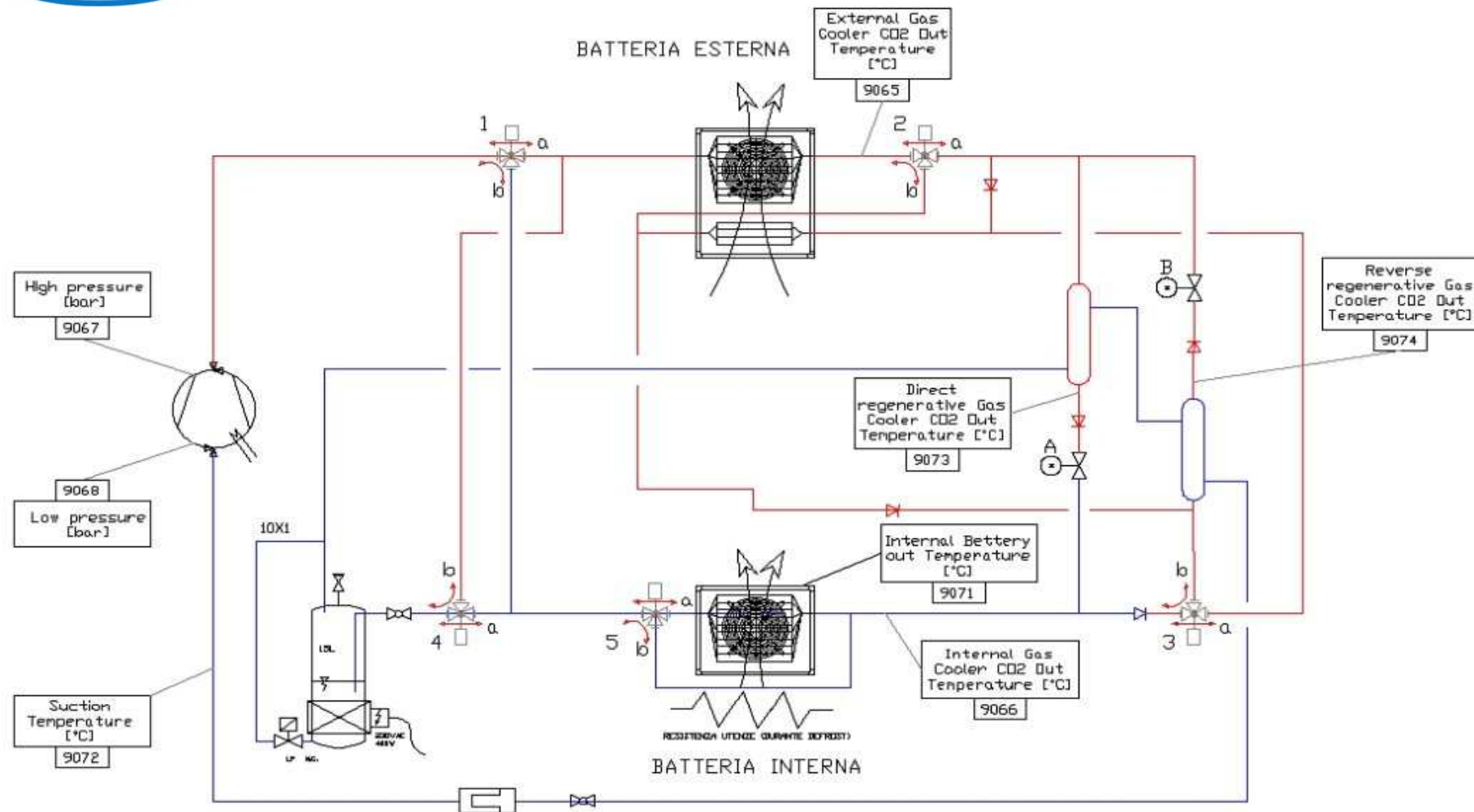


Figura 27 Schema Generale.

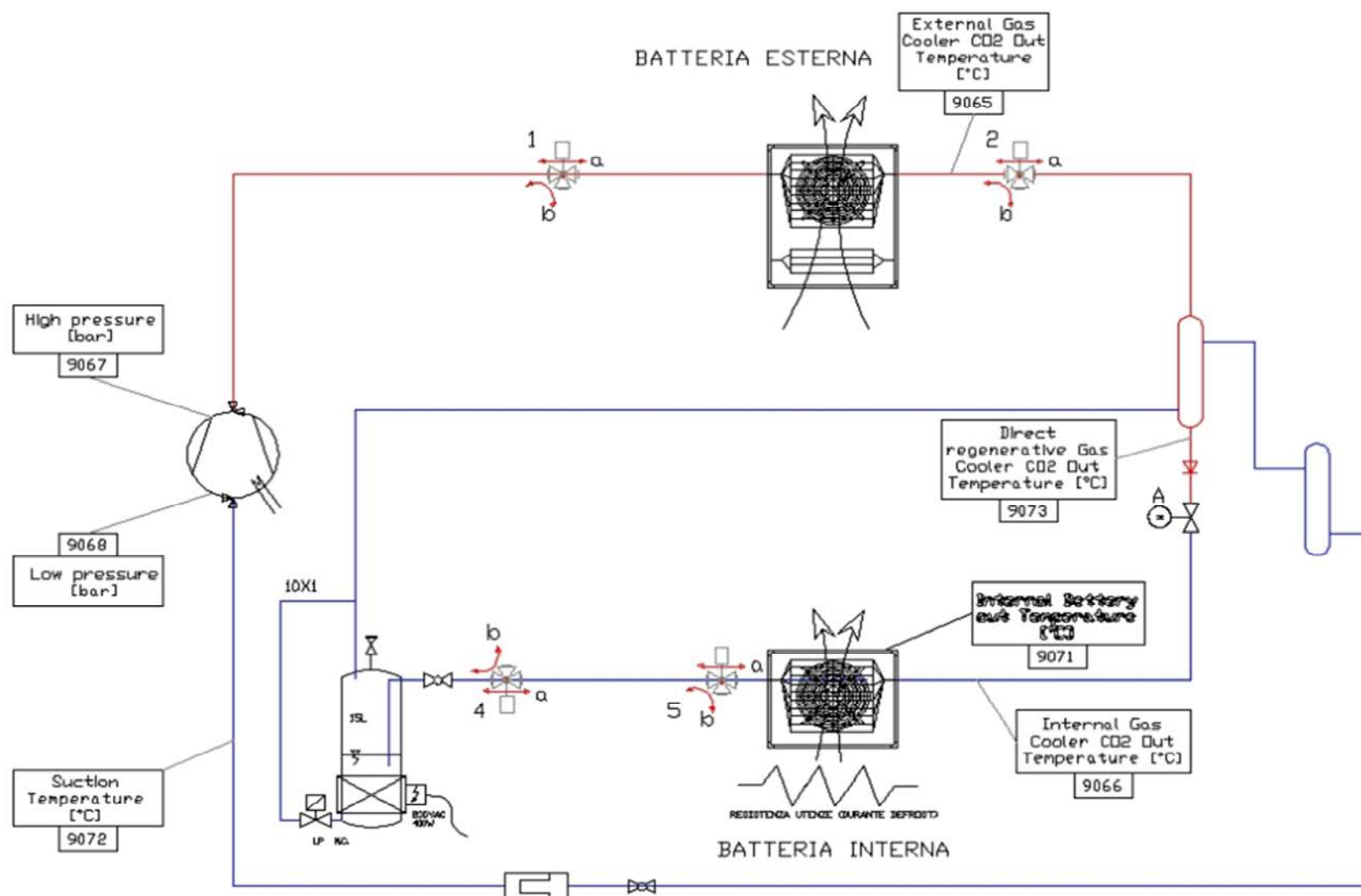


Figura 27a Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'ESTATE.'

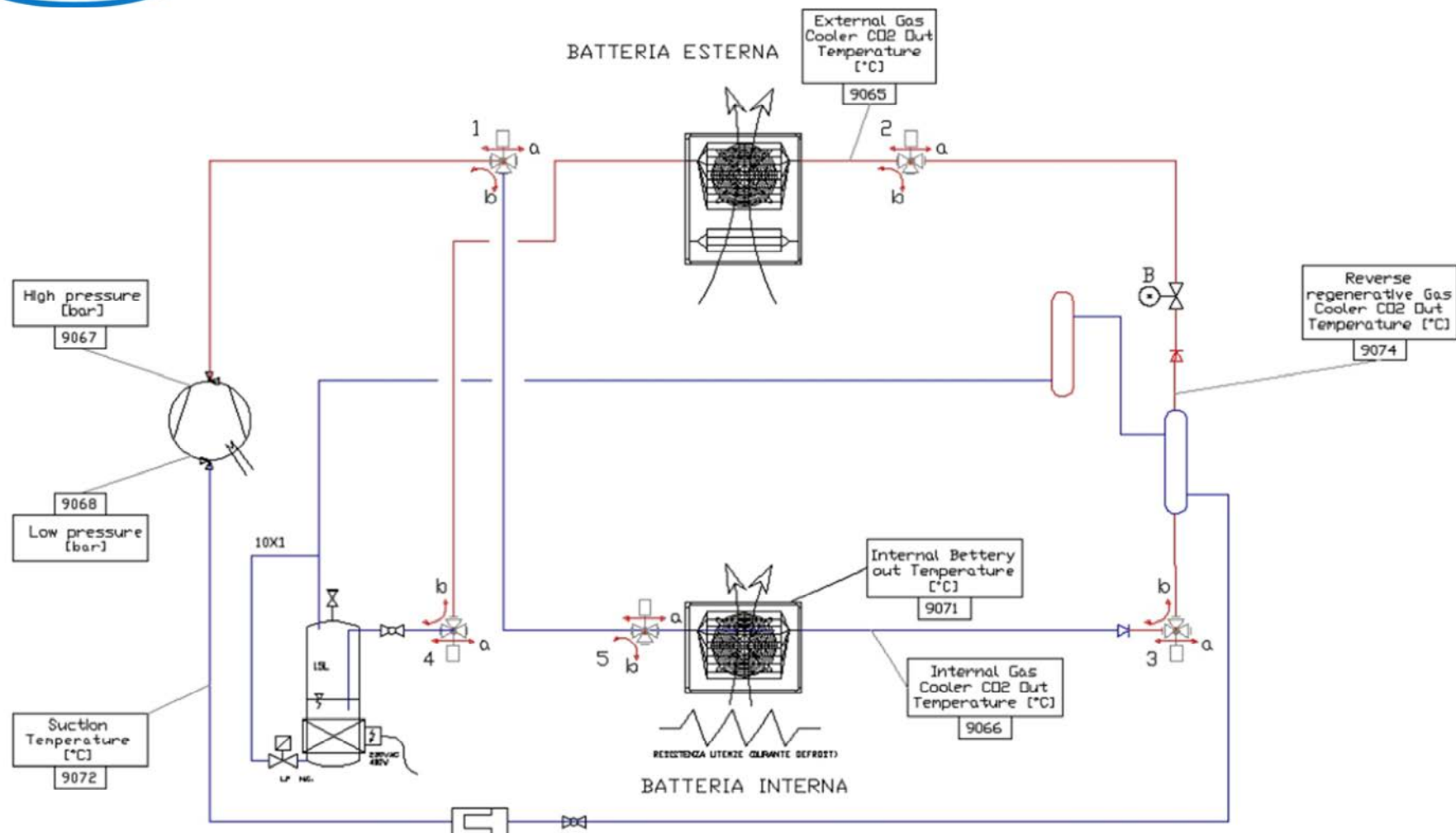


Figura 27b Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'Inverno'.

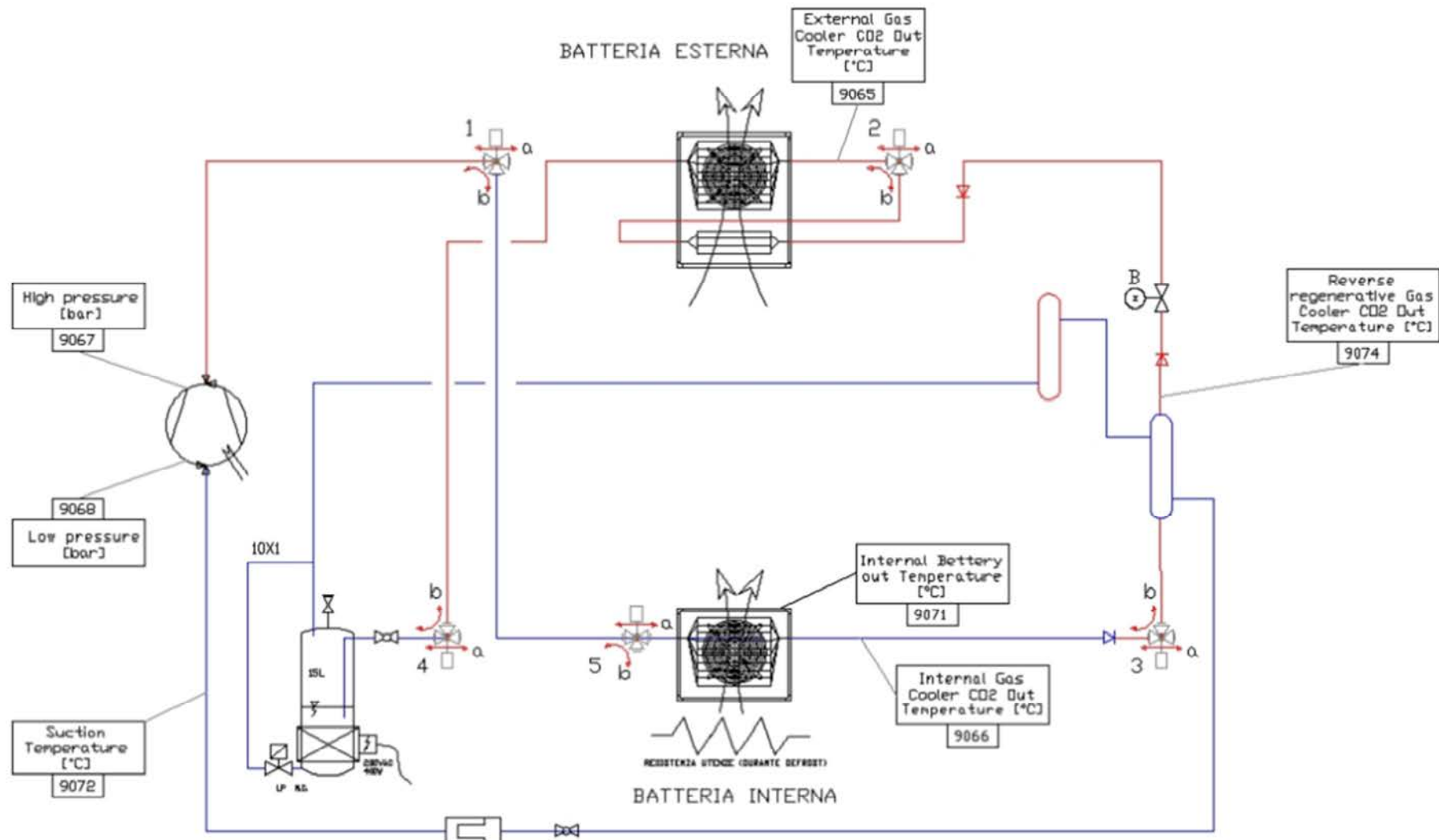


Figura 27c Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'INVERNO CON DUE EVAPORATORI IN SERIE'.

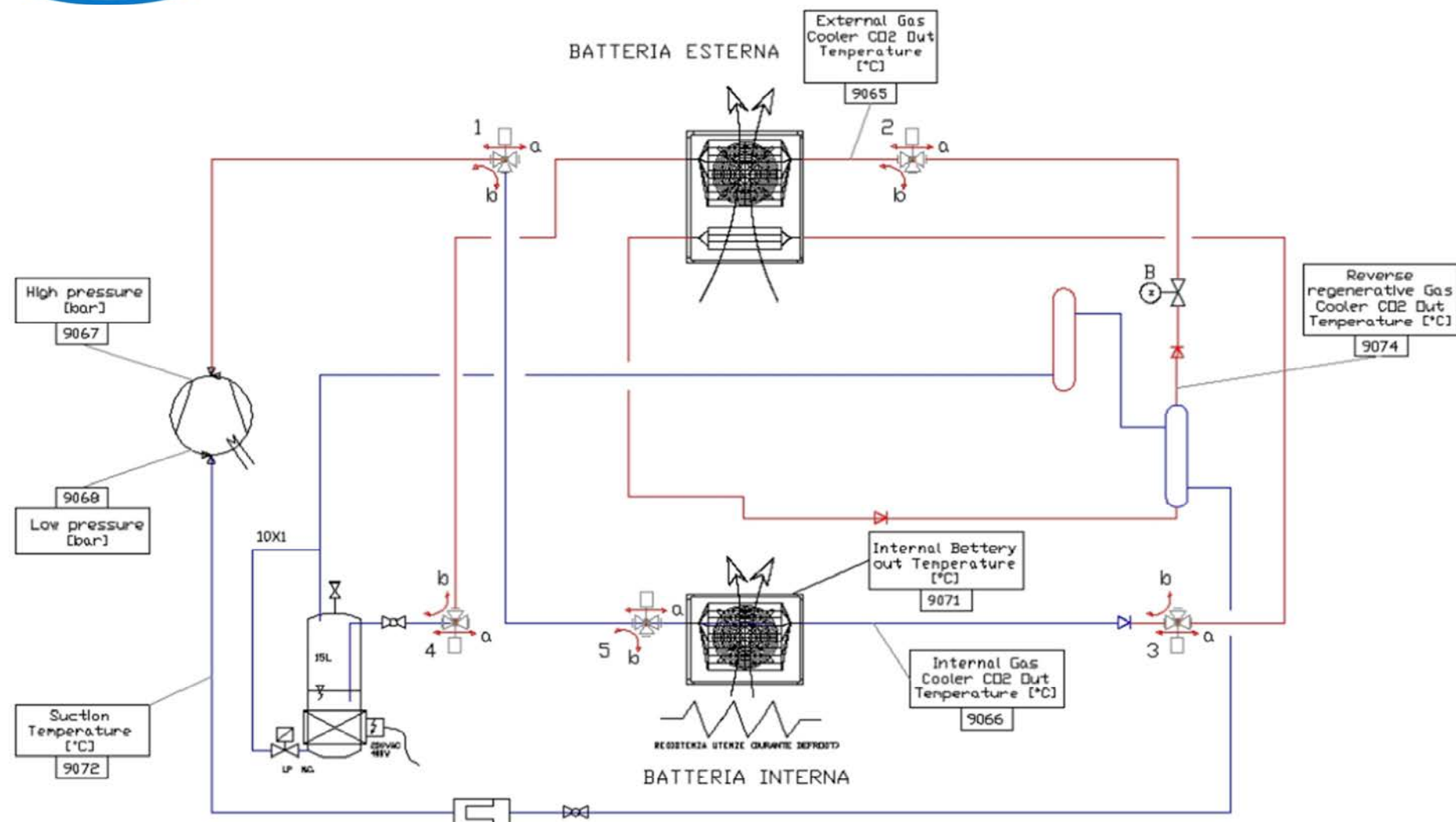


Figura 27d Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'INVERNO CON DUE RIGENERATIVI'

