
Il diagramma entalpico

Il diagramma entalpico

edizione **00 - gennaio 2018**

realizzata da **Gianfranco Cattabriga**

Il presente manuale è destinato ai partecipanti ai **Corsi di aggiornamento professionale per frigoristi** e la sua distribuzione è gratuita.

È vietata la riproduzione anche parziale del testo.

Indice

Nota introduttiva	1
Le proprietà di un refrigerante	5
La temperatura - T	5
Il volume - V	5
La pressione - P	5
L'entalpia - H	6
L'entropia - S	6
Il diagramma e i refrigeranti	6
I diversi tipi di refrigerante	6
Il diagramma entalpico	7
La saturazione	8
Lo stato liquido	8
Lo stato di vapore	8
Le zone del diagramma entalpico	9
Il ciclo frigorifero e il diagramma entalpico	9
La condensazione	10
L'espansione	10
L'evaporazione	10
La compressione	11
L'importanza del sottoraffreddamento	11
I refrigeranti zeotropici	12
Considerazioni finali	13
Definizioni	14
Bibliografia	17

Nota introduttiva

Il diagramma entalpico, detto anche diagramma termodinamico pressione/entalpia, è uno strumento di visualizzazione del ciclo frigorifero di grande utilità per la comprensione dei fenomeni connessi con le variazioni di pressione - volume - contenuto termico.

È la carta geografica sulla quale si segue il percorso del ciclo frigorifero.

Per ciclo frigorifero si intende l'insieme delle trasformazioni termodinamiche cui viene sottoposto un fluido refrigerante per consentirgli, attraverso appositi scambiatori, di effettuare il trasferimento di calore da un ambiente a bassa temperatura a un altro a temperatura più alta.

La conoscenza del diagramma entalpico consente di avere una immediata visualizzazione di tutti gli effetti interconnessi quando cambiano le condizioni operative.

Le informazioni fornite dal diagramma nella fase di progetto dell'impianto sono insostituibili per il dimensionamento dei principali componenti del circuito frigorifero e verificarne il rispetto dei limiti di impiego.

Le proprietà di un refrigerante

Quanto avviene durante il ciclo frigorifero, ossia il succedersi delle trasformazioni subite dal fluido frigorifero, può essere efficacemente rappresentato ricorrendo al diagramma pressione/entalpia, detto anche diagramma entalpico.

In un sistema frigorifero noi abbiamo a che fare con un fluido refrigerante che si manifesta in due differenti stati di aggregazione:

- *stato liquido*
- *stato gassoso*

Durante lo svolgersi del ciclo frigorifero, il refrigerante muta periodicamente il suo stato di aggregazione passando da uno all'altro; la loro conoscenza è necessaria per una migliore comprensione del diagramma entalpico del refrigerante.

Le proprietà del fluido frigorifero che vengono coinvolte nell'azione refrigerante sono:

- | | |
|----------------------|----------|
| • <i>temperatura</i> | T |
| • <i>volume</i> | V |
| • <i>pressione</i> | P |
| • <i>entalpia</i> | H |
| • <i>entropia</i> | S |

La temperatura - T

La temperatura di un corpo possiamo definirla come il livello energetico al quale si trova il calore contenuto nel corpo stesso.

Tale concetto nulla dice sulla quantità di calore contenuta nel corpo oppure quanto calore è necessario sottrarre o somministrare per modificarne la sua temperatura.

La temperatura di un corpo si misura mediante strumenti detti **termometri** che sono graduati secondo scale convenzionali.

Nei paesi che usano il sistema metrico decimale è in uso la scala dei gradi centigradi (detta anche scala Celsius, dal nome dell'astronomo svedese Anders Celsius che l'ha ideata).

La scala Celsius ha la particolarità di dividere in

cento intervalli lo spazio compreso tra il punto di congelamento e il punto di ebollizione dell'acqua (in condizioni standard di pressione) ai quali quindi vengono a corrispondere i valori di 0°C e 100°C.

Nei paesi anglosassoni la temperatura è misurata secondo la scala Fahrenheit, il cui simbolo è °F.

Tale scala di misura della temperatura prende nome dal fisico tedesco Gabriel Fahrenheit che attribuì il valore 0°F alla temperatura alla quale si scioglie una miscela di ugual misura di ghiaccio e sale e il valore di 96°F alla temperatura del sangue, utilizzando inizialmente il sangue di cavallo.

Per motivi vari, la sua scala di temperatura non era molto precisa e successivi ricalcoli hanno riallineato la scala che ora prevede che 32°F e 212°F corrispondano alle temperature di congelamento ed ebollizione dell'acqua.

Nel diagramma entalpico, la linea isoterma è la linea che congiunge i punti caratterizzati dalla medesima temperatura.

Il volume - V

Il volume è la misura dello spazio occupato da un gas; è consuetudine utilizzare il volume specifico inteso come la quantità di metri cubi (m³) occupati da 1 chilogrammo (kg) di un gas, quindi m³/kg; rappresenta il reciproco della densità.

Nel diagramma entalpico, la linea isocora è la linea che congiunge i punti caratterizzati dal medesimo volume.

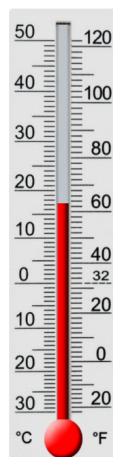
La pressione - P

la pressione è la misura dell'effetto di una forza esercitata sull'unità di superficie di un corpo.

Comunemente si definisce **pressione** l'effetto di una forza che provoca una contrazione del volume di una sostanza gassosa.

L'azione di contrazione si definisce più correttamente **compressione**, nel senso che la pressione è la misura dello stato di compressione nel quale la sostanza si trova.

Visto dall'interno della sostanza, l'effetto della compressione si traduce in una **tensione**, cioè nella



tendenza della sostanza a riacquistare il massimo volume consentitole.

Lo stato di tensione si diffonde uniformemente nella massa gassosa, la quale quindi esercita una pressione uniforme sulle pareti del recipiente che la contiene, anche se la tensione è stata indotta applicando la pressione esterna in un solo punto, ad esempio attraverso la valvola di una camera d'aria.

L'ambiente è soggetto alla pressione esercitata dagli strati dell'atmosfera che gravano su di esso.

Questo valore (denominato pressione atmosferica) è soggetto a piccole variazioni di tipo **climatico** (legate alla densità della colonna d'aria sovrastante una data località) oppure di tipo **altimetrico** (legate allo spessore della colonna d'aria sovrastante).

Una località di alta montagna è gravata da uno strato atmosferico meno spesso ed è quindi soggetta a minore pressione.

Malgrado queste variazioni, la pressione atmosferica costituisce una condizione permanente della vita quotidiana e quindi il suo valore medio (misurato al livello del mare) è stato assunto convenzionalmente come punto zero nella scala pratica della misura delle pressioni e viene denominata **pressione assoluta**.

