

Macchine frigorifere

Una *macchina frigorifera* è un sistema termodinamico che tramite trasformazioni cicliche (*cicli frigoriferi*) trasferisce calore da un serbatoio freddo (a temperatura minore) ad uno caldo (a temperatura maggiore) utilizzando lavoro fornito dall'esterno (Fig.1b).

Il funzionamento della *macchina frigorifera* risulta essere inverso rispetto una macchina termica diretta. Mentre per una macchina diretta tramite la differenza di temperatura dei due serbatoi viene prodotto lavoro utile, per una *macchina frigorifera* questa stessa quantità di lavoro viene fornita dall'esterno e utilizzata dalla macchina stessa per sottrarre calore al serbatoio freddo e cederlo al serbatoio più caldo.

Come per le macchine dirette abbiamo definito *motore perfetto* quel processo ciclico termodinamico che permette di utilizzare il solo calore estratto da un solo serbatoio e trasformarlo integralmente in lavoro così, analogamente, possiamo definire la *macchina frigorifera perfetta* quel particolare processo ciclico inverso che permette di estrarre calore dal serbatoio freddo e di cederlo a quello più caldo senza spesa di lavoro (Fig1a).

$$T1 > T2$$

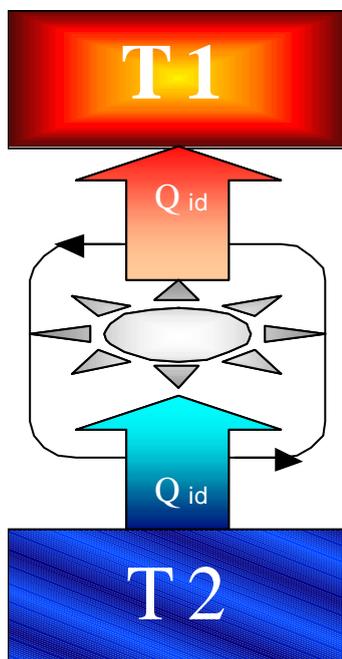


Fig.1a

Fig.1a Principio generale di funzionamento di una **macchina frigorifera perfetta**

Il calore Q_{id} prelevato dal serbatoio freddo è interamente ceduto al serbatoio caldo senza l'impiego di lavoro esterno. Il rendimento di tale macchina sarebbe infinito. Il suo funzionamento è negato dall'enunciato di Clausius e dalla consueta direzione della propagazione del calore: dal corpo a temperatura maggiore al corpo a temperatura minore.

$$T_1 > T_2$$

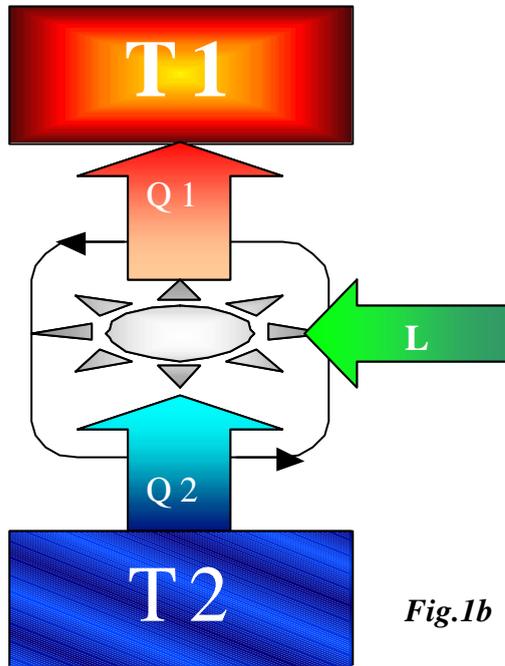


Fig.1b

Fig.1b Principio generale di funzionamento di una **macchina frigorifera reale**

In un macchina frigorifera reale, il calore Q_2 viene prelevato dal serbatoio a temperatura inferiore utilizzando lavoro esterno. Al serbatoio a temperatura superiore viene ceduta un'energia equivalente al calore assorbito Q_2 e al lavoro svolto sul sistema L .
 $|Q_1| > |Q_2|$

Non esiste una sostanziale differenza tra la *macchina frigorifera* e la *pompa di calore*, entrambe possono essere schematizzate con il medesimo grafico (Fig.1b), la distinzione si prospetta solo nell'utilizzo pratico; mentre il risultato utile prodotto dalla *macchina frigorifera* corrisponde alla sottrazione di una quantità di calore pari a Q_2 a scapito del serbatoio freddo T_2 , per la *pompa di calore* si ha come risultato utile l'acquisizione di una quantità di calore Q_1 da parte del serbatoio caldo T_1 .