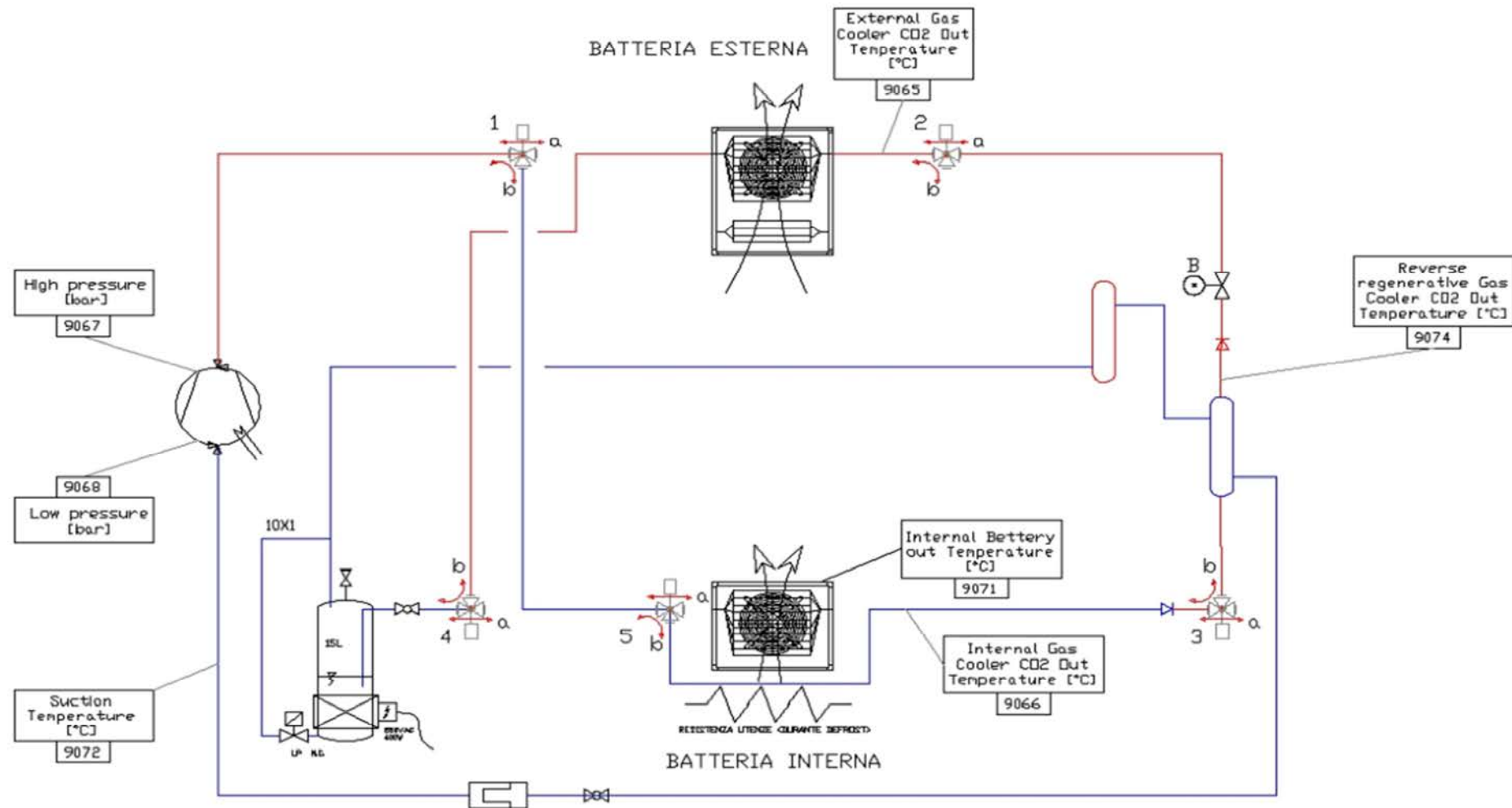


Figura 27e Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'DEFROSTING CLASSICO'

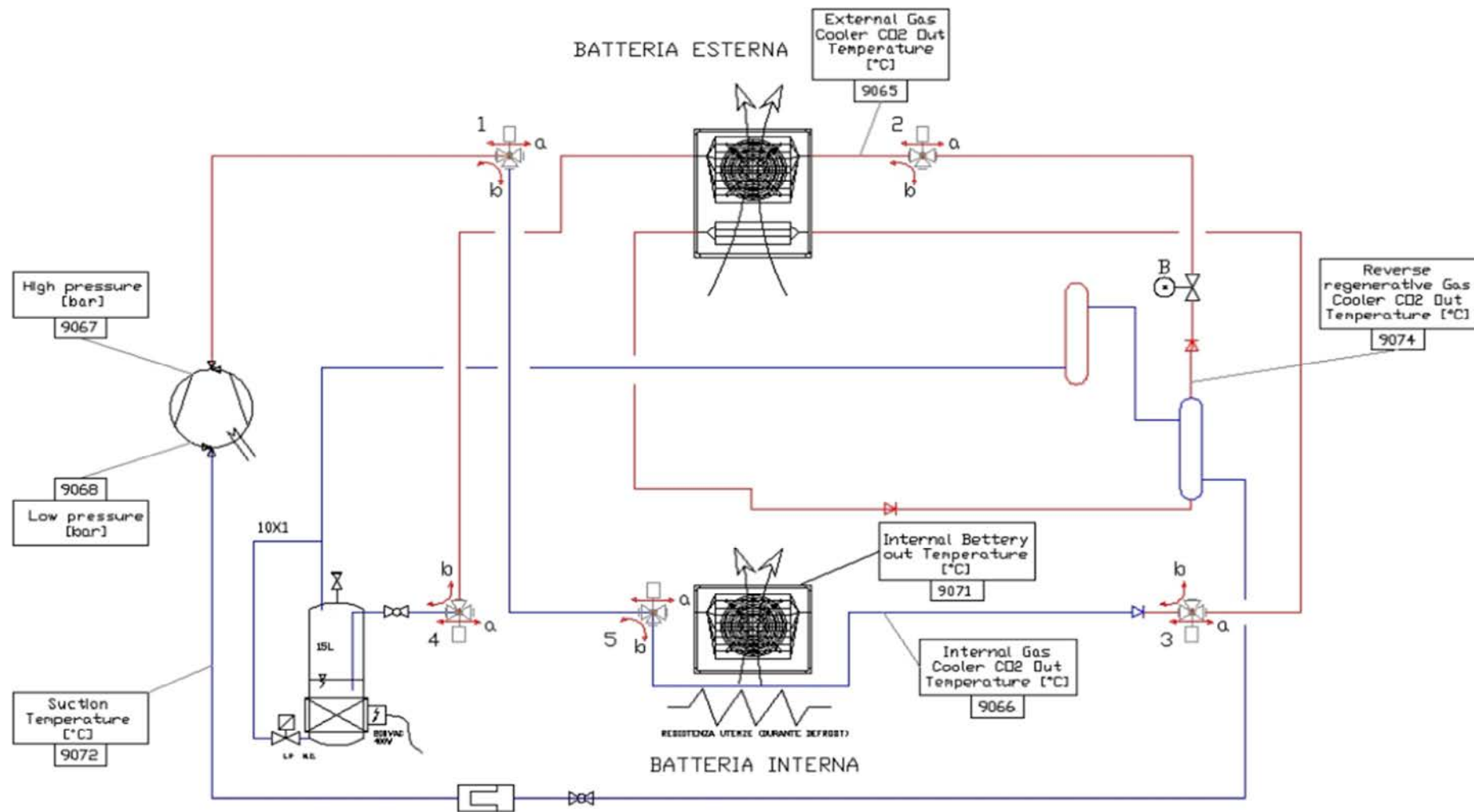


Figura 27f Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'DEFROSTING CON DUE RIGENERATIVI'

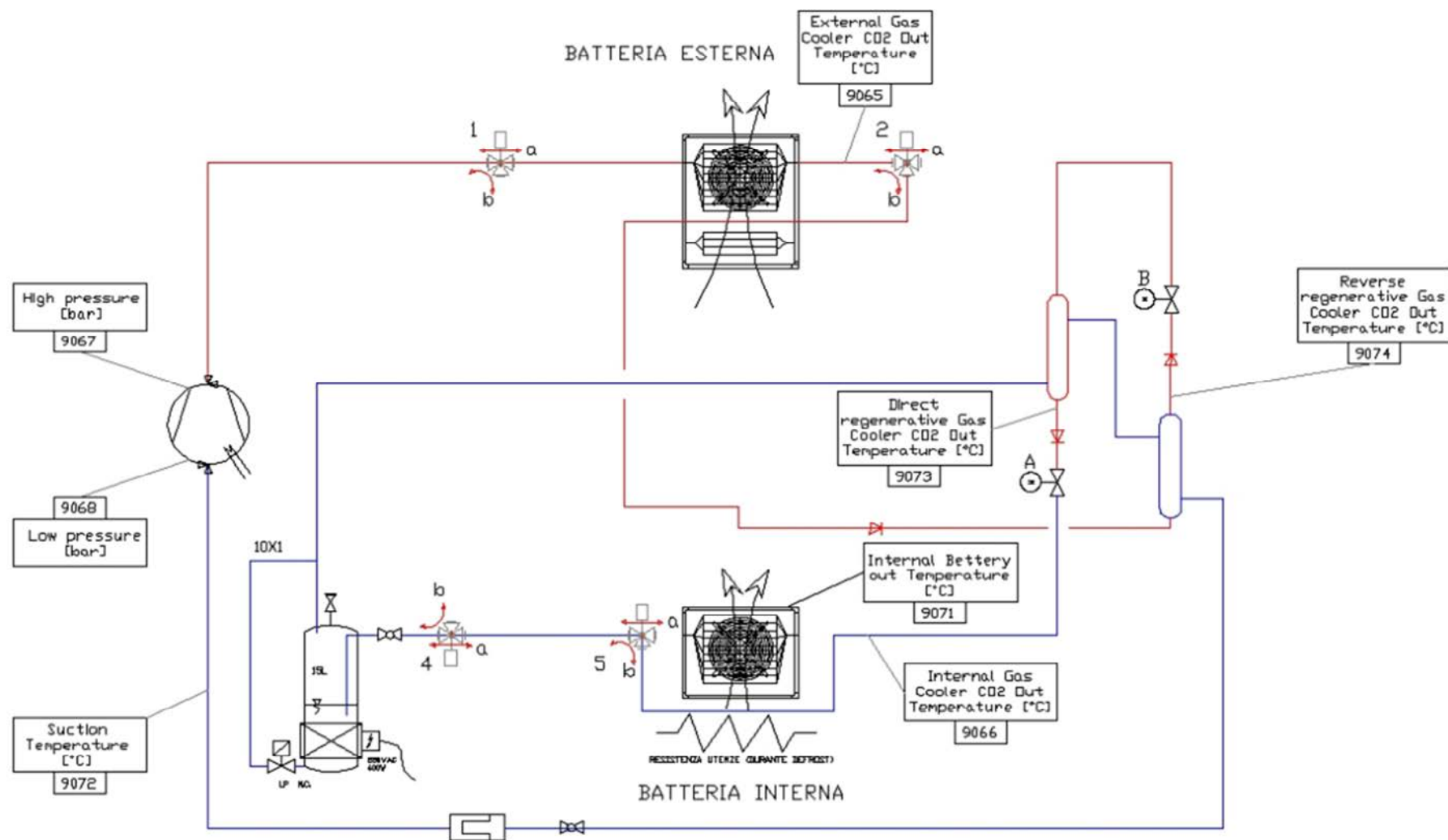


Figura 27g Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'DEFROSTING INVERSO'

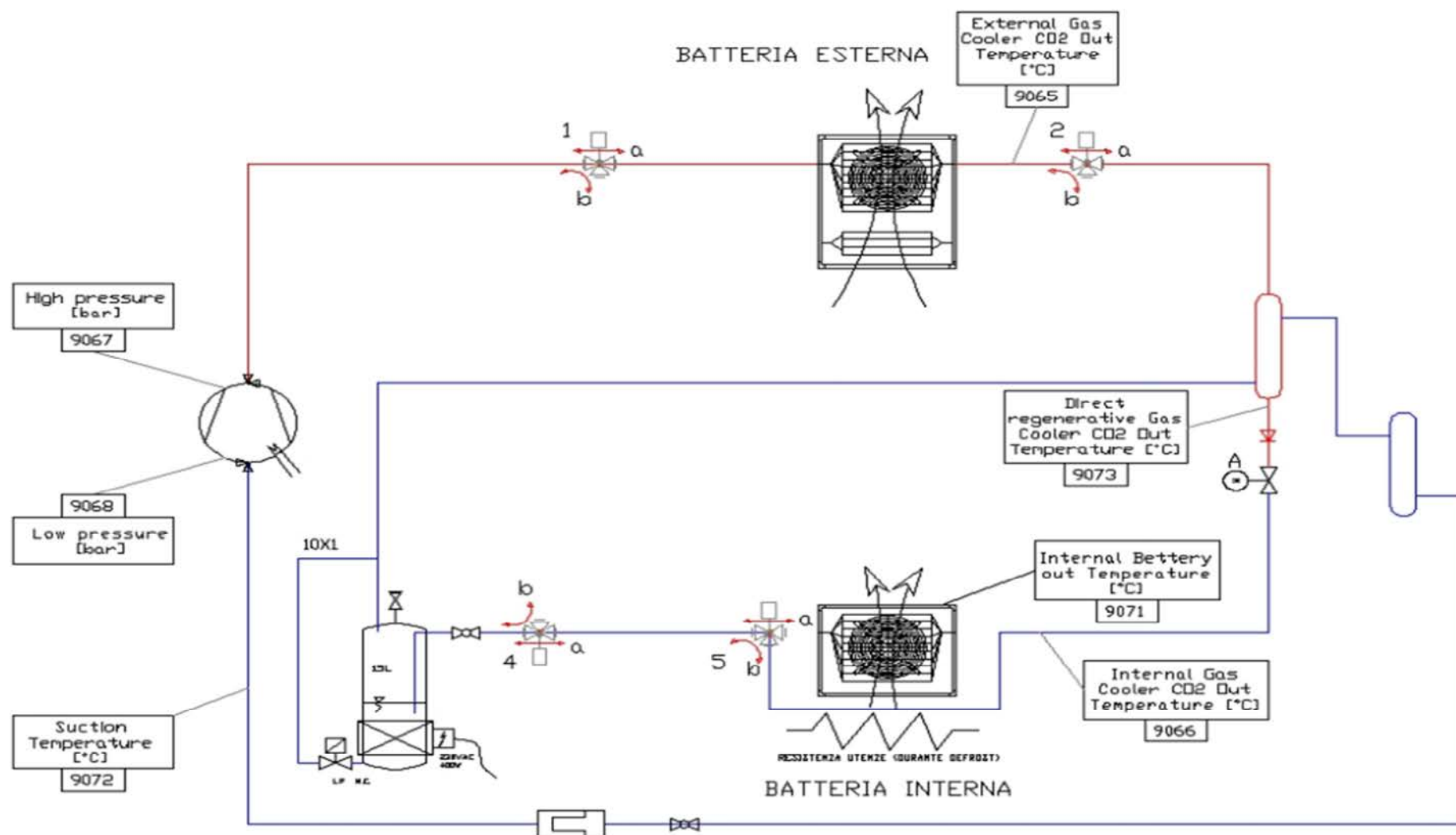


Figura 27h Rappresentazione dello schema generale d'impianto nella modalità di funzionamento 'DEFROSTING INVERSO 2'

Inoltre si è ritenuto molto importante, al fine della comprensione del funzionamento del roof-top, di riportare anche una tabella che descrive la configurazione di apertura delle valvole a tre vie e le due valvole di laminazione, al variare della modalità di funzionamento (Tabella 1).

Di seguito si riportano gli schemi dell'impianto nelle varie modalità di funzionamento.

Nella modalità di funzionamento 'ESTATE' (figura 27a), la CO₂ in uscita dal compressore viene inviata nel circuito principale della batteria esterna (che in tal caso funziona da gas cooler) al fine di cedere calore all'aria esterna. Dopodiché passa in uno dei due scambiatori rigenerativi, in modo da cedere calore al fluido in aspirazione al compressore al fine di surriscaldarlo. Il fluido refrigerante, che si trova dal lato alta pressione, uscito dal rigeneratore viene laminato, entra poi nella nell'evaporatore costituito dalla batteria interna, sottraendo calore all'aria dell'ambiente da climatizzare. Dopo l'evaporatore, il fluido refrigerante entra nel separatore di liquido e poi, infine nel rigeneratore, lato bassa pressione, per poi attraversare il compressore, ricominciando così di nuovo il ciclo.

Nella modalità di funzionamento 'INVERNO CLASSICO' (figura 27b) il fluido refrigerante in uscita dal compressore, entra nella batteria interna, che assolve il compito di gas cooler, al fine di cedere calore all'aria dell'ambiente climatizzato. Dopo tale processo di raffreddamento, la CO₂ viene ulteriormente portata ad una temperatura inferiore attraversando lo scambiatore rigenerativo lato alta pressione. A questo punto può essere laminata ed espandere nella batteria esterna che costituisce questa volta l'evaporatore. Dopo l'evaporatore, il fluido refrigerante, viene inviato al separatore di liquido e viene poi surriscaldato attraversando il rigeneratore lato bassa pressione, a tal punto è inviata al compressore per ripercorrere nuovamente il ciclo.

Nella modalità di funzionamento 'INVERNO CON 2 EVAPORATORI IN SERIE' (figura 27c) entra in funzione anche il circuito secondario della batteria esterna che funge da evaporatore. Tale circuito, in questa configurazione ha l'obiettivo di aumentare la superficie di scambio termico con l'aria esterna. Il fluido refrigerante dopo essere laminato, entra prima nel circuito secondario della batterie esterna, per poi attraversare successivamente il circuito principale di tale batteria. In questo modo, i due circuiti della batteria esterna sono attraversati in serie, sia dal fluido refrigerante che dall'aria.

