



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA MECCANICA**

---

Corso di Laurea triennale

Sistemi predittivi per la gestione del corretto funzionamento di un armadio  
congelatore

Development of predictive systems in order to control the correct operation of a  
freezer

Relatore:

Prof. Corvaro Francesco

Tesi di Laurea di:

Merli Andrea

A.A. 2021 / 2022

## INDICE

Capitolo 1	Abstract	3
Capitolo 2	Introduzione	6
Capitolo 3	Ciclo teorico e ciclo reale	9
Capitolo 4	Aria umida	13
Capitolo 5	Termoregolatore	16
Capitolo 6	Fluidi refrigeranti	18
Capitolo 7	Percorso del fluido e componenti	20
Capitolo 8	Gestione dello sbrinamento	25
Capitolo 9	Stratificazione termica	36
Capitolo 10	Ricerca dei guasti	38
Capitolo 11	Conclusione	42
Bibliografia		43

# **Capitolo 1**

## **Abstract**

Lo scopo dello studio è stato quello di analizzare dei sistemi predittivi per la gestione del corretto funzionamento di un armadio congelatore, in particolare, è stata riposta l'attenzione sulla gestione dello sbrinamento dell'evaporatore. Tale azione è indispensabile, dal momento che tra le alette dello scambiatore di calore si forma uno strato di brina che limita la sottrazione di calore al vano. Il fenomeno in questione si definisce "impacco" ed è stato possibile rilevarne la presenza attraverso un sistema di monitoraggio delle temperature registrate dalla sonda vano e dalla sonda evaporatore poiché nel momento in cui si verifica, le due temperature divergono.

L'obiettivo era quello di riuscire a programmare lo sbrinamento dell'evaporatore al variare delle condizioni esterne.

Sono state eseguite 3 prove a differenti condizioni di temperatura e umidità però una di queste non è risultata accettabile, di conseguenza, attraverso le uniche due prove rimaste si è cercato di prevedere i tempi di sbrinamento al variare della temperatura dell'ambiente. Nelle esperienze eseguite sono stati disattivati tutti i parametri che regolano lo sbrinamento al fine di rilevare l'impacco e registrare il tempo che la macchina ha impiegato a raggiungerlo alle varie condizioni.

Si è ipotizzata dunque una relazione lineare tra i tempi di sbrinamento e la temperatura esterna. Inizialmente è stata mossa l'idea che l'impacco fosse causato principalmente dall'umidità specifica dell'ambiente, però dal momento che le sonde riescono a registrare esclusivamente delle temperature è stato cambiato approccio e sono state valutate come variabili il numero di aperture porta e la temperatura dell'ambiente.

La condizione ottimale è quella per cui l'armadio congelatore lavora a porta chiusa e lo sbrinamento si attiva dopo il superamento del parametro  $d_0$  il quale identifica i minuti di funzionamento del compressore per l'attivazione dello sbrinamento (solitamente si imposta il  $d_0$  a 240 minuti). Tutte le aperture porta contribuiscono a peggiorare le condizioni di lavoro, per questo motivo si è pensato di moltiplicare un coefficiente di valore compreso tra 0 e 1 ai 240 minuti ogni volta che la porta viene aperta in modo tale da anticipare progressivamente lo sbrinamento. Attraverso una formula ricavata empiricamente il termoregolatore può calcolare il coefficiente moltiplicativo al variare della temperatura dell'ambiente. In questo approccio è stato ipotizzato che l'umidità specifica dell'ambiente sia sempre abbastanza elevata, come si presume possa essere all'interno di una cucina professionale.

È anche vero che i 240 minuti possono essere variabili, ovvero, si può scegliere di impostare il valore del parametro  $d_0$  in maniera differente; dunque, il coefficiente moltiplicativo dipende sia dalla temperatura ambiente che dal valore di  $d_0$ .

Per questo motivo, interpolando le curve sviluppate a diversi valori di  $d_0$ , è stata ricavata una funzione a due variabili che permette di ricavare il valore del coefficiente moltiplicativo in funzione sia della temperatura ambiente sia del parametro  $d_0$ .

Nella seguente trattazione è stata analizzata anche la stratificazione termica all'interno dell'armadio congelatore ed è stata dedicata una parte anche alla ricerca dei guasti.

# **Capitolo 2**

## **Introduzione**

L'impacco dell'evaporatore consiste nella formazione di uno strato di brina sull'evaporatore stesso che limita lo scambio termico. Viene favorito in ambienti umidi, più l'aria contiene vapore acqueo e maggiore è la possibilità che si verifichi l'impacco. In generale, le variabili principali che influenzano il fenomeno sono la temperatura del vano e dell'ambiente, l'umidità dell'ambiente, la temperatura del refrigerante e il numero di aperture della porta.

Per evitare questo problema, la macchina esegue periodicamente, in maniera autonoma, lo sbrinamento, che può essere di diversi tipi in relazione alle temperature a cui si trova il vano:

- Sbrinamento a resistenza (per temperature negative), si fa passare corrente elettrica attraverso una resistenza, la quale, scaldandosi, cede calore all'evaporatore. In questo caso il compressore rimane spento.
- Sbrinamento a gas caldo (per temperature negative), si fa passare il fluido caldo all'interno dell'evaporatore. In questo caso il compressore è acceso.
- Sbrinamento ad aria (per temperature positive), consiste nel tenere accese le ventole dell'evaporatore a compressore spento.

Dall'analisi dell'andamento delle temperature, si può riconoscere l'impacco nel momento in cui le temperature dell'evaporatore e del vano non conservano più il delta di temperatura di esercizio, ma divergono, ovvero la temperatura del vano aumenta mentre la temperatura dell'evaporatore si abbassa (l'evaporatore non scambia più calore con il vano).



Figura 2.1

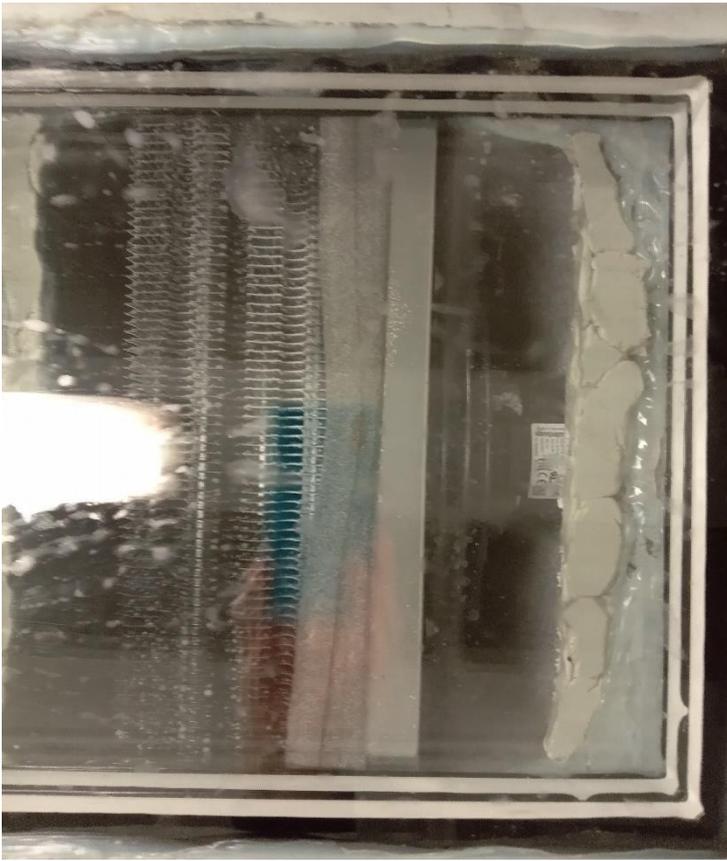


Figura 2.2

La Figura 2.2, rappresenta un evaporatore pulito, infatti, si riescono a distinguere le alette dello scambiatore di calore, tra le quali riesce a passare l'aria.

La Figura 2.1, rappresenta, invece, un evaporatore "impaccato", lo scambiatore è completamente ricoperto di brina e non si riescono più a distinguere le alette, questo fa sì che la sottrazione di calore al vano venga fortemente limitata se non annullata.

