



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

STUDIO DELLE METODOLOGIE DI PROVA DELLE PRESTAZIONI
DI POMPE DI CALORE

STUDY OF HEAT PUMP PERFORMANCE TEST
METHODOLOGIES

Relatore:

Prof. **Caresana Flavio**

Tesi di Laurea di:

Gambini Nicola

A.A. **2022 / 2023**

Sommario

Introduzione	3
1 Le pompe di calore	4
1.1 introduzione e descrizione ciclo termodinamico	4
1.2 efficienza delle pompe di calore	6
1.3 Approfondimenti dei componenti	8
1.3.1 Le sorgenti termiche	8
1.3.2 Il compressore.....	8
1.3.3 L'evaporatore.....	9
1.3.4 Condensatore.....	10
1.3.5 La valvola di espansione	10
1.3.6 Il refrigerante	11
2 Le camere di climatiche.....	13
2.1 Introduzione	13
2.2 Componenti delle celle di prova	14
2.2.1 La parete esterne	14
2.2.2 Scambiatori di calore.....	14
2.2.3 Sistemi di misura e controllo ambientale	15
2.3 Esigenze di potenza elettrica e termica in camera di prova	16
2.4 Soluzioni impiantistiche	17
2.4.1 Due serbatoi senza recupero	17
2.4.2 Solo il serbatoio freddo e recupero interno	18
2.4.3 Due serbatoi e pompa di calore	20
3 Analisi test delle prestazioni di pompe di calore aria-aria	22
3.1 Norme UNI EN 14511	22

3.2 Metodo test calorimetro (pompe di calore aria-aria)	23
3.3 Calorimetro a camera ambiente bilanciato.....	25
3.3.1 Simbologia della figura 10A e 10B.....	27
3.3.2 Analisi flussi della figura 10A.....	27
3.3.3 Analisi flussi della figura 10B.....	28
4 Valvole di regolazione.....	30
4.1 Introduzione e campo applicativo	30
4.2 Le valvole di regolazione.....	30
4.3 Valvola a due e tre vie.....	31
4.4 Proprietà delle valvole di regolazione	32
4.5 Caratteristica termica in relazione alla curva caratteristica.....	33
4.6 Schema e principio di funzionamento	34
5 Impianto idronico	35
5.1 Introduzione e funzionamento generale dell'impianto	35
5.2 Componenti e schema impiantistico	36
5.3 Termostatazione delle camere di prova	38
5.3.1 Serbatoi freddo	39
5.3.2 Regolazione della temperatura del liquido nel serbatoio freddo	40
5.3.3 Serbatoi caldo	41
5.3.4 Regolazione della temperatura del liquido nel serbatoio caldo	42
5.3.5 Soluzione impiantistica aria-acqua.....	44
5.3.6 Regolazione della temperatura dell'aria nella camera di prova.....	48
Bibliografia figure	52
Bibliografia e sitografia	53

Introduzione

Quotidianamente si fa ricorso all'uso di pompe di calore in moltissime situazioni, come nei frigoriferi per la conservazione degli alimenti, o nei condizionatori per la regolazione della temperatura degli ambienti.

Lo scopo del lavoro svolto presso il dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche dell'Università Politecnica delle Marche è quello di approfondire le caratteristiche delle celle in cui le pompe di calore in modalità di raffreddamento o riscaldamento vengono testate.

La trattazione inizierà dall'approfondimento del ciclo di funzionamento delle pompe di calore e delle sue parti per poi, nel secondo e terzo capitolo, passare alla descrizione dei luoghi in cui tali macchine vengono testate e le norme da rispettare durante le analisi. Infine, si analizzeranno le valvole di regolazione con applicazione nella termostatazione degli ambienti, che risulteranno essenziali nella progettazione degli impianti idrogeni di cui si parlerà nell'ultimo capitolo.

1 Le pompe di calore

1.1 introduzione e descrizione ciclo termodinamico

In natura il calore si sposta da una zona più calda ad una più fredda, ciò avviene costantemente intorno a noi come, ad esempio, un bicchiere di tè caldo lasciato sul tavolo, questo cederà calore alla stanza che si trova ad una temperatura minore. Per far avvenire questo trasferimento di calore non sono necessarie macchine o altri metodi particolari.

Le pompe di calore sono state inserite per invertire il naturale flusso del calore, portandolo da una zona a temperatura più bassa ad una a temperatura più alta. La zona a bassa temperatura viene chiamata "sorgente", poiché il calore viene prelevato da questa e portato al "pozzo", la zona ad alta temperatura.

Questi strumenti sono comunemente utilizzati per regolare la temperatura degli ambienti. Durante la modalità di riscaldamento, la pompa di preleva calore dall'ambiente esterno, e lo trasferisce all'interno ad un secondo scambiatore. Le macchine reversibili possono operare in entrambe le modalità, riscaldamento, appena descritto, o raffreddamento, dove il calore viene asportato e portato verso una zona a temperatura più alta. Ciò avviene grazie alla possibilità di invertire il ciclo di funzionamento della pompa.

Il funzionamento delle pompe di calore avviene tramite un ciclo a compressione di vapore di un liquido chiamato refrigeratore. Il ciclo inizia al punto (1) della figura sottostante, dove il refrigeratore a temperatura e pressione bassa passa all'interno dell'evaporatore, che in questo caso è l'ambiente interno del frigorifero. Il liquido mentre passa nella cella a temperatura più alta, assorbe calore passando allo stato di vapore a pressione più alta rispetto a quella di partenza. A questo punto il refrigerante allo stato gassoso dovrà raggiungere una temperatura più alta di quella ambientale in modo da cedergli successivamente calore. Per avere ciò si utilizza il compressore, uno strumento composto da un pistone alimentato da un motore elettrico che comprime il refrigerante vaporizzato, punto (2).

Si ha ora vapore a temperatura e pressione elevate, poiché l'energia elettrica utilizzata

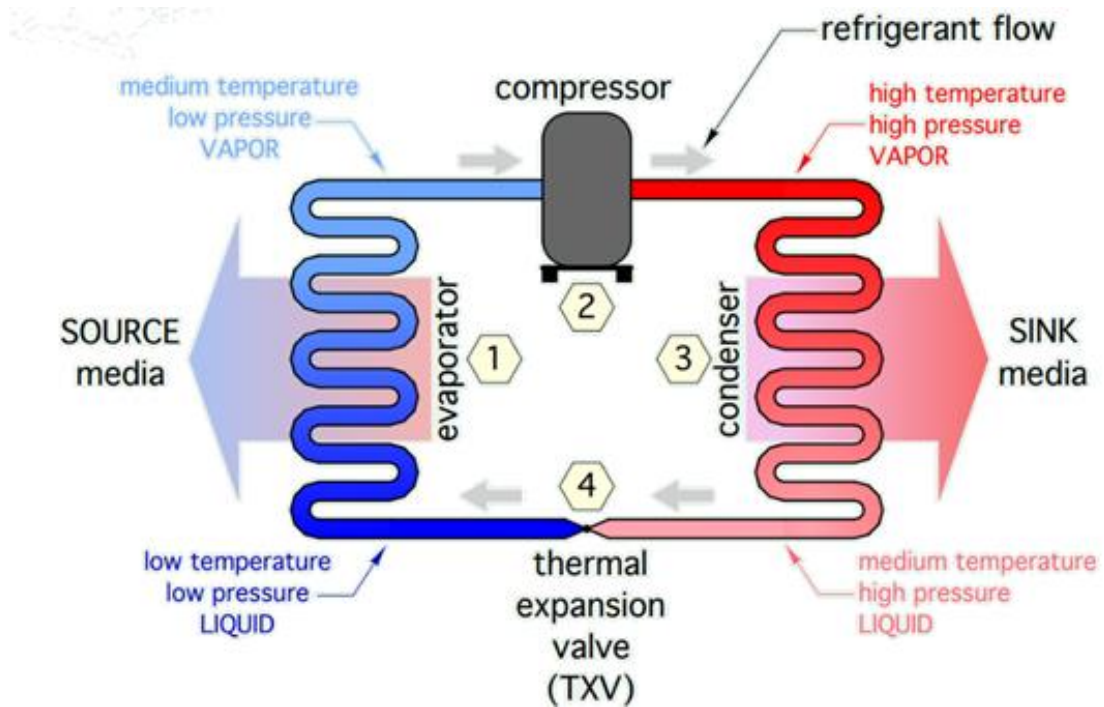


Figura 1: illustrazione ciclo di refrigerazione

per il funzionamento del compressore è stata convertita in calore aggiuntivo dato al vapore. Le temperature raggiunte sono solitamente tra i 45 ° e 78 °C a seconda delle condizioni operative.

Il gas refrigerante caldo fluisce quindi all'interno del condensatore, punto (3). Qui il calore del vapore verrà ceduto a un flusso d'acqua o aria, in base al vettore termico utilizzato, a minore temperatura, che trasporterà il calore via dal refrigeratore.

Il refrigerante, cedendo calore tornerà liquido ad alta pressione e arriverà al punto (4), ovvero la valvola di espansione, che abatterà la pressione del refrigeratore. Il crollo di quest'ultima provoca una corrispondente caduta in temperatura, ripristinando il refrigerante alla stessa condizione in cui era quando il ciclo è iniziato.

Questo ciclo è comune in molti elettrodomestici di uso comune, come nei frigoriferi, congelatori, condizionatori, deumidificatori, e in altre macchine per il trasferimento del calore.

1.2 efficienza delle pompe di calore

Per comprendere meglio il funzionamento della pompa si deve evidenziare la sua definizione: ovvero, una macchina frigorifera che permette di aumentare la temperatura del corpo caldo, mentre se lo scopo principale è quello di far diminuire la temperatura del corpo, verrà chiamata macchina frigorifera.

L'enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica dice: "È impossibile realizzare una trasformazione il cui l'unico risultato sia quello di trasferire calore da un corpo più freddo a uno più caldo senza l'apporto di lavoro esterno" * (1).

Di conseguenza, in una trasformazione dove il calore viene prelevato da un corpo più freddo e portato ad uno a temperatura più alta, ci sarà sempre la necessità di apportare del lavoro dall'esterno, in caso contrario tale trasformazione non potrà avvenire. Nel ciclo frigorifero, viene fornito calore all'ambiente caldo, prelevato dalla sorgente a bassa temperatura, ma per far avvenire ciò è necessario fornire del lavoro dall'esterno.

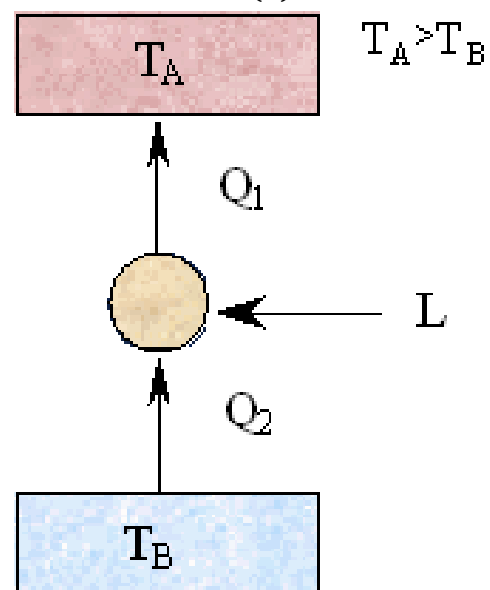


Figura 2: schema concettuale macchina frigorifera

Il coefficiente di effetto utile o COP (coefficient of performance), mostra le prestazioni della pompa di calore ed è dato dalla seguente formula:

$$COP = \dot{Q}_{\text{utile}} / L \quad (1)$$

dove \dot{Q}_{utile} rappresenta la potenza termica ceduta dal condensatore e L la potenza assorbita dal sistema.

La formula del COP può essere riscritta nel caso di una pompa di calore (2) o di una macchina frigorifera (3):

¹- Citazione diretta secondo principio della termodinamica- Punto 5 bibliografia.

$$COP = \dot{Q}_1 / L \quad (2)$$

$$COP = \dot{Q}_2 / L \quad (3)$$

Misurando la quantità di potenza termica ottenibile al condensatore rispetto alla quantità di potenza elettrica fornita al compressore, si può determinare l'efficienza della pompa di calore in questione. È interessante notare che il COP sarà sempre superiore a uno, poiché, secondo il bilancio energetico, la potenza ceduta al condensatore è pari alla somma della potenza fornita al compressore e della potenza assorbita dall'evaporatore. L'efficienza massima di una macchina frigorifera può essere raggiunta se con un quantitativo di lavoro, tendente a zero, questa è in grado di operare a pieno carico.

La macchina frigorifera che presenta il massimo valore di efficienza o COP, funzionante tra due corpi a due temperature prefissate, è la macchina di Carnot. Dopo aver determinato le temperature dei due corpi tra cui deve avvenire lo scambio di calore, è possibile calcolare l'efficienza utilizzando una macchina di Carnot come riferimento. Questo valore rappresenta il limite massimo di efficienza che una macchina termica reale può raggiungere, ma non superare. Infatti, la macchina di Carnot è l'unica che può raggiungere questo limite massimo di efficienza, il quale rappresenta un valore a cui tutte le altre macchine termiche tendono.

La prima equazione può essere riformulata tenendo conto delle temperature in gioco:

$$COP = \eta \frac{T_c}{T_c - T_e} \quad (4)$$

dove η è il rendimento e tiene conto delle perdite e gli scostamenti dal ciclo di Carnot, T_e è la temperatura di evaporazione e T_c quella di condensazione.

Analizzando l'equazione (4) si nota come all'aumento del salto termico diminuisca l'efficienza, questo si spiega semplicemente perché fissata una temperatura T_e , sarà più facile asportare calore da una sorgente fredda con una temperatura più alta. Con una maggiore differenza di temperatura, il compressore dovrà fornire un maggiore salto di pressione.

1.3 Approfondimenti dei componenti

1.3.1 Le sorgenti termiche

Le sorgenti termiche rappresentano gli ambienti da cui è possibile estrarre calore e possono includere l'aria esterna, le acque superficiali, il terreno e il sottosuolo. Tuttavia, per ottenere uno scambio termico efficace è necessario utilizzare superfici considerevoli o grandi flussi d'aria, cercando un compromesso tra le dimensioni della macchina e il rumore generato dai ventilatori.

1.3.2 Il compressore

Il compressore è il componente posto dopo l'evaporatore, figura 1, ed ha il compito di aspirare e comprimere il refrigerante, già allo stato gassoso, aumentandone la pressione, quindi anche la temperatura, per poi condurlo verso il condensatore.

Questo strumento viene utilizzato sia per permettere la circolazione del refrigerante tra ambienti diversi, che per comprimerlo a una pressione superiore a quella presente nell'evaporatore. In questo modo, è possibile regolare il processo di condensazione in modo da raggiungere una temperatura adeguata in base alla disponibilità della fonte "fredda".

Ci sono diversi tipi di compressori utilizzati nei sistemi di pompa di calore:

-Compressori a pistone: questi sono i compressori più comuni utilizzati nelle pompe di calore. Funzionano tramite un pistone che si muove all'interno di un cilindro, comprimendo e spingendo il refrigerante attraverso il sistema. I compressori a pistone sono economici e affidabili, ma possono produrre rumore e vibrazioni che potrebbero causare problemi alle macchine su cui sono installati o agli operatori.

-Compressori rotativi: questi sono divisi in due categorie principali, i compressori a palette e i compressori a vite. I primi utilizzano un rotore che gira all'interno di una carcassa a forma di pala, mentre i secondi utilizzano due rotori a forma di vite che si muovono l'uno verso l'altro, comprimendo il refrigerante. I compressori rotativi risultano più efficienti dei compressori a pistone, ma sono più costosi.