Questa stessa convenzione definisce come positiva superiore a questo valore e prende il nome di **pressione relativa o manometrica**, mentre le pressioni inferiori (che si realizzano necessariamente svuotando un contenitore mediante una apposita pompa) si definiscono **vuoto**.

L'unità SI di misura della pressione è il Pa (pascal); in un recente passato, nella pratica quotidiana, erano usate due unità denominate atmosferica metrica (at) e atmosfera fisica (atm).

La prima equivale alla pressione di 1 kg/cm²; la seconda, desunta dalla misura della pressione atmosferica in condizioni prefissate, equivale alla pressione esercitata da una colonna di mercurio alta 760 mm.

Nelle attività svolte nei paesi anglosassoni, la pressione viene misurata in PSI (Pound Square Inch) libbre su pollice quadrato dove:

1 PSI = 6894,76 Pa = 0,0689 bar.

La differenza tra pressione assoluta e pressione manometrica è circa 14,7 PSI oppure 30" (inch) di colonna di mercurio.

In conclusione:

- la **pressione assoluta** è la pressione misurata assumendo come riferimento il vuoto; quindi la pressione assoluta non prevede valori negativi
- la **pressione relativa o manometrica** è la pressione misurata assumendo come valore zero di riferimento la pressione atmosferica

Nello svolgimento delle attività frigorifere, la pressione manometrica è di gran lunga la più utilizzata mentre l'uso della pressione assoluta è limitato alla lettura

del diagramma entalpico, oggetto della presente pubblicazione.

Nel diagramma entalpico, la linea isobara è la linea che congiunge i punti caratterizzati dalla medesima pressione.

L'entalpia - H

L'entalpia, calore totale o contenuto termico sono nomi equivalenti che si riferiscono alla stessa quantità.

Il calore è una forma di energia che può essere trasferita, ma non può essere distrutta e fluisce spontaneamente da un corpo più caldo a un corpo più freddo anche se di natura diversa.

La materia è caratterizzata dalla propria energia interna, quella propria del moto termico delle sue molecole.

L'entalpia che il diagramma entalpico del refrigerante prende in esame è riferito al contenuto di calore di un chilogrammo (1 kg) del refrigerante stesso; quindi l'unità di misura dell'entalpia specifica, nel sistema SI è kJ/kg.

Nel diagramma entalpico, la linea isoentalpica è la linea che congiunge i punti caratterizzati dal medesimo contenuto entalpico.

L'entropia - S

In termodinamica l'entropia costituisce una misura della qualità dell'energia termica.

Il calore caratterizzato da bassa entropia è il più pregiato di quello ad alta entropia, che è difficilmente utilizzabile perché *"degradato"*.

In ultima analisi, l'entropia può essere definita come "il grado di non utilizzabilità del calore".

Nel diagramma entalpico, la linea isoentropica è la linea che congiunge i punti caratterizzati dalla medesima entropia.

Le linee isoentropiche del diagramma entalpico servono per calcolare l'energia spesa per la compressione del refrigerante e per determinare la temperatura di fine compressione.

Il diagramma e i refrigeranti

Prima di affrontare l'argomento "diagramma entalpico", è indispensabile fare una breve panoramica sui diversi "tipi" di refrigerante che l'industria del freddo utilizza per la carica dei circuiti frigoriferi.

La composizione chimica e il legame tra i componenti dei diversi fluidi influenza notevolmente le prestazioni, il comportamento che ogni refrigerante offre durante le sue trasformazioni all'interno del ciclo frigorifero.

I diversi tipi di refrigerante

L'introduzione di fluidi HFC idrofluorocarburi, ha modificato notevolmente il modo di operare dei tecnici del freddo, sovvertendo alcune procedure acquisite nel tempo ma introducendo nuovi approcci alla gestione dei refrigeranti; modi di operare

tecnicamente più rigorosi, rispettosi della qualità dell'ambiente e delle risorse energetiche. Senza tenere conto dei vari refrigeranti banditi dai regolamenti internazionali, valutiamo i diversi fluidi sulla base del loro comportamento durante i cambiamenti di stato.

- *refrigerante puro*

Con tale definizione si identifica un fluido refrigerante che durante il cambiamento del suo stato fisico (da liquido a vapore e/o viceversa) vede la sua temperatura rimanere costante dall'inizio alla fine del cambiamento di stato (ovviamente rimanendo costante la pressione), così come potremmo dire che la sua pressione rimane costante dall'inizio alla fine del cambiamento di stato (ovviamente rimanendo costante la temperatura).

Le condizioni alle quali avviene il cambiamento di stato (temperatura-pressione) dipendono dalla composizione chimica del fluido e sono rilevabili dalla lettura di un apposito manometro, regolo, tabella oppure applicazione per smartphone.

- *refrigerante azeotropico o miscela azeotropica*

Il termine azeotropico o azeotropo deriva dal greco: α = non, $\zeta\epsilon\epsilon\iota\nu$ = bollire, $\tau\rho\acute{o}\pi\omicron\varsigma$ = cambiamento, quindi *bollore immutato* e viene assegnato a una miscela di fluidi puri.

Un azeotropo si forma quando tra le molecole delle due o più sostanze che lo compongono si manifestano fenomeni di attrazione dovuti alla formazione di legami intermolecolari; a causa di tali legami il comportamento della miscela, che non varia la sua composizione durante il cambiamento di stato, è del tutto simile a quello di un refrigerante puro.

- *refrigerante zeotropico o miscela zeotropica*

Le miscele zeotropiche non presentano alcun fenomeno di attrazione e formazione di legami intermolecolari, durante il cambiamento di stato ogni fluido puro che compone la miscela si comporta secondo la propria natura chimica.

La conseguenza è che il cambiamento di stato che avviene a pressione costante, vedrà una temperatura di inizio diversa da quella presente alla fine del cambiamento; tale differenza chiamata *scorrimento* oppure *glide* può essere più o meno accentuata in funzione dei fluidi che compongono la miscela.

Il diagramma entalpico

Come precedentemente illustrato, cinque sono le differenti proprietà di un fluido refrigerante che sono coinvolte dello sviluppo di un ciclo frigorifero.

Se ci fossero solo tre proprietà, la tracciatura del diagramma sarebbe più semplice.

Il diagramma di fig.1 rappresenta la correlazione tra

pressione, temperatura e volume di un ipotetico fluido refrigerante.