Nella prima fase della ricerca l'attenzione è stata focalizzata sul comprendere al meglio come la macchina funziona e sul come variano le temperature nei punti caratteristici del circuito: ingresso e uscita evaporatore, ingresso e uscita compressore e uscita condensatore. Questo è stato possibile grazie all'analisi di numerose prove a vuoto e a carico eseguite sull'armadio congelatore.

Al fine di poter capire il fenomeno dell'impacco, è stato elaborato un protocollo, attraverso il quale sono state eseguite diverse prove a differenti condizioni ambientali. L'armadio congelatore è stato caricato con dei pacchetti che riescono a simulare il comportamento degli alimenti. I risultati delle prove sono poi stati utilizzati per trarre le conclusioni.

Prima di procedere nella trattazione è importante precisare che con il termine "termostatazione" si intende il normale ciclo di ON/OFF del compressore.

# **Capitolo 3**

## **Ciclo teorico e ciclo reale**

Per conservare gli alimenti, è necessario che questi vengano mantenuti a delle temperature molto inferiori rispetto quelle dell'ambiente esterno. Al fine di realizzare ciò bisognerà continuamente sottrarre calore al vano in cui sono riposte le vivande. Secondo il postulato di Clausius è impossibile costruire un dispositivo che abbia come unico effetto il passaggio di calore da un sistema a temperatura più bassa ad un sistema a temperatura più alta. Infatti, per la risoluzione di tale problema si utilizza una macchina inversa, attraverso la quale, fornendo lavoro dall'esterno, è possibile sottrarre calore alla sorgente fredda.

La soluzione più efficiente per realizzare il ciclo è quella per cui lo scambio avviene a temperatura costante (si considerano dei delta di temperatura infinitesimi).

L'unico modo per ottenere uno scambio di calore isoterma è quello di operare all'interno della zona di saturazione (ciclo inverso di Carnot).

Le ipotesi alla base del ciclo inverso di Carnot sono:

- Sistema operante in regime stazionario
- Composto da componenti caratterizzati come sistemi aperti ad un solo ingresso e una sola uscita, con flusso monodimensionale e collegati da condotti e tubazioni ritenuti ideali, ovvero adiabatici verso l'esterno e senza attrito.

L'effetto utile, ovvero la sottrazione di calore alla sorgente fredda, si ottiene nell'evaporatore, dove il fluido refrigerante assorbe calore per poter evaporare. Una volta terminato l'effetto utile è necessario che il fluido torni allo stato iniziale per poter ripetere il processo, perciò, deve cedere calore all'ambiente esterno che però si trova ad una temperatura superiore. Per permettere la cessione di calore del fluido all'ambiente esterno è indispensabile comprimerlo per portarlo ad una temperatura che sia maggiore o uguale a quella dell'ambiente esterno. Una volta che il fluido ha ceduto calore all'ambiente esterno, attraverso una espansione in turbina si riesce a riportarlo allo stato iniziale. Mediante questa trasformazione è possibile anche recuperare parte del lavoro ceduto nella compressione.

Il ciclo inverso di Carnot è però irrealizzabile innanzitutto perché non è possibile comprimere un fluido bifasico, dal momento che le gocce di liquido presenti in aspirazione, durante la compressione vaporizzano provocando un istantaneo aumento del volume specifico.

Quindi, all'ingresso del compressore deve entrare un vapore saturo secco o, meglio ancora, vapore surriscaldato.

Di conseguenza lo scambio di calore tra fluido caldo e ambiente esterno non sarà più isoterma (ovvero non più reversibile). Un'altra condizione che permette di discostarsi da Carnot è la rimozione della reversibilità esterna, ovvero, gli scambi di calore devono avvenire con una differenza di temperatura finita e non infinitesima. Inoltre, l'espansione di un fluido bifasico, non essendo realizzabile deve essere sostituita con una isoentalpica che può essere realizzata con una valvola di laminazione termostatica o con un capillare. Le ipotesi che stanno alla base dei bilanci di energia ed entropia sono:

- Tempo di osservazione comprendente un numero finito di cicli, il che comporta una variazione di energia interna nulla
- Macchina a fluido adiabatica
- Variazioni di energia cinetica e potenziale trascurabili rispetto ai flussi energetici in gioco
- Flussi considerati in valore assoluto

Un ciclo di questo tipo prende il nome di ciclo a compressione di vapore standard:

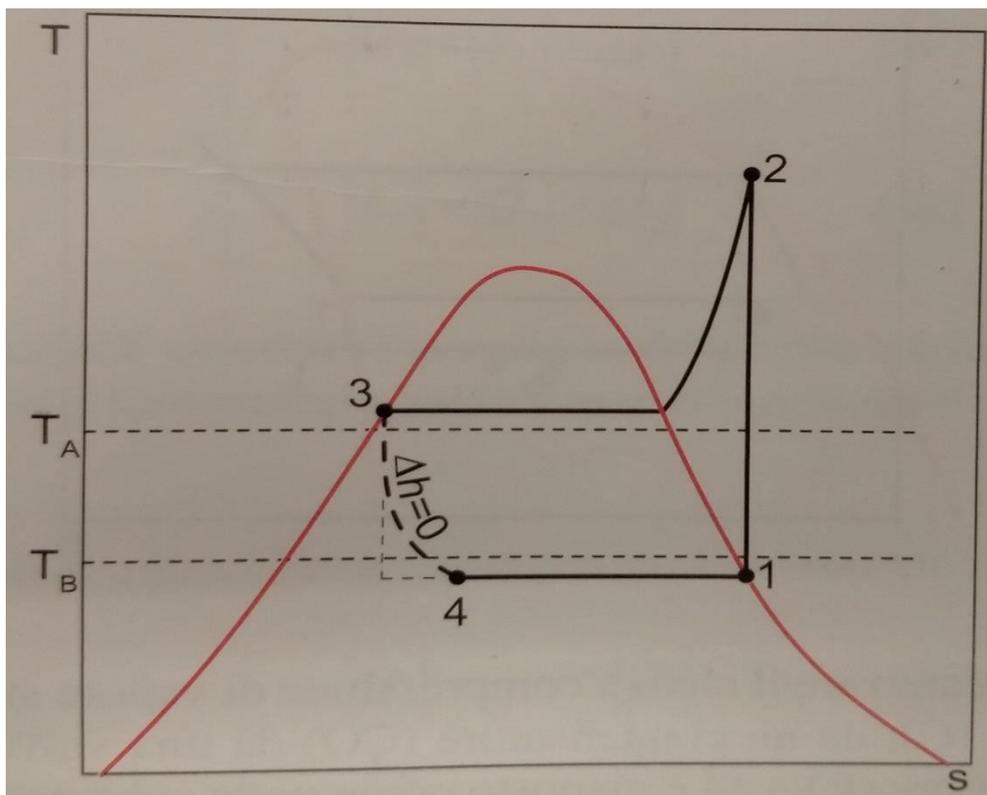


Figura 3.1

La trasformazione che avviene nel compressore viene considerata adiabatica endoreversibile, dunque isoentropica. Nel bilancio di energia vengono trascurati i contributi relativi alla variazione di energia cinetica e potenziale, inoltre non essendo progettato per lo scambio termico, anche la potenza termica viene considerata nulla, di conseguenza il lavoro per unità di massa è esprimibile come una variazione di entalpia del fluido tra aspirazione e scarico compressore.

Anche per quanto riguarda gli scambiatori di calore, evaporatore e condensatore, non si considerano i termini riguardanti la variazione di energia cinetica e potenziale. In questo caso, però, gli scambiatori non sono progettati per scambiare lavoro ma calore, di conseguenza la potenza termica scambiata sarà pari alla variazione di entalpia del fluido tra stato iniziale e stato finale. I processi di scambio termico sono considerati isobari.