-Compressori a scroll: questi compressori sono costituiti da due involucri, uno fisso e uno mobile. Il movimento rotativo del mobile all'interno del fisso crea una compressione del refrigerante. I compressori a scroll sono molto silenziosi e efficienti, ma possono essere costosi.

-Compressori centrifughi: questi compressori fanno ricorso alla forza centrifuga per comprimere il refrigerante. L'aria viene aspirata attraverso il centro del compressore e viene espulsa radialmente alla periferia, creando una compressione del refrigerante. Questa tipologia è efficiente ma costosa.

Concludendo, ci sono diverse tipologie di compressori utilizzati nelle pompe di calore, starà al progettista valutare i vantaggi e gli svantaggi di ognuno in base alle esigenze operative.

1.3.3 L'evaporatore

L'evaporatore è un componente chiave delle pompe di calore e gioca un ruolo fondamentale nel processo di trasferimento del calore. L'evaporatore asporta il calore dall'ambiente e lo trasferisce al fluido refrigerante presente nel circuito. Grazie a questo processo, il refrigerante che assorbe il calore passa allo stato di vapore.

Le tipologie di evaporatori sono molteplici e si differenziano per la modalità di evaporazione. Le varianti più comuni sono l'evaporazione a secco e quella sommersa, ma esistono anche loro combinazioni.

Nell'evaporazione a secco, il refrigerante scorre all'interno di tubi, che vengono esposti all'aria esterna. L'aria esterna cede il calore al refrigerante, che vaporizza. Questo processo avviene in assenza di acqua o altri liquidi.

Nell'evaporazione sommersa, invece, il refrigerante si trova all'interno di un serbatoio di liquido, come ad esempio l'acqua. In questo caso, il refrigerante assorbe il calore dall'acqua circostante, che funge da fonte di calore.

In generale, l'evaporatore rappresenta il punto di partenza del ciclo di refrigerazione delle pompe di calore e consente di sfruttare il calore presente nell'ambiente, la sorgente, per poi asportarlo verso il "pozzo".

1.3.4 Condensatore

Nel condensatore il gas refrigerante, proveniente dal compressore, viene desurriscaldato, condensato e sottoraffreddato attraverso la cessione di calore all'impianto di riscaldamento.

Il calore può essere trasferire attraverso più scambiatori di calore posizionati a diversi livelli di temperatura per massimizzare l'efficienza del sistema. Questo approccio prevede l'utilizzo di un desurriscaldatore, di un condensatore e di un sottoraffreddatore, e risulta particolarmente interessante in grandi impianti dove l'efficienza e l'economicità d'impiego sono fondamentali.

L'impiego di questo sistema di condensazione è usato in molte applicazioni tra cui il teleriscaldamento, il riscaldamento di acqua calda sanitaria e gli industriali oltre che nelle pompe di calore. Grazie alla sua elevata efficienza, questo sistema consente di ottenere un notevole risparmio energetico e di garantire prestazioni elevate anche in presenza di grandi flussi di calore.

Concludendo, nel condensatore avviene il passaggio di stato del refrigerante da gas a liquido, attraverso un processo di condensazione durante il quale il calore viene ceduto all'ambiente esterno.

1.3.5 La valvola di espansione

La valvola di espansione, collocata tra il condensatore e l'evaporatore, ha il compito di ridurre la pressione del refrigerante, poiché dopo la condensazione, la pressione è ancora alta e deve essere riportata a quella di partenza, ovvero di evaporazione. In uscita si ha un liquido saturo con quantità di vapore variabile.

Condensatore a pressione elevata ed evaporatore a pressione minore, sono collegati da un tubo dove è presente una trozzatura che permette il mantenimento delle due diverse pressioni. E' l'organo di laminazione a svolgere questa funzione. La valvola è costituita da una valvola termostatica, che si occupa dell'apertura e chiusura in funzione di un segnale di comando.

Tuttavia le valvole termostatiche presentano alcune limitazioni e problematiche, dovuta all'esigenza di mantenere elevata la differenza tra le due pressioni e temperature per mantenere un corretto funzionamento. Al fine di risolvere tale problematica, sono state sviluppate le valvole di laminazione elettroniche che impiegano un microprocessore in combinazione con un motore passo-passo per regolare la posizione della valvola.

1.3.6 Il refrigerante

Viene definito refrigerante l'insieme di tutti i fluidi circolanti in una macchina a compressione di vapore. In generale questa definizione si applica per le macchine frigorifere o per tutti i processi per la produzione di freddo, come nelle pompe di calore. Inizialmente a venire usati furono i fluidi naturali come l'anidride carbonica e l'ammoniaca, ma compresa la loro pericolosità vennero sostituiti con dei fluidi artificiali come i clorofluorocarburi, gli idroclorofluorocarburi, gli idrofluorocarburi o loro combinazioni, come l'R407C o l'R410A che possono vantare prestazioni migliori.

Le proprietà che ogni fluido dovrebbe avere sono:

- buone proprietà termodinamiche
- elevata potenza refrigerante volumetrica
- livello di pressione adatto al campo di applicazione (temperatura critica sufficientemente alta)
- minima quantità di perdite di carico durante la circolazione
- chimicamente e termicamente stabile
- non tossico

- non infiammabile, non esplosivo
- buon miscelamento con lubrificanti
- nessun potenziale di distruzione dell'ozono (ozone depletion potential ODP = 0)
- nessun o debole potenziale sull'effetto serra (global warming potential GWP = 0)
- economico

La quantità di refrigerante utilizzato deve essere la minore possibile, ma sufficiente per il funzionamento del ciclo onde evitare problemi dovuti alla sicurezza. L'uso dei refrigeranti deve rispettare la norma SN EN 378. La pericolosità di questi fluidi ha portato al bando di molti di loro che non potranno più essere utilizzati nelle pompe di calore. A parità di potenza ed efficienza vengono spesso preferiti refrigeratori a minore impatto ambientale.

L'Ordinanza per la riduzione dei rischi e prodotti chimici regola l'impiego dei refrigeranti. L'obiettivo è quello di incentivare l'uso di refrigeranti a basso impatto ambientale e di composizione naturale.

2 Le camere di climatiche

2.1 Introduzione

Una camera climatica, conosciuta anche come camera di prova o camera ambientale, è uno spazio appositamente progettato nel quale vengono condotti test sulle unità in prova per poi studiare di come queste fanno variare le specifiche condizioni ambientali nella camera.

Le camere climatiche creano e mantengono artificialmente le condizioni ambientali a cui dispositivi o componenti sono esposti e controllano temperatura e umidità per assicurare delle misure affidabili, condizioni della cella di prova costanti e di limitare che gli scambiatori vengano investiti da flussi d'aria irregolari.

Nella camera climatica è possibile testare pompe di calore aria/acqua o aria/aria con potenza termica variabile. Al suo interno la temperatura dell'aria deve sempre rimanere pari al valore di setpoint impostato.

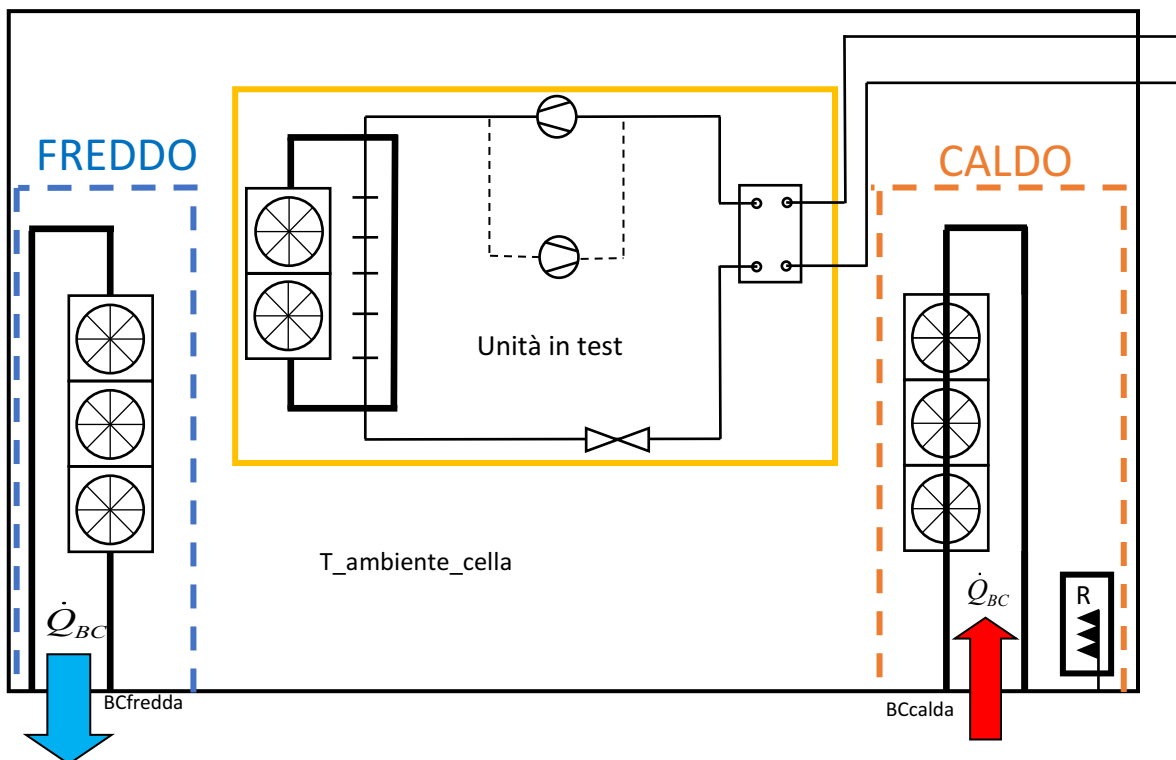


Figura 3: schema interno camera di prova

Questi impianti talvolta possono anche controllare il livello di umidità presene operando opportuni aggiustamenti in ingresso o uscita. La camera singola, fura 3, ha al suo interno una batteria di compensazione fredda che provvede ad asportare calore dall'ambiente interno ed una calda che invece lo fornisce; quest'ultima può lavorare insieme ad un gruppo di resistenze elettriche che se alimentate forniscono calore. Vengono installati anche dei PID di gestione dei gruppi di riscaldamento e raffreddamento in modo da far rispettare i valori desiderati.

Lo scopo principale di queste installazioni è studiare il comportamento dell'unità che si sta testando, calcolandone le prestazioni.

2.2 Componenti delle celle di prova

2.2.1 La parete esterne

L'involucro della camera, è la struttura esterna ed è progettata per avere un ambiente controllato e isolato limitando il più possibile i flussi di calore in entrata o in uscite. Di solito è realizzato con materiali resistenti e può essere dotato di finestre o porte per l'osservazione dei processi eseguiti o l'accesso per gli operatori.

2.2.2 Scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore, o batterie di compensazione (BC nella figura 3), sono dispositivi utilizzati per controllare e regolare la temperatura all'interno delle camere. Il loro compito è quello di compensare il calore asportato o dissipato dall'unità in prova andando a immetterne o prelevarne di nuovo qualora fosse necessario.

Gli scambiatori di calore utilizzati nelle camere di prova possono essere di diversi tipi:

-Scambiatori di calore ad aria, che utilizzano l'aria come vettore termico. L'aria calda viene prodotta da un sistema di riscaldamento e quindi fatta circolare attraverso la camera di prova per aumentarne la temperatura. L'aria fredda viene invece introdotta dall'esterno o proveniente da un sistema di raffreddamento per diminuire la temperatura. Questo tipo

di scambiatore di calore è comunemente utilizzato in camere di prova di piccole dimensioni dove non sono presenti grandi flussi di calore.

-Scambiatori di calore a liquido che utilizzano, per il trasferimento del calore un liquido, come l'acqua. Nel caso di una temperatura della camera troppo bassa il liquido caldo viene pompato attraverso una rete di tubi o serpentine all'interno della camera di prova dove dissipa calore grazie ad una serie di ventole, che creano dei movimenti d'aria aumentando la temperatura della camera in modo uniforme. Il liquido uscente dalla camera viene poi riscaldato attraverso un sistema di riscaldamento esterno o scambiato attraverso un fluido a temperatura maggiore per rifornire calore. Nel caso opposto la procedura è analoga, il fluido freddo viene fatto passare all'interno della cella di prova dove diminuirà la temperatura asportando così il calore.

Gli scambiatori di calore a liquido sono spesso utilizzati in camere di prova di grandi dimensioni.

-Scambiatori di calore a piastre che utilizzano una serie di piastre sottili di metallo, per facilitare il trasferimento del calore. Le piastre sono posizionate nella camera di prova e sono attraversate dal fluido termico che viene riscaldato o raffreddato a seconda della necessità. Il calore viene scambiato tra le piastre e l'ambiente circostante, consentendo di mantenere costante la temperatura nella camera di prova.

-Scambiatore di calore composto da una resistenza elettrica. Questo sfrutta il calore generato quando viene fornita energia elettrica per aumentare la temperatura della camera di prova. L'apporto di calore fornito rispetto agli scambiatori precedentemente analizzati risulta limitato. Viene utilizzato principalmente per apportare piccole variazioni di temperatura.

2.2.3 Sistemi di misura e controllo ambientale

Nella camera di prova il dispositivo che si occupa di regolare le condizioni ambientali, come temperatura, umidità e pressione è il sistema di controllo. Può comprendere dispositivi come termostati, umidificatori, deumidificatori, pompe per il vuoto, trasduttori

di pressione, sistemi di purificazione dell'aria, valvole di regolazione e strumenti di registrazioni di dati.

Questi dispositivi ricevono in ingresso le condizioni ambientali dalla camera di prova e in uscita danno i comandi per apportare le opportune modifiche. Si analizzeranno più precisamente nei prossimi capitoli.

2.3 Esigenze di potenza elettrica e termica in camera di prova

Come già spiegato, la temperatura nelle celle di prova va mantenuta costante per tutta la durata del test. Nella figura sottostante, sono rappresentati in modo schematico i flussi termici che attraversano l'involucro della camera di prova in modalità raffreddamento.