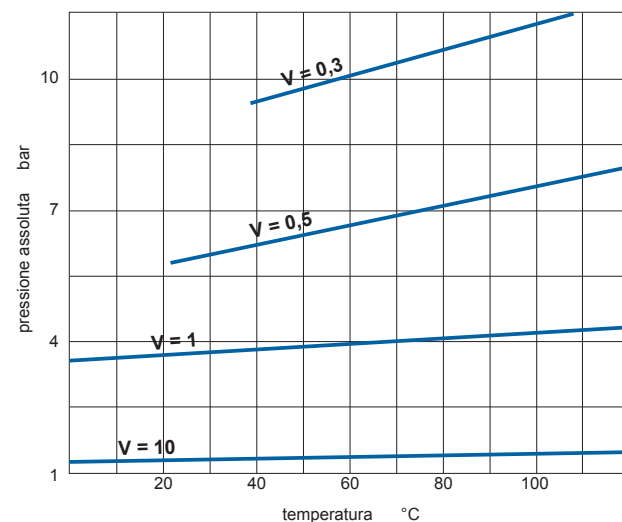


fig.1

L'asse delle ascisse (asse x) presenta l'andamento della temperatura riferita alla pressione assoluta, riportata sull'asse delle ordinate (asse y).

Le linee interne al diagramma rappresentano il luogo dei punti aventi la medesima pressione (linee isobare). Diversamente, il diagramma di fig. 2 mostra l'entropia dell'ipotetico fluido refrigerante sull'asse delle ascisse (asse x) mentre la pressione assoluta è riportata sull'asse delle ordinate (asse y).

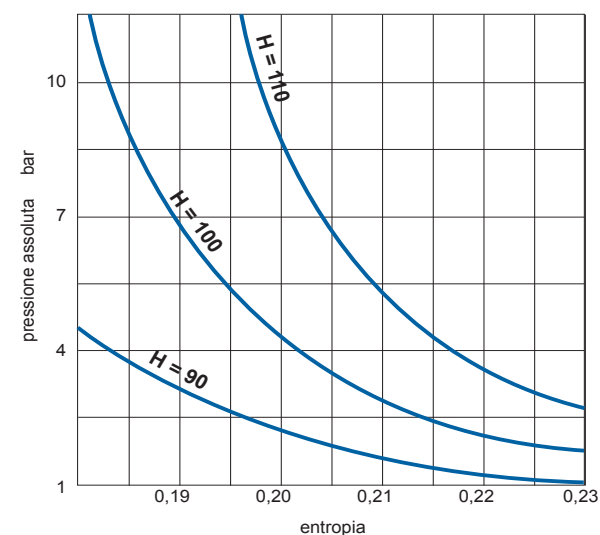


fig.2

All'interno del diagramma ogni curva rappresenta il luogo dei punti con medesima entalpia (linee isoentalpiche).

Al fine di includere nei diagrammi le altre due proprietà, è necessario aggiungere altrettanti curve che renderebbero i diagrammi di difficile lettura e interpretazione.

Il diagramma di fig. 3 includerebbe quattro proprietà; entalpia ed entropia, rispettivamente sull'asse

delle ordinate (asse y) e sull'asse delle ascisse (asse x), mentre le curve contenute nel diagramma rappresentano l'andamento della pressione e quello della temperatura; questo è il diagramma di Mollier.

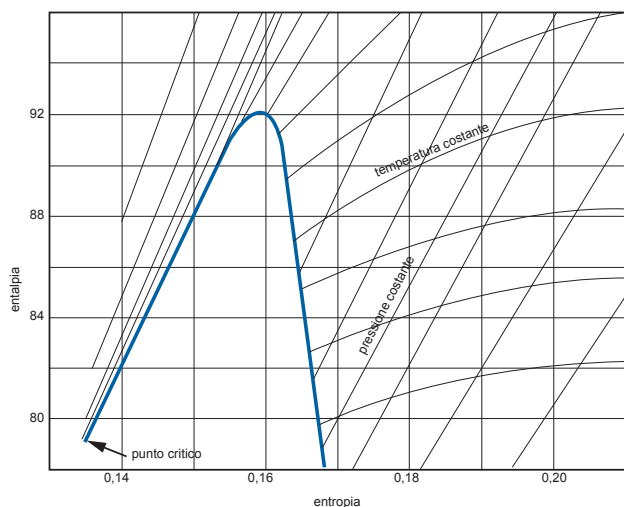


fig.3

In Germania, il professor Mollier era un insegnante che si interessava nella tracciatura di diagrammi. Sviluppando numerosi diagrammi per il vapore d'acqua ha elaborato numerosi metodi di rappresentare le proprietà in forma di diagramma.

Anche se il suo nome è legato ad altri diagrammi, quello appena illustrato è quello che è maggiormente conosciuto.

Tale diagramma è principalmente usato in refrigerazione con pressione assoluta (asse y) ed entalpia (asse x); al suo interno sono riportate le curve del volume (isocora), della temperatura (isoterma) ed dell'entropia (isoentropica) ed è anche conosciuto come diagramma P-H (pressione-entalpia) al fine di non confonderlo con gli altri diagrammi elaborati da Mollier.

Considerando che i refrigeranti hanno diverse caratteristiche chimico-fisiche, ne consegue che i singoli diagrammi pur avendo un aspetto molto simile tra loro coinvolgono numeri estremamente diversi.

A titolo di esempio possiamo confrontare i seguenti diagrammi (fig.4), uno relativo al refrigerante R22 e l'altro al refrigerante R134a.

Ciascun punto del diagramma rappresenta uno stato particolare del fluido refrigerante.

Prima di entrare nei dettagli del diagramma entalpico, è necessario definire gli stati ai quali il refrigerante si può trovare che sono la saturazione, lo stato liquido e lo stato di vapore.

La saturazione

La saturazione è quella condizione in cui un liquido e il suo vapore coesistono e si trovano in equilibrio, il liquido è "pronto" per iniziare a trasformarsi in vapore

così come il suo vapore è "pronto" per iniziare a trasformarsi in liquido; tutto dipende dalla temperatura del corpo (o dal fluido) che dall'esterno entra in contatto con il fluido in saturazione.

Un fluido in saturazione messo in contatto con un corpo più caldo, sottrae calore a quest'ultimo e trasforma la sua frazione liquida in vapore; il calore sottratto si chiama calore latente di vaporizzazione.

Se, viceversa, viene in contatto con un corpo più freddo, il fluido in saturazione cede calore a quest'ultimo e questo provoca la condensazione della sua frazione gassosa; il calore ceduto si chiama calore latente di condensazione.

Sia il processo di evaporazione del fluido in saturazione che quello di condensazione

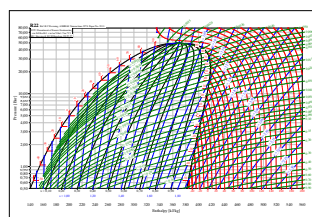


fig.4 - R22

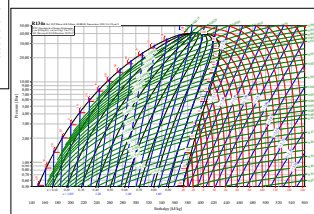


fig. 4 - R134a

avvengono a una temperatura e pressione ben definite e tra loro correlate e tale rapporto rimane costante per tutto il processo di cambiamento di stato.

Come vedremo più avanti, la variazione della pressione influenza il cambiamento di stato; ridurre la pressione favorisce l'evaporazione, aumentarla favorisce la condensazione.