A differenza del caso ideale prima esposto, nel caso reale, bisogna considerare le perdite di carico che si hanno lungo il circuito e bisogna tener conto del fatto che le tubazioni che collegano i vari componenti non sono adiabatiche. Di conseguenza tra ingresso e uscita evaporatore esisterà sempre una differenza di temperatura anche se minima. Si tiene conto anche del fatto che la compressione non è isoentropica, quindi, ci sarà una componente di entropia generata. Una differenza di temperatura esisterà anche tra ingresso compressore e uscita evaporatore, che diminuisce all'aumentare del lavoro del compressore. Per temperature relativamente basse dell'ambiente esterno, infatti, si riscontrano differenze sostanziali di temperatura soprattutto quando il compressore è spento. All'aumentare della temperatura dell'ambiente esterno, aumenta il tempo di lavoro del compressore, di conseguenza la temperatura di aspirazione del compressore riesce a raggiungere temperature simili a quelle di uscita evaporatore.

Il coefficiente di prestazione della macchina, COP, viene valutato come rapporto tra la potenza termica sottratta al vano e la potenza meccanica fornita dal compressore. Maggiore è il COP, minore è la potenza meccanica richiesta dal compressore e minore sarà anche il costo d'esercizio del ciclo. Al diminuire della differenza di temperatura tra scarico e ingresso compressore aumenta l'efficienza della macchina, ma diminuisce la potenza frigorifera fornita, dunque, nella pratica industriale, è bene trovare il giusto compromesso tra prestazione e consumo. Maggiore è il COP, minore è la potenza meccanica richiesta dal compressore e minore sarà anche il costo d'esercizio del ciclo.

# **Capitolo 4**

## **Aria umida**

L'aria atmosferica viene considerata come una miscela di un gas incondensabile (aria secca costituita da azoto, ossigeno, argon...) e di un vapore condensabile (vapore d'acqua). L'aria secca può essere considerata come una sostanza pura. Entrambi i componenti possono essere considerati come gas ideali.

Una proprietà importante di una miscela tra un gas e un vapore è che, fissato un volume chiuso e finito di miscela, la massa totale ( $m$ ) è costante e pari a:

$$m = m_{as} + m_{vap} + m_{liq} = \text{costante.} \quad (1)$$

La massa di vapore può dunque variare a discapito o a favore del liquido, mentre la componente di aria secca rimane inalterata.

L'umidità specifica ( $\chi$ ) si definisce come il rapporto tra la massa di vapore ( $m_{vap}$ ) e la massa d'aria secca ( $m_{as}$ ):

$$\chi = \frac{m_{vap}}{m_{as}} \quad (2)$$

L'umidità relativa ( $\phi$ ), invece, si definisce il rapporto tra la massa di vapore ( $m_{vap}$ ) contenuta in un dato volume di aria atmosferica ad una certa temperatura e la massa di vapore ( $m_{vs}$ ) che renderebbe satura la massa di aria atmosferica a quella data temperatura:

$$\phi = \frac{m_{vap}}{m_{vs}} \quad (3)$$

Se su di una miscela di un gas e di un vapore si esegue un raffreddamento a pressione costante, ad un certo punto si arriverà alla condizione di saturazione per il vapore. A questo punto, continuando a raffreddare, si provocherà la condensazione del vapore. Si definisce quindi "temperatura di rugiada", la temperatura alla quale comincia il fenomeno della condensazione.

Per il postulato di stato, un sistema a 2 componenti è univocamente individuato se si conoscono 3 proprietà. Nello studio dell'aria atmosferica, la pressione (in particolare quella atmosferica) può essere considerata come una proprietà nota. Quindi per determinare un generico stato dell'aria sarà necessario conoscere altre 2 proprietà. Il diagramma psicometrico è uno strumento che consente di studiare i processi che coinvolgono l'aria umida e viene costruito per un certo valore di pressione (in genere la pressione atmosferica). Sull'asse delle ascisse viene riportata la temperatura misurata in °C, sull'asse delle ordinate, invece, l'umidità specifica.

La curva al centro del grafico rappresenta la curva di saturazione ( $\phi = 100\%$ ), mentre le curve simili giacenti sulla destra rappresentano degli stati ad umidità relativa costante. Nel grafico vengono anche riportate delle linee isoentalpiche e linee a volume specifico costante.

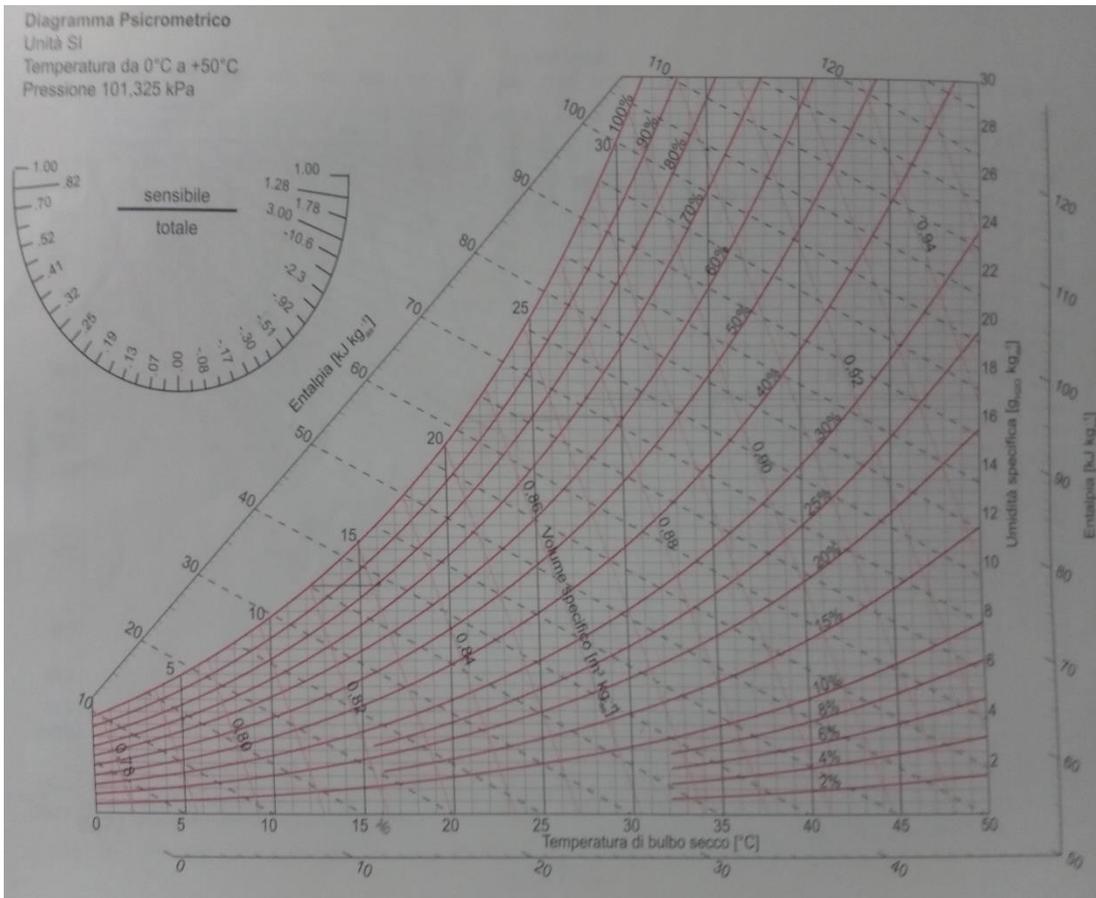


Figura 4.1

# **Capitolo 5**

## **Termoregolatore**

Il termoregolatore è un componente essenziale poiché rappresenta il sistema di controllo della macchina e ha il compito fondamentale di gestire l'accensione e lo spegnimento delle ventole del condensatore e del compressore in base alle temperature di set point e al differenziale impostati. Il set point è la temperatura pre-programmata alla quale il termoregolatore spegne il compressore e le ventole del condensatore. Il differenziale, invece, è la differenza di temperatura che viene aggiunta alla temperatura di set point e che permette dunque di riaccendere il compressore.

Ad esempio, se avessi una temperatura di set point di  $-21^{\circ}\text{C}$  e un differenziale di  $+2^{\circ}\text{C}$  allora il compressore si spegnerebbe a  $-21^{\circ}\text{C}$  e si riaccenderebbe a  $-19^{\circ}\text{C}$ .