Nel funzionamento 'INVERNO CON 2 RIGENERATIVI' (figura 27d) si osserva che i due circuiti che costituiscono la batteria esterna, ricoprono funzionalità diverse. Il primo circuito incontrato dall'aria esterna, più soggetto a brinamento rispetto all'altro, assume il compito di sbrinatori della batteria esterna essendo attraversato dal fluido refrigerante ancora caldo in uscita dal gas cooler cedendo calore alla brina. Dopo il passaggio nel circuito secondario dell'evaporatore, il fluido passa nel rigeneratore lato alta pressione, poi viene laminato ed evapora successivamente nel circuito principale della batteria esterna che funge ovviamente da evaporatore in questa modalità di funzionamento. Successivamente il fluido attraversa il separatore di liquido, il rigeneratore lato bassa pressione ed infine il compressore per poi ripercorrere di nuovo il ciclo termodinamico.

Nella modalità di funzionamento 'DEFROSTING CLASSICO' (figura 27e) il fluido di lavoro by-passa la batteria interna, infatti in uscita dal compressore viene inviato direttamente nel rigeneratore, lato alta pressione, e successivamente nel circuito principale della batteria esterna in modo da cedere calore alla brina formatasi, al fine di scioglierla. Successivamente attraversa il separatore di liquido, il rigeneratore, lato bassa pressione, e ritorna al compressore. In tale configurazione non si verifica una vera e propria laminazione, quindi il lato di alta e bassa pressione a cui abbiamo fatto riferimento, vengono a crearsi per le perdite di carico che caratterizzano il circuito. Inoltre è importante sottolineare che il calore ceduto alla brina, è esclusivamente quello prodotto dal fluido nell'attraversare il circuito caratterizzato da tali perdite di carico.

Anche nel funzionamento denominato 'DEFROSTING CON 2 RIGENERATIVI' (figura 27f) viene realizzata una tecnica di sbrinamento a gas caldo. In tale schema si evince il fatto che lo scambio termico con l'ambiente avviene solo nella batteria esterna. Più precisamente in essa, il circuito secondario, atto a sbrinare, si

comporta da gas cooler cedendo calore alla brina, mentre il circuito principale, sottraendo calore dall'aria esterna si comporta da evaporatore. Un aspetto molto importante da sottolineare in questa modalità di funzionamento, è il fatto che la batteria interna viene by-passata dal fluido refrigerante, quindi non c'è uno scambio di calore con l'aria interagente con la batteria interna. E' ovvio che tale modalità di funzionamento, è utilizzata solo per brevi intervalli temporali durante il normale funzionamento invernale. La durata e la frequenza di tali intervalli dipendono dalle condizioni dell'ambiente esterno e dal carico della macchina.

La modalità di funzionamento 'DEFROSTING INVERSO' (figura 27g) è utilizzata quando è necessario lo sbrinamento anche del circuito principale della batteria esterna. Anche se tale circuito è posto a valle di quello secondario nel senso dell'aria, si possono verificare gravose condizioni climatiche che portano alla formazione di brina anche in questa parte della batteria esterna. Tramite una particolare configurazione delle valvole a tre vie, il fluido di lavoro in uscita dal compressore, viene inviato nel circuito principale della batteria esterna in modo da cedere calore alla brina. Successivamente il fluido attraversa in serie i due scambiatori rigenerativi dal lato alta pressione, poi il separatore di liquido, e di nuovo i due scambiatori rigenerativi lato bassa pressione, infine ritorna al compressore per ricominciare di nuovo il ciclo termodinamico.

La modalità di funzionamento 'DEFROSTING INVERSO 2' (figura 27h) è utilizzata quando è necessario lo sbrinamento della batteria esterna. Il fluido di lavoro in uscita dal compressore, viene inviato nella batteria esterna in modo da cedere calore alla brina. Successivamente il fluido attraversa lo scambiatore rigenerativo dal lato alta pressione, poi il separatore di liquido, e di nuovo i due scambiatori rigenerativi lato bassa pressione, infine ritorna al compressore per ricominciare di nuovo il ciclo termodinamico.

4.2 Componenti del roof-top

Dopo la descrizione dell'impianto in cui è inserito il roof-top oggetto di analisi, delle sue configurazioni circuitali al variare della modalità di funzionamento, in questo paragrafo si descrivono in modo dettagliato i principali componenti che costituiscono il roof-top. In molti casi oltre alla breve descrizione, quando è stato possibile, viene allegato anche parte del datasheet fornito dalle varie case costruttrici.

Dai dati di targa si trae che, in funzionamento invernale, l'impianto, con temperatura ambiente +5°C, ha una capacità termica di 36,3 kWt con aria in +16°C/out +34°C e lato evaporatore aria in +2°C/out -2°C. In funzionamento estivo con temperatura ambiente +35°C, ha una capacità frigorifera di 38,5 kWf con aria in +27°C/out +16°C, lato condensatore aria in +35°C/out +50°C.

L'impianto è costituito dai seguenti componenti:

- Compressore
- Valvole di laminazione
- Batteria Interna
- Batteria Esterna
- Scambiatore Rigenerativo
- Ventilatori assiali per la batteria esterna
- Ricevitore di liquido
- Valvole motorizzate a 3-vie
- Ventilatori di mandata e ripresa dell'aria

Compressore

Il compressore installato all'interno della pompa di calore è stato fornito dalla 'DORIN' che realizza compressori per la CO₂ in diversi modelli e serie. In particolare, a bordo è presente un compressore della serie 300 modello CD1300H (figura 28-29), ovvero un compressore monostadio, semi-ermetico a due cilindri, capace di operare in regime transcritico.

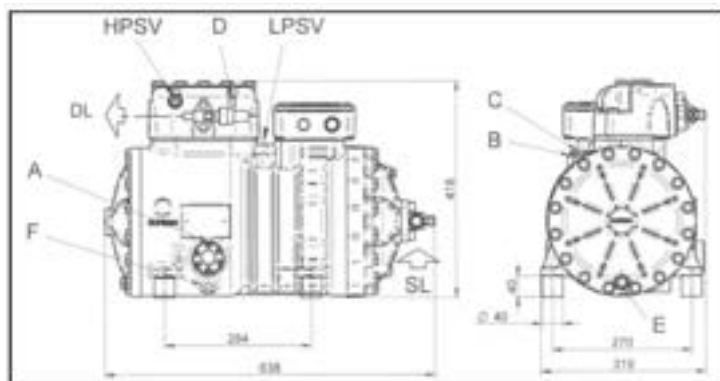


Figura 28 Compressore semi-aperto DORIN modello CD 1300 H.

Esso è adatto per applicazioni tipo: pompa di calore, refrigerazione commerciale, trasporto refrigerato, sistemi HVAC reversibili e non. Le sue caratteristiche tecniche principali da catalogo sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 Dettagli tecnici compressore.

SPECIFICHE TECNICHE COMPRESSORE	
Cilindri	2
Volume spostato [m ³ /h] @ 50 Hz	8.92
RPM @ 50 Hz	1450
Peso [kg]	148
Carica Olio [kg]	2.5



Figura 29 Compressore del roof-top.

Come tutti in compressori alternativi, la variazione di pressione del fluido è ottenuta con il moto alternativo di uno o più pistoni che si muovono all'interno di cilindri in comunicazione con la parte di alta e bassa pressione del circuito frigorifero attraverso valvole unidirezionali che si aprono per differenza di pressione. I compressori semiermetici si stabiliscono in quella fascia di applicazioni dove è importante garantire una certa tenuta e quindi limitare la fuoriuscita di refrigerante, infatti il compressore vero e proprio (camera di compressione cinematici) è accoppiato direttamente al motore elettrico, il tutto è completamente rinchiuso in un involucro stagno. Nonostante la totale assenza di perdite in corrispondenza dell'albero motore, seppur in modesta entità, si possono verificare perdite per imperfetta tenuta in corrispondenza degli attacchi filettati. I principali vantaggi che caratterizzano tali compressori sono: una buona versatilità e flessibilità ai valori di pressione in mandata e in aspirazione, un valore di rendimento che si mantiene abbastanza costante in tutte le condizioni di esercizio sia al variare del carico frigorifero sia al variare del rapporto di compressione.

Di contro c'è da considerare una serie di significativi svantaggi: fattori di perdita introdotti dalla presenza delle valvole unidirezionali, marcata dipendenza del rapporto volumetrico dal rapporto di compressione, a causa del volume nocivo, sono molto sensibili alla presenza di liquido all'aspirazione e infine il funzionamento alternativo che produce vibrazioni e rumorosità.

Questo compressore è monostadio capace di lavorare in regime transcritico, condizione essenziale dal momento che il fluido refrigerante è CO₂. Considerando le condizioni particolarmente gravose in cui si trova a lavorare un compressore per anidride carbonica in ciclo transcritico, il compressore in oggetto per il suo design è particolarmente adatto a limitare fenomeni di scambio termico tra la parte di alta e bassa pressione.

Il compressore è mosso dall'inverter della FRIGOKIMO, modello 15FPE-FMV14 (figura 30) che consente di variare la frequenza, e quindi la potenza del compressore stesso. Questo è possibile variando i parametri del compressore e utilizzando il controllo web come sarà descritto più avanti.



Figura 30 Compressore Frigokimo.

Valvole di laminazione

Le valvole di laminazione vengono gestite da un controllore elettronico in funzione del valore della pressione di mandata. Queste sono valvole motorizzate ad azionamento diretto pilotate da un attuatore.

Per la pompa di calore aria/aria a CO₂ oggetto di studio sono state scelte valvole della Danfoss modello CCMT ad alta pressione con attuatore elettronico.

L'CCMT è progettata per regolare il flusso del gas transcritico o del liquido subcritico proveniente dal raffreddatore di gas (gas cooler) nei sistemi a CO₂ transcritici. Essa può essere inoltre utilizzata anche per altre funzioni di controllo nei sistemi sempre a CO₂.

L' CCMT è progettata in modo che le forze di apertura e di chiusura siano bilanciate, attraverso un segnale elettrico si genera una forza magnetica che mette in rotazione un giunto accoppiato ad un mandrino il quale a sua volta determina il movimento verticale del cono valvola che garantisce la variazione di sezione per il passaggio di refrigerante e una perfetta tenuta in condizioni di chiusura valvola.



Figura 31 Valvole di laminazione elettroniche del roof-top.

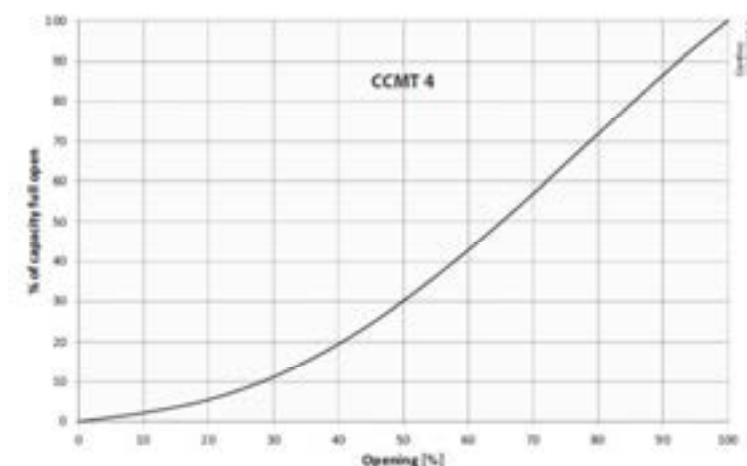


Figura 32 Curva caratteristica di funzionamento delle valvole di laminazione.

Tabella 3 Caratteristiche della valvola ICMTS installata sulla pompa di calore.

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

Il controllore legge la pressione di mandata (Pressione al gas cooler), la temperatura del gas all'uscita del gas cooler 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. La valvola è stata sviluppata appositamente per le pressioni che caratterizzano un ciclo transcritico ad anidride carbonica.

Il motore della valvola cioè l'attuatore ICAD è controllato attraverso un segnale 0-10 V inviato dal controllore. Sono riassunte in tabella 3 le caratteristiche tecniche della valvola ICMTS.

Il controllore elettronico installato per il funzionamento della valvola è sempre della Danfoss modello EKC 326A. Questo controllore è adoperato in svariate applicazioni, tra cui pompe di calore, che utilizzano l'anidride carbonica come fluido refrigerante. La caratteristica principale è che riesce a garantire e stabilizzare il livello di pressione al gas cooler per massimizzare il COP. Il sistema prevede che oltre al controllore, l'attuatore e la valvola siano predisposti di un opportuno sensore di temperatura e pressione in uscita al gas cooler in modo da poter avere gli input necessari al corretto funzionamento dell'intero sistema di laminazione.



Fig.33 Controllore Danfoss mod. EKC326A per il controllo dell'alta pressione.

Il controllo delle valvole, avviene utilizzando in cascata al controllore Danfoss mod. EKC326A un controllore della Danfoss mod. EKD316 illustrato in figura. 34. Questo viene utilizzato per muovere fisicamente il motore della valvola di laminazione elettronica.



Figura 34 Controllore Danfoss mod.EKD316.

Batteria Interna

Nel roof-top in esame, a seconda del funzionamento, estivo od invernale, la batteria interna assume il ruolo, rispettivamente di evaporatore o gas cooler.

La batteria interna rientra nei componenti più importanti installati sulla pompa di calore, in quanto attraverso questa riusciamo a riscaldare o raffreddare l'aria a seconda delle condizioni considerate.

Nel caso della pompa di calore aria/aria a CO₂ oggetto di studio, come batteria interna è stato scelto uno scambiatore a tubi ed alette fabbricato appositamente dalla LU-VE: il codice prodotto del modello scelto è LPN32/ED/32T3R1000A/CuAl/12V01 (figura 35-36).

I tubi sono realizzati in rame, così come i distributori e i connettori, mentre le alette sono in alluminio. Le alette sono forate ed al loro interno sono fissati i tubi tramite una lavorazione di forzatura. La scelta di una tipologia di scambiatore è dettata sicuramente dalla tipologia di fluidi impiegati nello scambio termico e dalle condizioni operative in cui si troverà a lavorare.

La batteria interna, al fine di scongiurare una possibile formazione di brina su di essa, è equipaggiata anche di una resistenza elettrica. La progettazione è stata ottimizzata per il funzionamento della batteria anche a seguito dell'inversione del ciclo e in funzionamento 'allagato' in alcune condizioni operative. Ciò spiega ulteriormente la presenza del separatore di liquido alla sua uscita in particolari configurazioni delle valvole a tre vie, riguardanti ovviamente il funzionamento estivo. I dettagli tecnici dello scambiatore sono riportati in tabella 4. In particolare, in uno scambiatore di calore a tubi ed alette, come quello scelto per assumere le vesti della batteria interna, i due fluidi a temperatura diversa scambiano calore attraverso la superficie sia dei tubi che delle alette, il flusso dei due fluidi di lavoro, CO₂ ed aria è incrociato.

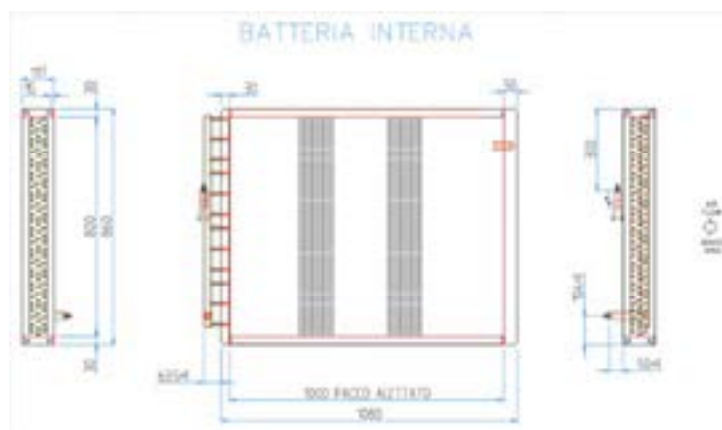


Figura 35 Batteria Interna.



Figura 36 Tipologia di batteria interna installata sulla pompa di calore.

Una delle caratteristiche principali della batteria interna, ma in generale di tutti gli scambiatori di calore che costituiscono una macchina reversibile a CO₂ è la loro particolare resistenza a pressioni elevate. Infatti trovandosi a lavorare in condizioni transcritiche, tale batteria della pompa di calore in esame è stata realizzata per resistere a pressioni del fluido interno di oltre 120 bar.

Di seguito viene riportata la scheda tecnica del modello impiegato come batteria interna nella pompa di calore a CO₂ oggetto di studio.

Tabella 4 Dettagli tecnici batteria interna.

SPECIFICHE TECNICHE BATTERIA INTERNA	
Ingombro totale [mm ³]	1000x800x65
Ingombro superficie alettata [mm ³]	1000x800x65
Peso Batteria [Kg]	24.6
Superficie esterna [m ²]	31.4
Volume interno [lt]	3.97
Rapporto superficie esterna/interna	15.9
Diametro interno tubi [mm]	6.52
spessore tubi [mm]	1.00
Passo tra le alette [mm]	3.20
spessore alette [mm]	0.13
passo tra i tubi [mm]	25.0
passo tra i ranghi [mm]	21.6
Perdita di carico [Pa]	24

Batteria Esterna

La batteria esterna, come quella interna, rientra nei componenti principali installati sulla pompa di calore, ed è proprio attraverso questa che riusciamo a raffreddare o riscaldare l'aria che l'attraversa, come già detto, al variare del funzionamento estivo od invernale.

Nel caso della pompa di calore oggetto di studio, come batteria esterna è stato scelto uno scambiatore a tubi ed alette fabbricato appositamente dalla LU-VE contrassegnato da un codice prodotto LPN32/GC/54T6R1400A/CuAl/12V01 (figura 37-38).

Per la particolare attenzione che si è data allo sbrinamento, la batteria esterna è costituita da due circuiti per la CO₂ che possono essere alimentati in serie od in parallelo rispetto al flusso dell'aria esterna, ed indipendentemente l'uno dall'altro, grazie all'opportuna configurazione delle valvole a tre vie. Di questi due circuiti uno assume le vesti di defrosting.

Anche per la batteria esterna, i tubi sono realizzati in rame, così come i distributori e i connettori, mentre le alette sono in alluminio, anche per essa è previsto il funzionamento in allagato.

Ovviamente, come si può osservare nella figura 39, la batteria esterna presenta il distributore sia per il circuito principale che per quello secondario.



Figura 37 Tipologia di batteria esterna installata sulla pompa di calore.