Per ogni fluido refrigerante in saturazione, ad ogni valore di pressione (pressione di saturazione) corrisponde un valore di temperatura (temperatura di saturazione).

Questo legame vale solo per i refrigeranti puri oppure per quelli azeotropici; per i refrigeranti zeotropici oppure quasi azeotropici è necessaria una spiegazione che rimandiamo a pagina 12.

Lo stato liquido

Un fluido si trova allo stato liquido quando la sua temperatura a parità di pressione, abbia subito una diminuzione rispetto a quella alla quale il fluido si trova in saturazione.

Un fluido in forma liquida, avendo una temperatura inferiore a quella di saturazione che compete alla pressione alla quale si trova, si definisce sottoraffreddato.

Un fluido liquido è, per antonomasia, un fluido sottoraffreddato; viceversa, un fluido sottoraffreddato è, per antonomasia, un liquido.

Lo stato di vapore

Un fluido si trova allo stato di vapore quando la sua temperatura a parità di pressione, abbia subito un

aumento rispetto a quella alla quale il fluido si trova in saturazione.

Un fluido in forma di vapore, avendo una temperatura *superiore* a quella di saturazione che compete alla pressione alla quale si trova, si definisce *surriscaldato*. Un vapore è, per antonomasia, un fluido *surriscaldato*; viceversa, un fluido *surriscaldato* è, per antonomasia, un vapore.

Le zone del diagramma entalpico

Prendendo visione del diagramma entalpico di fig.5, possiamo identificare tre diverse aree in rappresentanza delle tre diverse condizioni alle quali si può trovare il refrigerante.

La zona del diagramma posta alla estrema sinistra (LIQ) raccoglie tutte le condizioni del refrigerante liquido (fluido *sottoraffreddato*); la curva che la separa dall'area centrale si chiama "curva del liquido saturo" o "*bubble point*".

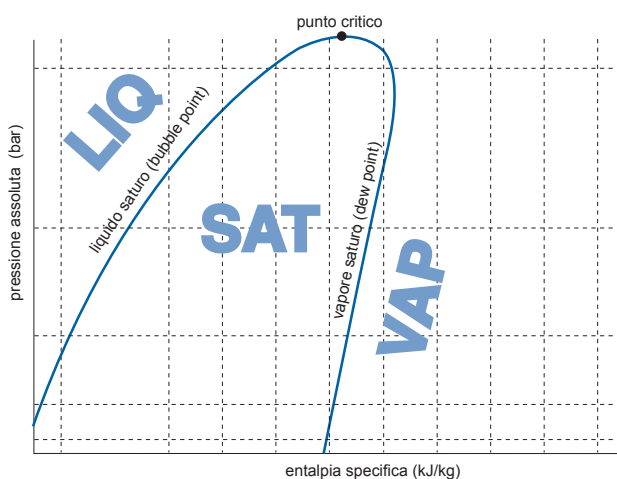


fig.5

L'area centrale (SAT) raccoglie tutte le condizioni del refrigerante in saturazione, mentre la zona all'estrema destra (VAP) è relativa al refrigerante in forma di vapore (fluido *surriscaldato*).

La curva che separa la saturazione dalla zona del vapore si chiama "linea del vapore saturo" o "*dew point*".

All'interno delle zone SAT e VAP, le linee tracciate evidenziano la correlazione pressione-temperatura. È evidente come, in saturazione, il refrigerante passando dalla fase liquida a quella di vapore o viceversa, non subisce variazioni di temperatura ma solo di entalpia (asse x).

La zona del refrigerante liquido non presenta curve, ma considerando che un liquido è un fluido incompressibile non è possibile correlare temperatura e pressione.

All'aumentare della sua temperatura, un liquido si dilata e, quindi, ad una temperatura possiamo associare qualsiasi pressione; dalla curva del liquido

saturo la curva caratteristica del refrigerante prosegue verticalmente così che a un valore di temperatura di saturazione corrisponde un solo valore di entalpia ma un numero infinito di pressioni.

Riepilogando: (vedi fig.5)

- zona del *liquido sottoraffreddato*; ossia del fluido a temperatura inferiore a quella di saturazione
- curva del *liquido in condizioni di saturazione*; caratterizzata dal titolo di vapore x uguale a zero

Il titolo di vapore di una miscela liquido-vapore è dato dal rapporto tra il peso del vapore e il peso della miscela.

Pertanto un titolo di vapore $x = 0,3$ è relativo a una miscela costituita dal 30% di vapore e dal 70% di liquido.

Tutte le curve a titolo di vapore $x =$ costante confluiscono nel "punto critico", cui corrisponde la massima temperatura alla quale il vapore può diventare liquido, se assoggettato a compressione.

- zona del *vapore saturo umido*; caratterizzata da valori progressivamente crescenti del titolo di vapore x
- curva del *vapore saturo secco*; caratterizzata da titolo di vapore x uguale a 1
- zona del *vapore surriscaldato*; ossia a temperatura superiore a quella di saturazione

Il ciclo frigorifero e il diagramma entalpico

Il fine di questo paragrafo è quello di focalizzare il percorso ed i cambiamenti di stato del fluido refrigerante all'interno del circuito frigorifero.

Il ciclo frigorifero viene definito come la trasformazione periodica di un fluido del quale siano variate in modo definito le caratteristiche di pressione, volume e temperatura.

In una macchina frigorifera si realizza un ciclo termico chiuso nel corso del quale una carica di fluido refrigerante ritorna periodicamente ad assumere i valori iniziali di energia interna e come tale il ciclo frigorifero non ha un punto di inizio definito; una volta scelto un punto qualsiasi lo stesso rappresenta la fine del ciclo frigorifero e l'inizio del ciclo successivo. Il ciclo frigorifero si compone si articola in quattro fasi **compressione, condensazione, espansione ed evaporazione** il cui alternarsi consente di trasferire calore da un ambiente interno a un ambiente esterno. Esaminiamo ora il ciclo frigorifero tracciandolo su un diagramma entalpico generico (fig.6);

Il classico ciclo frigorifero che prendiamo ora in esame è quello del percorso D-A1 A1-B B-C1 C1-D; ricordiamo che, non essendoci un preciso punto di inizio, una volta scelto un punto qualsiasi lo stesso rappresenta la fine del ciclo frigorifero e l'inizio del ciclo successivo.