È inoltre importante precisare che sul display del termoregolatore viene visualizzata la temperatura interna degli apparecchi e non quella del prodotto.

Il termoregolatore ha due segnali di ingresso che sono rilevati rispettivamente da due sonde, una è posizionata nei pressi delle alette dell'evaporatore, mentre l'altra è posizionata sullo spigolo sinistro interno del vano, ma viene decalibrata in modo da misurare una temperatura simile a quella del baricentro del vano.

Il termoregolatore gestisce inoltre il micro porta, che permette di spegnere la ventola dell'evaporatore quando si apre la porta del frigo e di riaccenderla quando la porta si chiude. Nel caso dell'armadio frigorifero doppia porta, i micro sono due.

I segnali in uscita dal termoregolatore sono indirizzati al compressore, alle ventole ed infine l'ultimo segnale in uscita riguarda lo sbrinamento che viene eseguito periodicamente ogni 4 o 6 ore.

Attraverso il termoregolatore si impostano inoltre i parametri di configurazione, quelli più importanti sono r0, che indica il differenziale, CA1 che indica l'offset sonda vano e d20 che stacca il compressore per un tempo di lavoro effettivo del compressore stesso preimpostato. L'offset indica sostanzialmente la differenza tra la temperatura effettiva all'interno del vano e la temperatura rilevata sul display.

In generale ogni parametro di configurazione è contraddistinto da una lettera che ne indica le caratteristiche: "i" sta per ingressi digitali, "CA" e "P" stanno per ingressi analogici, "C" sta per compressore, "d" sta per sbrinamento, "F" sta per ventole, "Pr" sta per sonda, "A" sta per allarmi, "u" sta per uscite digitali, "Hd" sta per sbrinamento in tempo reale e "r" sta per regolazione.

# **Capitolo 6**

## **Fluidi refrigeranti**

I fluidi frigoriferi presentano molti problemi riguardo la reperibilità, la sicurezza e l'impatto ambientale. Devono inoltre soddisfare diverse specifiche tra le quali devono essere in grado di bollire ad una temperatura inferiore a quella della sorgente più bassa, proprio per essere in grado di sottrarre calore al vano. Altre caratteristiche che il fluido refrigerante deve possedere: la temperatura e la pressione di evaporazione devono essere superiori a quelle del punto triplo, la pressione dell'evaporatore non deve essere troppo bassa (altrimenti il fluido non riesce a vincere le perdite di carico del circuito), la temperatura e la pressione di condensazione devono essere inferiori a quelle del punto critico, la pressione del condensatore non deve essere troppo alta, le proprietà del fluido devono garantire il COP più alto possibile, il fluido deve possedere una elevata conducibilità termica e una bassa viscosità alle temperature operative e deve essere compatibile con l'ambiente.

I primi fluidi utilizzati nel campo della refrigerazione furono presto abbandonati in quanto molto pericolosi. Più tardi vennero introdotti i clorofluorocarburi (CFC), dei composti sintetici derivati dagli alcani per sostituzione di atomi di idrogeno con alogeni. Gli idroclorofluorocarburi (HCFC), invece, sono caratterizzati dal fatto che in questo caso non tutti gli atomi di idrogeno sono sostituiti con alogeni. A causa della presenza di cloro, i CFC e gli HCFC hanno un elevato ODP, ovvero hanno una elevata capacità di distruzione dell'ozono. Per questo vennero introdotti altri fluidi refrigeranti HFC (idrofluorocarburi), che non possiedono cloro e quindi hanno un ODP nullo. Di contro, anche gli HFC provocano dei problemi di tipo ambientale, infatti posseggono dei valori di GWP molto alti, dove il GWP misura il potenziale di effetto serra di una sostanza. È per questo motivo che oggi vengono utilizzati solo gli HFC che hanno un basso GWP. In molte applicazioni si utilizzano refrigeranti naturali, invece che sintetici, dal momento che possiedono un ODP pari a zero e dei bassi valori di GWP come, ad esempio, l'R290 (propano) il quale è presente nell'armadio congelatore esaminato ed è caratterizzato da un ODP=0 e da un GWP=3.

# **Capitolo 7**

## **Percorso del fluido e componenti**

I componenti principali di un armadio frigorifero sono: compressore, condensatore, evaporatore e valvola di laminazione termostatica o capillare.

Attraverso l'evaporatore si realizza l'effetto frigorifero, ovvero il passaggio di calore dal vano all'evaporatore stesso. All'interno di questo componente il refrigerante entra come fluido bifasico, assorbe calore, ed esce come vapore surriscaldato, per poi entrare nel compressore dove subisce un forte innalzamento di temperatura e pressione. Una volta uscito dal compressore, l'R290, si trova ad una temperatura molto elevata, per questo si sfrutta parte del calore posseduto dal fluido per fare evaporare l'acqua raccolta in una bacinella formatasi dai precedenti sbrinamenti. Una volta entrato nel condensatore, cede calore all'ambiente passando dallo stato di vapore surriscaldato allo stato di liquido. Infine, attraverso una valvola di laminazione termostatica o attraverso un capillare si realizza l'espansione che consente al refrigerante di raggiungere la pressione all'ingresso dell'evaporatore.

La valvola di laminazione, a differenza del capillare, consente di regolare la quantità di fluido in ingresso evaporatore in base alle esigenze dell'evaporatore stesso.

Un altro elemento importante è la cuffia dell'evaporatore, la quale ha il compito di isolare termicamente quanto più possibile lo scambiatore di calore.

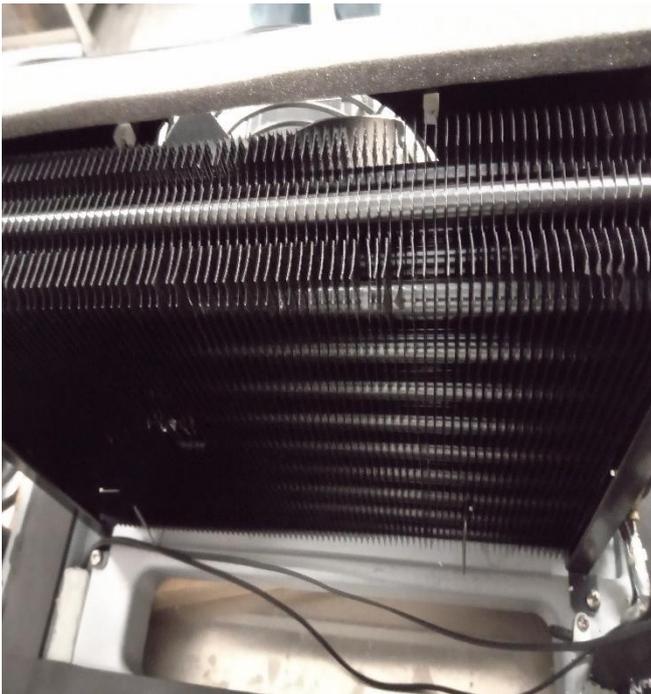


Figura 7.1 Alette evaporatore



Figura 7.2 Ventola evaporatore



Figura 7.3 Compressore



Figura 7.4 Condensatore



Figura 7.5 Ventola condensatore



Figura 7.6 Valvola di laminazione



Figura 7.8 Cuffia evaporatore

# **Capitolo 8**

## **Gestione dello sbrinamento**

L'impacco dell'evaporatore consiste nella formazione di uno strato di brina, sulla superficie dello scambiatore di calore stesso, che limita lo scambio termico. Per ovviare a questo problema, la macchina attiva lo sbrinamento che può essere di diversi tipi in relazione alla temperatura alla quale si trova il vano. Se il vano si trova a temperature positive si può effettuare lo sbrinamento ad aria, mentre, se le temperature sono negative è necessario uno sbrinamento elettrico a resistenza o ad inversione di ciclo (a gas caldo).

Gli attuali armadi congelatori eseguono lo sbrinamento in maniera periodica in base al numero di ore di funzionamento della macchina o al numero di ore continuative di lavoro del compressore oppure in base al numero di ore continuative che l'evaporatore passa al di sotto di una temperatura preimpostata che prende il nome di soglia evaporazione.