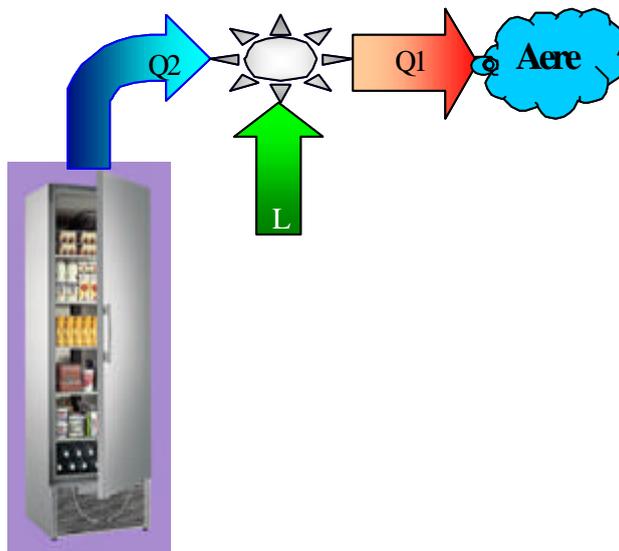


Fig.2

Fig.2 Principio generale di funzionamento di un **frigorifero domestico**

Il calore Q_2 viene estratto dalla cella frigorifera tramite l'apporto di un lavoro L . L'energia così accumulata pari a $Q_1 = |Q_2| + |L|$ viene emessa nell'ambiente esterno.

Più semplicemente il concetto si può riassumere esemplificando i due casi:

La funzione del frigorifero domestico (*macchina frigorifera*) si esplica nella sottrazione di calore dagli alimenti in esso introdotti (effetto utile), tale calore viene poi fornito all'ambiente esterno e così dissipato (effetto secondario) (Fig.2). L'ambiente dove ottengo il risultato utile corrisponde in (Fig.1b) al serbatoio T2 ossia l'interno del frigorifero.

Situazione contraria si ottiene durante il riscaldamento domestico da parte di una *pompa di calore*, in questo caso il serbatoio freddo T2 è l'ambiente esterno a cui viene sottratto calore (effetto secondario) il quale viene successivamente ceduto all'interno dell'abitazione. (effetto utile).

“Refrigerazione o riscaldamento?”

In molte grandi strutture architettoniche, grattacieli, università ecc.. l'impianto di termoregolazione è affidato a macchinari dal funzionamento sopra descritto, La scelta di adottare questo tipo di macchinari a discapito dei più noti impianti di riscaldamento a combustibile fossile è dettata da un notevole risparmio economico. Il costo dell'impianto è elevato ma per grandi strutture è facilmente ammortizzabile in brevi tempi. Mentre in tempi passati era consono installare due impianti differenti, uno per la refrigerazione ed un secondo per il riscaldamento, grazie all'avanzamento tecnologico e grazie alla peculiarità di queste macchine di poter sia estrarre che cedere calore, i due impianti vennero sostituiti da una sola macchina termica. Tramite un commutatore si è reso possibile dirigere la direzione del processo termodinamico scambiando vicendevolmente il serbatoio di utilizzo: nei mesi afosi la macchina produce refrigerio estraendo calore dall'ambiente interno e cedendolo all'ambiente esterno, mentre nei mesi freddi, inversamente, il calore viene prelevato dall'esterno e poi ceduto all'ambiente interno.