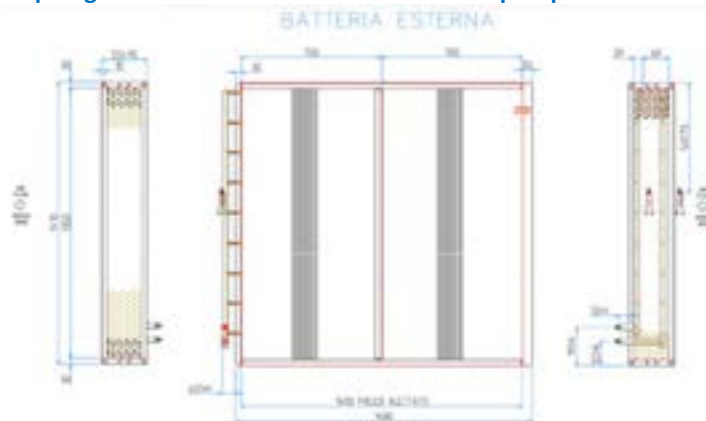


Figura 38 Rappresentazione tecnica della batteria esterna.

Tabella 5 Dettagli tecnici batteria esterna.

SPECIFICHE TECNICHE BATTERIA ESTERNA	
Ingombro totale [mm ³]	1400x1350x130
Ingombro superficie alettata [mm ³]	1400x1350x130
Peso Batteria [Kg]	117.
Superficie esterna [m ²]	148
Volume interno [lt]	16.7
Rapporto superficie esterna/interna	16.0
Diametro interno tubi [mm]	6.5
spessore tubi [mm]	1.00
Passo tra le alette [mm]	3.20
spessore alette [mm]	0.13
passo tra i tubi [mm]	25.0
passo tra i ranghi [mm]	21.6
Perdita di carico [Pa]	20



Figura 39 Vista della batteria esterna installata sulla pompa di calore.

Scambiatori Rigenerativi

Il sistema presenta due scambiatori rigenerativi che consentono da un lato di far evaporare ulteriormente il refrigerante proveniente dall'evaporatore, in modo da surriscaldarlo, e dall'altro, sotto raffreddare il refrigerante in uscita dal gas cooler.

Per i rigeneratori installati sulla pompa di calore a CO₂ aria/aria oggetto di studio è stata scelta come tipologia uno scambiatore realizzato da ENEX, a correnti parallele, a fascio tubiero multi-tubo lato alta pressione rappresentato nelle figure 40-41, progettato in maniera tale da garantire una efficienza intorno al 50% nelle condizioni nominali; mentre le ulteriori caratteristiche tecniche vengono riportate nella tabella 6.

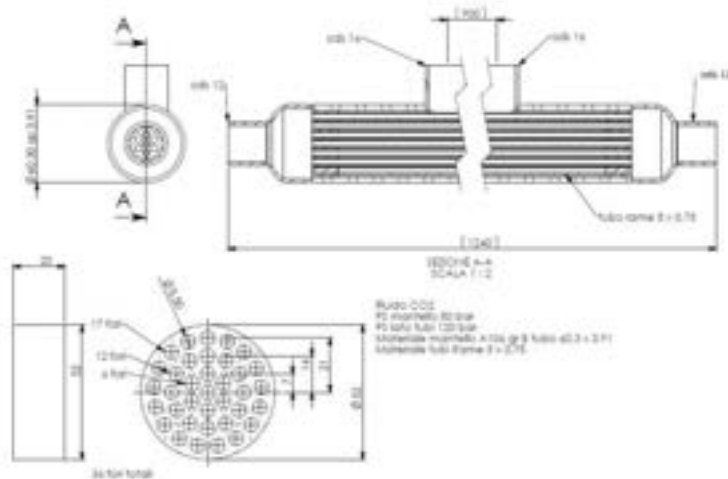


Figura 40 Scambiatore Rigenerativo.

Tabella 6 Caratteristiche dei rigeneratori installati sulla pompa di calore.

Lunghezza [m]	1,240
Numero di tubi	36
Materiale mantello	ASTM106grB
Materiale tubi	Rame



Figura 41 Rigeneratori installati sulla pompa di calore.

Per questa tipologia di scambiatore il processo di scambio termico avviene tra i due fluidi uno contenuto all'interno del fascio tubiero e l'altro disposto lato mantello, in modo tale da garantire un valore di area di scambio termico quanto più grande è possibile.

Ventilatori assiali per la batteria esterna

Il ventilatore della batteria esterna è il modello A4E450-AO09-01 della EBMPAPST le cui specifiche sono riportate in figura 42 e tabella 7. Visto che le perdite di carico caratterizzanti il 'circuit' attraversato dall'aria, che interagisce con la batteria esterna, sono piccole, ed inoltre vengono richieste grosse portate di aria a tali batterie, la scelta non può che non ricadere sui ventilatori di tipo assiali.

Tale tipologia di ventilatori è caratterizzata da basse prevalenze fornite al fluido elaborato, ossia l'aria, e grosse portate volumetriche; che nel caso in esame si attestano a valori di $8000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabella 7 Caratteristiche tecniche del ventilatore della batteria esterna.

SPECIFICHE TECNICHE VENTILATORE		
Phase	1~	1~
Voltaggio nominale [VAC]	230	230
Frequenza [Hz]	50	60
Definizione del tipo di dati	A carico max.	A carico max.
Standard	CE	CE
Velocità [1/min]	1310	1390
Potenza in ingresso [W]	490	650
Assorbimento elettrico [A]	2.36	2.96
Motor capacitor [μF]	10	10
Capacitor voltage [VDB]	400	400
Max. back pressure [Pa]	125	115
Min. T amb. [$^{\circ}\text{C}$]	-40	-40
Max. T amb. [$^{\circ}\text{C}$]	65	55

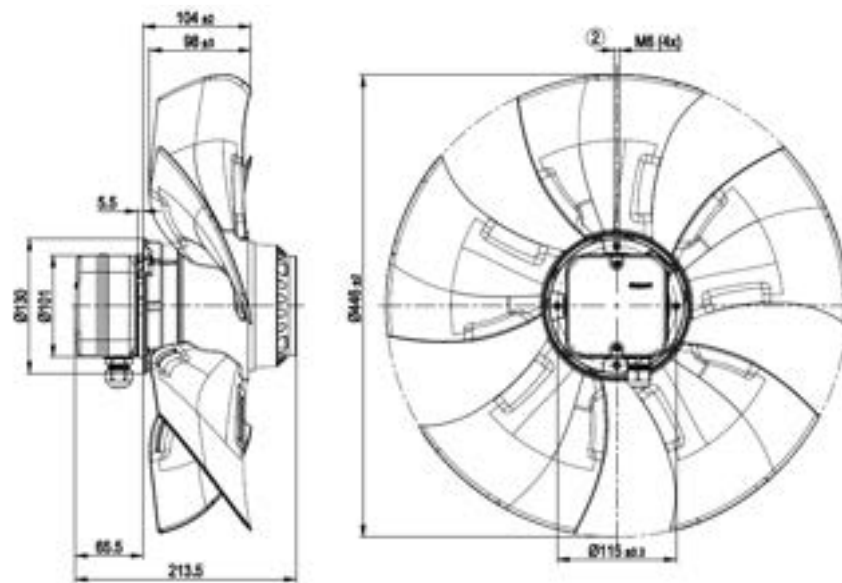


Figura 42 Rappresentazione tecnica del ventilatore assiale.

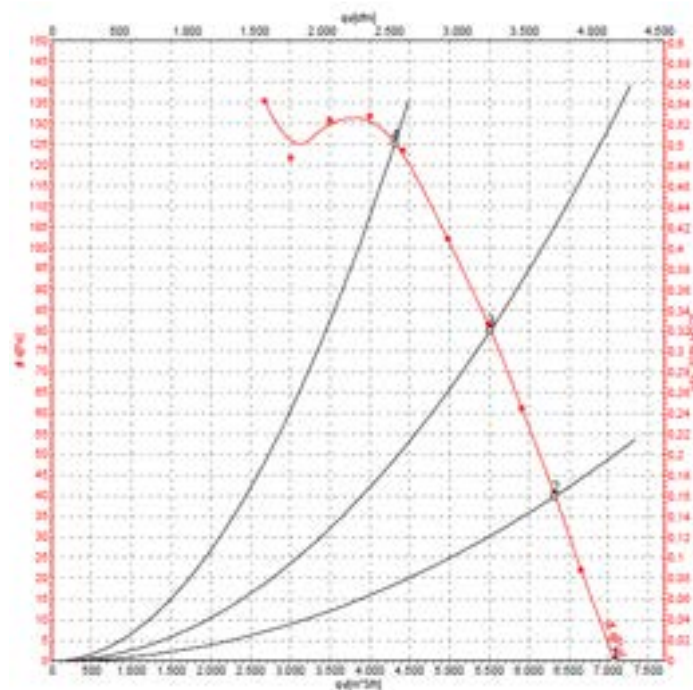


Figura 43 Curva caratteristica di funzionamento del ventilatore.

Il ricevitore di liquido

La funzione del ricevitore o separatore di liquido è molto importante dal momento che c'è bisogno sia di preservare il compressore dalla presenza non desiderata della fase liquida all'interno del fluido refrigerante causata sia da variazioni di carico della macchina, transitori o variazioni di parametri operativi della macchina; sia di riportare parte dell'olio che inevitabilmente si depositerà in circolo con il fluido refrigerante al compressore. Tale fenomeno avviene grazie ad un sistema di valvole elettroniche in cui il separatore di liquido è posizionato a valle dell'evaporatore e a monte dello scambiatore rigenerativo lato evaporatore.

La CO₂ che esce dall'evaporatore prima di arrivare allo scambiatore rigenerativo e quindi poi al compressore, deve passare prima all'interno del separatore di liquido dove si crea la separazione appunto tra la parte liquida e quella vapore.

Ovviamente il vapore così prodotto viene fatto passare all'interno dello scambiatore rigenerativo garantendo un opportuno surriscaldamento, assicurando la totale assenza di liquido all'aspirazione dei compressori. Invece la parte di liquido che si è formata sarà costituita in parte dal fluido refrigerante e in parte da olio. La distillazione del fluido refrigerante dall'olio, quando necessaria, viene realizzata grazie ad un opportuno nastro scaldante di cui il separatore di liquido è caratterizzato.

Nel roof-top oggetto di studio, il separatore di liquido ha un volume di 15 dm³ e i dettagli costruttivi sono riportati in figura 44 mentre in figura 45 lo si può vedere collegato agli altri componenti.

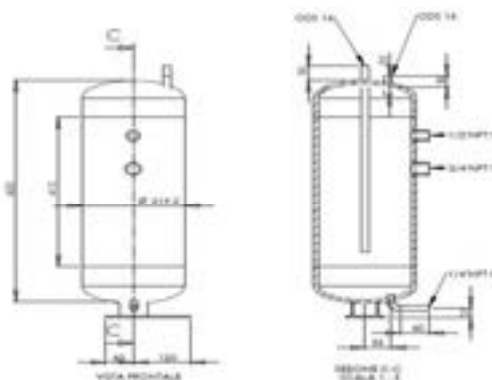


Figura 44 Ricevitore di liquido.



Figura 45 Ricevitore di liquido.

Valvole motorizzate a 3-vie

Il roof-top è dotato di cinque valvole a sfera (figura 46) altamente performanti per impianti in alta pressione ad anidride carbonica (R744 a ciclo trans-critico). La valvola a tre vie riceve il flusso in ingresso attraverso il tronchetto verticale (sempre in presa) e permette di convogliare il flusso in uscita, alternativamente, lungo una delle due direzioni orizzontali. L'attuatore agisce con un tempo di manovra di 155s, permettendo la gestione di una coppia massima di 40 Nm, in modo tale da garantire un notevole margine contro i blocchi indesiderati causa l'irrigidimento dei seggi nel caso di intervalli prolungati di apertura/chiusura. Il sistema di ancoraggio è a tenuta di pressione, ed è studiato per costituire un'ulteriore barriera a leaking nella zona del perno (la più suscettibile nel tempo a questo problema), conformemente alle richieste di normativa di componenti capaci di minima perdita annua di refrigerante e in ottemperanza alle più recenti normative di salvaguardia ambientale.



Figura 46 Valvole motorizzate del roof-top.

Ventilatori di mandata e ripresa dell'aria

L'aria viene inviata e ripresa dagli ambienti mediante dei ventilatori plug-fan della ZIEHL-ABEGG riportati in figura 47.



Figura 47 Ventilatore di mandata dell'aria.

I ventilatori sono muniti di inverter dell'ABB modello ACS 150-03E--08A8-4 mostrato in fig. 48. Tali inverter possono essere montati a parete e a pavimento, nel primo caso, la parete dev'essere quanto più verticale possibile, di materiale non infiammabile e sufficientemente robusta da sorreggere il peso del convertitore. Nel secondo basta che il pavimento /materiale sottostante non sia infiammabile.

Per consentire il raffreddamento del dispositivo è necessario disporre di uno spazio libero sopra e sotto lo stesso di 75 mm, mentre non è necessario lasciare spazio libero ai lati del convertitore, che può pertanto essere installato in configurazioni affiancate come nel nostro caso.



Figura 48 Inverter ventilatori mandata e ripresa.

4.3 Strumentazione e sistema di acquisizione dati, controllo e gestione impianto

L'impianto, l'ambiente esterno e quello interno vengono costantemente monitorati mediante diversi 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 CO₂, viene utilizzato il sistema di controllo e supervisione della Eliwell, i parametri relativi all'ambiente esterno e interno e all'impianto vengono acquisiti e memorizzati da un apposito e sofisticato controllore di gestione, BX EINSTEIN, il quale permette anche la rielaborazione delle acquisizioni. In fase di progettazione sono stati individuate le grandezze da misurare e i punti in cui risulta necessario effettuare le misurazioni per monitorare e caratterizzare l'impianto.

I punti controllati dal sistema di supervisione sono ad esempio le temperature e le umidità relative di mandata e di ripresa dell'aria, temperature e pressioni relative al ciclo termodinamico della CO₂. Sono stati inoltre previsti sensori per la misura dell'umidità e temperatura esterna, un sensore per la misura della concentrazione di CO₂ 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.

I componenti in campo montati (schede, sensori, software) appartengono al gruppo Emerson Electric Spa.

Il sistema di controllo e supervisione della Eliwell "comunica" con il controllore di gestione BX EINSTEIN mediante linguaggio modbus, in tal modo il sistema di gestione, permette all'utente una semplice interazione con l'impianto mediante la creazione di opportune pagine grafiche, visualizzabili su pc, consultabili sia in locale che in remoto.

Strumentazione lato aria.

Sonda di temperatura aria esterna,mandata e ripresa.

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 49). 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 49 Sonda temperatura aria esterna.

La sonda, con sensore da 10000-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 50).

CODE	SENSOR*
1	100-Ohm platinum RTD
3	1,000-Ohm platinum RTD
4	1,000-Ohm nickel RTD
5	1,000-Ohm Balco RTD
7	10,000-Ohm NTC thermistor
10	3,000-Ohm NTC thermistor
12	10,000-Ohm NTC thermistor
13	5,000-Ohm NTC thermistor
15	100,000-Ohm NTC thermistor
17	20,000-Ohm NTC thermistor
18	2,252-Ohm NTC thermistor
21	1,800-Ohm NTC thermistor

Figura 50: Specifiche tecniche sonda temperatura TE-706-B-12.

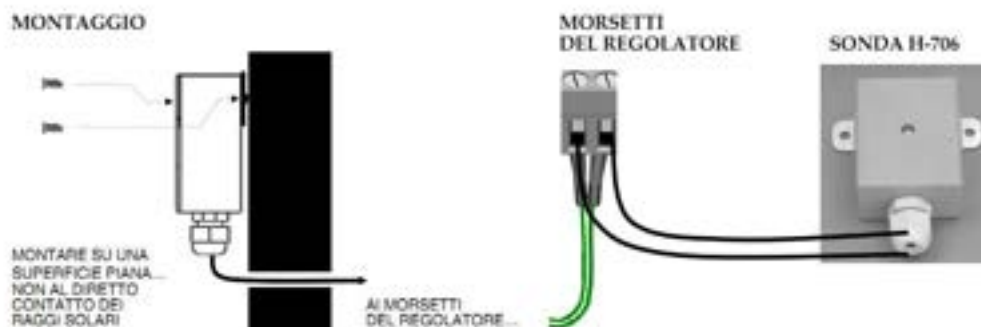


Figura 51: Specifiche di installazione sonda TE-706-B-12.

Sonda umidità aria esterna, mandata e ripresa 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 52). Essa è calibrata e certificata secondo gli standard NIST. La sonda incorpora un sensore polimerico capacitivo 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 (figura 53).



Figura 52 Sonda di umidità a bulbo.

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°C e -130°C. 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.

Accuracy*: $\pm 2\%$ RH
 Range: 0–100% RH
 Hysteresis: $\pm 1\%$
 Supply Voltage: 12–40 VDC
 12–35 VAC (VDC output units only)
 Supply Current: VDC Units – 10 mA max.
 mA Units – 20 mA max.
 Enclosure: 18 Ga C. R. Steel NEMA 4 (IP-65)
 or ABS Plastic
 Finish: Baked on enamel–PMS2GR88B or off-white
 Conformance: EMC Standards EN50082-1(1992)
 EN55014(1993)/EN60730-1(1992)
 Compensated Temp Range: -30°F to 130°F (-35°C to 55°C)
 Environmental: 10–90%RH Non-Condensing
 Termination: Unpluggable screw terminal block
 Wire Size: 12 Ga max.
 Load Impedance: 3K ohms max. at 40 VDC (mA
 output units)
 1K ohms min. (VDC output units)
 Weight: Duct Mount: 1.0 lbs. (.45 kg)
 Wall Mount: 0.5 lbs (.25 kg)

Figura 53 : Dati tecnici sonda di umidità a bulbo.

Sonda di temperatura ambiente interno NTC 10K

Sonda di temperatura ambiente con termistore NTC 10 K (figura 54).



Figura 54 Sonda TE-205-EU-12.

GMW115 Trasmettitore CO₂ ambiente

Il sensore CARBOCAP misura la concentrazione di CO₂ in ppm nell'ambiente da climatizzare (figura 55 56). È realizzato in silicone 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.



Figura 55 56 Sonda CO₂.

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 (figura 57). 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. Infatti un'elevata concentrazione di CO₂ è indice di una cattiva ventilazione (figura 58).