Visto che le condizioni di lavoro in cui si trovano le macchine sono variabili, è necessario lo sviluppo di un sistema intelligente che sia in grado di intervenire quando è effettivamente necessaria l'attivazione dello sbrinamento. I parametri che influenzano il fenomeno sono: la temperatura interna del vano, la temperatura del fluido refrigerante, il carico interno degli alimenti, il numero di aperture porta della cella frigorifera, la temperatura dell'ambiente esterno e l'umidità dell'ambiente esterno.

Infatti, in ambienti in cui ci sono elevate escursioni termiche, elevata umidità relativa dell'ambiente esterno e frequenti aperture porte, l'umidità specifica all'interno della cuffia potrebbe salire fino al punto di rugiada e causare l'inefficienza dell'evaporatore prima del previsto. È necessario dunque ideare un sistema che in base alla lettura delle sonde (evaporatore e vano) sia in grado di gestire lo sbrinamento.

L'aspetto fondamentale di cui bisogna tener conto per lo studio del fenomeno è il delta di temperatura che esiste tra vano ed evaporatore, il quale deve rimanere costante. Nelle fasi di power on (discesa in temperatura) e overcooling (modalità secondo la quale il vano si trova ad una temperatura inferiore rispetto a quella di esercizio), questa differenza va controllata se la temperatura del vano aumenta al diminuire della temperatura dell'evaporatore; non va controllata se la temperatura del vano diminuisce al diminuire della temperatura dell'evaporatore, anche se il delta è variabile, infatti, nella discesa in temperatura è normale che la differenza di temperatura non rimane costante.

Nelle fasi di normale funzionamento, la differenza di temperatura tra vano ed evaporatore, non va monitorata sia quando il compressore è spento sia durante lo sbrinamento che se le temperature del vano e dell'evaporatore aumentano o diminuiscono insieme poiché in queste situazioni è corretto che il delta sia variabile. Il comportamento anomalo della macchina si riscontra

quando le temperature del vano e dell'evaporatore divergono, ovvero quando la temperatura del vano aumenta mentre la temperatura dell'evaporatore diminuisce.

Per studiare il fenomeno, sono state eseguite delle prove secondo le classi climatiche riportate nella seguente foto:

Classe climatica della camera di prova	Temperatura di bulbo secco °C	Umidità relativa %	Punto di rugiada °C	Massa del vapore d'acqua aria secca g/kg
0	20	50	9,3	7,3
1	16	80	12,6	9,1
2	22	65	15,2	10,8
3	25	60	16,7	12,0
4	30	55	20,0	14,8
6	27	70	21,1	15,8
5	40	40	23,9	18,8
7	35	75	30,0	27,3
8	23,9	55	14,3	10,2

Figura 8.1

Per l'analisi è stato utilizzato un sistema di monitoraggio che registra gli andamenti di temperatura rilevati dalla sonda vano e dalla sonda evaporatore. La curva di colore azzurro rappresenta la temperatura del vano, mentre quella di colore giallo la temperatura dell'evaporatore.

Il protocollo di prova è stato il medesimo per tutte le prove ed è articolato nel seguente modo:

- Togliere l'alimentazione e riattivare la macchina in modo da resettare il timer del termoregolatore
- Avviare lo sbrinamento manuale per "ripulire" l'evaporatore
- Attendere 15 minuti dal termine dello sbrinamento per iniziare un ciclo di aperture porta di 7 secondi ogni 3 minuti fino al raggiungimento dell'impacco

Nelle esperienze svolte sono stati disattivati tutti i parametri che regolano lo sbrinamento, tranne quello che interviene per numero di ore di funzionamento complessivo della macchina che è stato impostato ad 8 ore. Inoltre, la temperatura di set point è stata impostata a  $-21^{\circ}\text{C}$  e il differenziale ad  $1^{\circ}\text{C}$ .

La prima prova è stata eseguita ad una temperatura ambiente di  $16^{\circ}\text{C}$  e 80% di umidità relativa, questo significa che l'umidità specifica è di  $9,1 \text{ g/kg}$ . La durata della fase di aperture porta è stata di 3 ore e 20 minuti e la divergenza tra la curva del vano e quella dell'evaporatore si è verificata dopo circa 2 ore e 20 minuti dall'inizio del ciclo di aperture.

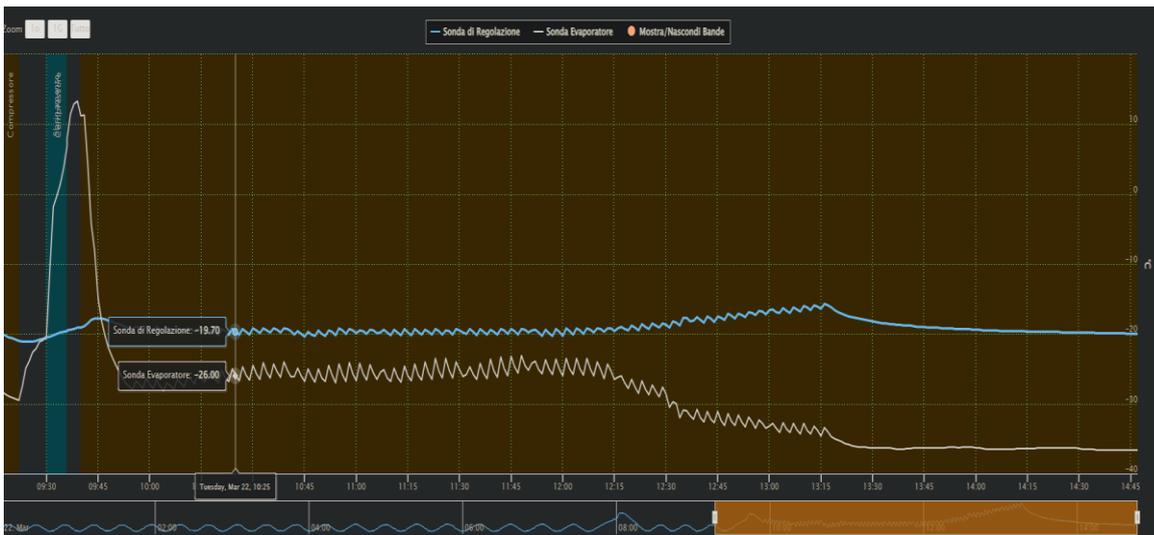


Fig. 8.2

La seconda prova è stata eseguita ad una temperatura ambiente di  $30^{\circ}\text{C}$  e 55% di umidità relativa, di conseguenza l'umidità specifica risulta essere di  $14,8 \text{ g/kg}$ . La fase di aperture porta è durata, in questo caso, 1 ora e 50 minuti e la divergenza tra le curve si è verificata circa 50 minuti dopo l'inizio del ciclo di aperture.



Fig. 8.3

La terza prova è stata eseguita ad una temperatura ambiente di 40°C e 40% di umidità relativa, dunque, l'umidità specifica è di 18,8 g/kg. La fase di aperture porta ha avuto un tempo complessivo di 3 ore e la divergenza tra la temperatura del vano e la temperatura dell'evaporatore è avvenuta circa 1 ora e 50 minuti dopo l'inizio del ciclo di aperture.



Fig. 8.4

L'andamento delle temperature, sia del vano che dell'evaporatore, è di tipo ondulatorio poiché con l'apertura porta si immette all'interno del vano una massa di aria calda che fa innalzare le temperature fino a raggiungere un massimo per poi scendere fino all'apertura successiva.

Quando si verifica l'impacco, l'evaporatore non riesce più a sottrarre calore al vano, di conseguenza, la temperatura del vano comincia a crescere mentre quella dell'evaporatore a diminuire. Nelle prime due prove, la divergenza tra le curve è più netta, infatti, si riesce a riconoscere il punto in cui varia la tangenza dell'andamento medio della temperatura del vano.