Secondo le convenzioni internazionali il calore assorbito e il lavoro svolto dal sistema hanno segno positivo. Quindi il calore (Fig.1b) Q_2 è una quantità positiva, essendo assorbito dal sistema, mentre il calore Q_1 essendo ceduto dal sistema ha segno negativo.

Per la legge della conservazione dell'energia:

$$|L| = |Q_1| - |Q_2|$$

Abbandoniamo momentaneamente il principio generale di funzionamento della macchina frigorifera per dedicarci allo studio vero e proprio della componentistica interna e delle mansioni svolte dai singoli diversi organi della macchina stessa.

“Scaldiamo l’ambiente...”

Negli ultimi anni è cresciuta la sensibilità comune a proposito dei danni provocati dall’inquinamento odierno sull’ambiente.

Una forma di inquinamento “moderna” ossia considerata dannosa per l’ambiente da tempi recenti è *l’inquinamento termico*. Modificare la temperatura del nostro habitat produce effetti negativi su grande scala, il mutamento del clima stesso è uno di questi danni. Tale inquinamento consiste nell’innalzamento della temperatura esterna dovuto all’emissione incontrollata di calore nell’ambiente. Tale effetto nei mesi invernali è concausato dall’utilizzo di impianti di termoregolazione a combustione. Al contrario se venissero utilizzate macchine frigorifere per ottenere il riscaldamento domestico verrebbe sottratto calore all’ambiente esterno a vantaggio dell’ambiente stesso.

Come è mostrato dallo schema (Fig.3) il funzionamento della macchina è incernierato sul funzionamento di quattro sottomacchine, ognuna delle quali svolge una determinata azione termodinamica sul fluido refrigerante (linea nera che congiunge tra loro le macchine). Il funzionamento di questa macchina è ciclico, è ciò è ben rappresentato (Fig.3), infatti, seguendo i numeri da 1 a 4 ci si ritrova di fronte nuovamente allo stesso percorso.

Immediato è il paragone con la macchina Rankine, di funzionamento opposto ma di analoga componentistica.

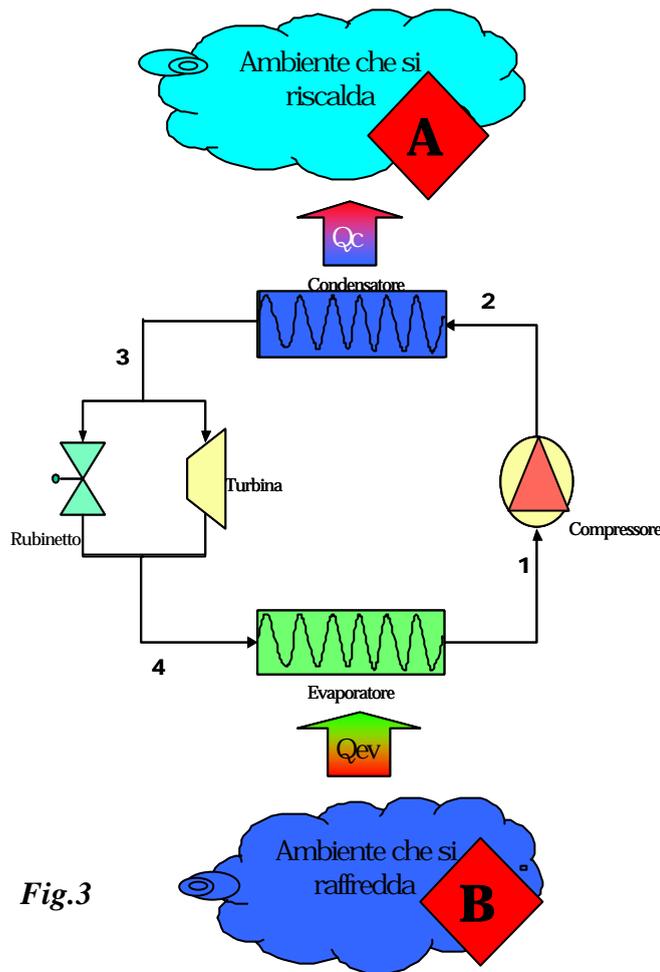


Fig.3

Fig.3 Schema interno della macchina frigorifera

Il fluido refrigerante attraversando le 4 sottomacchine subisce più trasformazioni termodinamiche.