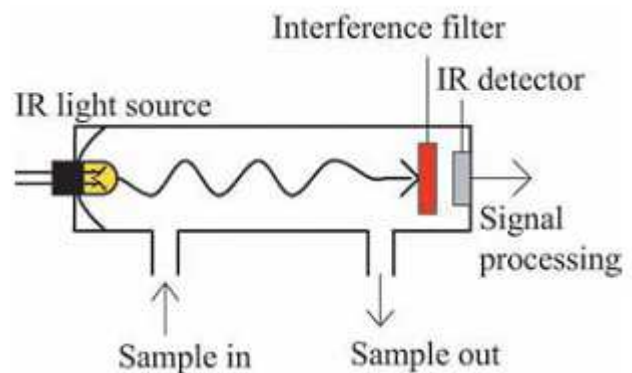


Figura 57 Componenti sonda e principio di funzionamento.

Performance

CO ₂ -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

Operating environment

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 58: Dati tecnici sonda GMW115.

Sonda di velocità mandata aria

Per misurare la velocità dell'aria viene utilizzata la sonda IVL 10 della Pro dual (figura 59) di cui si riportano le caratteristiche tecniche (figura 60). Utilizzata per applicazioni di tipo HVAC¹, la sonda è montata nel canale di mandata dell'aria subito prima l'ingresso nell'edificio; questa misurazione vedremo sarà indispensabile per conoscere la portata d'aria immessa nell'edificio.

¹ Heating, Ventilation and Air Conditioning



Figura 59 Sonda di velocità IVL 10.

Technical data:	
Supply	24 Vac/dc (22-28Vac/dc), <1,5 VA
Ranges	air velocity 0-10m/s temperature 0...50 °C
Outputs	0...10 V, <2mA, 4...20 mA, <600 ohm
Velocity deviation	< 0,5m/s +/- 7% from reading, (at 25 °C)
Temp. deviation	< 0,5 °C (25 °C, > 0,5 m/s)
Operating temp.	0...50 °C
Mounting	by adjustable flange
Housing	IP 54 (transmitter), probe or cable conduit downwards
Materials	PBT, PC, PA and stainless steel

Figura 60 Scheda tecnica sonda IVL 10.

Strumentazione lato CO₂

Misure di temperatura

Per le misure di temperatura vengono utilizzate sonde di temperatura del tipo NTC (figura 61) con tubo in acciaio, mentre il materiale costituente la capsula è AISI 304 con un diametro di 6mm e una lunghezza di 40mm.



Figura 61 Sonda di temperatura NTC.

Le misure di temperatura vengono effettuate all'aspirazione e alla mandata del compressore, all'ingresso dell'evaporatore, all'uscita del GasCooler e del rigeneratore. In tabella 8 sono riportate le caratteristiche principali della sonda:

Tabella 8 Caratteristiche principali delle sonde NTC.

Intervallo di taratura	-30 – +80 °C
Accuratezza	± 1 °C

Misure di pressione

Sono effettuate sia misure di pressione assoluta (bassa e alta pressione) che differenziale (lato ventilatori mandata e ripresa). Vengono utilizzati trasduttori di pressione della Huba Control serie 511 (figura 62) e il segnale di uscita è di 4 – 20 mA.



Figura 62 Trasduttore di pressione Huba Control 511.

In tabella 9 sono riportate le caratteristiche principali:

Tabella 9 Caratteristiche principali trasduttore di pressione.

Accuratezza	$\pm 0.3 \%$
Intervallo di taratura	0 – 160 bar
Temperature di esercizio	-40 - 125 °C



Figura 63 Strumentazione lato CO₂ a bordo roof-top.

La strumentazione lato CO₂, consente di calcolare le condizioni di funzionamento dell'impianto grazie alle quali è possibile risalire al ciclo termodinamico effettuato dal fluido nelle diverse condizioni di funzionamento, infatti come già detto sono note, la temperatura all'aspirazione e alla mandata del compressore, quella in uscita alla batteria interna e esterna e la temperatura ingresso valvola, inoltre sono misurate le due pressioni del ciclo, alta e bassa, al gas cooler e all'evaporatore.

4.4 Regolazione e gestione dell'impianto: BX EINSTEIN

Il sistema per la gestione e la regolazione digitale del roof-top 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 64).



Figura 64 BX Eistein.

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 SETPOINTS (temperatura locale di prova);
- veder visualizzata sul monitor il relativo andamento grafico (Log) di tutte le grandezze monitorate quali temperature, pressioni ecc. (figura 65).
- impostare giornate speciali di utilizzo dell'impianto e variare orari di funzionamento di luci o macchine di condizionamento;

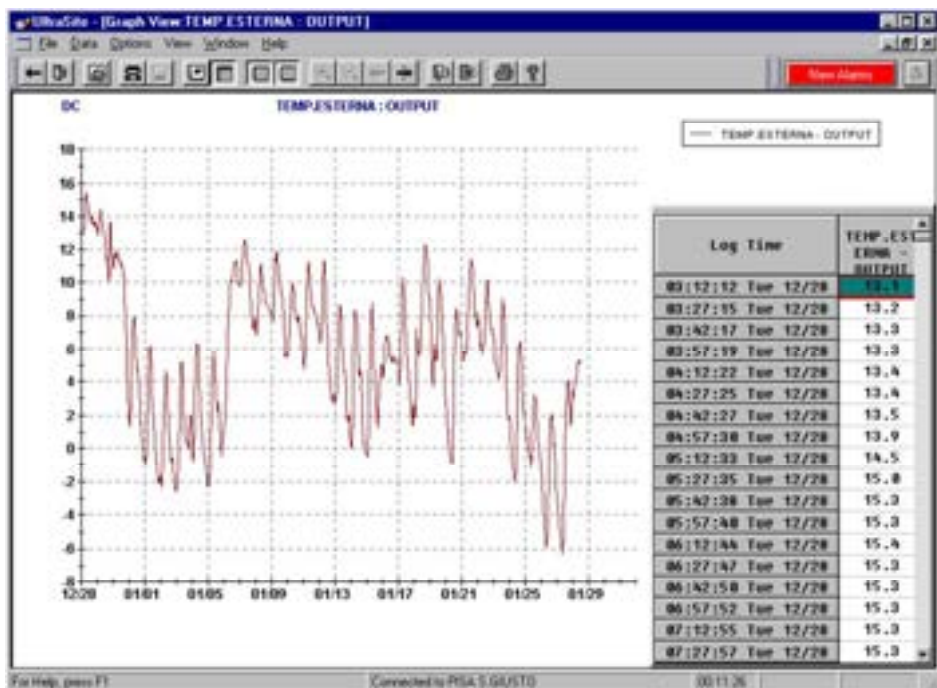


Figura 65 Esempio di visualizzazione dell'andamento grafico delle grandezze misurate.

Il sistema EINSTEIN accomuna la funzione di controlli precisi e flessibili sulle regolazioni alla funzione di ottimizzazione dei consumi energetici. e 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 Einstein 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.

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 controllore 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, Pressioni, Comandi.

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 temperatura ambiente periodo invernale ed estivo;
- 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 ed inoltre 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., quindi ogni intervento viene archiviato con la data e ora di intervento e di ritorno al normale.

E' opportuno ricordare che in un apposito archivio vengono registrati tutti gli interventi di override, cioè di sovra scrittura alla logica di regolazione preimpostata, effettuati sulle varie utenze e sui vari punti di programma, mentre in un altro 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 ed i programmi su cui detto è intervenuto. E' consentito inoltre registrare messaggi (che potranno essere letti da altri operatori localmente direttamente sul display o remotamente tramite Personal Computer) attraverso la funzione Notepad (figura 66).

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 primi sono configurati come on-off in caso di allarme ed hanno tempi di ritardo assegnati, i secondi possono essere configurati come soglie di minima\massima o di variazione graduale della soglia e, possono inoltre essere configurati come valori di scostamento dal set point. A ciascun punto inoltre viene abbinato un tempo di ritardo.



Figura 66 Modalità di accesso all'impianto tramite il software di gestione, in locale o da remoto.

Le principali caratteristiche hardware sono le seguenti:

- CPU, Processore Pentium 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.

Infine è opportuno illustrare le quattro pagine grafiche che permettono il monitoraggio e la gestione dell'impianto mediante il software di gestione.

La pagina grafica principale mostra una vista dall'alto e una laterale del roof-top, dalle quali è possibile distinguere, il compressore, i ventilatori del gruppo frigo, i ventilatori di mandata e ripresa dell'aria con i rispettivi canali (figura 67); essa inoltre permette di accedere alle specifiche pagine grafiche riguardanti il circuito frigorifero (figura 68) e la piantina dell'edificio (figura 69).

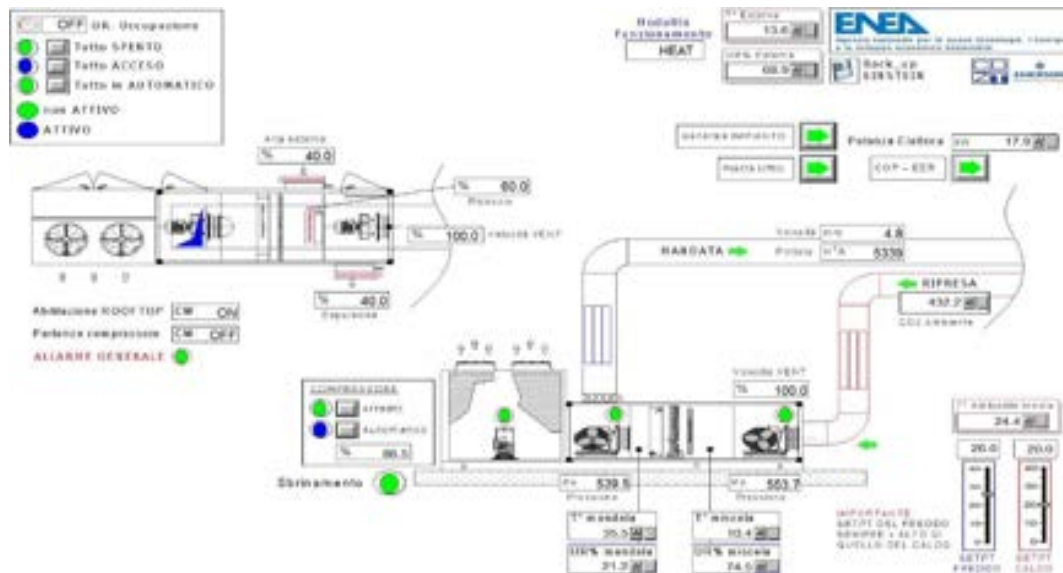


Figura 67 Pagina grafica Home.

Dalla pagina principale si visualizzano le condizioni di temperatura e umidità esterna, temperatura e umidità dell'aria all'ingresso batteria e di mandata agli ambienti. E' possibile forzare l'apertura e la chiusura delle serrande, la potenza del compressore, la velocità dei ventilatori e impostare una temperatura di set point negli ambienti e inoltre è possibile visualizzare la portata elaborata dell'impianto e il consumo elettrico. Infine si può forzare lo spegnimento dell'impianto o scegliere la programmazione oraria. Dalla precedente pagina grafica si accede a quella riguardante il funzionamento dell'impianto.

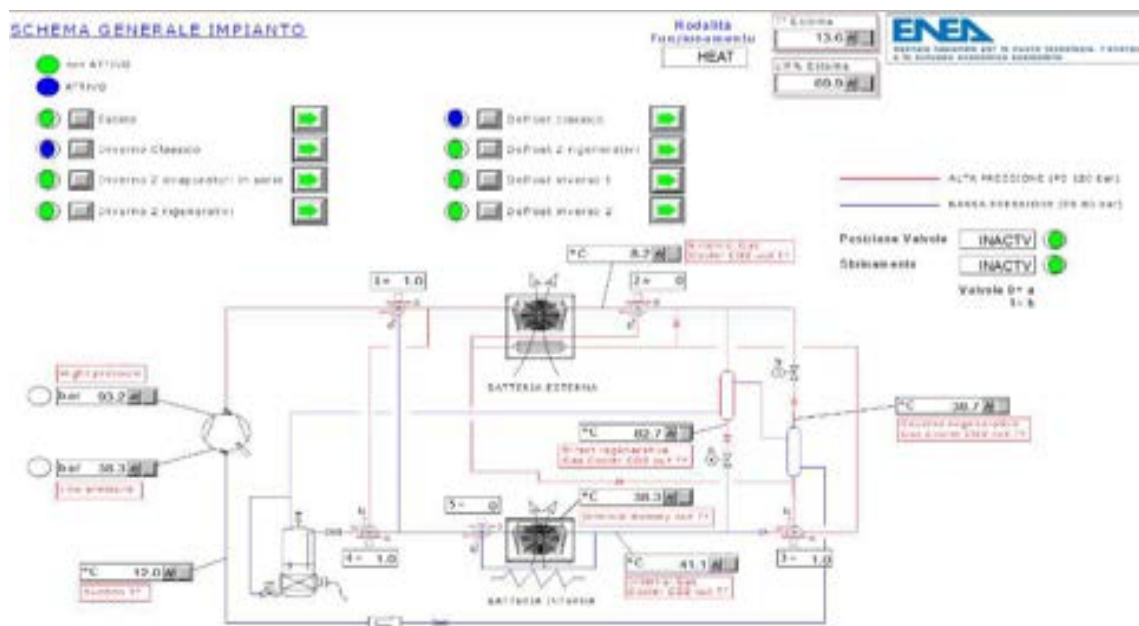


Figura 68 Pagina grafica Circuito di funzionamento.

In questa pagina non solo è possibile scegliere una delle modalità di funzionamento della macchina ma vengono anche visualizzati i valori delle temperature e delle pressioni che caratterizzano il circuito frigorifero. L'altra pagina grafica visualizzata è la pianta dell'edificio, all'interno del quale in ogni ufficio è possibile fissare il valore di temperatura di set point e forzare l'apertura delle serrande; quest'ultima azione può essere effettuata contemporaneamente per tutti gli uffici, utilizzando il comando presente in alto a sinistra della pagina. Inoltre è possibile monitorare anche il valore della velocità dell'aria

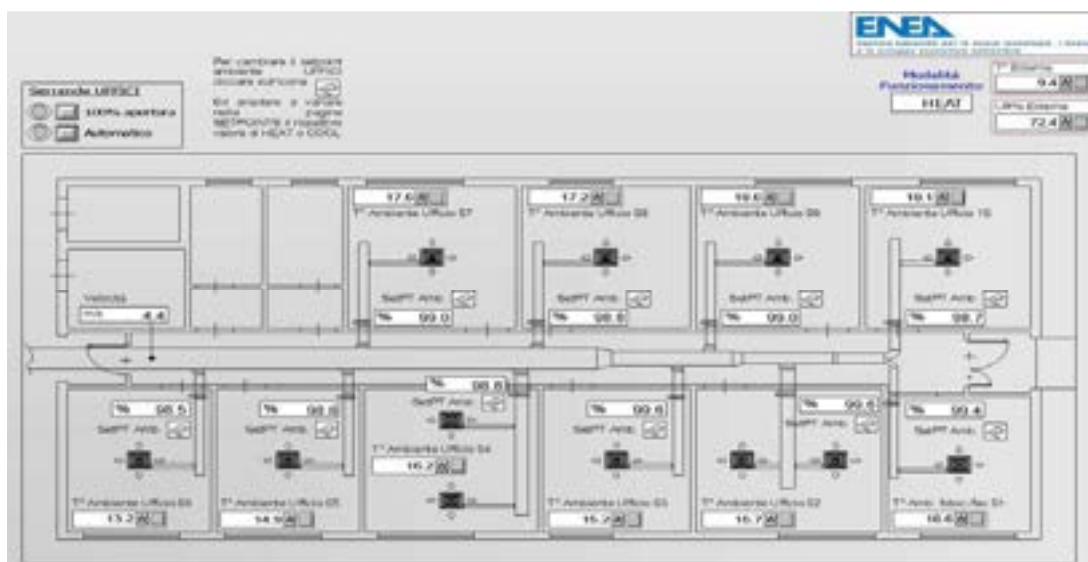


Figura 69 Pagina grafica Pianta edificio.

Infine dalla pagina principale si può accedere a quella relativa alle grandezze lato aria (figura 70), in cui vengono visualizzate la potenza termica sensibile e latente, i consumi elettrici e il COP dell'impianto lato aria.

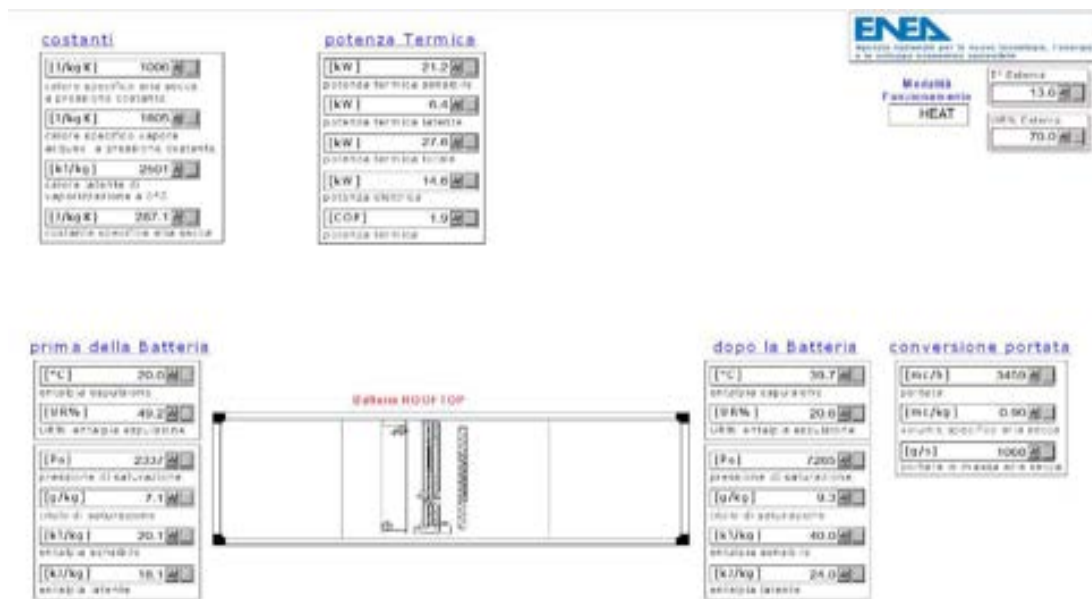


Figura 70 Pagina grafica Bilancio aria.

La disponibilità di un sistema di controllo come BX EINSTEIN 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 e fruizione rispetto all'utilizzo di un notebook o di un computer (figura 71).



Figura 71 Pagina grafica del roof top visualizzata su un comune dispositivo tablet.

4.5 Sistema di controllo e supervisione ELIWELL

L'unità Roof Top viene controllata da una centralina ELIWELL mod. EVD7500/CU + EVE7500 + modulo ETH + tastierino EVK 1000 (figura 72)



Figura 72 Modulo ETH, EVD7500/C/U, EVE7500, EVK1000.