Sempre analizzando le prime due prove si può riscontrare come più è elevata l'umidità specifica dell'ambiente e prima si verifica l'impacco dell'evaporatore. La terza prova rappresenta, invece, un caso in cui l'inefficienza della macchina è da attribuire alla temperatura ambiente troppo alta piuttosto che all'impacco. Alla temperatura di 40°C la potenza frigorifera è tale da non permettere di contrastare la dispersione termica, di conseguenza si raggiungono temperature talmente elevate da far aumentare in maniera considerevole il punto di rugiada, per questo motivo l'impacco avviene in ritardo rispetto alla prova eseguita a 30°C e 55% di umidità relativa.

Dai grafici si deduce dunque che il tempo di ON del compressore per l'attivazione dello sbrinamento deve essere nella prima prova di 155 minuti, mentre nella seconda di 69 minuti.

L'idea di base era quella di cercare una regola che permettesse di programmare lo sbrinamento al variare delle condizioni di temperatura e umidità dell'ambiente. Le variabili in questione sono però diverse: temperatura dell'ambiente, umidità dell'ambiente, temperatura del vano, umidità all'interno del vano, temperatura dell'evaporatore e frequenza di aperture porta.

Il termoregolatore odierno è in grado di monitorare esclusivamente la temperatura del vano e quella dell'evaporatore, quindi, individuare una regola generale risulta molto difficoltoso.

Si assume che tra le classi climatiche quella più severa sia la stessa che possiede il valore più alto di umidità specifica. Si trascurano le classi a temperature superiori di 30°C dal momento che oltre quel valore di temperatura l'inefficienza non è più da attribuire all'impacco. Quindi la classe climatica più gravosa risulta essere quella a 27°C e 70% di umidità relativa, mentre quella meno gravosa è quella a 20°C e 50% di umidità relativa.

Conoscendo quanto vale il tempo di funzionamento consecutivo del compressore che porta all'impacco per 2 classi climatiche (30°C e 55% UR e 16°C e 80% UR), attraverso l'interpolazione lineare si può calcolare in maniera approssimata il tempo consecutivo del compressore in fase di ON per l'attivazione dello sbrinamento per le altre classi.

Classi	Minuti compressore ON (t) per attivazione sbrinamento	Umidità specifica (x)
20°C e 50% UR	183	7,3 g/kg
16°C e 80% UR	155	9,1 g/kg
23,9°C e 55% UR	138	10,2 g/kg
22°C e 65% UR	129	10,8 g/kg
25°C e 60% UR	111	12 g/kg
30°C e 55% UR	69	14,8 g/kg
27°C e 70% UR	54	15,8 g/kg

Tab. 8.1

Formula utilizzata per l'interpolazione:

$$\frac{t-t_1}{t_2-t_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad (1)$$

Da questi risultati si può riscontrare come all'aumentare della severità della classe climatica aumenta la frequenza degli sbrinamenti e si può quindi prevedere lo sbrinamento per ciascuna situazione.

Per programmare lo sbrinamento in questo modo è però necessario utilizzare uno strumento che sia in grado di rilevare l'umidità all'interno della cuffia e ciò, al momento, non è possibile. In genere si adottano delle sonde che misurano delle temperature.

All'aumentare della temperatura dell'aria esterna, aumenta la capacità da parte dell'aria di contenere vapore e quindi aumenta la quantità di vapore che, attraverso le aperture della porta, viene introdotta all'interno del vano e di conseguenza all'interno della cuffia dell'evaporatore. Per questo motivo, si può ritenere che all'aumentare della temperatura ambiente, aumenti anche la severità della condizione in esame, sia dal punto di vista dell'impacco che dal punto di vista del funzionamento continuativo del compressore. Così si è deciso di cambiare approccio e si è deciso di attivare lo sbrinamento in funzione del numero di aperture della porta e della temperatura ambiente. Questo è possibile se si sceglie di "sacrificare" la sonda evaporatore e adottarne una che misura proprio la temperatura dell'ambiente.

Reimpostando la tabella con una scala di gravosità che si basa sulla temperatura esterna e interpolando si ottiene:

Temperatura ambiente (T)	Minuti compressore ON (t) per attivazione sbrinamento
16°C	155
20°C	130
22°C	118
23,9°C	106
25°C	100
27°C	87
30°C	69

Tab. 8.2

In questo caso, dunque, le condizioni estreme vengono fornite proprio dalle prove che sono state eseguite.

La condizione ottimale rimane quella per cui la macchina lavora a porta chiusa e lo sbrinamento viene attivato quando si supera il tempo di funzionamento complessivo definito dal parametro d0, il quale viene in genere impostato a 240 minuti. Ogni apertura della porta contribuisce a peggiorare le condizioni di lavoro, dunque, sono stati ricavati dei coefficienti in maniera empirica, di valore compreso tra 0 e 1, che vengono moltiplicati ai 240 minuti ogni volta che si apre la porta in modo tale da anticipare lo sbrinamento.

Per trovare il numero di aperture è necessario dividere il tempo di compressore ON per l'attivazione dello sbrinamento per la frequenza di aperture (ogni 3 minuti).

Per generalizzare il concetto, attraverso Excel, è stata trovata l'equazione che descrive come varia il coefficiente moltiplicativo in funzione della temperatura ambiente:

Classi	Minuti compressore ON (t) sbrinamento	Umidità specifica ( $\chi$ )	Coefficienti moltiplicativi	Numero aperture porta
16°C	155	9,1 g/kg	0,9916	52
20°C	130	7,3 g/kg	0,9858	43
22°C	118	10,8 g/kg	0,982	39
23,9°C	106	10,2 g/kg	0,9769	35
25°C	100	12 g/kg	0,9738	33
27°C	87	15,8 g/kg	0,9656	29
30°C	69	14,8 g/kg	0,9472	23

Tab. 8.3

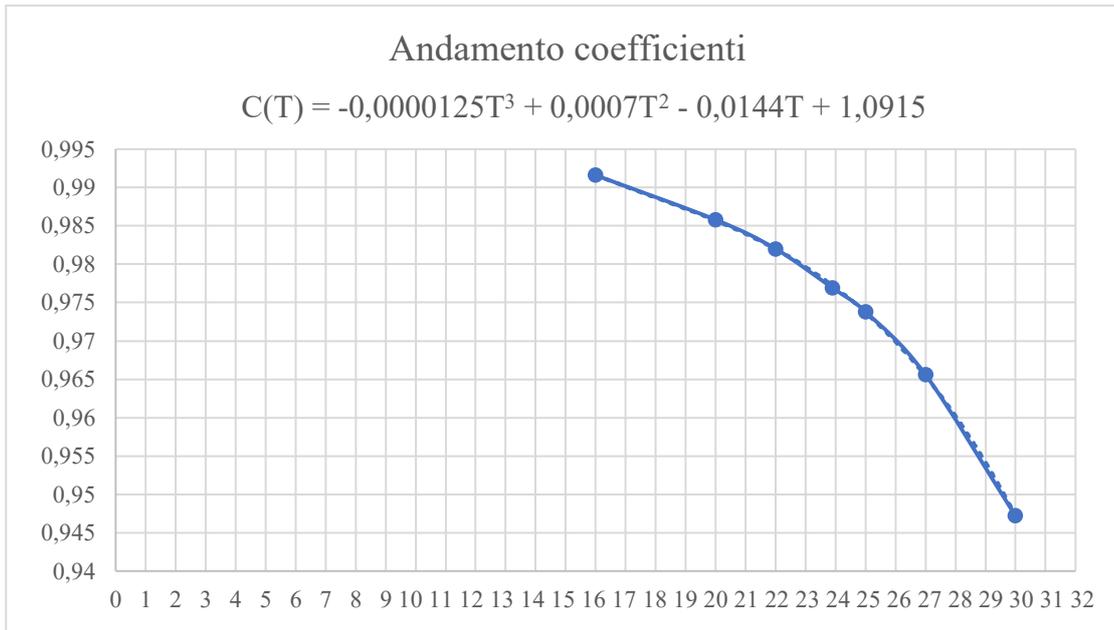


Figura 8.5

Dove T indica la temperatura.

Dal momento che anche i 240 minuti di funzionamento continuativo possono essere variabili, si giunge alla conclusione che il coefficiente moltiplicativo non è funzione della sola temperatura ambiente, ma anche del parametro  $d_0$ .