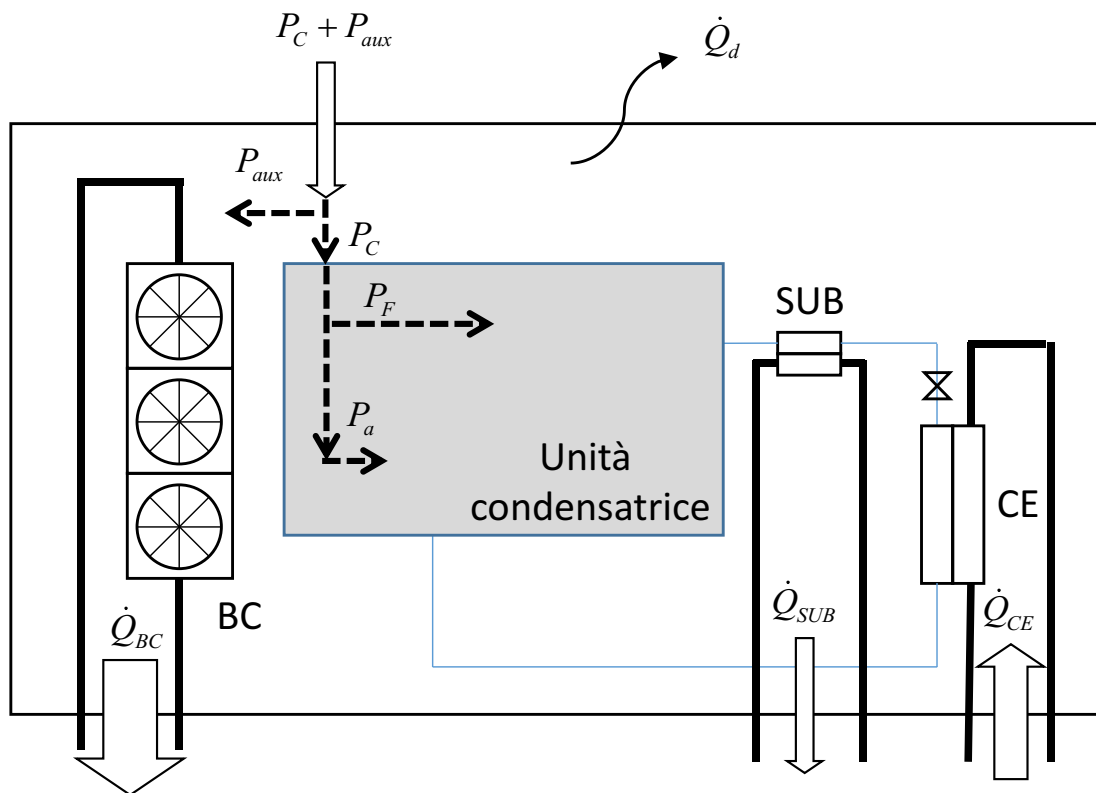


Figura 4: schema esigenze elettriche e di potenze, caso raffreddamento

Per garantire condizioni stazionarie in camera occorre compensare gli ingressi di energia termica ed elettrica con equivalenti uscite:

$$P_F + P_a + P_{aux} + \dot{Q}_{CE} = \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{SUB} + \dot{Q}_d$$

Gli ingressi sono:

- la potenza elettrica necessaria all'azionamento della motocondensante e di tutti gli ausiliari necessari all'esecuzione della prova ($P_a + P_{aux}$).
- e la potenza termica necessaria al calorimetro/evaporatore (P_F).

Le uscite che servono a compensare gli ingressi, a meno delle dispersioni di calore attraverso l'involucro della camera (\dot{Q}_d), sono:

- la potenza termica asportata dalla batteria di compensazione BC (\dot{Q}_{BC})
- la potenza termica asportata dal sottoraffreddatore SUB (\dot{Q}_{SUB})

In dipendenza dalle condizioni di prova delle motocondensanti e tenendo conto delle centrali termiche a disposizione, le soluzioni impiantistiche per realizzare gli ingressi e le uscite di energia termica in camera sono molteplici.

Di seguito si riportano le diverse opzioni e le condizioni per il loro impiego.

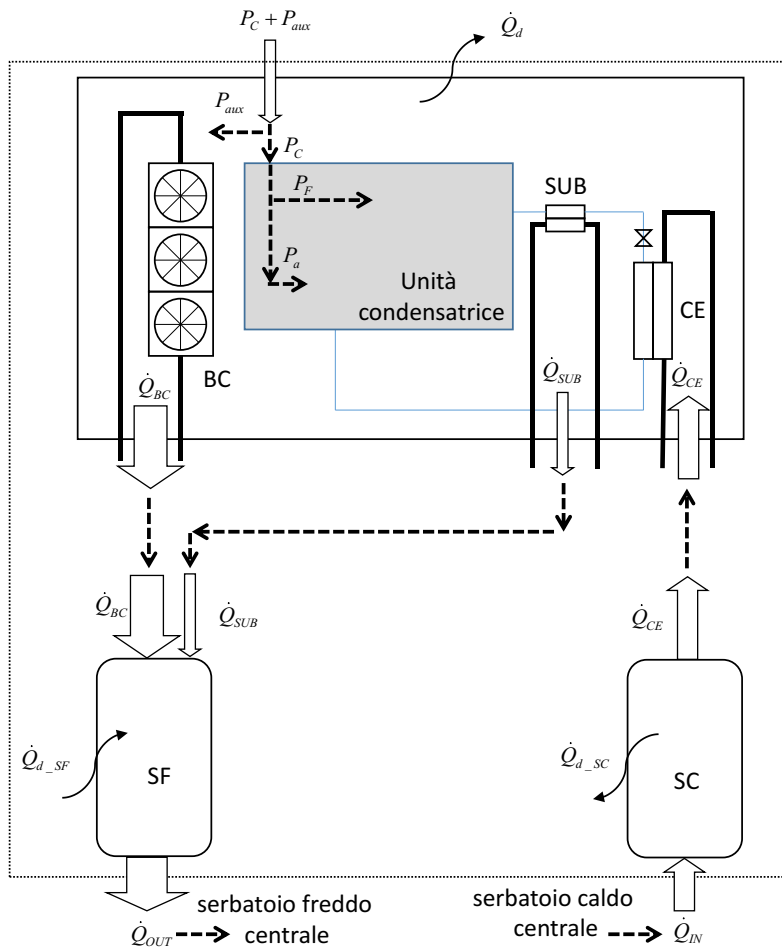
2.4 Soluzioni impiantistiche

2.4.1 Due serbatoi senza recupero

Qualora siano presenti due serbatoi, uno caldo e uno freddo, le potenze termiche in entrata e in uscita verranno fornite mediante liquido caldo/freddo prelevato dai serbatoi della centrale esistente. Più precisamente nello schema sottostante si vede come il calore necessario per compiere l'evaporazione del fluido venga fornito dal SC (serbatoio caldo), mentre il calore asportato dalla batteria di compensazione e dal sottoraffreddatore finiscano nel SF (serbatoio freddo).

Il fabbisogno di potenze termiche risulta essere: $\dot{Q}_{IN} = \dot{Q}_{CE}$; $\dot{Q}_{OUT} = \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{SUB}$

Il fabbisogno di potenza elettrica è: $P_{IN} = P_C + P_{aux}$, ovvero la potenza elettrica necessaria per il funzionamento dell'unità condensatrice e della batteria di compensazione.



$$\dot{Q}_{OUT} = [P_C + P_{aux} - \dot{Q}_d] + \dot{Q}_{CE}$$

Rispetto al caso con recupero interno (soluzione successiva) si deve asportare anche la potenza introdotta in camera nel calorimetro/evaporatore cioè, a meno delle rientrate di calore in CE, quella utilizzata per l'evaporazione e il surriscaldamento del refrigerante.

Figura 5: Schema impianto a 2 serbatoi

2.4.2 Solo il serbatoio freddo e recupero interno

Nel caso in cui sia presente solamente il serbatoio freddo, la potenza termica è asportata mediante liquido freddo prelevato da quest'ultimo, ciò sarà possibile solo se il salto termico $t_{Amb} - t_{sf}$ lo consente.

In questo caso la potenza termica del sottoraffreddatore e dell'unità compensatrice finiranno nel serbatoio termico, da cui verrà prelevato il calore necessario da fornire all'evaporatore, andando a effettuare un recupero del calore asportato.

Il fabbisogno di potenza elettrica è: $P_{IN} = P_C + P_{aux}$ (bilanciamento del SF considerato adiabatico)

Il fabbisogno di potenza termica sarà: $\dot{Q}_{IN} = 0$; $\dot{Q}_{OUT} = \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{SUB} - \dot{Q}_{CE}$, con $\dot{Q}_{in} = 0$ dato dal fatto che il calore fornito in entrata è preso direttamente dal serbatoio freddo.

La potenza da asportare, considerando il bilancio globale, equivale, a meno delle dispersioni per non perfetto isolamento della camera, alla sola potenza elettrica immessa per azionare l'unità in prova e alimentare tutti gli ausiliari e apparecchiature presenti in camera: $\dot{Q}_{OUT} = P_C + P_{aux} - \dot{Q}_d$

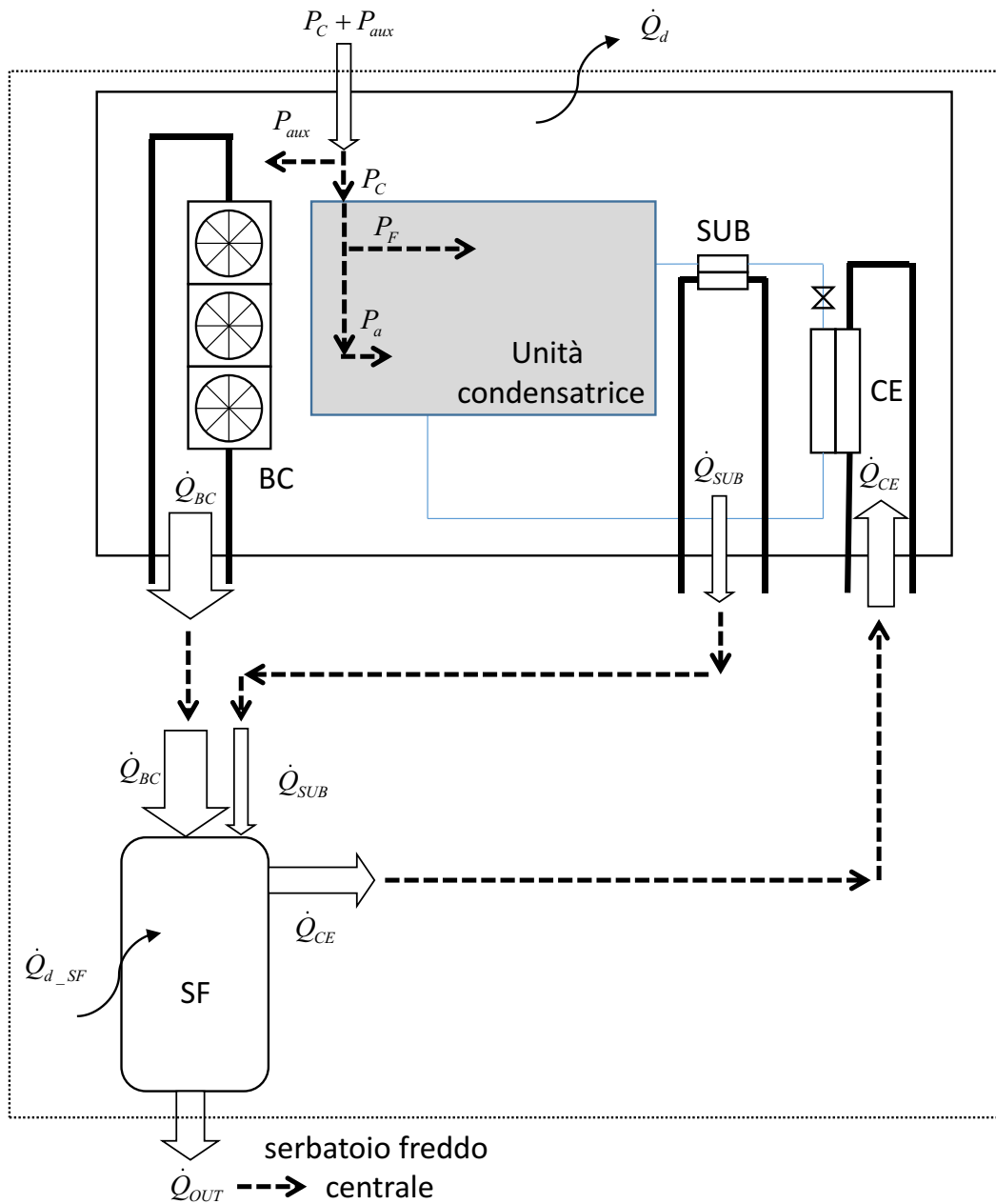


Figura 6: Schema impianto 1 serbatoio con recupero

Nell'eventualità in cui non fosse possibile asportare calore con la batteria di compensazione utilizzando il liquido proveniente dal serbatoio freddo della centrale, componente analizzato nei prossimi sottocapitoli, perché non sufficiente o non momentaneamente disponibile, lo si può asportare mediante una pompa di calore che smaltirà la potenza termica asportare e quella elettrica immessa nella pompa stessa tramite il suo condensatore ausiliario ad aria.

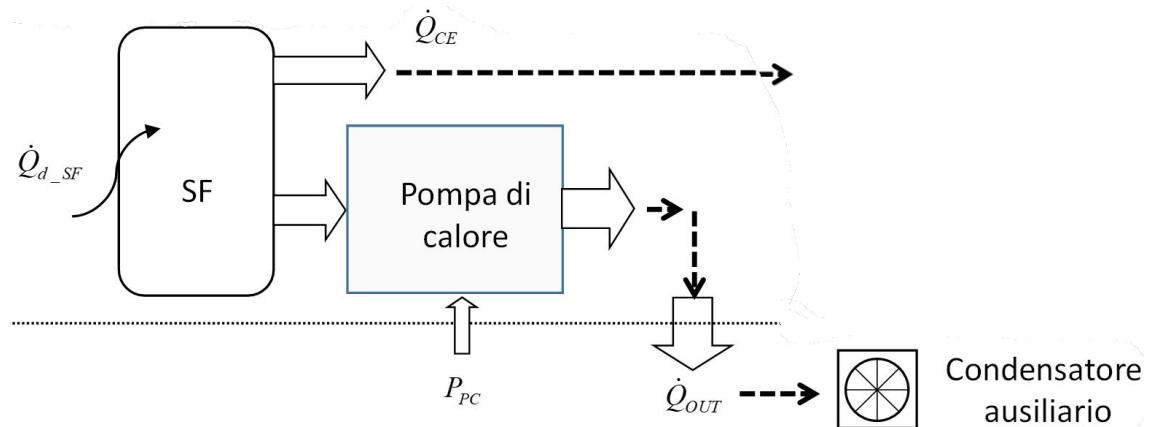


Figura 7: Utilizzo pompa di calore per asportazione del calore dal SF

2.4.3 Due serbatoi e pompa di calore

In questa struttura è presente una pompa di calore tra i due serbatoi di calore, ovvero la centrale sopra citata, che permette di non apportare potenza termica dall'esterno in quanto recuperata da quella asportata dalla camera di prova tramite la pompa. La potenza termica è asportata mediante aria ambientale nel condensatore ausiliario della pompa.

Fabbisogno di potenza elettrica: $P_{IN} = P_C + P_{aux} + P_{PC}$

Fabbisogno di potenze termiche: $\dot{Q}_{IN} = 0$; $\dot{Q}_{OUT} = P_C + P_{aux} + P_{PC} - \dot{Q}_d$

La potenza da asportare, a meno delle perdite, è l'eccedenza tra quella in uscita dalla pompa di calore e quella necessaria al calorimetro evaporatore come si evince anche dal bilancio energetico della pompa di calore stessa.