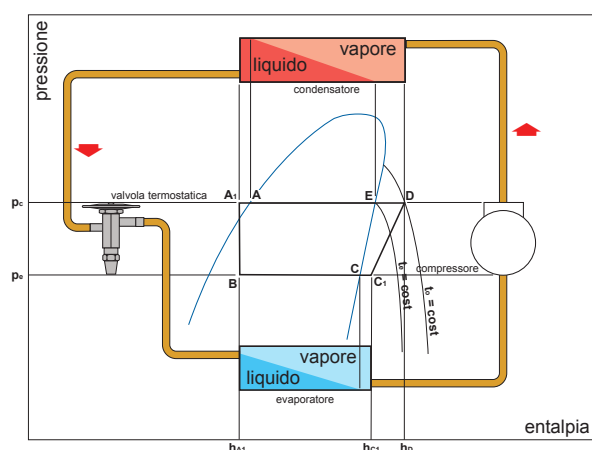


fig.6

Per semplicità di esposizione, le quattro fasi che compongono il ciclo frigorifero saranno illustrate considerando un refrigerante puro o azeotropico; i refrigeranti zeotropici richiedono considerazioni specifiche riportare in uno specifico capitolo.

La condensazione

Con il termine condensazione si definisce quel fenomeno naturale che implica il passaggio di fase di un refrigerante dallo stato di vapore allo stato liquido. In un circuito frigorifero il cambiamento di stato avviene all'interno del condensatore che è uno scambiatore di calore che mette in contatto il refrigerante allo stato di vapore con un fluido caratterizzato da una temperatura inferiore.

Nel passaggio attraverso il condensatore, il refrigerante (che ha elevati valori di pressione, temperatura ed entalpia specifica) trasferisce il suo calore al fluido circostante che è a temperatura inferiore.

Il processo di condensazione avviene a pressione costante che, in un tipico ciclo frigorifero, può essere identificato con una retta orizzontale che attraversando la zona della saturazione ha la sua origine nella zona del vapore e termina nella zona del liquido (fig.6).

Il refrigerante in forma di vapore (per antonomasia surriscaldato) cede calore al mezzo di raffreddamento che fluisce esternamente al condensatore (calore sensibile) abbassando la sua temperatura.

Nel momento in cui la temperatura riducendosi assume un valore pari alla temperatura di saturazione che compete alla pressione del refrigerante, si forma la prima traccia di refrigerante liquido, ha inizio quindi il processo di condensazione (fig.6, punto E).

Persistendo lo scambio di calore (calore latente di condensazione) tra refrigerante e fluido di raffreddamento, prosegue il cambiamento di stato fino alla completa condensazione (fig.6, punto A).

Ora la condensazione del refrigerante è ultimata ma nella parte terminale del condensatore prosegue lo scambio di calore (calore sensibile) tra fluido esterno

di raffreddamento e refrigerante, ne consegue un abbassamento di temperatura di quest'ultimo e, quindi, l'aumento del suo sottoraffreddamento; (fig.6, tratto A-A1).

Tanto maggiore è il contatto tra refrigerante liquido e fluido di raffreddamento maggiore sarà il sottoraffreddamento del refrigerante.

Il sottoraffreddamento del liquido è uno dei parametri che il progettista deve considerare per procedere al dimensionamento dell'organo di laminazione che sia il capillare oppure la valvola d'espansione termostatica.

L'espansione

Con il termine espansione si definisce il repentino abbassamento di pressione che il refrigerante subisce quando attraversa l'organo di laminazione (valvola termostatica, capillare, valvola automatica, etc.).

La trasformazione che il refrigerante subisce avviene a entalpia specifica costante (trasformazione isoentalpica) e senza scambio di calore con l'esterno (trasformazione adiabatica).

Una certa frazione del refrigerante liquido evapora sottraendo il necessario calore latente (di vaporizzazione) alla rimanente massa di refrigerante liquido che così si raffredda.

Come detto in precedenza, la trasformazione si svolge a entalpia costante in quanto il calore sensibile perduto dal refrigerante liquido lo si ritrova sotto forma di calore latente nel vapore che si sviluppa.

Al termine della fase di espansione (fig.6, tratto A1-B) il refrigerante che ne risulta è in parte in forma di vapore e parte in forma liquida, quindi è refrigerante saturo.

Come precedentemente riportato, il refrigerante saturo è in condizioni di precario equilibrio, è molto sensibile alle condizioni dell'ambiente che lo circonda e con tali caratteristiche lascia la valvola d'espansione termostatica e viene indirizzato nell'evaporatore per completare la sua evaporazione.

L'evaporazione

Con il termine evaporazione si definisce quel fenomeno naturale che implica il passaggio di fase di un refrigerante dallo stato di liquido allo stato di vapore.

In un circuito frigorifero il cambiamento di stato (che è stato innescato con l'attraversamento della valvola d'espansione termostatica) si completa all'interno dell'evaporatore che è uno scambiatore di calore che mette in contatto il refrigerante allo stato di saturazione con un fluido caratterizzato da una temperatura superiore.

Nel passaggio attraverso l'evaporatore, il refrigerante (che ha bassi valori di pressione, temperatura ed entalpia specifica) sottrae calore al fluido circostante raffreddandolo.

Il processo di evaporazione avviene a pressione costante che, in un tipico ciclo frigorifero, può essere

identificato con una retta orizzontale che, partendo dal punto di uscita dalla valvola d'espansione termostatica (fig.6, punto B), termina nella zona del vapore; durante questa fase il refrigerante sottrae calore sensibile al fluido esterno che si raffredda, mentre il refrigerante utilizza questo calore per proseguire il processo di evaporazione (calore latente di evaporazione).

Il processo di evaporazione si completa nel punto C, ma persistendo lo scambio di calore (calore sensibile) tra refrigerante e fluido esterno, ne consegue un innalzamento della temperatura del refrigerante al di sopra della temperatura di cambiamento di stato che compete alla sua pressione e , quindi, un aumento del suo surriscaldamento; (fig.6, tratto C-C₁).

Tanto maggiore è il contatto tra fluido esterno e vapore di refrigerante maggiore sarà il suo surriscaldamento. Il refrigerante completamente evaporato e adeguatamente surriscaldato, quindi assolutamente in forma di vapore, lascia l'evaporatore per venire aspirato dal compressore.

La compressione

Come dice il termine stesso, la compressione avviene nel compressore frigorifero che è il "cuore" del sistema frigorifero, perchè fornisce il lavoro necessario e mantenere in funzione il ciclo.

Il suo compito è quello di fornire al condensatore fluido refrigerante ad alta pressione, in modo di renderne possibile la condensazione a una temperatura che sia compatibile con quella del fluido di raffreddamento (aria o acqua) utilizzato per condurre il fluido frigorifero allo stato liquido.

Il fluido refrigerante (vapore surriscaldato), nel percorso che compie dall'uscita dell'evaporatore all'uscita della valvola di scarico del compressore, subisce variazioni di pressione, entalpia e temperatura, pur conservando la sua condizione di vapore.

Il fluido lascia l'evaporatore alla pressione di evaporazione e alla temperatura di vapore surriscaldato, assorbe calore dall'ambiente circostante attraverso la linea di aspirazione (benchè questa sia coibentata) con aumento di entalpia e temperatura.

Nei compressori ermetici e semiermetici, il refrigerante lambisce il motore elettrico, lo raffredda e assorbe quindi altro calore che produce un ulteriore aumento del suo contenuto entalpico e del suo livello di temperatura.