Nel seguente grafico sono riportate le curve che descrivono come varia il coefficiente moltiplicativo in funzione della temperatura per diversi valori di  $d_0$ .

Serie 1  $d_0 = 240$ , Serie 2  $d_0 = 300$ , Serie 3  $d_0 = 360$ , Serie 4  $d_0 = 420$ , Serie 5  $d_0 = 480$ ,  
Serie 6  $d_0 = 540$

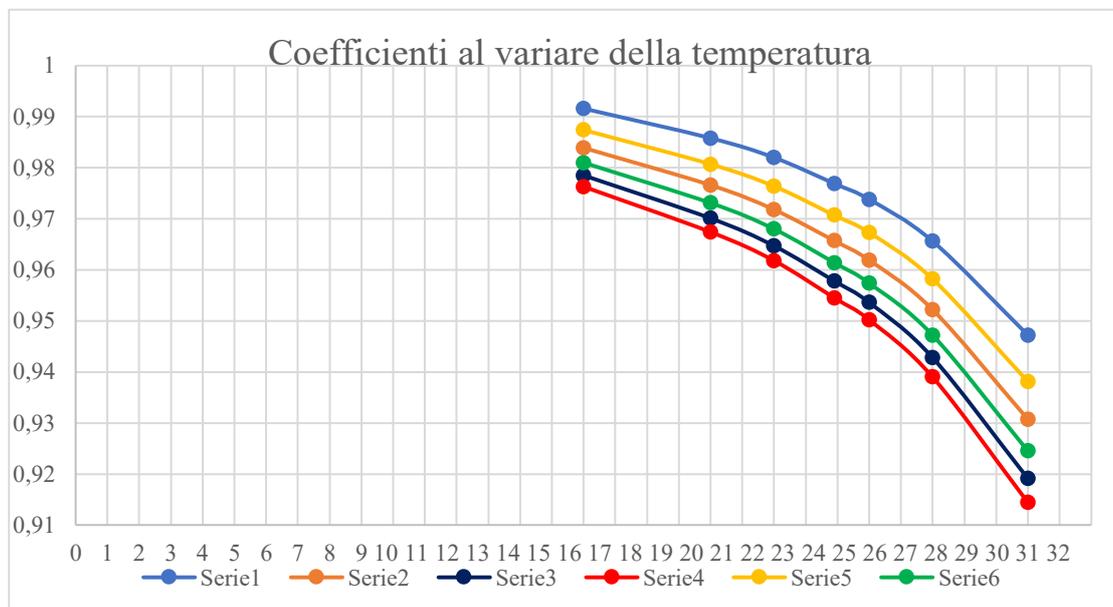


Figura 8.6

In questo invece sono riportate le curve che descrivono come varia il coefficiente in funzione del parametro  $d_0$  per diversi valori di temperatura (T).

Serie 1  $T = 30^\circ\text{C}$ , Serie 2  $T = 16^\circ\text{C}$ , Serie 3  $T = 25^\circ\text{C}$ , Serie 4  $T = 23,9^\circ\text{C}$ , Serie 5  $T = 22^\circ\text{C}$   
Serie 6  $T = 20^\circ\text{C}$ , Serie 7  $T = 27^\circ\text{C}$

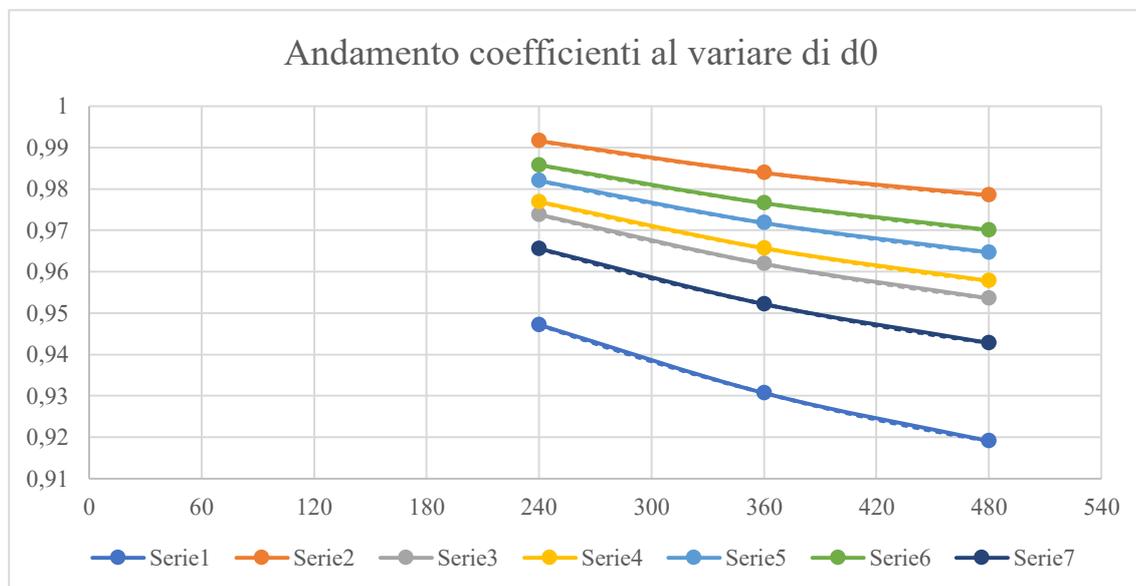


Figura 8.7

Così interpolando le curve è stata ricavata un'equazione a due variabili che permette di ottenere il valore del coefficiente moltiplicativo in funzione della temperatura esterna e del parametro d0.

$$C(T, d0) = \left(\frac{0,0002T + 0,0002}{28800}\right)d0^2 + \left[\frac{-0,0000138T^3 + 0,0006T^2 - 0,0138T + 0,0372}{720}\right]d0 - 0,0000079T^3 + 0,0005T^2 - 0,0102T + 1,0789$$

Quindi ad ogni apertura porta il coefficiente viene moltiplicato al parametro d0 andando in questo modo a ridurlo fino a quando non risulta che  $d0 \times C \times C \times C \dots \leq$  del tempo registrato dal timer, momento in cui si attiva lo sbrinamento.



# **Capitolo 9**

## **Stratificazione termica**

A causa della differenza di densità tra aria più calda e aria più fredda, all'interno del vano di un armadio frigorifero o congelatore, si assiste al fenomeno della stratificazione termica, ovvero, l'aria più calda sale verso l'alto mentre l'aria più fredda si deposita sul fondo del vano (convezione termica naturale). Grazie alla ventola dell'evaporatore è però possibile creare delle turbolenze all'interno del vano che limitano la stratificazione in modo tale da avere una distribuzione di temperatura più omogenea. Risulta però quasi impossibile evitare completamente questo fenomeno dal momento che all'interno del vano ci saranno sempre zone a diversa temperatura. È però possibile appunto adottare dei metodi che fanno in modo che la temperatura nelle varie zone del vano non differisca per più di circa 3°C, come si evince dalle diverse prove di laboratorio eseguite.

Analizzando gli andamenti di temperatura per diverse prove a carico eseguite su un armadio congelatore, si può riscontrare che le temperature più alte si registrano proprio nella parte superiore del vano a dimostrazione della stratificazione termica. È però vero anche che la differenza di temperatura con il punto più freddo del vano è esigua, nei frigoriferi statici si assiste, in genere, ad una differenza di temperatura più netta.

La stratificazione termica dipende anche dalla termostatazione della macchina, infatti, si assiste ad una diversa stratificazione quando il compressore è acceso e quando il compressore è spento (quando il compressore è OFF, l'aria fredda si deposita verso il basso, mentre l'aria più calda risale verso la parte alta del vano, quando il compressore è ON, le turbolenze generate dalla ventola dell'evaporatore modificano la stratificazione). La stratificazione termica dipende inoltre dalla direzione del flusso convettivo che si instaura all'interno del vano, è testimone di ciò la differenza di temperatura esistente tra i pacchetti che giacciono su uno stesso ripiano.