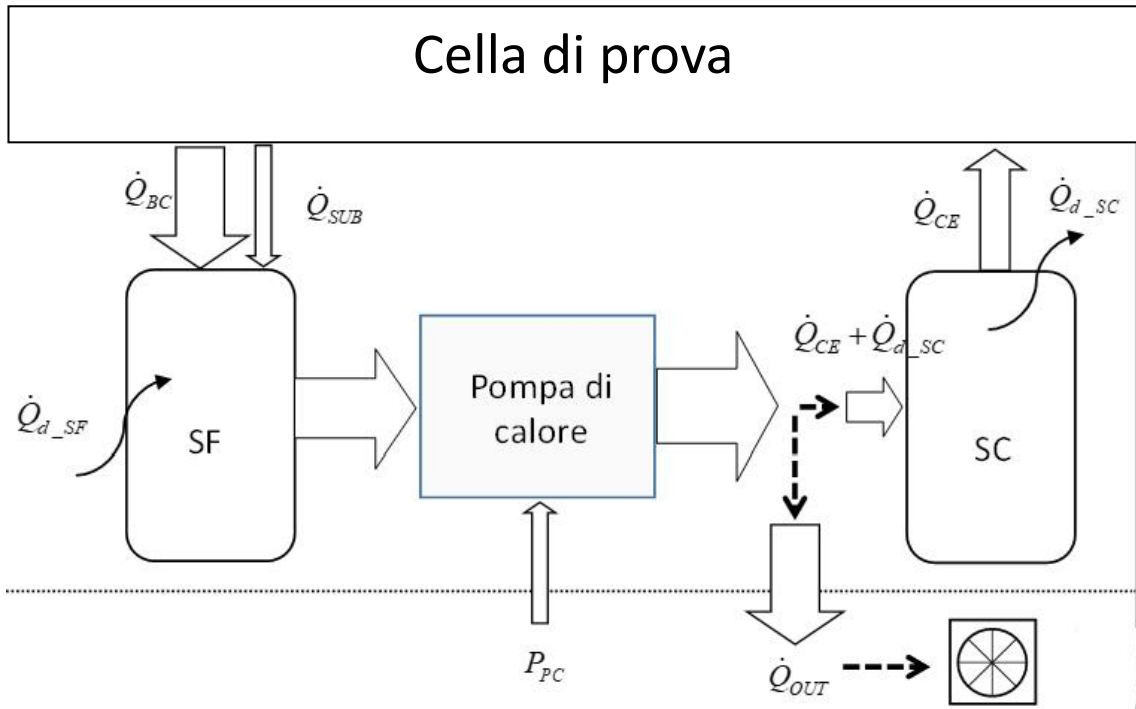


Figura 8: Schema due serbatoi e pompa di calore

Il bilanciamento della pompa di calore risulta:

$$\dot{Q}_{inPC} + P_{PC} = \dot{Q}_{outPC}$$

$$\dot{Q}_{inPC} = \dot{Q}_{outSF} = \dot{Q}_{BC} + \dot{Q}_{SUB} = [P_C + P_{aux} - \dot{Q}_d] + \dot{Q}_{CE}$$

$$\dot{Q}_{outPC} = [P_C + P_{aux} - \dot{Q}_d] + \dot{Q}_{CE} + P_{PC}$$

$$\dot{Q}_{ECC} = \dot{Q}_{outPC} - \dot{Q}_{SE} = [P_C + P_{aux} - \dot{Q}_d] + P_{PC}$$

Nel caso in cui la pompa di calore non disponesse della potenza necessaria per alimentare completamente il calorimetro/evaporatore della motocondensante, sarà necessario integrare l'apporto energetico prelevando potenza dal serbatoio caldo della centrale esistente. Inoltre, per garantire il corretto bilancio termico, sarà indispensabile rimuovere il calore utilizzando il fluido estratto dal serbatoio freddo della stessa centrale, poiché la pompa di calore non sarà in grado di gestire l'intero carico termico richiesto.

3 Analisi test delle prestazioni di pompe di calore aria-aria

3.1 Norme UNI EN 14511

Le norme di riferimento da consultare durante i test nella camera di prova sono le UNI EN 14511 parte 1, 2, 3 e 4, le quali stabiliscono i termini e la nomenclatura pertinente, definiscono i criteri di classificazione, specificano le condizioni di prova e presentano i metodi per la determinazione delle prestazioni termiche dei dispositivi in questione. L'adesione alla norma assicura che i produttori, gli installatori e gli utilizzatori di condizionatori d'aria, refrigeratori e pompe di calore siano in grado di ottenere dati accurati e confrontabili sulle prestazioni termiche di tali apparecchiature.

La UNI EN 14511-1 ha l'obiettivo di stabilire una serie di termini e definizioni chiare e precise per classificare i condizionatori d'aria e le sue prestazioni. Questi condizionatori, equipaggiati con dei compressori elettrici, utilizzati per scaldare o raffreddare l'ambiente, possono usare come vettore termico l'aria, l'acqua o una soluzione salina. Vengono anche definiti i termini e le definizioni pertinenti alla classificazione e alle prestazioni dei refrigeratori basati sui cicli di processo.

È importante evidenziare come che la norma non è applicabile alle pompe di calore destinate al riscaldamento di acqua calda sanitaria. Sebbene alcune delle definizioni contenute possano essere applicate in parte a queste pompe di calore, la norma non si estende a esse in modo completo. L'ambito di competenza è limitato e si concentra principalmente sulla classificazione e le prestazioni dei cicli nei condizionatori d'aria e dei refrigeratori.

La norma UNI EN 14511-2 stabilisce quali siano i requisiti essenziali per la classificazione dei condizionatori d'aria, dei refrigeratori e delle pompe di calore che impiegano aria, acqua o salamoia come vettori termici e sono dotati di compressori elettrici per il riscaldamento o il raffreddamento degli spazi. Sono anche stabilite le condizioni ambientali da mantenere durante le prove per classificare i refrigeratori adoperati per cicli di processo per di raffreddare aria, acqua o salamoia.

La norma specifica anche come dichiarare i dati delle presentazioni per le unità a singolo o doppio condotto. Questo viene fatto per sottostare alla norma ecodesign 206/2012 e del Regolamento per l'Energy Labelling 626/2011.

La norma UNI EN 14511-3 chiarisce quali protocolli provare, per valutare e classificare le prestazioni dei condizionatori d'aria, refrigeratori e delle pompe di calore, equipaggiati con compressori elettrici per le funzioni di riscaldamento e raffreddamento, che usufruiscono di aria, acqua o salamoia come vettori termici. Questi protocolli di prova sono altresì validi per la classificazione e la valutazione delle prestazioni dei refrigeratori a cicli di processo che fanno uso di un compressore elettrico.

Viene spiegato anche come calcolare il rapporto di recupero del calore attraverso metodi di prova specifici, sia a causa delle limitazioni di capacità del sistema che delle capacità delle unità interne dei sistemi multisplit.

La norma UNI EN 14511-4 stabilisce quali siano i minimi requisiti per assicurare che i condizionatori d'aria, i refrigeratori e le pompe di calore che fanno uso di aria, acqua o soluzioni saline come vettore termico, e dotati sempre di compressori elettrici, siano adatti all'uso previsto dal produttore per raffreddare o scaldare gli ambienti.

Nel presente lavoro si approfondiranno le configurazioni di prove relative alle pompe di calore aria-aria e aria-acqua. In particolare, le soluzioni impiantistiche per la termostatazione delle camere di prova.

3.2 Metodo test calorimetro (pompe di calore aria-aria)

Nell'analisi dei test mediante il calorimetro si fa riferimento alla norma UNI EN 14511-3.

Da definizione il calorimetro fornisce un metodo per la determinazione della capacità di un'unità misurando l'effetto di un apparecchio di condizionamento per mantenere le condizioni di prova specifiche in ogni stanza.

Per le unità aria-aria, le capacità di raffreddamento e riscaldamento devono essere determinate da misurazioni e calcoli effettuati dalla stanza interna o esterna del calorimetro, a condizione che sia soddisfatto il requisito relativo all'incertezza massima di misurazione di tali capacità.

Per le unità acqua (salamoia)-aria, per camere separate, le capacità di raffreddamento e riscaldamento devono sempre essere determinate da misurazioni e calcoli dalla stanza interna poiché la stanza esterna non viene utilizzata come calorimetro.

La norma definisce la posizione del calorimetro e le dimensioni, le quali devono essere adatte per evitare qualsiasi restrizione all'ingresso o scarico delle aperture dell'unità.

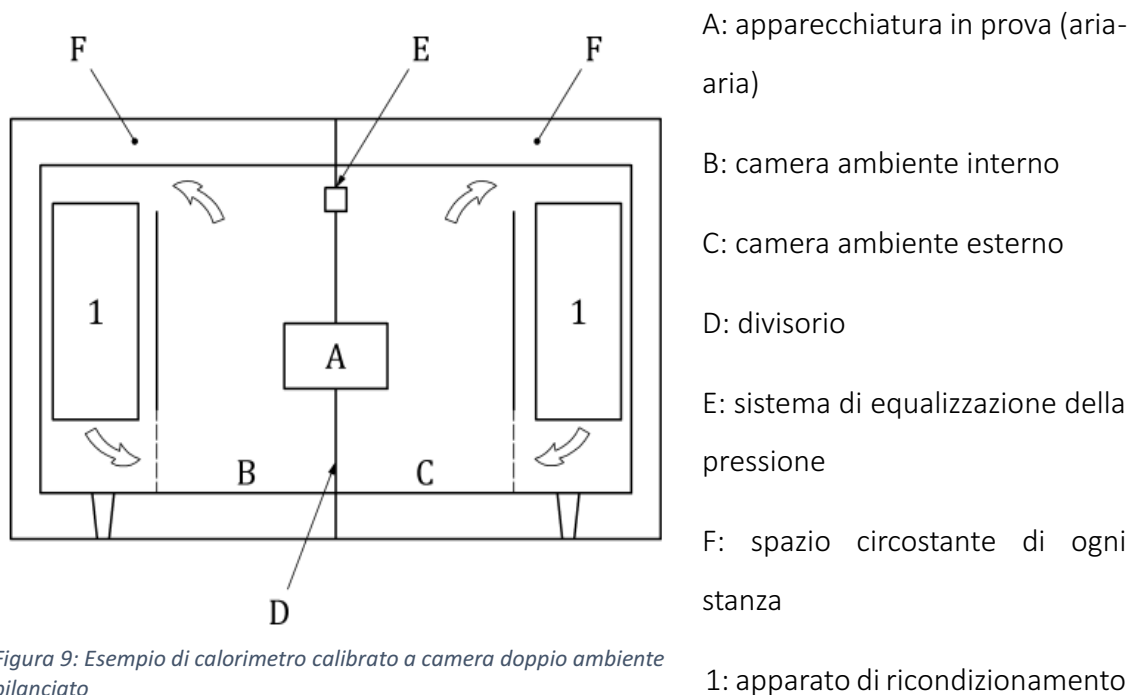


Figura 9: Esempio di calorimetro calibrato a camera doppio ambiente bilanciato

In riferimento alla figura 9, qualora non fosse presente lo spazio circostante (F), si sarebbe parlato di calorimetro calibrato a camera doppio ambiente.

Il dispositivo di equalizzazione della pressione (E), deve essere fornito tra le due stanze per mantenere una pressione equilibrata tra la stanza interna ed esterna.

3.3 Calorimetro a camera ambiente bilanciato

Il calorimetro a camera ambiente bilanciato, figura 9, si basa sul principio di mantenimento della temperatura del bulbo secco nello spazio circostante di ogni stanza uguale alla temperatura di bulbo secco mantenuta all'interno di questa stanza. Questo principio si traduce in un trasferimento di calore minimo tra la stanza e le condizioni ambientali.

Ogni stanza, come i separatori ambientali, deve essere progettata per prevenire la dispersione del calore, incluse le radiazioni. Il pavimento, il soffitto e le pareti dei locali del calorimetro devono essere distanziati a una distanza sufficiente tra loro per fornire una temperatura dell'aria uniforme nei locali.

Le quantità di flusso di energia utilizzate per calcolare la capacità di raffreddamento totale sulla base delle misurazioni interne ed esterne sono mostrate nella figura sottostante 10A

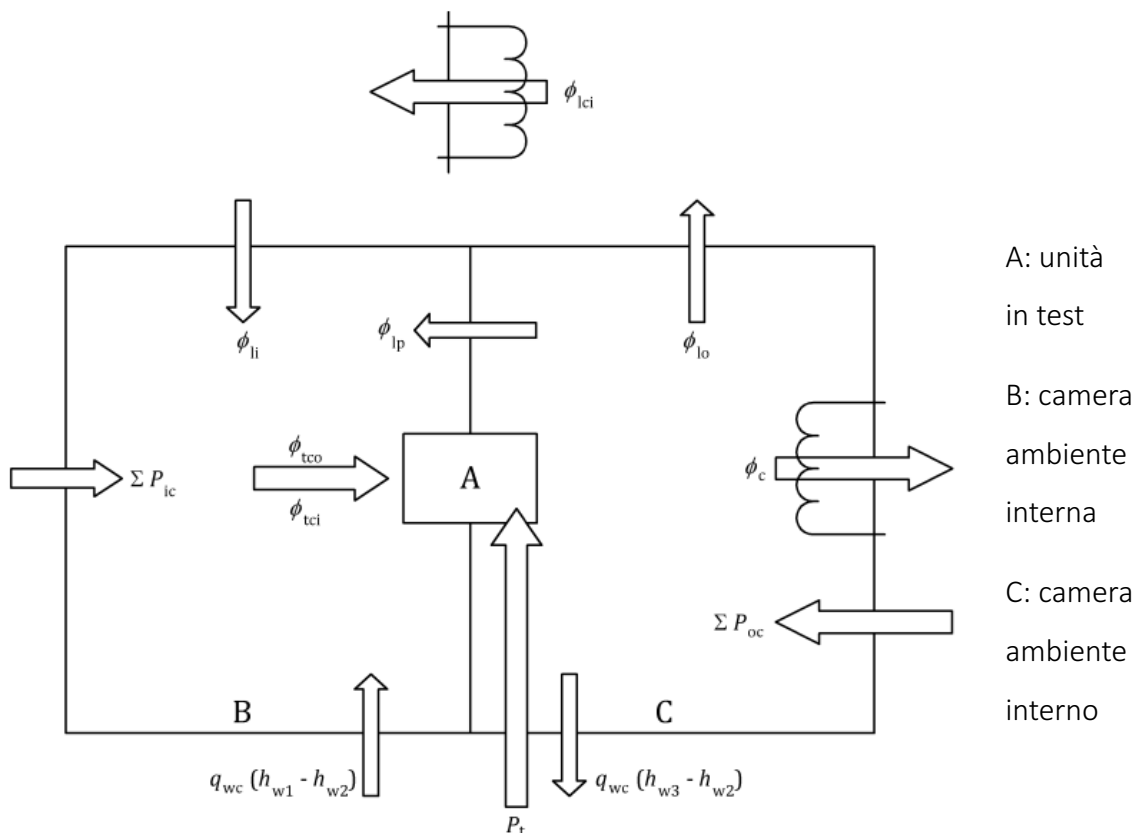


Figura 10A: Flussi di energia durante i test della capacità di raffreddamento

La figura sopra riporta il caso in cui l'unità in test stia lavorando in raffreddamento; nel caso contrario, in riscaldamento lo schema è il seguente:

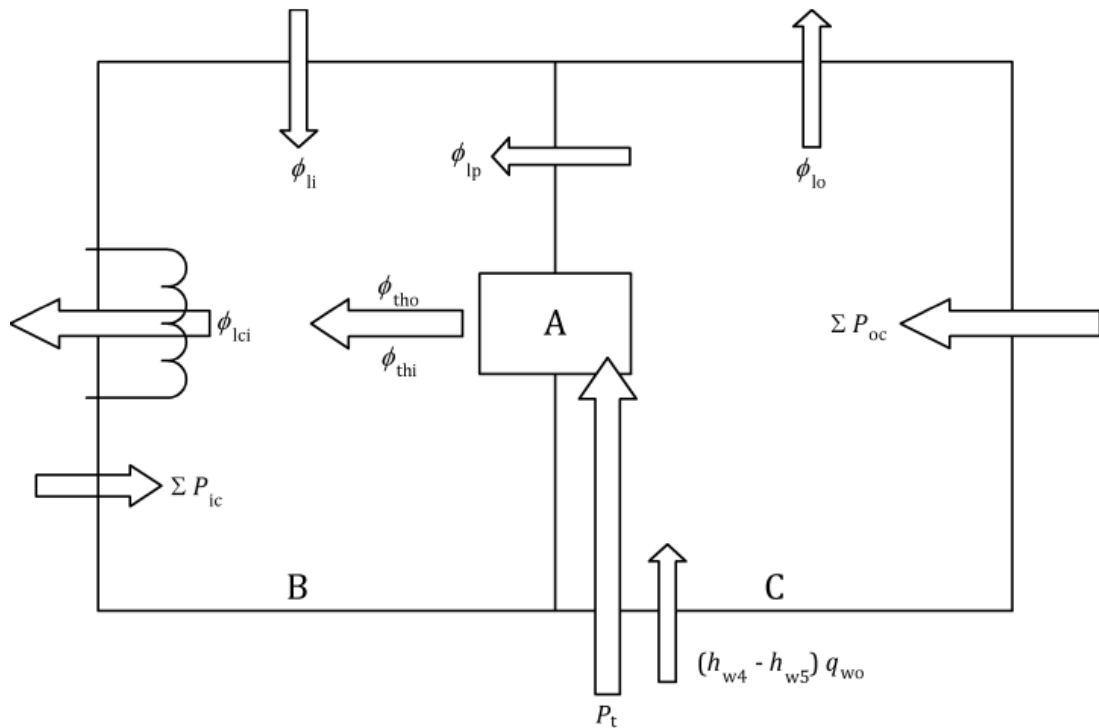


Figura 10B: Flussi di energia durante i test della capacità di riscaldamento

3.3.1 Simbologia della figura 10A e 10B

Simbolo	Descrizione	Unità
$\dot{\Phi}_{lp}$	Il calore che fluisce attraverso la partizione verso la parte interna da quella esterna	kW
$\dot{\Phi}_{li}$	Flusso di dispersione termica nel vano interno attraverso tutte le superfici ad eccezione del divisorio di separazione	kW
$\dot{\Phi}_{tci}$	Capacità di raffreddamento totale dal lato interno	kW
$\dot{\Phi}_{tco}$	Capacità di raffreddamento totale dal lato esterno	kW
$\dot{\Phi}_{thi}$	Capacità di riscaldamento totale dal lato interno	kW
$\dot{\Phi}_{tho}$	Capacità di riscaldamento totale dal lato esterno	kW
$\dot{\Phi}_{lo}$	Calore disperso dal lato esterno attraverso tutte le superfici del lato esterno ad eccezione della partizione di separazione	kW
$\dot{\Phi}_c$	Calore asportato dalla serpentina di raffreddamento nel vano lato esterno	kW
$\dot{\Phi}_{lci}$	Calore rimosso dal vano lato interno	kW
$\sum P_{0c}$	Somma di tutti gli ingressi di potenza a qualsiasi apparecchiatura nel compartimento lato esterno	kW
$\sum P_{ic}$	Somma di tutti gli ingressi di alimentazione al vano lato interno	kW
P_t	Potenza totale assorbita dall'apparecchiatura	kW
h_{w1}	Entalpia specifica dell'acqua o del vapore fornita al compartimento lato interno	kJ/kg
h_{w2}	Entalpia specifica dell'umidità del condensatore in uscita dal compartimento lato interno	kJ/kg
h_{w3}	Entalpia specifica della condensa asportata dalla batteria di trattamento aria nel vano lato esterno	kJ/kg
h_{w4}	Entalpia specifica dell'acqua alimentata al vano lato esterno	kJ/kg
q_{wc}	Velocità alla quale il vapore acqueo viene condensato dall'apparecchiatura	kg/s

3.3.2 Analisi flussi della figura 10A

La capacità di raffreddamento totale sul lato interno, testata nel calorimetro di tipo ambiente calibrato o bilanciato, è calcolata come mostrato nella seguente formula:

$$\dot{\Phi}_{tci} = \sum P_{ic} + q_{wc}(h_{w1} - h_{w2}) + \dot{\Phi}_{lp} + \dot{\Phi}_{li} - \dot{\Phi}_{lci} \quad (1)$$

La formula (1) spiega come viene mantenuta costante la temperatura nell'ambiente interno, ovvero che la somma dei flussi in ingresso e in uscita deve dare come risultato zero.

Nella camera interna gli ingressi sono: la somma di tutte le potenze fornite ai componenti, i flussi di dispersione termica in ingresso attraverso le superfici, escluso il divisorio di separazione, il calore che fluisce mediante il divisorio e per ultimo il calore fornito attraverso l'effetto condensa.

Le uscite volte a compensare le entrate nella cella sono: il calore rimosso dalla stanza mediante uno scambiatore di calore e quello asportato verso il lato esterno dall'unità in prova.

\dot{Q}_{tci} è ciò che si vuole calcolare attraverso il bilanciamento della formula (1), come precedentemente detto, rappresenta la capacità di raffreddamento dell'unità in prova.

La medesima analisi dei flussi può essere effettuata anche nel lato esterno, il bilanciamento è dato dalla formula:

$$\dot{Q}_{tco} = \dot{Q}_c - \sum P_{ic} - P_t + q_{wc}(h_{w3} - h_{w4}) + \dot{Q}_{lp} + \dot{Q}_{lo} \quad (2)$$

In ingresso sono le somme delle potenze elettriche necessarie per il funzionamento dei componenti e dell'unità in prova più il calore asportato da quest'ultima proveniente dal lato interno.

Il calore in uscita è dato dalla dispersione termica mediante il separatore verso il lato interno e verso l'esterno, dal calore asportato dallo scambiatore di calore e dall'effetto condensa.

3.3.3 Analisi flussi della figura 10B

La capacità di riscaldamento misurata nella camera ambiente interno del calorimetro è calcolata con la seguente formula;

$$\dot{Q}_{thi} = \dot{Q}_{lci} - \dot{Q}_{lp} - \dot{Q}_{li} - \sum P_{ic}$$

La medesima analisi dei flussi può essere effettuata anche nel lato esterno, il bilanciamento è dato dalla formula:

$$\dot{Q}_{tho} = \sum P_{oc} + P_t + q_{wo}(h_{w4} - h_{w5}) + \dot{Q}_{lp} - \dot{Q}_{lo}$$

4 Valvole di regolazione

4.1 Introduzione e campo applicativo

Negli impianti di termostatazione degli ambienti, dove è importante mantenere stabile il livello della temperatura, è necessario regolare il corretto flusso di calore da fornire o asportare nelle camere.

Di conseguenza, diventa indispensabile effettuare una compensazione costante dei fattori che influenzano la temperatura attraverso l'utilizzo di dispositivi adeguati, come le valvole di regolazione.

Le valvole di regolazioni sono dei dispositivi utilizzati per il controllo dei flussi d'acqua. Il loro utilizzo è molto ampio e risale fino al tempo dei Romani.

Per gestire correttamente la potenza assorbita o emessa in un circuito di raffreddamento o riscaldamento, è fondamentale comprendere i fattori che influenzano tale potenza. qualora come vettore termico venga utilizzata acqua, la potenza termica può essere approssimata in modo più semplice come segue:

$$P_{termica} = G * \Delta t$$

Dove P è potenza termica scambiata, G è la portata volumetrica e Δt il salto termico.

Tale formula evidenzia come la potenza scambiata sia direttamente proporzionale al salto termico e alla portata. Per variare quindi la potenza termica si può agire su uno dei due fattori.

4.2 Le valvole di regolazione

La valvola di regolazione è un dispositivo progettato con apposite caratteristiche costruttive che consente di regolare adeguatamente il flusso che la attraversa. Questa capacità è resa possibile grazie alla possibilità di modificare la sezione di apertura della valvola in un intervallo compreso tra la massima apertura e la completa chiusura. Solitamente, questa azione è eseguita da un servomotore appositamente configurato per tale scopo.

Le valvole di regolazione di norma fanno parte del sistema di controllo automatico; le parti fondamentali che lo compongono sono tre:

- Il sensore di misura che calcola la grandezza da controllare, la temperatura nel caso preso in esame.
- Il controllore o regolatore che verifica eventuali discrepanze tra il segnale ricevuto dal sensore e il valore desiderato della grandezza. Dal confronto, il regolatore determina come comandare l'organo di regolazione. Un esempio è il termostato.
- L'organo di regolazione che consente di correggere la grandezza da regolare, con l'obiettivo di tornare al valore desiderato.

4.3 Valvola a due e tre vie

Le valvole di regolazione, in base al numero di ingressi e uscite possono, essere distinte in diverse tipologie. Le valvole a due vie presentano un ingresso ed un'uscita, mentre quelle a tre vie hanno 2 ingressi ed un'uscita.

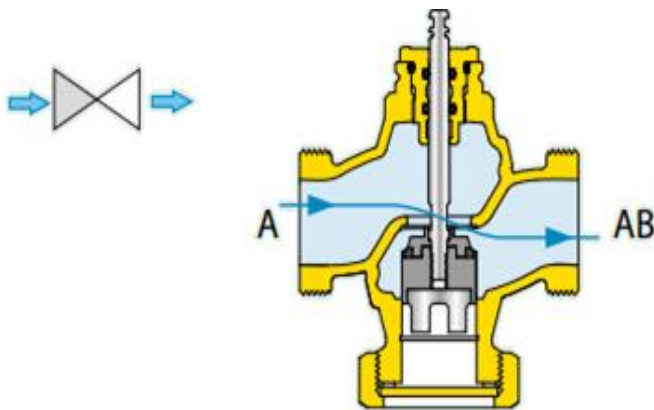
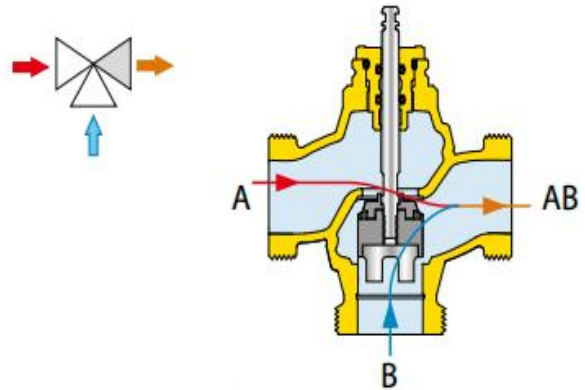


Figura 11: valvola a 2 vie

Come si può osservare in figura, tra l'ingresso A e l'uscita AB è presente un otturatore che in base al suo posizionamento aumenta o diminuisce la luce di passaggio interna, aumentando o diminuendo il flusso passante.

Le valvole a tre vie invece presentano due ingressi, A e B, ed una sola uscita AB. Al variare della posizione dell'otturatore si avrà in uscita una percentuale più alta di liquido proveniente da uno dei due ingressi.



Cioè sono progettate in modo tale che l'apertura progressiva di una delle

Figura 12: valvola a tre vie

due porte comporti la chiusura simultanea dell'altra, garantendo così un controllo adeguato del flusso.

Ciò significa che ad un'apertura della via tra l'ingresso A e l'uscita AB, la via tra l'Ingresso B e AB si chiuderà progressivamente.

I due ingressi nella valvola possono essere a temperature differenti; quindi, variando la posizione dell'otturatore si può regolare la percentuale di miscelazione dei due flussi entranti. Questa situazione si verifica per esempio prima dell'ingresso del fluido nel serbatoio freddo/caldo, capitolo 5, dove è necessario avere una temperatura stabile; perciò, viene effettuata una miscelazione tra il liquido uscente dal serbatoio e quello proveniente dalla centrale.

Le valvole in modalità deviatrice vengono utilizzate per il controllo della portata in uscita e non si ha una nessuna mescolazione tra fluidi; un esempio applicativo è situato tra il serbatoio freddo/caldo e la batteria di compensazione, dove la valvola regola la portata d'acqua da portare allo scambiatore e quella da far bypassare.

4.4 Proprietà delle valvole di regolazione

La curva caratteristica di una valvola relaziona la variazione della portata con il grado di apertura, ovvero lo spostamento dell'otturatore. Questa curva viene calcolata sperimentalmente dai produttori.

Analizzando le curve caratteristiche di regolazione si possono distinguere due gruppi;

le valvole ad apertura rapida che nella parte iniziale della corsa hanno una curva ripida che tenderà poi ad appiattirsi e valvole ad apertura lenta che presentano curve ripide nella parte finale della corsa, mentre all'inizio, con bassi gradi di apertura, permettono un limitato passaggio di fluido.

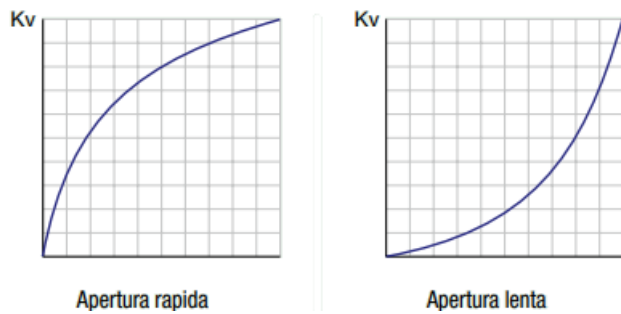


Figura 13: curve caratteristiche, apertura rapida e lenta

L'andamento delle curve dipende da come il progettista decide di progettare gli otturatori. L'uso dell'una o dell'altra dipende in quale parte della corsa della valvola si vuole avere una sensibilità maggiore.

4.5 Caratteristica termica in relazione alla curva caratteristica

Negli impianti di condizionamento è necessario regolare la potenza termica scambiata, la quale non risulta proporzionale alla portata che attraversa lo scambiatore. È fondamentale quindi operare un continuo controllo sulla portata per effettuare una corretta regolazione della potenza termica.

Per le valvole con curve caratteristiche lineari l'andamento tra la portata e la corsa della valvola è lo stesso. Questa tipologia ha lo stesso comportamento lungo tutta la corsa, ma non rappresenta necessariamente un vantaggio, poiché nel caso di controllo della potenza termica si avranno difficoltà nella regolazione soprattutto a basse potenze.

Le valvole con andamenti equipercentuali o ad apertura lenta sono state progettate per compensare le caratteristiche termiche degli scambiatori e per avere un'efficienza maggiore in fase di regolazione, sfruttando la loro intera corsa. La percentuale della potenza dissipata o asportata dallo scambiatore risulta uguale alla percentuale del grado di apertura della valvola che però corrisponderà ad una diversa percentuale di portata.

4.6 Schema e principio di funzionamento

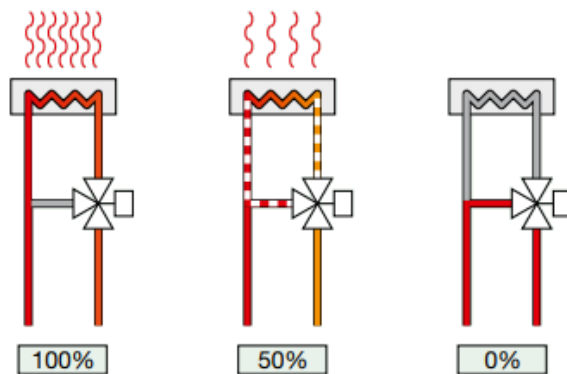


Figura 14: principio funzionamento valvola a 3 vie, modalità deviatrice

Il sistema di controllo regola la valvola a tre vie raffigurata controllando la portata che attraversa lo scambiatore e quella che invece lo bypassa, tramite il grado di apertura della valvola. Così facendo la potenza termica scambiata viene regolata.