Mediante il tastierino EVK1000 è possibile scorrere tutte le variabili di ciclo quali pressione, temperature, ingressi analogici e digitali e verificare lo stato delle uscite digitali. E' inoltre possibile agire sui parametri di funzionamento per poter adattare al meglio il roof-top all'applicazione specifica. E' quindi possibile modificare tutti i parametri di ciclo, come ad esempio la temperatura dell'aria in mandata all'impianto di climatizzazione nelle condizioni di funzionamento estivo ed invernale, i parametri di defrost, i limiti massimi delle pressioni di ciclo, e molti altri.

Sulla pagina iniziale del menu è possibile visualizzare la data, l'ora, il modo di funzionamento (estivo o invernale) e lo stato della macchina.



Figura 73 Pagina iniziale centralina.

Dalla pagina iniziale si accede al menu principale (figura 74), dal quale si visualizza il modo di funzionamento in esecuzione; nel momento in cui la macchina cambia la modalità, ferma il compressore, posiziona le valvole secondo lo schema relativo al modo selezionato e, una volta ricevuto il consenso dal posizionamento, fa ripartire il compressore. Altri parametri visualizzabili sono la temperatura dell'aria in uscita dalla batteria interna, il set impostato e lo stato dei ventilatori della macchina frigorifera ed infine, lo stato del compressore, (in termine percentuale che è quella richiesta dall'inverter); al di sotto del 100%, al di sotto si va a parzializzare il compressore.

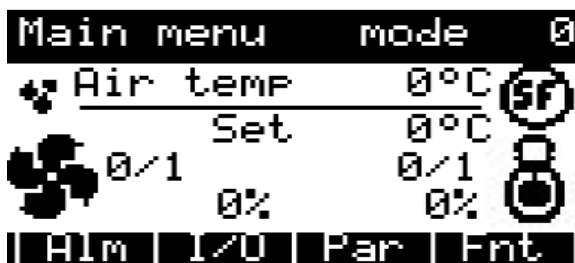


Figura 74 Menu principale centralina.

Dal menu principale è possibile passare al sottomenu strutturato in:

- Menu allarmi (Alm)
- Menu input e output (I/O)
- Menu parametri (Par)
- Menu funzioni (Fnt).

Per quanto riguarda gli allarmi, questi sono visibili solo se attivi e una volta cessati si spengono autonomamente. Sul sito Web è disponibile lo storico degli allarmi (ultime 8 ore) e il file di log con tutti gli avvenimenti di allarme (dimensione max 1Mb, reset automatico al superamento).

Tra gli allarmi troviamo quello del livello olio compressore, errori sonde, pressione superiore al massimo impostato (PLC), pressione inferiore al minimo impostato (PLC), temperatura gas cooler esterno superiore al set massimo, temperatura gas cooler interno superiore al set massimo, posizionamento della valvole errato ecc.

Gli Input e gli output sono divisi in segnali digitali e analogici, gli ingressi digitali vengono indicati con valore 0 = false, aperto, valore 1 = true, chiuso. Tra gli ingressi è possibile visualizzare il posizionamento delle valvole, l'abilitazione macchina da Einstein, lo start della macchina ecc. Tra gli input analogici invece ritroviamo i valori delle grandezze misurati sul circuito frigorifero, ad esempio temperatura CO₂ in uscita al gas cooler esterno, temperatura all'aspirazione del compressore, alta e bassa pressione oppure è possibile visualizzare la modalità di funzionamento della macchina.

Gli output digitali vengono indicati allo stesso modo degli input, e all'interno del menu è possibile visualizzare il segnale ad inverter ON compressore, l'attesa posizionamento valvole, apertura valvola spillamento olio ecc. Gli output analogici sono il comando inverter, il comando ventilatori batteria esterna e il segnale apertura CCMT 100%.

Nel menu parametri è invece possibile variare i valori delle grandezze che caratterizzano il funzionamento della macchina, è ovvio che andando ad agire su questi si può determinare anche un malfunzionamento della stessa. Si può agire sui parametri principali quali la massima o la minima pressione ammissibile oltre la quale far scattare l'allarme, la massima o la minima temperatura del gas cooler esterno o interno, in modalità di funzionamento normale o in defrost, oppure fissare il tempo massimo per il posizionamento delle valvole. Altri parametri riguardano lo stato del compressore, la temperatura di set point estivo o invernale, il tempo massimo di defrost, parametri che caratterizzano il funzionamento dei ventilatori di mandata e ripresa ecc.

Nel menu function è possibile verificare l'attuale funzionamento della valvola di spillamento dell'olio, il funzionamento del defrost, modificare l'indirizzo IP (protocollo TCP/IP) del web server integrato con il controllore, e la relativa porta di comunicazione per il sito web interno.

Infine si possono impostare i parametri Modbus sulla porta 485 (protocollo Modbus/RTU) e impostare la data e l'ora interna del controllore.

4.6 Controllo web

Il controllore ha integrato un server web attraverso il quale è possibile leggere lo stato di funzionamento della macchina, leggere le principali variabili ed impostare tutti i parametri. L'architettura è simile a quanto indicato per il controllo da Tastierino Eliwell.

Per collegarsi al controllo web è sufficiente, sulla barra di un qualsiasi browser (anche se, per una migliore visualizzazione si consiglia l'uso di Mozilla Firefox vers. 10.0 o superiore), digitare l'indirizzo IP dello strumento. Per un collegamento remoto al di fuori della LAN, bisogna contattare l'amministratore di sistema. Ai fini del funzionamento deve essere abilitato nel browser Java Script.

In figura 75 si riporta la pagina principale all'interno della quale è possibile leggere, con aggiornamento ogni secondo, i seguenti valori:

- Temperatura dell'aria in uscita dalla batteria interna (°C)
- Set attualmente impostato (°C)
- La percentuale richiesta all'inverter dei ventilatori
- La percentuale richiesta all'inverter del compressore
- Attuale modo di funzionamento della macchina
- Modo di funzionamento normale impostato
- Modo di funzionamento defrost impostato
- Stato degli allarmi generali
- Fase di posizionamento delle valvole a tre vie
- Posizione corretta della serranda di mandata.



Figura 75 Home controllo web.

Attraverso il menu è possibile accedere alla pagine sotto indicate, alcune protette da password. In figura 76 si riporta la pagina degli allarmi, questi sono riferiti alle sonde (**Probes**), al non corretto posizionamento delle valvole a tre vie (**Valves**) e infine lo storico degli allarmi (**Historical Alarms**), questi permangono per il tempo impostato indicando ora e minuto degli allarmi, di default 8 ore, una volta cessati vanno a false (0), tranne gli storici.



Figura 76 Alarms controllo web.

Nella pagina I/O di figura 77 vengono visualizzati gli ingressi e le uscite, analogici e digitali, tutti i valori sono riportati in un'unica pagina, quelli digitali sono indicati da una luce spenta = false, accesa = true.



Figura 77 Input/Output controllo web.

Altra pagina è quella dei parametri figura 78, divisi in:

- Parametri principali per il funzionamento della macchina
- Parametri e sets stagionali
- Parametri per il funzionamento del defrost
- Parametri per il funzionamento della valvola di spillamento dell'olio.

Per cambiare valore ad un parametro, è sufficiente inserire il nuovo valore nella casella di testo e premere il tasto invio, cambiato il valore non ci saranno messaggi di conferma. E' ovvio che la non corretta variazione dei parametri potrebbe comportare un malfunzionamento del macchina.

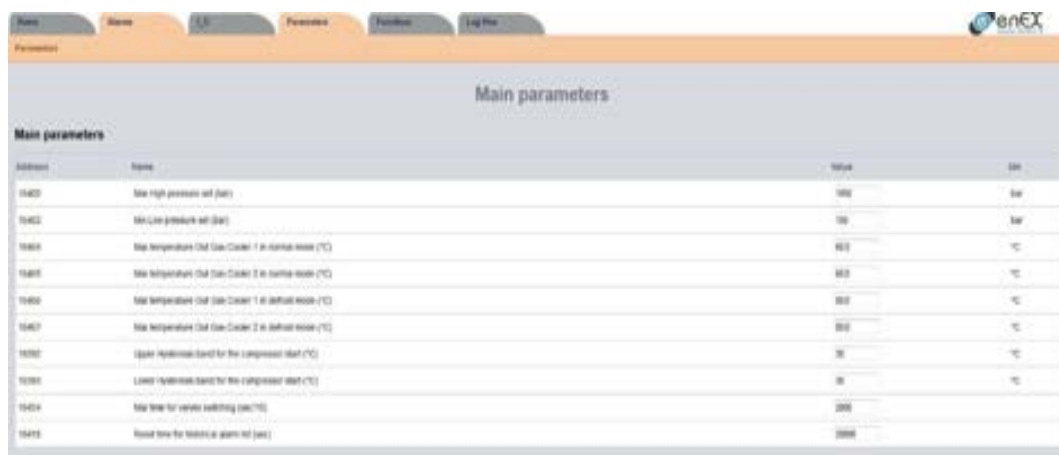


Figura 78 Parameters controllo web.

Nella pagina functions figura 79 troviamo:

- Oil drain per il funzionamento della valvola dell'olio e defrost per il relativo funzionamento;
- Impostazione orologio;
- Set dell'indirizzo IP del controllore e porta di comunicazione http;
- Impostazione del protocollo di comunicazione Modbus/RTU sulla porta RS485.

Infine troviamo la pagina dei log files: ad ogni variazione di stato di uno degli allarmi, il controllore genera un file di log, questo, in formato testuale (.txt), ha una dimensione massima di 1 MB, si rigenera automaticamente e può essere scaricato dalla pagina log files.



Fig.79 Functions controllo web.

4.7 Logica di regolazione

All'interno dell'impianto è stata implementata una logica di regolazione per garantire il funzionamento ottimale al fine di limitare i consumi energetici del roof top.

Il fluido termovettore prodotto dalla pompa di calore (aria calda in inverno ed aria fredda in estate) viene immesso direttamente nell'ambiente da climatizzare: il mantenimento delle condizioni di comfort sarà quindi gestito variando la portata e la temperatura dell'aria immessa all'interno degli ambienti serviti. Al fine di garantire anche una corretta qualità dell'aria, sarà gestita anche una percentuale di aria esterna (aria di rinnovo) che è funzione della percentuale di CO₂ rilevata nell'aria di ripresa dai vari ambienti.

A servizio dell'impianto di test è stata quindi implementata una logica di regolazione atta ad assicurare il funzionamento ottimale del sistema al fine di garantire il comfort negli ambienti serviti, limitando i consumi energetici necessari. L'impianto che serve i vari ambienti, del tipo a tutt'aria, è a portata variabile. La gestione della temperatura dei vari ambienti viene effettuata variando la portata d'aria immessa tramite delle serrande di regolazione servocomandate (impianto a portata variabile a basso costo).

Il roof top è dotato di ventilatori a portata variabile comandati da inverter: sui rami di immissione dell'aria negli ambienti serviti sono state predisposte delle serrande motorizzate in grado di variare la portata immessa dal 40% al 100%.

Alla partenza dell'impianto, il roof-top elaborerà la massima portata d'aria (inverter a 60 Hz) senza l'immissione di aria esterna e lavorando a "tutto ricircolo", al fine di ridurre i tempi di messa a regime dell'edificio: questa modalità di "messa a regime" sarà comunque funzione della richiesta termica dei vari ambienti serviti. Successivamente si valuterà la necessità di elaborare anche una certa frazione di aria esterna che dipenderà dal valore rilevato dalla sonda di CO₂ (<1000 p.p.m).

Il valore di temperatura presente in ciascun ambiente verrà confrontato con il valore di set della temperatura desiderata: avremo così un certo valore di portata immessa, funzione della percentuale di apertura della serranda.

Esempio:

Se nell'ufficio 2 occorressero 1000 mc/h di aria, ovvero la massima portata, l'apertura della serranda sarebbe del 100%. Se invece, poiché la temperatura ambiente è prossima al valore di set point, avessimo bisogno di soli 300 mc/h, l'apertura sarebbe del 30% (si ipotizza un andamento lineare tra la percentuale di apertura e la portata d'aria che transita attraverso la serranda di regolazione). In funzione del valore della portata immessa nei diversi ambienti, dipendente dalla vicinanza tra la temperatura dei vari ambienti e quella di set point, avremo la massima portata erogata dal ventilatore. Quando il primo degli uffici arriverà

in temperatura, verrà ridotta la portata d'aria immessa nello stesso mandando in chiusura il servomotore a servizio della serranda di taratura dedicata (apertura minima 40% della corsa, valore comunque settabile). Man mano che la temperatura all'interno degli altri uffici sarà prossima alla temperatura di set ($\pm 1^\circ\text{C}$), si procederà limitando la portata di aria immessa.

Si procederà con l'associare il proprio peso a ciascun segnale di posizionamento serrande in modo che la variazione percentuale da 40% a 100% del servo automatismo sia immediatamente convertita nella variazione di portata corrispondente: ogni segnale, inserito in un circuito sommatore, fornirà il valore della portata complessiva che dovrà essere elaborato dai ventilatori del roof top. A serrande completamente aperte la portata complessiva sarà pari a $5400 \text{ m}^3/\text{h}$ mentre con serrande al 40% sarà di $1500 \text{ m}^3/\text{h}$. Il valore di portata così ottenuto rappresenta il set point di portata richiesto alla macchina.

In tabella 2 si riportano le portate d'aria di progetto da immettere in ogni singolo ambiente, necessaria per valutare la legge che in funzione del numero di serrande in chiusura va a regolare la portata d'aria complessiva elaborata dal roof top.

Descrizione	Superficie	Portata aria
	$[\text{m}^2]$	$[\text{m}^3/\text{h}]$
Fotocopie/Fax: codice 001	18,3	400
Sala riunioni: codice 002	25,2	1000
Archivio: codice 003	20	500
Ufficio: codice 004	23,3	700
Ufficio: codice 005	19,5	450
Ufficio: codice 006	19,3	450
Ufficio: codice 007	22,7	650
Ufficio: codice 008	22,9	650
Ufficio: codice 009	22,2	600
Ufficio: codice 010	22,3	600
TOTALE =	215,7	6000

Tabella 3: Portate d'aria nominali da immettere nei vari ambienti

Misurando la velocità dell'aria che attraversa il canale di mandata ed essendo nota la sezione dello stesso (Dimensioni interne $750 \times 450 \text{ mm}$), è possibile calcolare la portata d'aria in mandata elaborata dal roof top: modulando gli inverter a servizio dei ventilatori di mandata a ripresa aria è possibile ottenere la portata desiderata.

Tramite la sonda di velocità, conoscendo la sezione del canale, si calcola in real time la portata d'aria complessiva che il RT sta immettendo nei vari locali:

$$Q_{\text{aria}} = v_{\text{aria}} * S_{\text{equivalente canale}} = [\text{m/s}] * [\text{m}^2] \times 3600 = [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$S_{\text{equivalente canale}} 750 \times 450 = \varnothing_{\text{equivalente}} = 630 [\text{mm}] = 0,315 [\text{m}^2]$$

$$v_{\text{aria}} \text{ di progetto (riferita a } Q_{\text{aria}} = 6000 [\text{m}^3/\text{h}]) = 5,3 [\text{m/s}].$$

Un ulteriore controllo di coerenza tra la percentuale di apertura delle serrande a servizio dei vari ambienti e la portata complessivamente elaborata dal roof top è effettuato tramite dei sensori di pressione aria installati a bordo roof top: qualora la pressione raggiunga il valore di soglia massimo ammesso (es. numero elevate di serrande in chiusura e portata aria massima), il controllore modula il ventilatore di immissione riducendo la portata d'aria elaborata dal roof top.

Quando la temperatura ambiente dei vari locali serviti sarà prossima al valore di set (es. 20°C durante il periodo invernale e 26°C durante il periodo estivo), verrà ridotta la portata d'aria al minimo (es. 40% di $6000 \text{ m}^3/\text{h}$): il mantenimento in temperatura degli uffici sarà quindi garantito minimizzando il consumo di energia elettrica.

E' stata inoltre prevista la compensazione della temperatura di mandata aria a seconda della temperatura media ambiente, che va ad agire sul numero di giri del compressore: questa "compensazione" è effettuata in base alla vicinanza delle temperature ambiente rispetto a quelle di set point (questa logica interviene quando $T_{\text{media ambiente}}$ entra nella fascia dei $\pm 2^\circ\text{C}$ rispetto al set point impostato).

Esempio:

Ipotizzando una $T_{\text{media ambiente}} = 17,6^\circ\text{C}$ con $T_{\text{set point}} = 20^\circ\text{C}$, il compressore sarà settato al massimo numero di giri, garantendo una temperatura mandata aria pari a 45°C . Se la $T_{\text{media ambiente}} = 19^\circ\text{C}$ (rientra nella fascia di $\pm 2^\circ\text{C}$ rispetto al set point) il compressore inizierà a modulare, riducendo il numero di giri al fine di ottenere una temperatura mandata aria = 40°C (ovvero inferiore di 5°C rispetto al caso precedente).

La variazione massima di set ammissibile, variando il numero di giri del compressore, è di -10°C nel caso invernale (temperatura mandata aria minima = 35°C , contro i 45°C con CMP al massimo), $+10^\circ\text{C}$ nel caso estivo (temperatura mandata aria massima = 26°C , contro i 16°C con CMP al massimo).

5 Rilievo e analisi dati sperimentali

Quella esposta di seguito è la prima campagna sperimentale condotta su questa macchina ed è stata effettuata in modo da definire le sue potenzialità durante il periodo invernale e estivo, investigando sia sui parametri che maggiormente incidono sulle prestazioni della macchina, sia per approfondire la caratterizzazione termodinamica dei vari componenti presenti. Tale caratterizzazione ha lo scopo di costituire un database di prove sufficientemente ampio per avere a disposizione un numero sufficiente di dati, o punti, su cui poter portare avanti una possibile calibrazione e validazione del modello di simulazione della pompa di calore.

5.1 Metodologie di prova e fase di acquisizione

Una buona campagna sperimentale presuppone che, in ogni prova, vengano raggiunte delle condizioni di funzionamento stazionarie. Per tale ragione, in questo paragrafo verranno illustrati il procedimento e la tempistica necessaria per l'esecuzione ottimale dei test sperimentali.

Prima di effettuare le prove, vengono eseguite delle operazioni di forzatura sull'impianto in maniera tale da portarlo a regime. Operando sull' *UltraSite* (interfaccia grafica di BX EINSTEIN), si lavora con il massimo valore della portata d'aria di ricircolo, frequenza massima del compressore, bassa potenza dei ventilatori, percentuale massima di apertura delle serrande (in figura 80 le variabili forzate sono evidenziate in azzurro).