Un metodo per limitare la stratificazione consiste nello sfruttare la brina che si genera sull'evaporatore ovvero si lascia la ventola dell'evaporatore accesa anche quando il compressore è spento. Inoltre, così facendo, si riduce la formazione di brina sull'evaporatore perché lo scambio termico è maggiore a causa della convezione forzata che si instaura. Infine, in questo modo si consente di ritardare l'aumento di temperatura all'interno del vano nel momento in cui il compressore non è in funzione.

# **Capitolo 10**

## **Ricerca dei guasti**

Una parte importante del percorso formativo riguarda la comprensione del funzionamento dei componenti al fine di poter intervenire in caso di malfunzionamenti

10.1

### **Test sul gruppo motore**

Attraverso dei trasduttori di temperatura è stato possibile registrare l'andamento delle temperature lungo i punti caratteristici dell'impianto, ovvero, ingresso e uscita evaporatore, ingresso e uscita compressore e ingresso e uscita condensatore.

Disattivando la ventola dell'evaporatore è stato possibile verificare che tutte le temperature caratteristiche si abbassano, in particolare quelle di ingresso e uscita evaporatore, perché in tale modo si limita lo scambio termico con il vano.

Disattivando la ventola del condensatore, invece, tutte le temperature caratteristiche si alzano, in particolare quella di uscita compressore e quella di ingresso condensatore, perché in questo modo si limita lo scambio termico tra il condensatore e l'ambiente esterno.

10.2

### **Mancata chiusura porta ma micro attivato**

La ventola dell'evaporatore serve a creare turbolenze all'interno del vano che hanno lo scopo di limitare la stratificazione termica. Se la porta è aperta e la ventola continua a girare, si induce una convezione forzata con l'ambiente esterno che causa un incremento eccessivo dello scambio termico. Per questo motivo si utilizza il micro porta che, quando è attivato, a porta chiusa, fa girare la ventola, mentre quando è disattivato, a porta aperta, blocca la ventola.

10.3

### **Carica refrigerante in eccesso o in difetto**

Si può stabilire un certo intervallo in peso di carica che può soddisfare le diverse esigenze di funzionamento dell'impianto che si vogliono avere.

In presenza di un elevato carico termico all'interno del frigo, il fluido refrigerante evapora agevolmente, mentre se il carico termico è basso, evapora con più difficoltà, dunque, la massa di refrigerante con cui viene caricato l'impianto dipende anche dal carico termico. Nei sistemi a capillare la carica di refrigerante può risentire di più fattori.

Nel caso dell'impianto con valvola di laminazione termostatica la variabilità risulta essere meno accentuata in quanto la valvola è in grado di regolare il flusso di refrigerante attraverso la rilevazione del surriscaldamento. La valvola, in sostanza, è in grado di modificare il flusso di refrigerante in relazione alle esigenze dell'evaporatore. Se la massa di refrigerante è in eccesso, all'uscita dell'evaporatore potrebbero permanere delle tracce di liquido, il che è un effetto fortemente indesiderato in quanto all'ingresso del compressore deve avere vapore surriscaldato. Se la massa di refrigerante è, però, in difetto, potrei non garantire lo scambio di calore che mi consente di mantenere gli alimenti alla temperatura desiderata.

10.4

#### **Temperatura ambiente oltre i limiti ammessi**

Se la temperatura dell'ambiente esterno salisse al di sopra del limite ammesso (50°C), la sonda non riuscirebbe più a rilevare la temperatura di stacco del compressore, di conseguenza il termoregolatore continuerebbe a far lavorare il compressore non garantendo così la corretta termostatazione.

Se la temperatura scendesse invece al di sotto del limite ammesso (10°C), il fluido raggiungerebbe una pressione talmente bassa da non poter vincere le perdite di carico del circuito, di conseguenza non riuscirebbe a circolare nell'impianto.

10.5

#### **Temperatura vano al limite superiore**

Dal momento che il vano cede calore all'evaporatore, se la temperatura del vano è al limite superiore probabilmente ci sono problemi di scambio termico con l'evaporatore. Quindi o l'evaporatore si è impaccato oppure si trova ad una temperatura superiore rispetto a quella di esercizio. Penso che in questo caso sia necessari controllare anche la temperatura rilevata dalla sonda evaporatore per verificare se le due temperature conservano il delta di esercizio o se divergono.

10.6

**Mal funzionamento resistenza anticondensa bacinella**

La resistenza anticondensa serve a far evaporare la condensa che si forma a causa del ponte termico che si viene a creare lungo la cornice interna della porta. In caso di mal funzionamento, si formerà appunto uno strato di condensa in corrispondenza del ponte termico.

10.7

**Mal funzionamento sbrinamento-interruzione solenoide**

Il mal funzionamento dello sbrinamento provoca l'impacco dell'evaporatore, il quale non scambierà più calore con il vano. Di conseguenza il delta T tra vano ed evaporatore aumenta (la temperatura dell'evaporatore diminuisce mentre la temperatura del vano aumenta).

# **Capitolo 11**

## **Conclusione**

La soluzione riguardo la gestione dello sbrinamento che è stata trovata si basa sull'ipotesi di un andamento lineare tra i tempi di sbrinamento e la temperatura dell'ambiente esterno, quando invece probabilmente la relazione è diversa. Il risultato ottenuto è dunque da considerarsi valido se si avvicina in maniera accettabile alla realtà.

Inoltre, bisogna considerare che le variabili che influenzano la formazione di brina tra le alette dell'evaporatore sono molteplici, di conseguenza è impossibile poterle considerare tutte o meglio sarebbero necessari dei sistemi di controllo molto più evoluti del termostato che si utilizza normalmente facendo così aumentare considerevolmente il costo di produzione.

Quello che si può fare è quindi scegliere le variabili che si ritengono più gravose e in base a queste impostare la migliore strategia di sbrinamento in modo tale da trovare il giusto compromesso tra prestazione e consumo.

Un sistema di controllo efficiente potrebbe registrare la temperatura e l'umidità all'interno della cuffia dell'evaporatore e in base dei valori critici avviare lo sbrinamento. Altri prototipi, invece, utilizzano dei sensori ottici per la rilevazione dello strato di brina sulle alette dell'evaporatore. Esistono anche delle tecniche passive attraverso le quali la superficie esterna dell'evaporatore viene rivestita dei materiali che non solo posticipano la formazione della brina, ma riescono a ridurre drasticamente l'aderenza del ghiaccio.

Per gli armadi frigoriferi (che lavorano a temperature positive) ci sono metodi di sbrinamento che si fondano sull'accensione e lo spegnimento delle ventole dell'evaporatore e che sfruttano anche la brina che si forma per poter raffreddare ulteriormente il vano.

Come già detto le incognite sono tante, di conseguenza anche le soluzioni che si possono prevedere sono molte, tutto dipende dalle condizioni di utilizzo della macchina.

## **Bibliografia**

Giovanni Cesini, Giovanni Latini; Fabio Polonara, Fisica tecnica, Città studi

Josè Miguel Maldonado, Gabriel Zsembinski, Alvarode Gracia, Pere Moreno, Xavier Alberts, Miguel Gonzalez, Luisa F. Cabeza, Strategie di controllo per il funzionamento delle ventole di sbrinamento e dell'evaporatore nei congelatori walk-in, International Journal of Refrigeration, Volume 91, Pagine 101-110

R. Mastrullo, A. W. Mauro, L. Menna, A. Palma, G. P. Vanoli, Modello transitorio di congelatore verticale con aperture delle porte ed effetti di sbrinamento, Applied Energy, Volume 121, Pagine 38-50

Pradeep Bansal, David Fothergill, Ryan Fernandes, Analisi termica di ciclo di sbrinamento in un congelatore domestico, International Journal of Refrigeration, Volume 33, Pagine 589-599

Mohammed Amer, Chi-Chuan Wang, Revisione dei metodi di sbrinamento, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 73, Pagine 53-74

Mahade Omran Ali Abdulla, Emrah Deniz, Mustafa Karagoz, Gursah Guruf, Uno studio sperimentale su un nuovo metodo di sbrinamento per celle frigorifere, Applied Thermal Engeneering, Volume 188, Pagine 116-573