Nel caso raffigurato a sinistra la via di bypass è chiusa; quindi, la portata verso lo scambiatore è massima, come è massima la potenza termica dissipata; nel caso di destra la via di bypass è completamente aperta, ciò non permette né il passaggio del liquido nello scambiatore né la dissipazione. Lo schema centrale mostra una valvola a tre vie con entrambi gli ingressi aperti, questo permette allo scambiatore di dissipare una quantità intermedia di calore.

Il ragionamento appena fatto è analogo in caso di asportazione di calore tramite liquido freddo, la variazione di portata nello scambiatore farà variare la capacità di raffreddamento dello stesso.

5 Impianto idronico

5.1 Introduzione e funzionamento generale dell'impianto

L'impianto idronico per la termostatazione delle camere climatiche è un sistema di raffreddamento e riscaldamento efficiente e controllato, che utilizza acqua fredda durante il raffreddamento e calda per il riscaldamento per distribuire il calore all'interno dell'ambiente.

La temperatura in ogni camera di prova viene misurata e controllata da dei termostati, dispositivi che rilevano la temperatura ambiente e che regolano l'apertura di una valvola a tre vie. Questa valvola controlla la quantità di acqua che fluisce attraverso l'elemento di riscaldamento/raffreddamento, permettendo di aumentare o diminuire la quantità di calore erogata o asportato.

Per controllare le temperature all'interno delle due camere di prova, quindi, si fa ricorso a batterie acqua/aria alimentate da due serbatoi mantenuti a temperatura costante da un'opportuna centrale.

Si denominerà batteria calda quella alimentata dal serbatoio caldo e batteria fredda quella alimentata dal serbatoio freddo.

Nella camera di prova, in cui occorre fornire calore per compensare l'effetto frigorifero della pompa di calore testata, si può ricorrere anche a delle resistenze elettriche (da utilizzare in sostituzione o in aggiunta alla batteria calda). Nella camera in cui si deve asportare calore per compensare il caldo immesso dalla pompa di calore in prova si può utilizzare un sistema di raffreddamento mediante macchina frigorifera (in sostituzione o in aggiunta alla batteria fredda).

5.2 Componenti e schema impiantistico

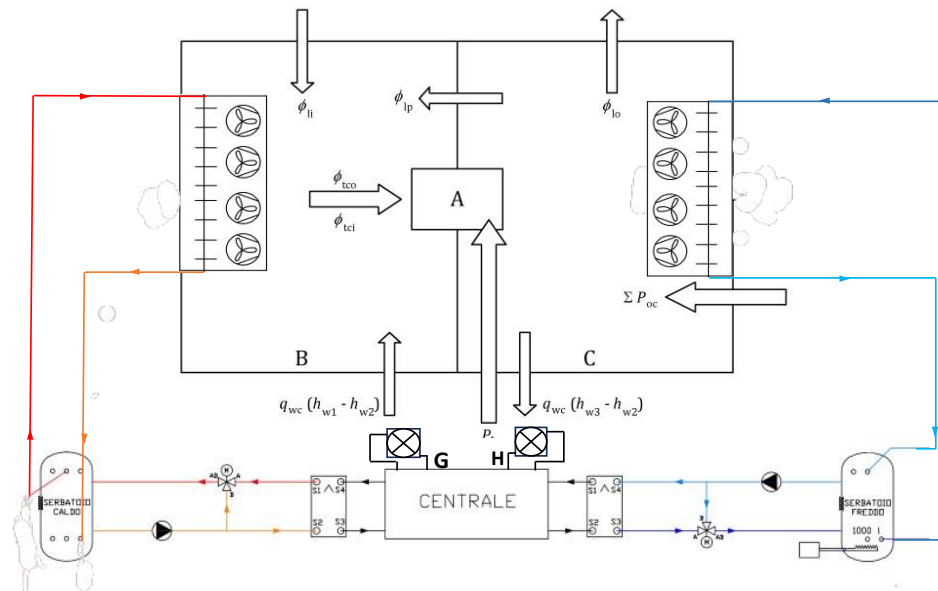


Figura 15: Schema impiantistico impianto idronico con due camere

Gli impianti idronici utilizzano l'acqua come mezzo per il trasferimento del calore e possono essere impiegati per il riscaldamento o il raffreddamento degli ambienti. I componenti chiave di un impianto sono:

-La pompa di circolazione, che spinge l'acqua attraverso l'impianto, consentendo il trasferimento dai serbatoi caldi o freddi ai terminali.

-La centrale, è una pompa di calore con il compito, tramite gli scambiatori di calore, di mantenere costanti le temperature nei due serbatoi, fornendo calore al SC e asportando calore al SF; a fronte di un ingresso di energia elettrica la centrale, dunque, asporta calore dal serbatoio freddo tramite il suo evaporatore e cede calore (termodinamicamente quello asportato dall'evaporatore più il lavoro del compressore) al serbatoio caldo tramite il suo condensatore.

Le prestazioni della centrale dipenderanno dalle sue condizioni operative (dipendenti dalle temperature nei serbatoi e dalle potenze da fornire/asportare).

Durante il funzionamento il bilancio delle esigenze di caldo e freddo (dettate dallo stato termico dei serbatoi che alimentano le batterie a servizio della camera di prova e quindi dalle condizioni operative della pompa di calore), dovrà essere raggiunto smaltendo

calore in ambiente o viceversa traendo calore dall'ambiente tramite dei condensatori/evaporatori ausiliari, rispettivamente lettera H e G nella figura 15).

-I serbatoi di accumulo, che possono essere serbatoi caldi e freddi, svolgono un ruolo fondamentale nell'immagazzinare l'acqua calda e fredda necessaria per il funzionamento dell'impianto.

Il serbatoio caldo è progettato per conservare l'acqua calda prodotta dal sistema di riscaldamento della centrale.

D'altra parte, il serbatoio freddo è collegato al sistema di raffreddamento della centrale. Questo serbatoio immagazzina l'acqua fredda utilizzata per il raffreddamento dell'impianto.

Per ridurre la dispersione di calore e mantenere la temperatura, il serbatoio caldo e quello freddo sono dotati di un isolamento termico.

-Le valvole di controllo, che regolano il flusso d'acqua nell'impianto. Esistono valvole di intercettazione, che aprono o chiudono il flusso in determinate sezioni dell'impianto, e valvole termostatiche, che regolano la temperatura dell'acqua che entra nei terminali.

-Il sistema di controllo, è un insieme di dispositivi che regolano la temperatura ambiente e il funzionamento dell'impianto idronico.

-Le tubazioni e altri accessori. Le prime trasportano l'acqua dai serbatoi ai terminali; di solito, vengono utilizzati materiali resistenti al calore, come il rame o il polipropilene. I secondi, come giunti, raccordi e valvole di sicurezza, sono impiegati per collegare le tubazioni e garantire il corretto funzionamento dell'impianto.

Si tratta solo di alcuni dei componenti fondamentali di un impianto idronico, ma la configurazione specifica può variare in base alle esigenze e al tipo di sistema utilizzato, che sia di riscaldamento o raffreddamento.

5.3 Termostatazione delle camere di prova

Ogni qual volta un'unità viene testata in una camera di prova, andrà a variare le condizioni ambientali, temperatura e umidità, che devono restare stabili durante tutta la durata del test. La temperatura delle camere si può controllare andando a compensare con una batteria di acqua calda-aria l'effetto di raffreddamento dell'evaporatore della pompa di calore e, compensando con un'altra batteria, però di acqua fredda-aria, l'effetto del condensatore.

La temperatura ambiente (t_a) viene misurata utilizzando più termoresistenze posizionate sulle pareti laterali della camera di prova, vicino al centro di ciascuna parete e a una distanza variabile in base alle esigenze. Nella parete in cui sono installate delle vetrate o delle porte di accesso, a causa dell'ingombro delle installazioni stessa, le sonde potrebbe trovarsi in una posizione leggermente spostata rispetto al baricentro, ma comunque in zone limitrofe.

Per evitare l'effetto radiante proveniente dalle superfici termicamente attive, in particolare dalla parete in cui sono collocati i calorimetri, le sonde necessitano di una schermatura. Questo schermaggio può essere realizzato utilizzando un tronchetto di tubo fatto di un materiale con bassa emissività termica, come ad esempio l'acciaio inossidabile. All'interno del tronchetto sono inseriti due dischetti che oscurano il sensore dalle superfici esterne, consentendo comunque una sufficiente circolazione dell'aria.

L'obiettivo di questa configurazione è garantire una misurazione accurata della temperatura ambiente, minimizzando gli effetti indesiderati dell'irraggiamento termico proveniente dalle superfici circostanti.

Qualora la temperatura delle camere di prova dovesse variare da quella preimpostata si farà ricorso o a delle termoresistenze di cui si è precedentemente parlato o a delle batterie di compensazione acqua-aria provenienti dai serbatoi.

5.3.1 Serbatoi freddo

Per garantire una precisa regolazione della temperatura nella camera di prova, il serbatoio freddo viene mantenuto a una temperatura costante inferiore a quella della camera, di solito con una differenza di almeno 12 gradi.

La stabilità della temperatura è fondamentale per assicurare un controllo accurato dell'estrazione di calore dalla batteria ad aria.

Per bilanciare il flusso di calore proveniente dalla batteria posta nella camera, viene utilizzato un circuito di scambio termico con il serbatoio freddo della centrale frigorifera esistente. Un regolatore modula la portata di calore per mantenere costante la temperatura del serbatoio.

Nel caso in cui le differenze di temperatura tra il serbatoio freddo e la centrale frigorifera siano troppo basse o addirittura negative, viene utilizzata una pompa di calore ausiliaria tramite uno scambiatore alimentato da un circolatore che rimane sempre in funzione.

La temperatura del serbatoio freddo viene regolata modificando la prestazione della pompa di calore mediante il regolatore, che modula i giri del compressore.

Il circolatore rimane sempre in funzione a piena portata per garantire un'omogeneizzazione ottimale, anche quando le altre due reti operano con piccoli flussi di fluido a causa delle diverse condizioni operative.

Al fine di consentire il passaggio da una temperatura più bassa a una più alta, per la quale il riscaldamento solo con la potenza fornita dall'unità richiederebbe troppo tempo, anche quando l'unità di prova è ferma o ha dimensioni particolarmente ridotte, viene inserita una resistenza elettrica nel serbatoio.

5.3.2 Regolazione della temperatura del liquido nel serbatoio freddo

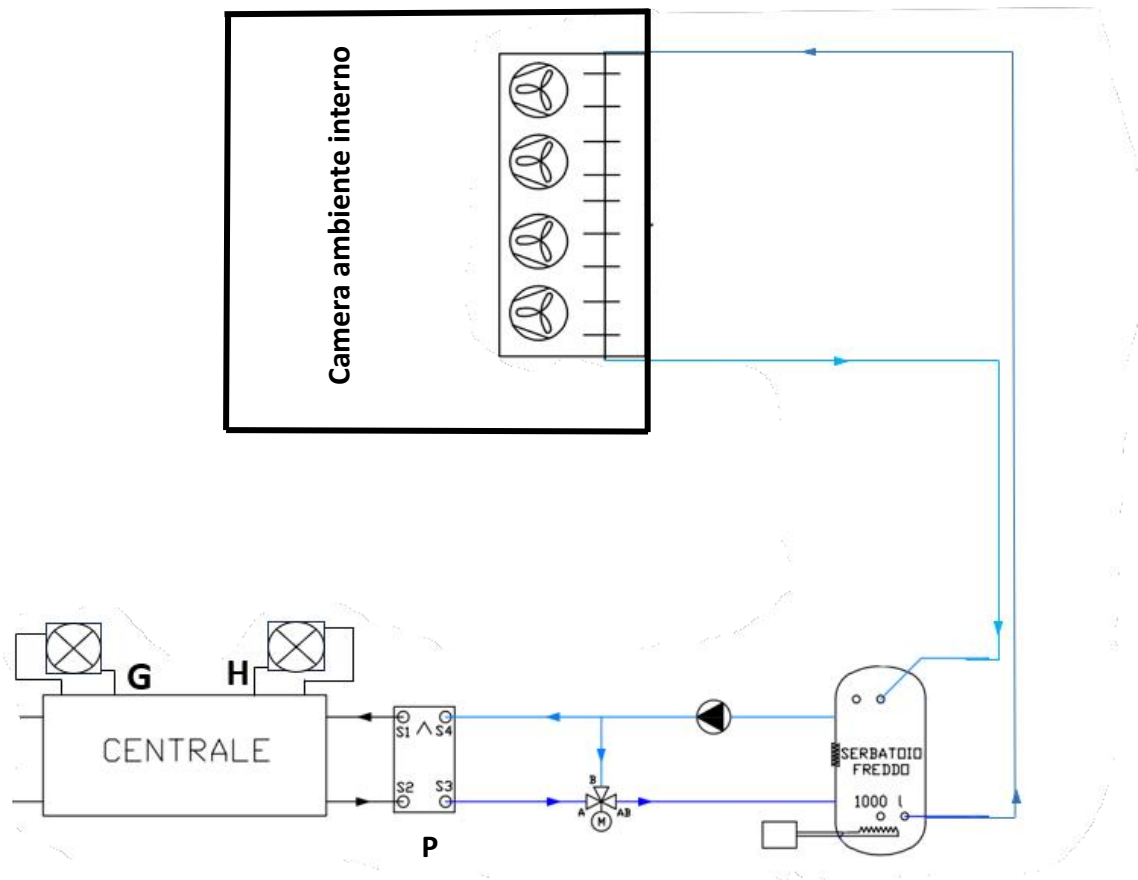


Figura 16: Schema impiantistico centrale, serbatoio freddo, camera ambiente interno

Per regolare la temperatura del serbatoio freddo, in cui l'acqua tende a riscaldarsi a causa dell'asportazione di calore nella batteria di compensazione fredda e della dissipazione termica dall'esterno, si utilizza l'impianto di figura 16, in cui l'acqua del serbatoio viene inviata alla piastra di raffreddamento della centrale (lettera P nella figura) e ritorna fredda al serbatoio stesso, compensando il riscaldamento lato circuito di condizionamento della camera di prova.

Il controllore riceve in ingresso la temperatura del liquido nel serbatoio freddo (t_{sf}) e interviene sulla valvola a tre vie regolando la portata dell'acqua in transito nella piastra di raffreddamento.

La valvola a tre vie riceve in ingresso i flussi di acqua A e B provenienti rispettivamente dalla piastra di raffreddamento e dal serbatoio freddo. Quando la temperatura dell'acqua presente nel SF è più alta di quella prevista, viene prelevata nella zona superiore del serbatoio, dove si accumula, e portata in parte nella valvola a tre vie e in parte nella piastra

di raffreddamento. Tanto più colore dovrà essere asportato, tanta più acqua passerà attraverso la piastra.

5.3.3 Serbatoi caldo

Il serbatoio caldo viene mantenuto a una temperatura di almeno una decina di gradi superiore alla massima temperatura di aspirazione dell'unità condensatrice per garantire una regolazione precisa della temperatura nella camera di prova.

La stabilità della temperatura è fondamentale per assicurare un controllo accurato dell'estrazione di calore dalla batteria ad aria.

Per bilanciare il flusso di calore che viene ceduto tramite la batteria di compensazione posta nella camera di prova, viene utilizzato un circuito di scambio termico con il serbatoio caldo della centrale frigorifera esistente. Un regolatore modula la portata di calore per mantenere costante la temperatura del serbatoio.

Il circolatore rimane sempre in funzione a piena portata per garantire un'omogeneizzazione ottimale, anche quando le altre due reti operano con piccoli flussi di fluido a causa delle diverse condizioni operative.