Il refrigerante arriva perciò alla valvola di aspirazione del compressore in condizioni di vapore surriscaldato. Attraverso la sua compressione, il vapore di refrigerante diminuisce di volume, aumenta considerevolmente di pressione e temperatura, surriscaldandosi ulteriormente.

La modifica dei valori di pressione e volume, non porta di per sé a una rilevante variazione della temperatura; è l'energia impiegata per comprimere il vapore che si trasferisce in gran parte al refrigerante stesso sotto

forma di calore (calore di compressione) e fa salire la temperatura.

Dal momento che il vapore, nella sua fase di compressione, non assorbe o cede calore in quanto tale, si considera che il processo sia adiabatico e si assume convenzionalmente una curva a entropia costante (fig.6, tratto C₁-D).

Il refrigerante allo stato di vapore surriscaldato, con una pressione $p_c > p_e$ e con un valore dell'entalpia specifica $h_d > h_{c1}$.

L'energia elettrica che durante il processo di compressione è stata mutata in energia termica, provoca un ulteriore surriscaldamento del vapore di refrigerante la cui temperatura, al punto di massima compressione (temperatura di fine compressione) risulta notevolmente più alta della temperatura di condensazione $t_o > t_c$.

L'importanza del sottoraffreddamento

Il sottoraffreddamento del liquido potrebbe sembrare solo uno dei parametri che fanno parte del ciclo frigorifero e per questo è spesso trascurato dai tecnici del freddo.

Invece, come vedremo ora, ha un notevole impatto sull'intera dinamica di funzionamento dell'impianto frigorifero.

Quali sono gli aspetti direttamente coinvolti dal sottoraffreddamento?

L'ampiezza del sottoraffreddamento (vedi fig.7, tratto A-A₁) influenza direttamente la capacità frigorifera del circuito poiché tanto più il refrigerante liquido è sottoraffreddato tanto maggiore è l'effetto frigorifero utile (vedi fig.7, tratto B-C₁) che riesce ad erogare.

Previene funzionamenti errati dell'organo di laminazione o danni irreversibili nel caso di valvola d'espansione termostatica.

In caso di insufficiente sottoraffreddamento del liquido, potrebbero verificarsi fenomeni di gas-flashing e quindi l'organo di laminazione verrebbe alimentato non più da solo liquido ma da una miscela di liquido e vapore dove la componente gassosa occupa un volume maggiore del liquido che lo ha generato.

La valvola d'espansione termostatica (progettata per lasciare passare solo liquido) pur aprendo al massimo il suo passaggio non è in grado di far passare la necessaria quantità di refrigerante per garantire la resa frigorifera dell'impianto.

Per prevenire ogni fenomeno di gas-flashing è necessario che il sottoraffreddamento garantito dal condensatore sia inferiore alla perdita di carico totale (statica + dinamica) della linea del liquido, espressa in K.

La perdita di carico dinamica è la conseguenza degli attriti che il refrigerante subisce nel corso del suo fluire nella linea del liquido.

Solitamente, il progettista considera una perdita di carico massima di 2K, parte dei quali sono dovuti

alle tubazioni vere e proprie (comprese curve, gomiti e riduzioni varie) il resto per i vari accessori quali filtri, spie di passaggio, valvole elettromagnetiche, etc.

Fenomeni di gas-flashing possono manifestarsi solo in caso di anomalie quali filtro intasato, valvola elettromagnetica con chiusura e/o apertura non completa.

Diversa è la considerazione riguardo alla perdita di carico statica che si verifica quando l'evaporatore è posizionato a un livello superiore a quello del condensatore (o dell'unità motocondensante).

La colonna di refrigerante liquido che grava sul condensatore avrà così un andamento della pressione che decresce dal basso verso l'alto.

Nel condensatore, che si trova alla base di detta colonna di liquido, la condensazione si verifica alla pressione che grava in questo punto e, mano a mano che il liquido risale la colonna, la sua pressione diminuisce che, superata l'entità del sottoraffreddamento disponibile, dà luogo al fenomeno di gas-flashing con tutte le conseguenze del caso.

Tale problema si presenta solo se il circuito è stato progettato senza un approfondito esame dei diversi aspetti impiantistici; è un impianto già sbagliato in partenza al 90%; rarissimi sono i casi che non possono prevedere altre disposizioni.

Vediamo ora come sia possibile ottenere il necessario sottoraffreddamento.

Una delle soluzioni è quella della installazione di uno scambiatore di calore liquido sottoraffreddato-gas aspirato.

Sono scambiatori di calore che permettono di aumentare il sottoraffreddamento del liquido a spese del gas relativamente più freddo aspirato dal compressore.

Sono equipaggiamenti che hanno un rendimento facilmente prevedibile, che possono aumentare il sottoraffreddamento di 5K circa.

Il sottoraffreddamento supplementare comporta un aumento del surriscaldamento del gas aspirato (che già lascia l'evaporatore surriscaldato di 8K circa in condizioni ottimali) che potrebbe arrivare al compressore con temperature superiori ai valori massimi dichiarati dal costruttore del compressore.

Un maggiore sottoraffreddamento del liquido può essere ottenuto installando un condensatore sovradimensionato ovvero con una maggiore superficie da destinare allo scambio di calore refrigerante liquido-mezzo di raffreddamento.

Superficie di scambio e circuitazione del condensatore devono essere tale da garantire un determinato grado di sottoraffreddamento e il coinvolgimento del produttore del condensatore è indispensabile.

Per esempio una superficie sottoraffreddante pari al

10% della superficie dedicata alla condensazione garantisce un sottoraffreddamento di circa 6K.

La scelta di adottare un condensatore sovradimensionato richiede una carica di refrigerante maggiore con un extra costo che, accomunato al maggior costo del condensatore, potrebbe far lievitare l'onere finale dell'intero impianto.

L'incremento del sottoraffreddamento del refrigerante liquido può essere ottenuto anche con altri accorgimenti

I refrigeranti zeotropici

La caratteristica di un refrigerante zeotropico è ampiamente illustrata a pagina 7, ma per maggiore chiarezza ne riassumiamo i termini; un refrigerante zeotropico è una miscela di fluidi puri che non presentano alcun legame molecolare tra loro, ne consegue che il cambiamento di stato che avviene a pressione costante, vedrà una temperatura di inizio diversa da quella presente alla fine del cambiamento

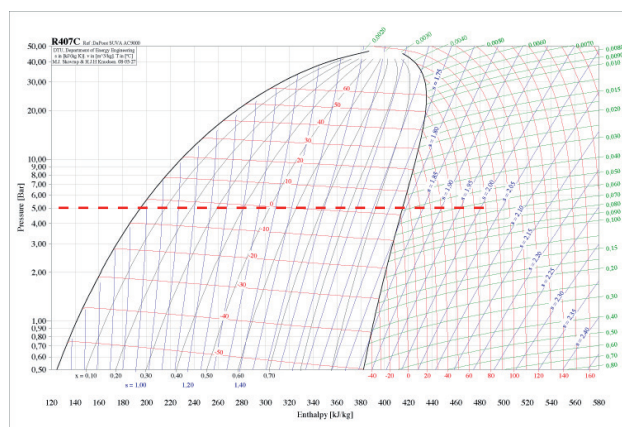


fig.7

stesso, ricordiamo che tale differenza viene definita "scorrimento" o "glide"

Tracciando una linea di cambiamento di stato a pressione costante sul diagramma entalpico di un refrigerante zeotropico, per esempio R407C (fig.7), possiamo notare chiaramente che il cambiamento di stato, che sia liquido-gassoso (evaporazione) oppure gassoso-liquido (condensazione) che avviene alla pressione di 5 bar assoluti vede una temperatura di punto di bolla (*bubble point*) pari a -3,9°C e un punto di rugiada di +2,3°C.