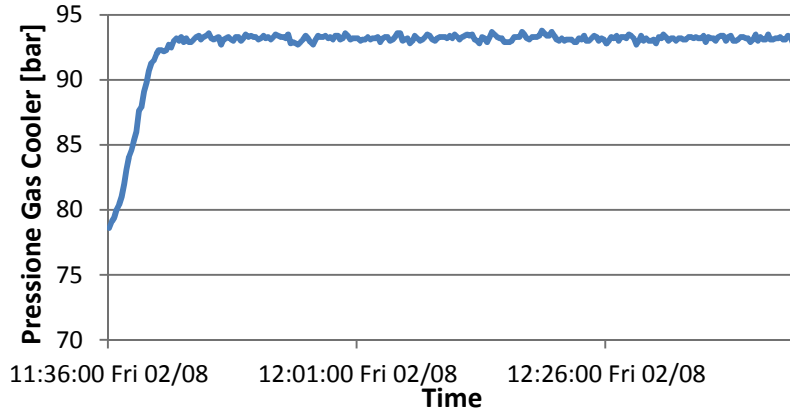


Figura 82 Andamento temporale pressione al gas cooler.

Dalle figure è possibile notare come sia la temperatura di mandata, che la pressione al gas cooler tendono a stabilizzarsi nel tempo; lo stesso accade per le altre grandezze quali la pressione all'evaporatore, la temperatura all'aspirazione e la temperatura in uscita al gas cooler, dopodichè stabilizzate, è possibile effettuare la prova che ha una durata di 30 minuti all'incirca.

Le grandezze lato CO₂, la potenza elettrica, la velocità dell'aria, la temperatura esterna, le temperature e umidità relative dell'aria in ingresso e uscita alla batteria interna vengono acquisite ogni 15 secondi, mentre l'umidità relativa esterna e la percentuale di CO₂ presente negli ambienti ogni 15 minuti. Tali grandezze sono memorizzate dall'EINSTEIN per la durata di un mese e, come già accennato nel capitolo precedente, è possibile graficarne l'andamento nel tempo o scaricarne i valori in un file.txt in modo da poter analizzare e lavorare i dati ottenuti.

Per il calcolo delle grandezze indirette (portata volumetrica d'aria, potenza lato aria, COP) si utilizzano i valori calcolati, facendo la media aritmetica dei valori acquisiti durante tutta la durata della prova.

5.2 Definizione delle principali misure indirette

La fase di rielaborazione dei dati è contemporanea a quella di elaborazione in quanto sempre BX EINSTEIN, attraverso l'acquisizione delle diverse variabili riesce a calcolare le grandezze indirette necessarie alla caratterizzazione termodinamica dei vari componenti dell'impianto.

In inverno, per la potenza termica al gas-cooler si è utilizzata la seguente relazione:

$$P_{gc} = \rho_{a,out} \dot{V}_{a,out} [c_{pa}(T_{out} - T_{in}) + \Delta h_{vs}(\omega_{out} - \omega_{in}) + c_{pv}(\omega_{out}T_{out} - \omega_{in}T_{in})]$$

mentre in estate per la potenza frigorifera all'evaporatore:

$$P_{ev} = \rho_{a,out} \dot{V}_{a,out} [c_{pa}(T_{in} - T_{out}) + \Delta h_{vs}(\omega_{in} - \omega_{out}) + c_{pv}(\omega_{in}T_{in} - \omega_{out}T_{out})]$$

Gli stati termodinamici in ingresso e in uscita lato aria sono determinati mediante misure di temperatura e umidità relative, tramite le ben note relazioni per il calcolo delle proprietà dell'aria umida; la portata volumetrica tramite un anemometro posto nella sezione di uscita.

Durante il periodo invernale, il COP della pompa di calore è stato calcolato come:

$$COP = \frac{P_{gc}}{P_{el,pdc}}$$

mentre nel periodo estivo, l'EER, come:

$$EER = \frac{P_{ev}}{P_{el,pdc}}$$

laddove la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore tiene conto della potenza elettrica totale assorbita al netto di quella per i ventilatori di ripresa e mandata dell'aria.

5.3 Risultati sperimentali invernali

Le condizioni di prova testate, realizzate durante la campagna invernale, sono state riassunte in Tabella 11. Per una fissata temperatura dell'aria esterna pari a 6 °C sono state condotte prove al variare della temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler, per la quale non si fissano valori limite o controlli particolari poiché le prestazioni dell'impianto vengono esaminate disgiuntamente da una qualsivoglia applicazione.

Nelle Figure 83 e 84 si riportano, a titolo di esempio, i cicli termodinamici sui piani pressione-entalpia specifica e temperatura-entropia specifica compiuti dalla CO₂ alla frequenza minima e massima di funzionamento del compressore e i relativi profili di temperatura dell'aria tra ingresso (punto 7) e uscita (punto 8) del gas-cooler, fissate le altre condizioni operative. Osservando la Figura 83 si nota come la variazione di entalpia specifica tra la mandata e l'aspirazione del compressore sia quasi indipendente dalla frequenza del compressore: ne risulta che la potenza elettrica assorbita dal compressore laddove, come in questo caso, siano uguali le pressioni al gas-cooler, segue l'aumento della portata massica. L'aumento della portata massica si riflette anche nelle perdite di carico in condizioni bifasiche all'evaporatore, le quali risultano molto più marcate nel caso mostrato di funzionamento a frequenza massima (e pari a 6 bar, contro i 2 del caso a frequenza minima). Dalla Figura 84 si nota invece che il ciclo a 60 Hz presenta una differenza di temperatura ingresso-uscita al gas-cooler della CO₂ più bassa: ciò si riflette in una diminuzione della variazione di entalpia specifica a fronte di un aumento di portata massica. Osservando le variazioni di temperatura dell'aria nei due casi si nota che nel funzionamento alla frequenza massima la temperatura d'uscita della stessa dal gas-cooler aumenta, ovvero che la potenza termica scambiata al gas-cooler è aumentata. Inoltre, si osserva un notevole aumento delle perdite di carico all'evaporatore a seguito dell'aumento della portata massica di CO₂.

Tabella 11 Database sperimentale realizzato inverno.

Condizioni di test			
T esterna [°C]	T miscela [°C]	Frequenza Compressore [Hz]	Portata Ventilatori [%]
6	da 6 a 20	38,40 - 59,50	70 - 100

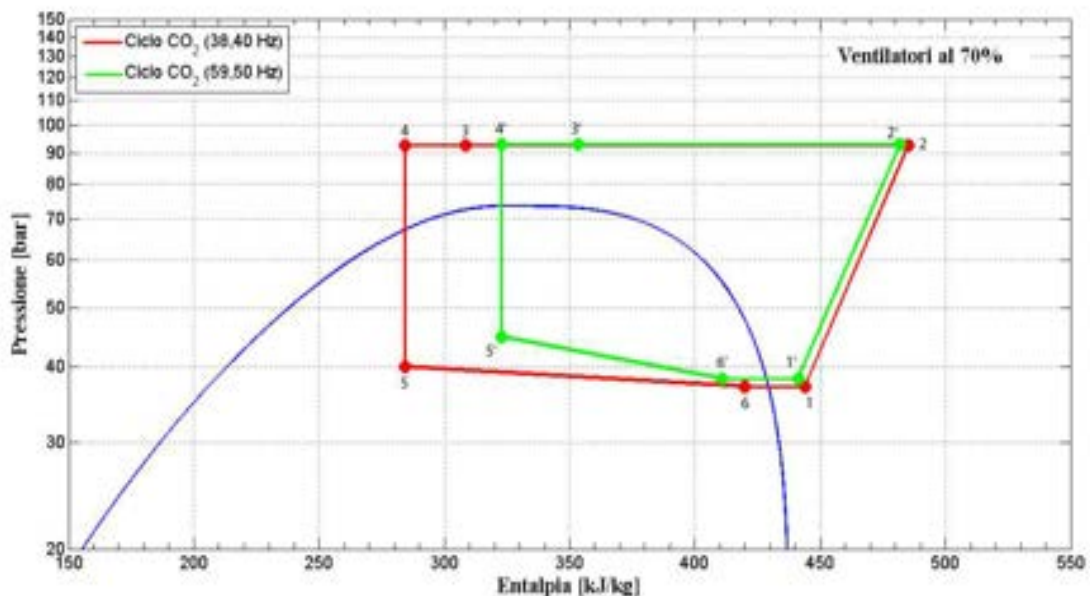


Figura 83 Cicli transcritici rigenerativi della CO₂ al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore, piano logp-h.

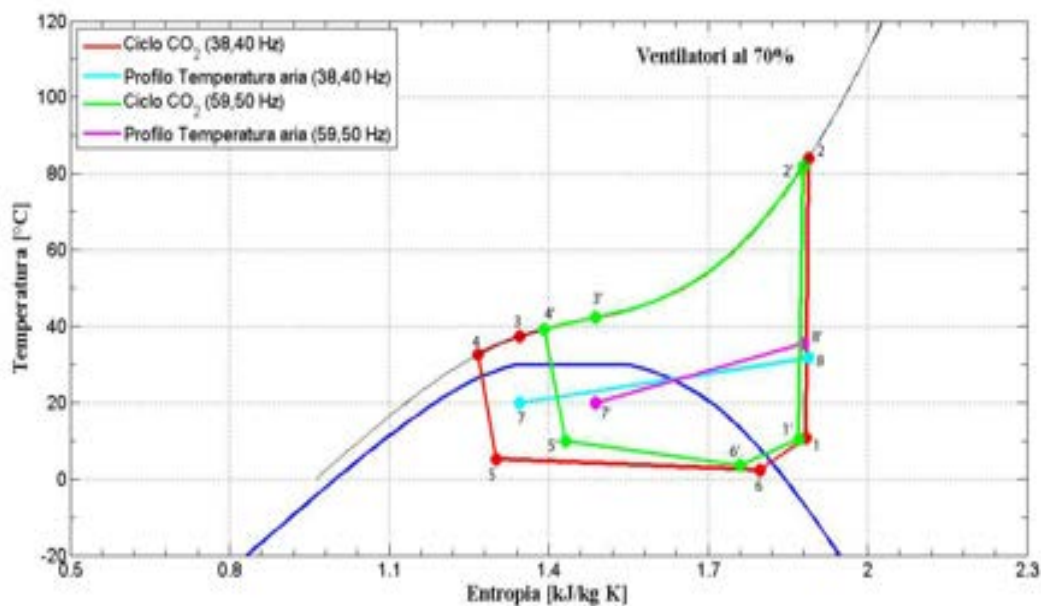


Figura 84 Cicli transcritici rigenerativi della CO₂ al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore, piano T-s. (Nota: per il fluido aria le entropie specifiche non sono in scala).

Uno dei parametri che maggiormente influenza le prestazioni del roof-top è la temperatura di ingresso dell'aria alla batteria interna (gas-cooler). Le acquisizioni sono state dunque elaborate e presentate in funzione di tale parametro nei grafici delle Figure 85, 86 e 87 al fine di fornire una mappatura delle prestazioni dell'impianto.

In Figura 85 si riportano le temperature di mandata dell'aria, misurate a valle del gas-cooler, in funzione della temperatura dell'aria in ingresso e al variare della frequenza del compressore. La portata volumetrica d'aria varia tra il massimo pari a 5500 m³/h e il 70% di quella massima. Si osserva che all'aumento della frequenza del compressore corrisponde una più elevata temperatura d'uscita dell'aria dal gas-cooler, ciò a causa dell'aumento di capacità termica della CO₂ conseguenza dell'aumento della frequenza di funzionamento. Confrontando invece il funzionamento al variare della portata d'aria si osserva come, per una data condizione di funzionamento della pompa di calore, un aumento della portata d'aria in ingresso comporti una riduzione di temperatura della stessa alla mandata. Vale la pena osservare che, in determinate condizioni, la temperatura d'aria alla mandata risulta essere inadatta alla climatizzazione invernale (sia in eccesso che – soprattutto – in difetto), sebbene una simile valutazione esuli dagli scopi di questa relazione.

In Figura 86 si riportano le potenze termiche scambiate al gas-cooler al variare della frequenza del compressore e al variare della portata d'aria tra il 70% e la massima. Come già evidenziato in precedenza, l'aumento della frequenza e dunque della portata massica di CO₂ elaborata prevale sulla diminuzione della variazione di entalpia, pertanto la potenza termica risulta crescente con la frequenza di funzionamento del compressore, fissata la portata d'aria. La sua proporzionalità inversa alla temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler, per temperature in ascissa maggiori di 12 °C, è dovuta alla diminuzione del ΔT medio tra i due fluidi che si verifica all'aumentare della temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler. Da questo punto di vista, rappresentano un'eccezione i due punti di funzionamento a 6 °C di temperatura di ingresso dell'aria e 38Hz, i quali mostrano, al contrario, una potenza termica scambiata leggermente inferiore in confronto ai rispettivi casi a 8 °C della temperatura in ascissa. Ciò è dovuto al sistema di regolazione che interviene, a 6 °C, abbassando la pressione massima dei cicli a 80 bar circa (contro i 94 dei cicli a temperature leggermente superiori) e dunque le temperature di ingresso al gas-cooler della CO₂. Ciò comporta che per le due differenti condizioni lo scambio termico avviene con un ΔT medio tra i due fluidi pressoché costante. Al variare della portata d'aria, invece, stanti i trend appena evidenziati, si osserva solo come i valori della

potenza termica scambiata siano mediamente più bassi che nell'altro caso, in virtù del minore coefficiente di scambio termico.

In Figura 87 si raccolgono i valori del COP del roof-top in funzione della frequenza del compressore con i ventilatori a pieno regime e parzializzati al 70%. Si nota che per ciascuna frequenza il COP decresce con l'aumento della temperatura dell'aria in ingresso alla batteria interna, a partire dai 12 °C. Ciò è dovuto alla circostanza che, mentre la potenza elettrica assorbita dal compressore (e dai ventilatori) si mostra quasi indipendente da questa temperatura (a meno dei già citati casi in cui interviene la regolazione di pressione al gas-cooler), la potenza termica scambiata mostra, a partire da questa temperatura, l'andamento decrescente della Figura 86. I cicli, a 6 °C e 38 Hz, funzionanti a pressione massima ridotta presentano potenze termiche scambiate e assorbimenti elettrici ridotti di una quantità simile (2 kW circa): quindi COP sostenuti (a detrimento, comunque, della temperatura di mandata dell'aria). All'aumentare della frequenza, invece, aumentano sia la potenza termica scambiata al gas-cooler che la potenza elettrica assorbita a causa dell'aumento di portata massica elaborata. I COP massimi si osservano, fissata l'ascissa, laddove la frequenza del compressore è minima, sintomo del peso preponderante dei consumi elettrici e indice dell'importanza della presenza dell'inverter. Osservando invece due serie che differiscono per portata dei ventilatori si nota una diminuzione del COP generalizzata al diminuire di questa, dovuta alla diminuzione della potenza termica scambiata alla batteria interna.

Si precisa che le prestazioni ottenute nel presente lavoro sono strettamente legate alle condizioni operative indagate e all'architettura d'impianto selezionata.

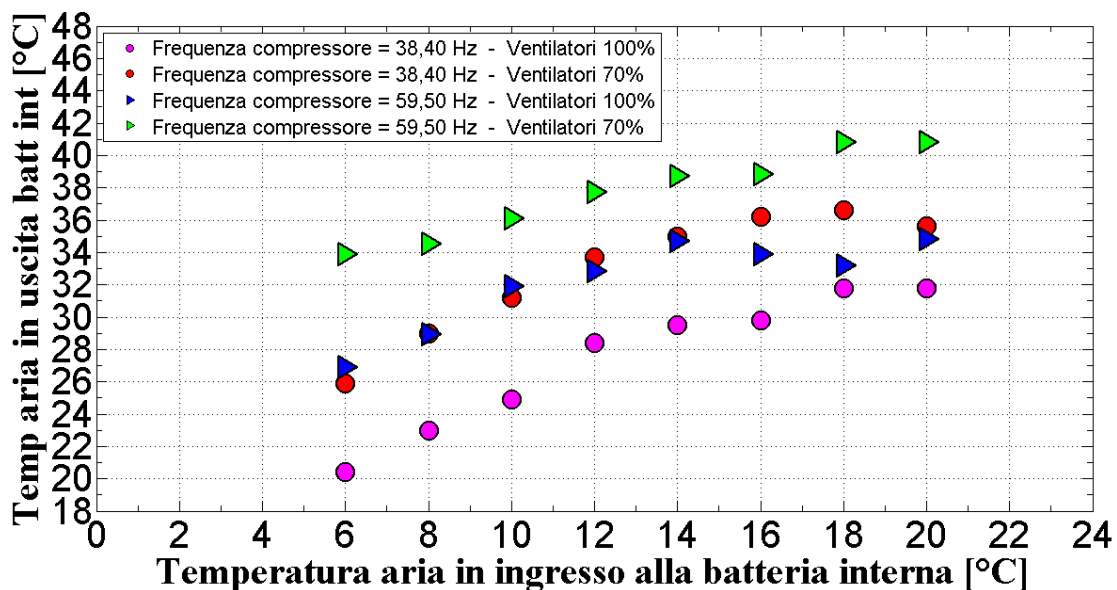


Figura 85 Temperatura di mandata in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso del gas-cooler, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore.