Al fine di consentire il passaggio da una temperatura più bassa a una più alta, anche quando l'unità di prova è ferma o ha dimensioni particolarmente ridotte, per le quali il riscaldamento solo con la potenza fornita dall'unità richiederebbe troppo tempo, viene inserita una resistenza elettrica nel serbatoio. Stessa applicazione del serbatoio freddo.

5.3.4 Regolazione della temperatura del liquido nel serbatoio caldo

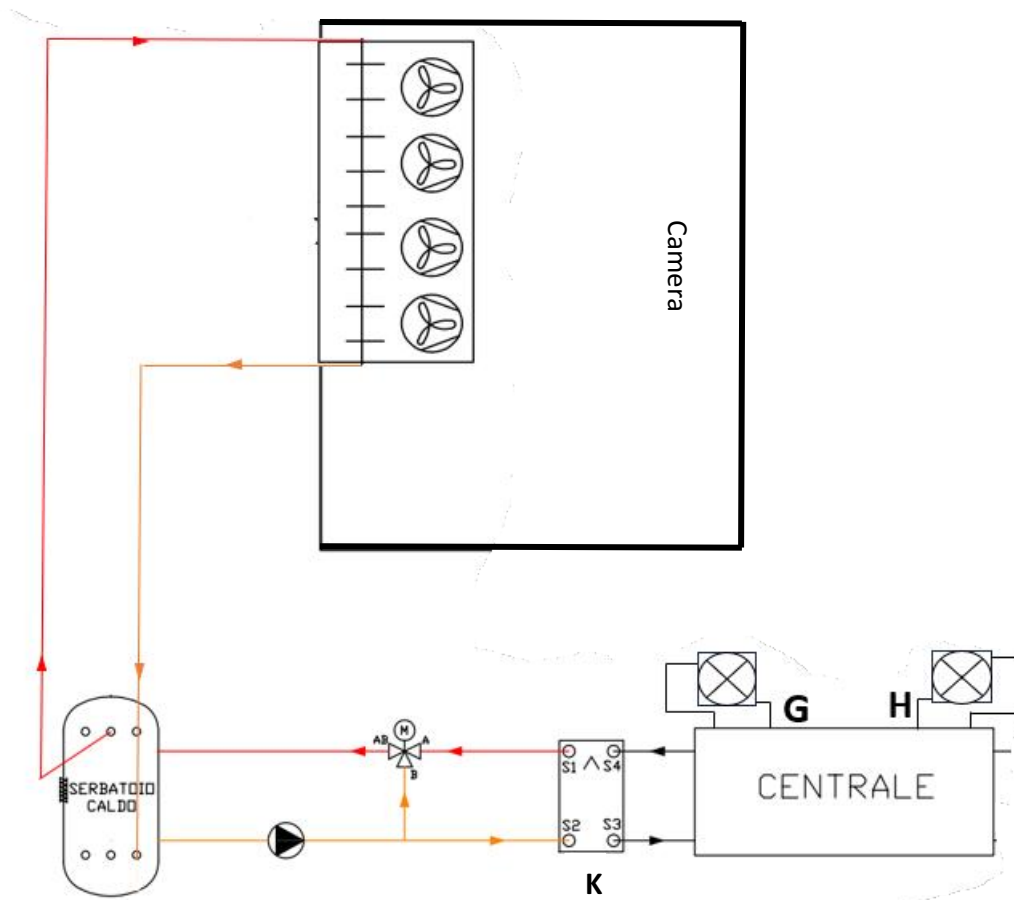


Figura 17A: Schema impiantistico centrale, serbatoio caldo, camera ambiente interno

Per regolare la temperatura del serbatoio caldo, in cui l'acqua tende a raffreddarsi a causa dell'asportazione di calore nella batteria di compensazione calda e della dissipazione termica verso l'ambiente, si utilizza l'impianto di figura 17A, in cui l'acqua del serbatoio viene inviata alla piastra di riscaldamento della centrale (lettera K nella figura) e ritorna a temperatura maggiore al serbatoio stesso, compensando il raffreddamento lato circuito di condizionamento della camera di prova.

Il controllore riceve in ingresso la temperatura del liquido nel serbatoio caldo (t_{sc}) e interviene sulla valvola a tre vie regolando la portata dell'acqua in transito nella piastra di raffreddamento.

Il funzionamento della valvola è analogo a quello descritto nel capitolo 5.3.2, ovvero se la via di by-pass della valvola a tre vie è chiusa, la portata passante per la piastra di riscaldamento è massima e massimo è l'effetto riscaldante. Aprendo progressivamente la

via di by-pass (lettera B nella figura 17B) si riduce la portata alla piastra e, quindi, il suo effetto riscaldante. Ciò avviene quando il calore richiesto dal serbatoio caldo è minore.

Sia nel caso del serbatoio caldo, sia in quello freddo è possibile trovare un'altra valvola a tre vie posta tra i serbatoi e le loro rispettive batterie di compensazione. In figura è riportato il caso di regolazione della temperatura del serbatoio caldo.

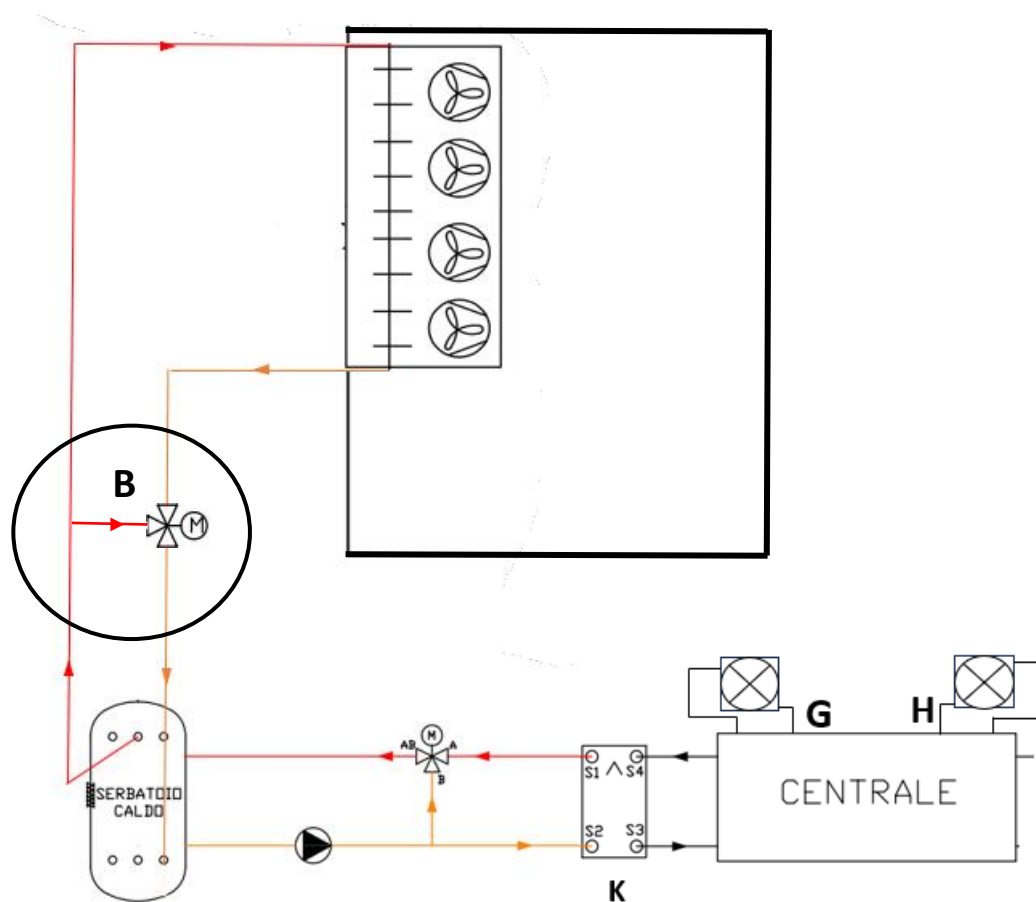


Figura 17B: Schema impiantistico con seconda valvola a tre vie

Il caso mostrato evidenzia come, se la via di by-pass della valvola a tre vie è chiusa, la portata che alimenta la batteria è massima e massimo è l'effetto riscaldante; aprendo progressivamente la via di by-pass si riduce la portata alla batteria e, quindi, il suo effetto riscaldante.

Nel caso di batteria di compensazione fredda il funzionamento è identico, ma invece di aumentare l'effetto riscaldante aumenterà l'effettuo raffreddante.

5.3.5 Soluzione impiantistica aria-acqua

In riferimento alla norma unien14511-2, tabella 16, è possibile raffigurare uno schema di una soluzione impiantistica di un'unità in modalità di raffreddamento aria-acqua.

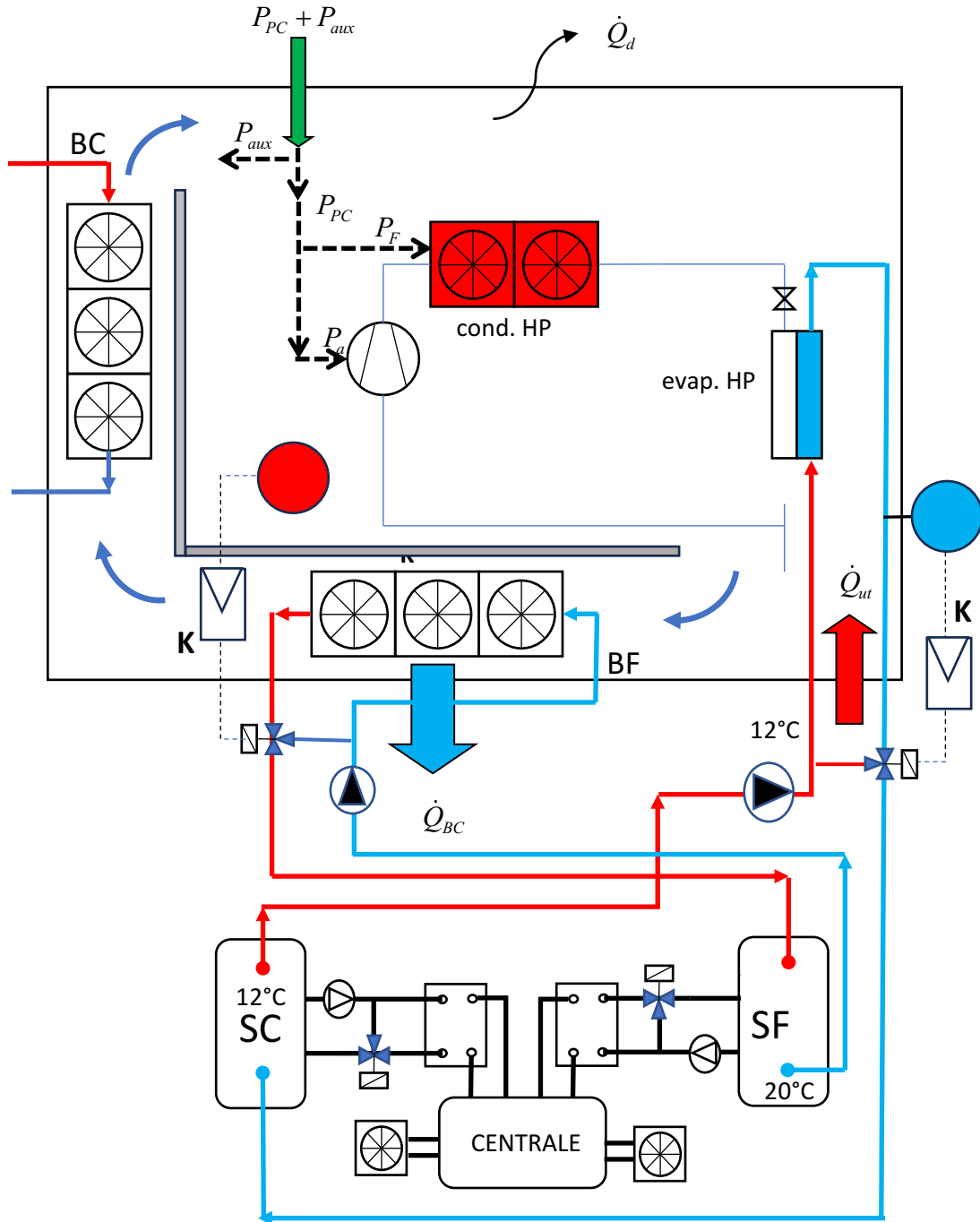


Figura 18: soluzione impiantistica aria-acqua in modalità raffreddamento

La pompa di calore in funzione è in modalità di raffreddamento e, seguendo la norma, deve produrre acqua fredda a 7°C a servizio di un impianto di raffreddamento, ricevendo in ingresso acqua a 12°C.

All'interno della camera di prova la temperatura deve essere mantenuta a 35°C per simulare le condizioni estive dell'ambiente in cui si troverà ad operare il condensatore fluido frigorifero/aria della pompa di calore.

L'impianto idronico deve:

- fornire acqua fredda alla batteria di compensazione fredda per compensare l'effetto riscaldante del condensatore della pompa di calore (batteria aria/fluido frigorifero);
- fornire acqua a 12°C all'evaporatore della pompa di calore (scambiatore a piastre acqua/fluido frigorifero), che la restituirà a 7°C per simulare il carico frigorifero dell'appartamento. Ciò avviene perché il fluido refrigerante si trova ad una temperatura minore, quindi assorbirà calore dall'acqua a 12°C, raffreddandola.

Il bilancio termico della camera di prova, escluse le dispersioni e le rientrate di calore, è dato dalla somma degli ingressi e delle uscite. I primi sono: l'energia elettrica, fornita per alimentare la componentistica, e l'acqua "calda" dalla batteria di compensazione calda. Le seconde sono: l'acqua fredda prodotta dalla pompa di calore.

Approssimando, la somma del lavoro del compressore e della capacità frigorifera della pompa di calore equivale al calore da smaltire nel condensatore della pompa di calore.

Per un calcolo più preciso si può prendere in considerazione la seguente formula:

$$Q_{bc} = Q_{cond} + Q_d + P_f + (1 - \eta_{comp})P_a + P_{aux} + P_r = Q_{cond} + Q_d + Q_{altro}$$

Dove Q_{bc} è la potenza termica sottratta dalla batteria di compensazione (BC), Q_{cond} la potenza calcolata con resa condensatore nelle varie condizioni, Q_d la dispersione attraverso le pareti, P_f la potenza termica per alimentare ausiliari della PdC (principalmente ventilatore), P_a la potenza elettrica per alimentare compressore, η_{comp} il rendimento di conversione da energia elettrica in energia del fluido, P_{aux} la potenza termica per alimentare ventilatore nella cella e P_r la quota di resistenze termiche utilizzate, se accese.

Il bilancio globale, esclusa la dispersione di calore, è dato:

- dagli ingressi che sono: l'energia elettrica usata prevalentemente per l'alimentazione della pompa di calore, ma anche per la gestione di tutti gli ausiliari della camera di prova.
- Dalle uscite: l'energia smaltita in ambiente tramite il condensatore ausiliario della centrale.

A livello energetico globale, dunque, si deve introdurre energia elettrica che dovrà poi essere smaltita come termica in ambiente.

Sono anche da considerare le richieste energetiche della centrale frigorifera a servizio della camera di prova. Il suo compito, a fronte di un ingresso di energia elettrica, è quello di prelevare calore dal serbatoio freddo tramite l'evaporatore e cederlo al serbatoio caldo. Nello schema, nei pressi della centrale, sono raffigurati il condensatore e l'evaporatore ausiliario, che entrano in funzione quando di deve smaltire calore verso l'ambiente o viceversa.