Ne consegue che lo scambio termico tra mezzo esterno e refrigerante avverrà non a temperatura costante ma con una temperatura che varia di 6,2K tra l'inizio e la fine del processo.

Questo particolare comportamento del refrigerante zeotropico costituisce una sensibile difficoltà per il progettista dello scambiatore e richiede particolare attenzione da parte del tecnico frigorista che dovrà travasare il refrigerante zeotropico sempre in forma liquida per evitare la sua scissione nelle sue componenti di base.

Considerazioni finali

Tracciando il ciclo frigorifero sul diagramma entalpico si può desumere che:

- il calore ceduto dal condensatore è maggiore del calore assorbito dall'evaporatore
- più alta è la temperatura (o la pressione) di condensazione, minore è l'effetto refrigerante
- aumentando il sottoraffreddamento del liquido all'uscita del condensatore si aumenta l'effetto refrigerante
- più bassa è la temperatura (o la pressione) di evaporazione, più alta è la temperatura di fine compressione
- il dato più utile che si può ricavare dal diagramma entalpico è appunto la temperatura di fine compressione che è bene che non superi il limite consigliato da alcuni costruttori di compressori che è di 149°C (300°F); in presenza di temperature superiori, si verifica la decomposizione del lubrificante e del refrigerante
- è possibile calcolare l'esatta capacità frigorifera del compressore moltiplicando il salto entalpico che il refrigerante subisce nel corso della fase di evaporazione (a condizione di conoscere, oltre alle temperature di evaporazione, anche i rispettivi valori di sottoraffreddamento e surriscaldamento) per la portata ponderale del compressore espressa in kg /h di refrigerante movimentato.

Quest'ultimo dato lo si ottiene praticamente utilizzando il software di calcolo del compressore in esame.

Definizioni

Bubble point - Punto nel diagramma psicrometrico al quale si forma la prima traccia di vapore allorché un refrigerante azeotropo liquido (miscela a due o più componenti) viene scaldato.

Nel caso di refrigeranti puri e azeotropi prende il nome di punto di evaporazione.

Vedi anche "Punto di bolla".

Caduta di pressione - Diminuzione della pressione che il refrigerante subisce durante il suo fluire attraverso l'organo di laminazione.

Vedi anche "Perdita di carico".

Calore di compressione - Calore (sensibile) che il compressore trasferisce al refrigerante durante la sua compressione; i watt termici trasferiti nel refrigerante corrispondono ai watt elettrici assorbiti dal motore del compressore.

Questo trasferimento di calore provoca un ulteriore surriscaldamento del refrigerante.

Ciclo frigorifero - Ciclo termodinamico di un sistema frigorifero che permette di trasferire il calore da un ambiente caratterizzato da bassa temperatura in un ambiente con temperatura più alta.

Compressione - Innalzamento della pressione del vapore di refrigerante, realizzato attraverso macchine frigorifere dette compressori.

Condensazione - Cambiamento di stato di un refrigerante dalla fase di vapore a quella di liquido.

Dew point - Punto nel diagramma psicrometrico al quale si forma la prima traccia di liquido allorché un refrigerante azeotropo liquido (miscela a due o più componenti) viene raffreddato.

Nel caso di refrigeranti puri e azeotropi prende il nome di punto di condensazione.

Vedi anche "Punto di rugiada".

Entalpia - L'entalpia è una forma di energia che può essere trasferita ma non può essere distrutta e fluisce spontaneamente da un corpo più caldo a un corpo più freddo anche se di natura diversa.

Entalpia, calore totale o contenuto termico sono nomi equivalenti che si riferiscono alla stessa quantità.

Entalpia specifica - Termine utilizzato in termodinamica per identificare la quantità di calore totale di un kg di una sostanza; nel sistema SI, la sua unità di misura è il kJ/kg.

Entropia - Descrive lo stato termico di un corpo come rapporto tra la sua carica termica e la sua temperatura. Costituisce una misura della qualità dell'energia termica.

Il calore a bassa entropia è più pregiato di quella ad alta entropia che è difficilmente utilizzabile perché "degradato"; in altri termini, l'entropia è il *grado di non utilizzabilità* del calore.

Nel sistema SI, la sua unità di misura è kJ/kg K.

Entropia specifica - È il valore dell'entropia riferita a un kg di materia e un grado di temperatura assoluta (K); nel sistema SI l'entropia specifica si misura in J/kg K.

Espansione - Con il termine espansione si definisce il repentino abbassamento di pressione che il refrigerante subisce quando attraversa l'organo di laminazione (valvola d'espansione termostatica, capillare, valvola automatica, etc.).

Evaporazione - Cambiamento di stato di un refrigerante dalla fase di liquido a quella di vapore.

Gas flashing - Vapore di refrigerante generato da una rapida caduta di pressione; nel circuito frigorifero tale fenomeno si verifica preordinatamente nell'orifizio della valvola termostatica oppure incidentalmente all'interno di linee del liquido con andamento ascendente ed eccessivo sviluppo in lunghezza.

Glide - Il glide di un refrigerante è, per convenzione, la differenza tra la temperatura del vapore saturo alla pressione di evaporazione e la temperatura all'ingresso dell'evaporatore.

Vedi anche "Scorrimento".

Isobara - Linea che unisce i punti aventi la medesima pressione.

Isocora - in termodinamica è un grafico che mostra la variazione a volume costante dello stato di un sistema.

Isoentalpica - Linea che unisce i punti aventi la medesima entalpia.

Isoentropica - Linea che unisce i punti aventi la medesima entropia.

Isoterma - Linea che unisce i punti aventi la medesima temperatura.

Liquido - Stato della materia intermedio tra lo stato solido e quello di vapore; le molecole sono libere di muoversi tra loro ma sempre vincolate dai legami molecolari.

Un liquido è caratterizzato da avere un volume proprio ma assume la forma del contenitore che lo ospita.

Tutte le sostanze liquide sono incompressibili.