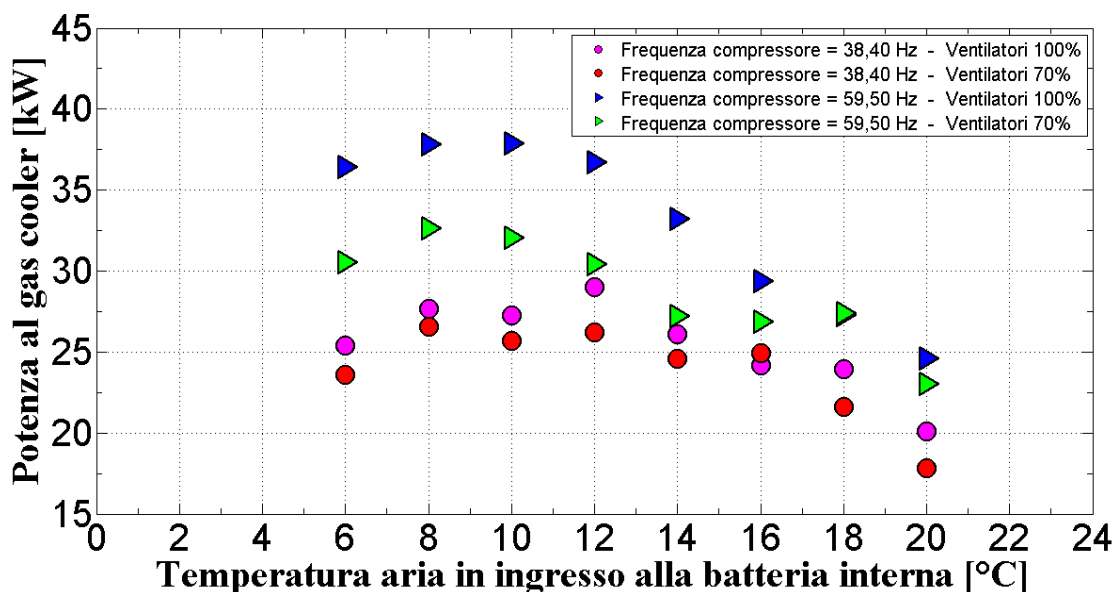


Figura 86 Potenza termica scambiata in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso del gas-cooler, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore.

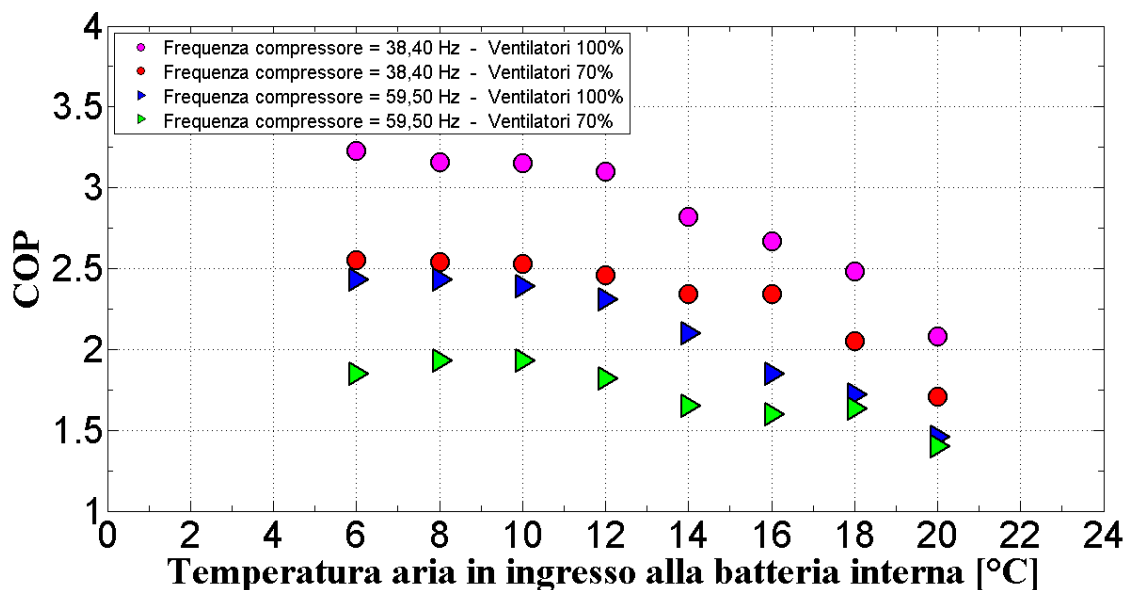


Figura 87 COP in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso del gas-cooler, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore.

5.4 Risultati sperimentali estivi

Per diversi valori della temperatura dell'aria esterna sono state condotte prove al variare della temperatura dell'aria in ingresso all'evaporatore, per la quale non si fissano valori limite o controlli particolari poiché le prestazioni dell'impianto vengono esaminate disgiuntamente da una qualsivoglia applicazione, e facendo variare la frequenza del compressore e la potenza dei ventilatori.

L'indagine sperimentale estiva ha quindi permesso di ottenere 82 punti sperimentali, nelle condizioni operative presentate in tabella 12:

Tabella 12 Database sperimentale realizzato in estate.

Condizioni di test			
T esterna [°C]	T miscela [°C]	Frequenza Compressore [Hz]	Portata Ventilatori [%]
26-34	da 26 a 32	38,40 - 59,50	70 - 100

In Figura 88 si riportano le temperature di mandata dell'aria, misurate a valle dell'evaporatore, in funzione della temperatura dell'aria in ingresso e al variare della frequenza del compressore. La portata volumetrica d'aria varia tra il massimo pari a 5500 m³/h e il 70% di quella massima. Si osserva che all'aumento della frequenza del compressore corrisponde una più bassa temperatura d'uscita dell'aria dall'evaporatore, ciò a causa dell'aumento di capacità termica della CO₂ conseguenza dell'aumento della frequenza di funzionamento. Confrontando invece il funzionamento al variare della portata d'aria si osserva come, per una data condizione di funzionamento della pompa di calore, un aumento della portata d'aria in ingresso comporti un aumento di temperatura della stessa alla mandata, in quanto essendo maggiore la quantità d'aria si ottiene un raffreddamento minore. Vale la pena osservare che, in determinate condizioni, la temperatura d'aria alla mandata risulta essere inadatta alla climatizzazione estiva, sebbene una simile valutazione esuli dagli scopi di questo lavoro.

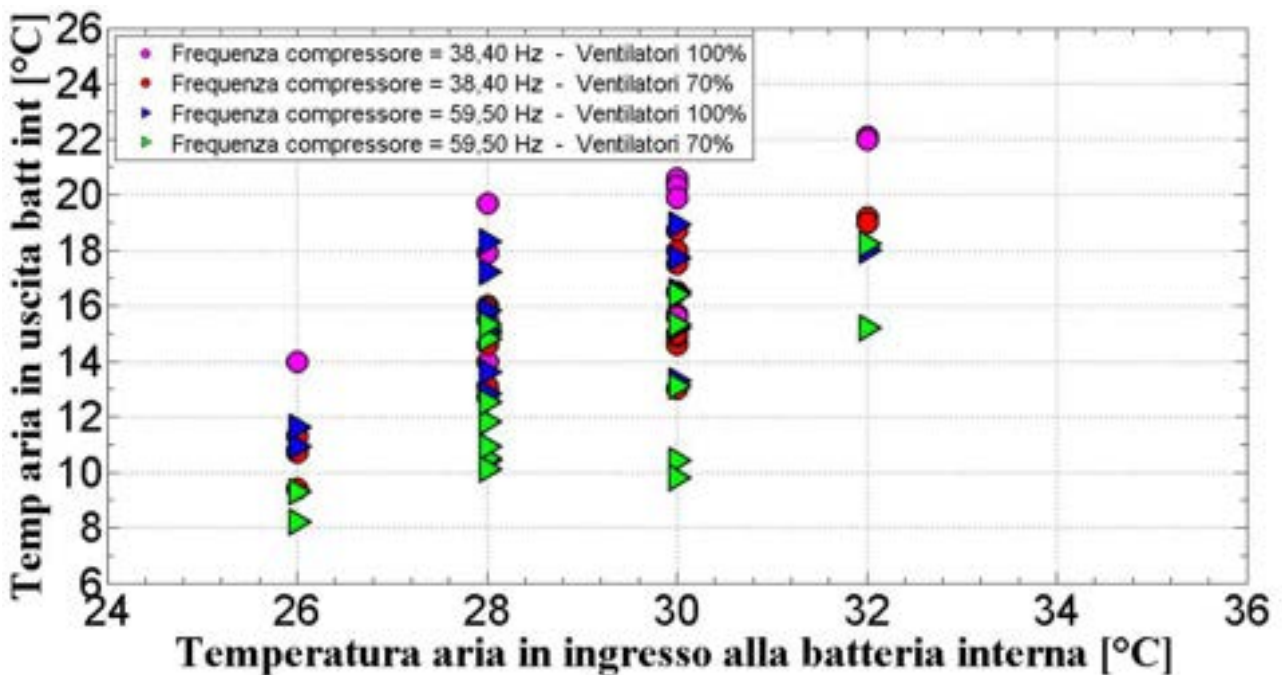


Figura 88 Temperatura di mandata in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore.

In figura 89 si riportano le potenze frigo scambiate all'evaporatore al variare della frequenza del compressore e al variare della portata d'aria tra il 70% e la massima. Come già evidenziato in precedenza, l'aumento della frequenza e dunque della portata massica di CO₂ elaborata prevale sulla diminuzione della variazione di entalpia, pertanto la potenza termica risulta crescente con la frequenza di funzionamento del compressore, fissata la portata d'aria. All'aumentare della frequenza, invece, aumentano sia la potenza termica scambiata all'evaporatore che la potenza elettrica assorbita a causa dell'aumento di portata massica elaborata. Gli EER massimi (figura 90) si osservano, fissata l'ascissa, laddove la frequenza del compressore è minima, sintomo del peso preponderante dei consumi elettrici e indice dell'importanza della presenza dell'inverter.

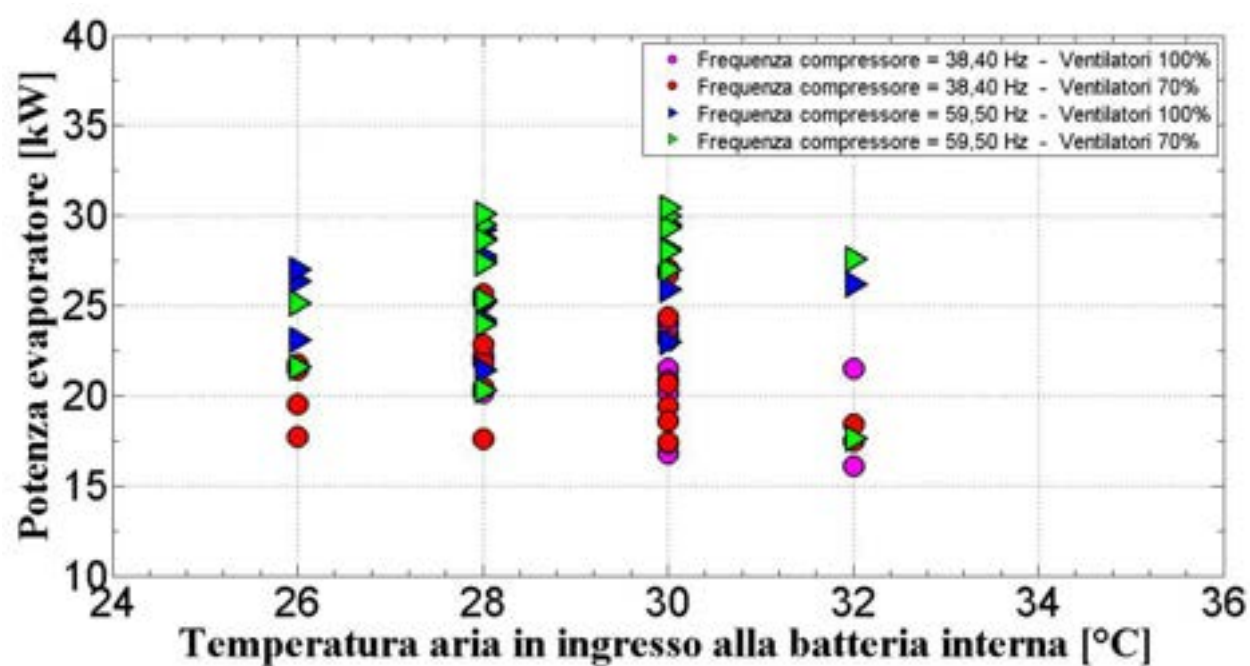


Figura 89 Potenza frigo scambiata in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore.

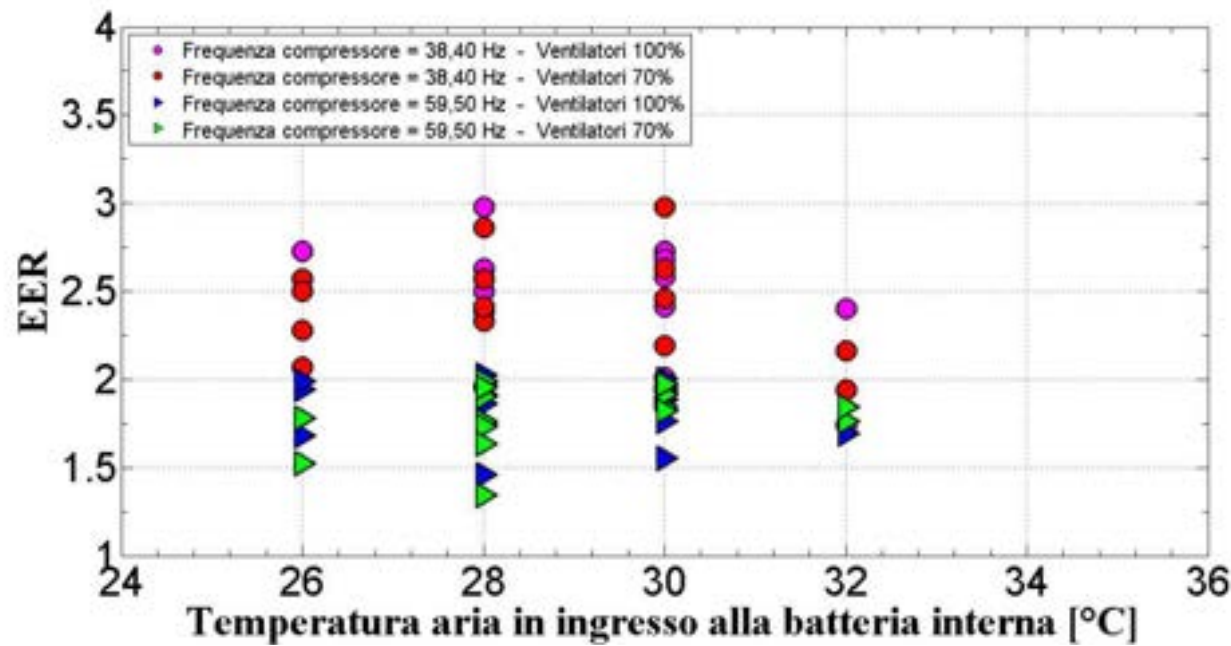


Figura 90 EER in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore.

6 CONCLUSIONI

In questo studio sono stati presentati alcuni risultati sperimentali relativi al funzionamento in modalità riscaldamento e raffrescamento di un impianto di condizionamento dell'aria del tipo roof-top a R744 (CO₂). Nel caso invernale la temperatura dell'aria esterna è stata fissata a 6 °C, la temperatura dell'aria all'ingresso del gas-cooler è stata fatta variare tra 6 e 20 °C attraverso un miscelamento tra aria di rinnovo e ricircolata. La portata del ventilatore è stata fatta variare tra il 70% e un massimo di 5500 m³/h. La frequenza dell'inverter che è accoppiato al compressore è stata fatta variare tra 38 e 60 Hz.

Le prestazioni della macchina oggetto di studio sono risultate dipendenti fortemente dai parametri di regolazione, nelle condizioni operative indagate, e comunque sono legate all'architettura d'impianto scelta. In particolare, da un lato si può osservare che il confronto delle prestazioni in termini di COP di tale prototipo con le soluzioni commerciali disponibili sul mercato e operanti con idro-fluoro-carburi (HFC) è risultato sfavorevole per temperature di ingresso alla batteria interna superiori ai 16 °C e per temperature ambiente simili. Al tempo stesso, i risultati sperimentali hanno mostrato un funzionamento stabile della macchina anche con temperature di ingresso alla batteria interna inferiori ai 10 °C, valori preclusi al funzionamento delle pompe di calore operanti con HFC. Pertanto, questa considerazione, unita al miglioramento delle prestazioni al diminuire della temperatura di ingresso alla batteria interna, ne favorisce l'impiego in situazioni in cui la frazione di aria prelevata dall'esterno debba essere significativa.

Nel caso estivo la temperatura dell'aria esterna è variata tra 26 °C e 34 °C, la temperatura dell'aria all'ingresso dell' evaporatore è stata fatta variare tra 26 °C e 32 °C attraverso l'utilizzo di sola aria di rinnovo. La portata del ventilatore è stata fatta variare tra il 70% e un massimo di 5500 m³/h. La frequenza dell'inverter che è accoppiato al compressore è stata fatta variare tra 38 e 60 Hz.

Le prestazioni della macchina oggetto di studio sono risultate anche nel caso estivo dipendenti fortemente dai parametri di regolazione, nelle condizioni operative indagate, e comunque sono legate all'architettura d'impianto scelta. In particolare, si può osservare che le prestazioni della macchina in termini di EER migliorino per valori bassi di temperatura in ingresso all'evaporatore, prestazioni che risultano inferiori rispetto al caso invernale, dove la CO₂ consente un miglior funzionamento della macchina.

Una pompa di calore con queste caratteristiche potrebbe essere abbinata in maniera ottimale a sistemi VAV a tutta aria esterna, a servizio ad esempio di strutture ricettive realizzate in zone climatiche rigide dove il periodo di riscaldamento invernale è preponderante rispetto al periodo di climatizzazione estivo, oppure in situazioni di impiego differenti, laddove la parzializzazione dei ventilatori e della macchina ha un contributo significativo sulle prestazioni[3].

7 Riferimenti bibliografici

- [1] P. Rovella Impianto Sperimentale per la valutazione delle prestazioni di una pompa di calore ad R744 (CO₂) primi risultati relativi alla climatizzazione invernale Tesi di laurea Università della Calabria.
- [2] D. De Gennaro - F. Rizzotto "I roof-top oggi, le tecnologie del recupero di calore presenti nel mercato Europeo e le applicazioni particolari" ATR GROUP Air Conditioning S.r.l., Treviso.
- [3] Vio M. 2011. "Impianti VAV a tutta aria esterna". AiCARR Journal, 9.

8 Abbreviazioni ed acronimi

COP	Coefficiente di prestazione.
EER	Energy Efficient Ratio
c_{pa}	Calore specifico a pressione costante (aria), kJ/(kg K).
c_{pv}	Calore specifico a pressione costante (vapor d'acqua), kJ/(kg K).
Δh_{vs}	Calore latente di vaporizzazione (acqua), kJ/kg.
$P_{el,pdc}$	Potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore, kW.
P_{gc}	Potenza termica scambiata al gas-cooler, kW.
P_{ev}	Potenza frigo scambiata all'evaporatore, kW
T	Temperatura, °C.
$\dot{V}_a$	Portata volumetrica dell'aria, m ³ /s.
ϕ	Umidità relativa, adim..
ρ_a	Densità, kg/m ³ .
ω_a	Umidità specifica, adim..