Le valvole a tre vie presenti sono comandate dal sistema di controllo, lettera K in figura, che ha in ingresso la temperatura ambiente (35°C) e la temperatura dell'acqua uscita dallo scambiatore a piastre (7°C); qualora gli ingressi siano diversi da quelli impostati, il sistema di controllo modificherà l'apertura delle valvole, aumentando o diminuendo la portata in entrata negli scambiatori.

Nel caso analizzato è presente come unità in prova un impianto di raffreddamento aria-acqua per il quale basta utilizzare solo una camera di prova.

In questo caso la soluzione impiantistica si complica perché l'acqua prodotta dalla centrale serve non solo per il controllo della temperatura della camera di prova, ma anche per fornire il carico termico alla pompa di calore.

Nel caso in cui la pompa di calore sia in raffreddamento, essa produce acqua fredda, se in riscaldamento produce acqua calda.

In condizioni di riscaldamento il ragionamento è opposto; nella camera di prova, nell'unità in test è presente un evaporatore che assorbirà calore dall'ambiente circostante, mentre il condensatore cederà calore all'acqua che passa all'interno dello

scambiatore a piastre facendola scaldare. Cambiano però le temperature in gioco che devono rispondere alla norma UNIEN 14511-2 tabella 12-15.

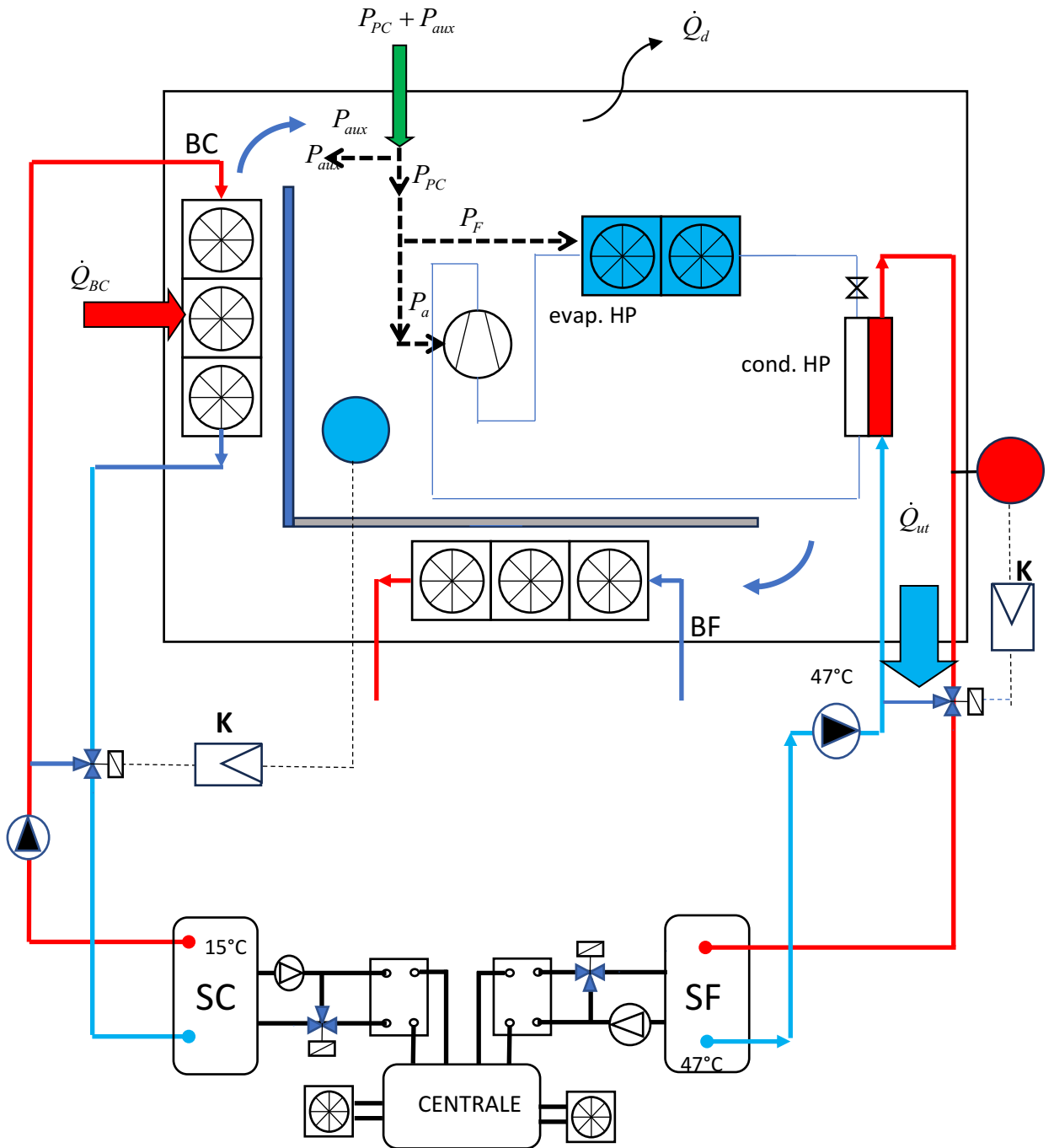


Figura 19: soluzione impiantistica aria-acqua in modalità riscaldamento

5.3.6 Regolazione della temperatura dell'aria nella camera di prova

La seguente formula descrive il calcolo del flusso termico \dot{Q}_{BC} in uscita dalla batteria di compensazione (BC):

$$\dot{Q}_{BC} = q_f c (t_{FoutBC} - t_{FinBC})$$

dove:

- \dot{Q}_{BC} rappresenta la portata di liquido che attraversa la batteria di compensazione BC.
- c è la capacità termica specifica del liquido.
- t_{FoutBC} è la temperatura del liquido in uscita dalla batteria di compensazione BC.
- t_{FinBC} è la temperatura dell'aria nell'ambiente di prova.

La batteria di compensazione viene alimentata con liquido prelevato dal serbatoio freddo SF. Pertanto, a meno delle dispersioni lungo la tubazione di adduzione e del contributo positivo della pompa di alimentazione, la temperatura del liquido in uscita dalla batteria di compensazione (t_{FoutBC}) sarà uguale alla temperatura del liquido nel serbatoio freddo (t_{FinBC}). La temperatura viene mantenuta costante a seconda del caso tramite l'asportazione di calore ad opera della centrale esistente, della centrale a pompa di calore o di una combinazione delle due.

Quando si aumenta la potenza dell'unità in prova, è necessario aumentare la portata del liquido di raffreddamento inviato alla batteria di compensazione BC.

L'input al sistema di regolazione è la temperatura dell'aria nell'ambiente di prova t_{Ain} . L'attuatore del sistema di regolazione è la valvola a tre vie. Con la via diretta completamente aperta, tutta la portata inviata dalla pompa transita attraverso la batteria BC. Aprire la via di bypass riduce la portata ($q_f = q_p - q_{bypass}$) e, di conseguenza, diminuisce la potenza termica asportata.

$$\dot{Q}_{BC} = c(t_{FoutBC} - t_{SF}) (q_p - q_{bypass}) = c q_p \left(1 - \frac{q_{bypass}}{q_p}\right) (t_{FoutBC} - t_{SF})$$

Una volta portato al valore voluto la temperatura del liquido nel serbatoio freddo t_{SF} , mantenendo costante la portata q_p della pompa, si potrà regolare \dot{Q}_{BC} variando il rapporto di bypass $\frac{q_{bypass}}{q_p}$.

La regolazione è di tipo diretto, il che significa che all'aumentare dell'input al regolatore, ovvero di t_{Ain} , l'attuatore deve aumentare proporzionalmente la sua uscita, ossia il flusso di liquido di raffreddamento nella batteria (q_f), riducendo così il flusso di bypass (q_{bypass}).

In teoria agendo sull'uscita del controllore il flusso termico varia linearmente tra un massimo $\dot{Q}_{BC} = c(t_{FoutBC} - t_{SF}) q_p$, ottenuto per $\frac{q_{bypass}}{q_p} = 0$ e quindi per uscita del regolatore $u_{vb} = 1 - \frac{q_{bypass}}{q_p} = 1$ e un minimo nullo $\dot{Q}_{BC} = 0$ per $\frac{q_{bypass}}{q_p} = 1$ e quindi per uscita del regolatore $u_{vb} = 1 - \frac{q_{bypass}}{q_p} = 0$. In pratica però la regolazione del carico risulta critica per portate in ingresso alla batteria piccole.

Al fine di gestire una situazione in cui la potenza termica che deve essere rimossa dalla batteria di compensazione è molto inferiore al suo valore nominale, viene installata una valvola manuale chiamata VBC1.

Aprire la via di bypass di questa valvola permetterà di miscelare il liquido proveniente dalla batteria di compensazione con il liquido prelevato dal serbatoio. Di conseguenza, a parità di portata volumetrica (t_{SF}), la temperatura del liquido in ingresso alla batteria (t_{FinBC}):

$$t_{FinBC} = \frac{q_{bypass1} t_{FoutBC} + (q_p - q_{bypass1}) t_{SF}}{q_p} = \frac{q_{bypass}}{q_p} t_{FoutBC} + \left(1 - \frac{q_{bypass}}{q_p}\right) t_{SF}.$$

Aumentando t_{FinBC} si andrà a ridurre il salto medio logaritmico nella batteria di compensazione BC e quindi il flusso termico scambiato a parità di portata q_f :

$$\dot{Q}_{BC} = c q_f (t_{FoutBC} - t_{FinBC})$$

Un'altra opzione potrebbe prevedere la temperatura del liquido nel serbatoio freddo.

Le possibili regolazioni di \dot{Q}_{BC} sono mostrate nella seguente espressione:

$$\dot{Q}_{BC} = c q_p \left(1 - \frac{q_{bypass}}{q_p}\right) \left(1 - \frac{q_{bypass1}}{q_p}\right) (t_{FoutBC} - t_{SF}) = c q_p (t_{FoutBC} - t_{SF}) u_{vb} u_{vb1}$$

Dove l'uscita del regolatore della valvola VB e della valvola VB1 può teoricamente variare da 0 a 1.

Un'ulteriore opzione disponibile nel caso di piccole motocondensanti in prova è quella di generare un carico fittizio utilizzando le resistenze elettriche presenti nella sala prova. La potenza fornita dalle resistenze, sommata alla potenza generata dalla motocondensante in prova, permetterà di superare la potenza minima che può essere asportata dalla batteria BC.

Le resistenze possono essere impiegate anche per raggiungere la temperatura desiderata nella camera di prova senza ricorrere alla batteria di compensazione. Questa opzione risulta utile quando si lavora con motocondensanti di potenza ridotta.

Un selettore manuale apposito permetterà di collegare l'output del regolatore alle resistenze presenti nella camera. In questa configurazione, l'attuazione sarà inversa, il che significa che all'aumentare dell'input t_{Ain} , sarà necessario ridurre la potenza elettrica fornita alle resistenze.

Bibliografia figure

- Figura 1: Caleffi Hydronic Solutions. "Air to Water Heat Pump System." 2020. Figura 2.1.
- Figura 4a8: IISM Ancona. "Supporto alla Progettazione e alla Realizzazione di una Camera di Prova per Unità Condensatrici e Condensatori." 2018. Figura 4a8.
- Figura 9: Norma europea UNI EN 14511-3, ottobre 2022. Figura A.2.
- Figura 10A: Norma europea UNI EN 14511-3, ottobre 2022. Figura A.3.
- Figura 10B: Norma europea UNI EN 14511-3, ottobre 2022. Figura A.4.
- Figura 11: Caleffi Hydronic Solutions. "Regolazione degli Impianti 56." 2019. Pagina 8, Figura 1.
- Figura 12: Caleffi Hydronic Solutions. "Regolazione degli Impianti 56." 2019. Pagina 8, Figura 2.
- Figura 13: Caleffi Hydronic Solutions. "Regolazione degli Impianti 56." 2019. Pagina 10, Figura 2.
- Figura 14: Caleffi Hydronic Solutions. "Regolazione degli Impianti 56." 2019. Pagina 20, Figura 3. Figura 14; Caleffi hydronic solutions; Regolazione degli impianti 56-2019; pagina 20, figura 3.

Bibliografia e sitografia

1. Grassi, Walter. "Heat Pumps - Fundamentals and Applications." 2018.
2. Caleffi Hydronic Solutions. "Air to Water Heat Pump System 27." 2020.
3. Caleffi Hydronic Solutions. "Regolazione degli Impianti 56." 2019.
4. Faktor Architektue Technik Energie. "Pompe di Calore - Progettazione, Ottimizzazione, Esercizio, Manutenzione." 2020.
5. * (1)-Citazione diretta-Wikipedia.org. "Secondo Principio della Termodinamica - Enunciato di Clausius."
https://it.wikipedia.org/wiki/Secondo_principio_della_termodinamica.
6. Grassi, Walter. "Le Pompe di Calore - Bozza sulle Pompe di Calore."
<http://www.den.unipi.it/walter.grassi/materiale/Le%20pompe%20di%20calore.pdf>.
7. Il Sito del Governo del Regno Unito. "Heat Pump Technology."
<https://www.gov.uk/search/all?keywords=heat+pump&order=relevance>.
8. Enciclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/heat-pump>.
9. IISM Ancona. "Supporto alla Progettazione e alla Realizzazione di una Camera di Prova per Unità Condensatrici e Condensatori." 2018.
10. Evergreen Energy UK. "What Is a Heat Pump Condenser? What Does It Do?"
<https://www.evergreenenergy.co.uk/heat-pump-guides/what-is-a-heat-pump-condenser-what-does-it-do/#:~:text=The%20condenser%20is%20a%20main,in%20the%20heat%20pump%20condenser>.
11. Fire Italia - Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia. "Le Pompe di Calore.": <https://fire-italia.org/le-pompe-di-calore/>
12. Pellicer, E., Dobrzanski, L. A., Kaczorowski, M., Reformat. "Materials Testing and Characterization." 2021.
13. Romanucci, L. "Valutazione Sperimentale di una Strategia Real Time Pricing di Demand Response Applicata al Riscaldamento con Pompa di Calore." 2020.
14. Guffanti, B. "Pompe di Calore, Lago e Acquedotto Industriale di Como per la Climatizzazione Estiva ed Invernale di un Centro Commerciale e di altre Utenze Urbane." 2013.

15. Shackelford, James F. "Introduction to Materials Science for Engineers." 2017.
16. Niemann, Rolf G. "Handbook of Materials Testing and Characterization." 2002.
17. Ente Italiano di Normazione (UNI): <https://uni.com/uni-en-14511>.
18. UNI EN 14511-1. "Condizionatori, Refrigeratori di Liquido e Pompe di Calore - Termini e Definizioni." Norma.
19. UNI EN 14511-2. "Condizionatori, Refrigeratori di Liquido e Pompe di Calore - Condizioni di Prova." Norma.
20. UNI EN 14511-3. "Condizionatori, Refrigeratori di Liquido e Pompe di Calore - Metodi di Prova." Norma.
21. UNI EN 14511-4. "Condizionatori, Refrigeratori di Liquido e Pompe di Calore - Requisiti." Norma.
22. Microline.it. "Normative UN EN 14511.": <https://www.microline.eu/normative/>.
23. Biblus.it. "Pompe di Calore e Condizionatori in Vigore: Quattro Nuove Norme." <https://biblus.acca.it/pompe-di-calore-e-condizionatori-in-vigore-quattro-nuove-norme/>.