Liquido saturo - Un liquido saturo è un liquido la cui pressione di vapore eguaglia la pressione esterna,

praticamente e' un liquido che si trova al proprio punto di ebollizione e può essere anche definito la condizione di equilibrio tra fase liquida e fase gassosa (vapore).

Perdita di carico - Diminuzione della pressione che il refrigerante subisce durante il suo fluire attraverso l'organo di laminazione.
Vedi anche "Caduta di pressione".

Portata ponderale - viene espressa in kg/min, kg/s, kg/h o addirittura t/d a seconda della grandezza della macchina; rappresenta la quantità in peso di refrigerante movimentata dal compressore frigorifero.
Da non confondere con la "portata massica" che rappresenta la massa di refrigerante movimentata dal compressore nell'unità di tempo.

Pressione assoluta - Pressione correlata al vuoto assoluto esercitata dagli strati dell'atmosfera che gravano sulla superficie terrestre; è soggetta a piccole variazioni di tipo climatico (legate alla densità della colonna d'aria sovrastante una data località) e/o altimetrico (legate allo spessore della colonna d'aria sovrastante).
Le unità di misura pratiche sono il bar e il kg/cm², l'unità di misura SI è il Pascal (Pa).
Vedi anche "Pressione atmosferica".

Pressione atmosferica - Pressione correlata al vuoto assoluto esercitata dagli strati dell'atmosfera che gravano sulla superficie terrestre.
Tale pressione è soggetta a piccole variazioni di tipo climatico (legate alla densità della colonna d'aria sovrastante una data località) e/o altimetrico (legate allo spessore della colonna d'aria sovrastante).
Le unità di misura pratiche sono il bar e il kg/cm², l'unità di misura SI è il Pascal (Pa).
Vedi anche "Pressione assoluta".

Pressione relativa - Pressione correlata alla pressione atmosferica; è detta anche pressione manometrica.

Punto di rugiada - Punto nel diagramma psicrometrico al quale si forma la prima traccia di liquido allorché un refrigerante azeotropo liquido (miscela a due o più componenti) viene raffreddato.
Nel caso di refrigeranti puri e azeotropi prende il nome di punto di condensazione.
Vedi anche "Dew point".

Punto critico - Condizione termodinamica al di sopra delle quali il refrigerante in forma gassosa non può essere liquefatto.

Punto di bolla - Punto nel diagramma psicrometrico al quale si forma la prima traccia di vapore allorché un refrigerante azeotropo liquido (miscela a due o più componenti) viene scaldato.

Nel caso di refrigeranti puri e azeotropi prende il nome di punto di evaporazione.
Vedi anche "Bubble point".

Refrigerante azeotropico o azeotropo - Termine che si riferisce al comportamento di determinate miscele frigorifere con 2, 3, 4 componenti in cui i passaggi di fase da liquido a vapore o viceversa, avvengono a temperatura o pressione costanti.

Refrigerante puro - Fluido refrigerante per il quale i passaggi dalla fase liquida a vapore o viceversa avvengono a temperatura e pressione costanti.

Refrigerante zeotropico o zeotropo - Termine che si riferisce al comportamento di determinate miscele frigorifere con 2, 3, 4 componenti in cui durante il cambiamento di fase da vapore a liquido o viceversa, si ha una certa variazione di temperatura (scorrimento o glide) a parità di pressione.

Saturazione - Condizione che vede la coesistenza contemporanea di refrigerante sia in fase liquida che in fase gassosa.
Tale contemporanea presenza è una condizione di equilibrio precario molto sensibile alle condizioni dell'ambiente che la circonda.

Scorrimento - Lo scorrimento della temperatura per un refrigerante è, per convenzione, la differenza tra la temperatura del vapore saturo alla pressione di evaporazione e la temperatura all'ingresso dell'evaporatore.
Vedi anche "Glide".

Sottoraffreddamento - Stato di un liquido che ha subito una diminuzione di temperatura rispetto alla temperatura di saturazione che gli compete a una determinata pressione.

Surriscaldamento - Stato di un gas che ha subito un aumento di temperatura rispetto alla temperatura di saturazione che gli compete a una determinata pressione.

Temperatura di fine compressione - Temperatura che il refrigerante raggiunge quando, sottoposto a compressione, raggiunge il suo volume minimo.
È dovuta alla trasformazione della energia meccanica impiegata per comprimere il vapore in energia termica che trasferita al vapore stesso ne innalza la temperatura aumentandone sensibilmente il surriscaldamento.

Trasformazione adiabatica - Trasformazione termodinamica irreversibile nel corso della quale un sistema fisico non scambia calore con l'ambiente.

Vapore - Stato della materia che vede le molecole della sostanza in questione libere di muoversi nello spazio se non ci fosse un contenitore.

Un vapore non ha una forma propria, non ha un volume proprio ma assume la forma e il volume del contenitore; un vapore è comprimibile.

Il termine “vapore” viene utilizzato al posto di “gas” quando si tratta di refrigerante o, in generale, di ogni gas quando le sue condizioni sono al di sotto del punto critico.

Vapore saturo - Condizione di equilibrio tra fase liquida e fase gassosa (vapore), in cui il numero di particelle (o meglio “entità molecolari”) che dalla fase liquida passano alla fase gassosa è uguale al numero di quelle che condensano nel liquido.

Bibliografia

- Carlo Eisner spa - *Il recupero di calore negli impianti frigoriferi*
Milano, 1983
- Ralph C. Downing - *Pressure-enthalpy charts and their use*
Refrigeration Service Engineers Society, 1970
- Marcello Collatin, Fabio Braidotti - *L'arte del freddo, riparazione e manutenzione*
Grafiche Oderzo, 2012
- R. D. Heap - *Heat pumps*
E. & F. N. Spon LTD, 1979
- Wilbert F. Stoecker, Uberto Stefanutti - *Manuale della refrigerazione industriale*
Tecniche Nuove, 2001
- Guy R. King - *Basic refrigeration*
Nickerson & Collins CO., 1971
- Michele Via, Diego Danieli - *Le centrali frigorifere*
Editoriale Delfino, 2007
- Erik Strandgaard Andersen, Paul Jespersgaard, Ove Østergaard - *Data Book*
Edizioni Studio Tesi, 1985
- S. Gullace, B. Pisani - *Impianti di climatizzazione, di condizionamento e macchine a fluido*
Editrice San Marco, 2009
- Joe Ammons - *Air conditioning and refrigeration system servicing*
Nickerson & Collins CO., 1971
- P. J. Rapin - *Impianti frigoriferi*
Tecniche Nuove, 1978
- Althouse, Turnquist, Bracciano - *Modern refrigeration and air conditioning*
Goodheart Willcox, 1996
- Rolf Seidel, Hugo Noak - *Manuale dell'installatore frigorista*
Tecniche Nuove, 2016
- Karl Breidenbach, Uberto Stefanutti - *Manuale del freddo*
Tecniche Nuove, 2008