Ogni organo della macchina cambia lo stato termodinamico del fluido. (i singoli funzionamenti sono analizzati più avanti). Il fluido ritorna al punto 1 con le stesse caratteristiche termodinamiche dell'inizio del ciclo precedente. Ad ogni ciclo viene sottratto calore al serbatoio freddo ed utilizzato lavoro.

Rappresentando l'intera trasformazione termodinamica su un diagramma di stato (p-V, T-S, h-S) possiamo analizzare analiticamente gli effetti di ogni singola sottomacchina sul fluido refrigerante. La trasformazione può essere rappresentata indifferentemente su ognuno dei tre diagrammi di stato sopra elencati, noi, per semplicità, ne analizzeremo in dettaglio solamente uno: il diagramma **T-S** (Fig.4).

Tali diagrammi sono unici per ogni fluido termodinamico utilizzato, in quanto sono uniche le caratteristiche termodinamiche di ogni fluido.

Noi utilizzeremo a scopo didattico un grafico **T-S** di un generico fluido refrigerante.

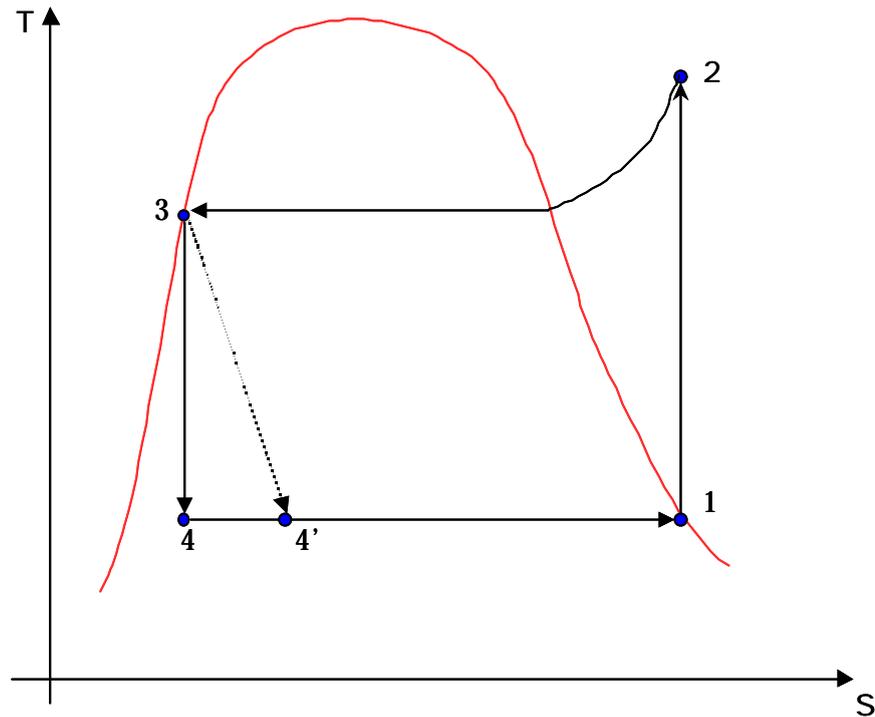


Fig.4 – Diagramma T – S

Analizziamo ora le diverse fasi della trasformazione osservando contemporaneamente Fig.3 e Fig.4.

- **1 P 2** : La miscela, che si trova allo stato di vapore saturo secco (titolo unitario) (1), passando attraverso un compressore, viene portata ad una pressione più elevata tramite una trasformazione adiabatica reversibile (angioentropica). L'aumento di pressione implica un forte aumento della temperatura del fluido, il quale arrivato al punto (2) si trova nel campo dei vapori surriscaldati.

- **2 P 3** : Passando attraverso la serpentina del condensatore, il fluido refrigerante cede all'ambiente A una quantità di calore Q_c e comincia a raffreddarsi, fino a quando non entra nella regione del grafico sottostante alla curva limite (quella tracciata in rosso), nella quale la trasformazione prosegue a temperatura costante, in quanto si verifica la condensazione del vapore ed è in atto un cambiamento di fase. In (3) il fluido ha titolo zero.

- **3 P 4** : Questa fase può avvenire in due modi, attraverso la turbina (3-4) o tramite la valvola di laminazione (3-4'). Nel caso della turbina si otterrebbe una trasformazione adiabatica reversibile, vantaggiosa per il rendimento della macchina, mentre con la valvola si attua un processo irreversibile, motivo per il quale il passaggio da (3) a (4'), nel grafico, è stato tracciato con una linea tratteggiata, per indicare che non si sa con precisione cosa avvenga in quella regione. La trasformazione in questo secondo caso perde l'isoentropicità, e abbassa il rendimento della macchina.

● **4 P 1** : Dentro all'evaporatore, il fluido refrigerante attua la seconda transizione di fase (opposta a (2-3)), la miscela passa dallo stato liquido a vapore saturo a temperatura costante assorbendo calore Q_{ev} e ritorna quindi nello stato di partenza, chiudendo il ciclo. Il calore assorbito è sottratto all'ambiente B che così si raffredda.

La serpentina del condensatore deve essere posta in modo tale che sia a contatto con un ambiente provvisto di un continuo riciclo d'aria, ciò fa sì che il processo di raffreddamento avvenga più velocemente e la temperatura stessa dell'aria nelle prossimità del condensatore non aumenti considerevolmente.

Se questo principio non viene rispettato, disponendo così il condensatore in zone poco arieggiate della macchina, si otterrà un aumento della temperatura del condensatore stesso e di conseguenza la macchina lavorerà tra un intervallo di temperature $\Delta T = (T_1 - T_2)$ maggiore.

Questo implica direttamente un aumento del lavoro necessario per compiere lo stesso processo, quindi un abbassamento del rendimento della macchina.

Il lavoro necessario affinché la macchina svolga correttamente il suo compito è, per il primo principio della termodinamica:

$$L = Q_c - Q_{ev}$$

Ossia uguale alla differenza del calore ceduto dal condensatore all'ambiente A e il calore sottratto dall'evaporatore all'ambiente B .

Rappresentando lo stesso processo termodinamico su un diagramma P-V (Fig.5), possiamo evidenziare il ruolo della turbina nella macchina frigorifera. Lo scopo della turbina è quello di recuperare una parte del lavoro fornito alla macchina, ed aumentarne di conseguenza il rendimento.

Il lavoro recuperato è evidenziato in verde.

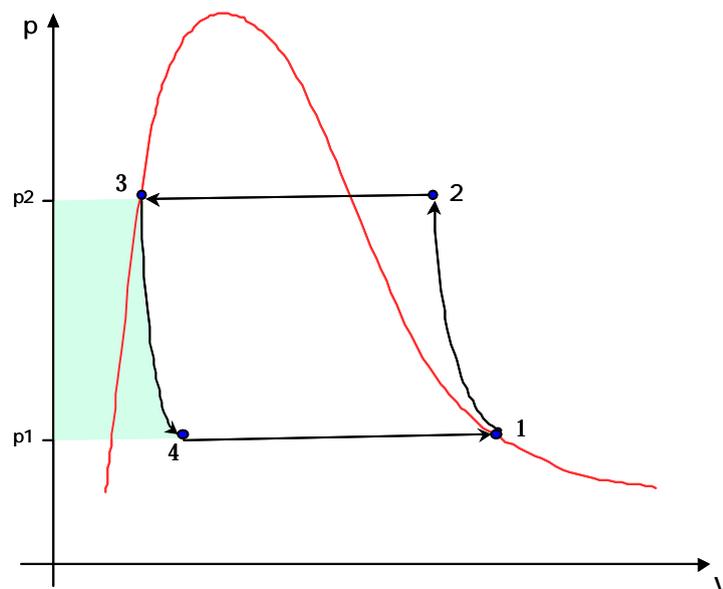


Fig.5 – Diagramma p – V: lavoro recuperato dalla turbina

Con la turbina si recupera una quota di lavoro ma questo organo è complesso e costoso (anche se di piccole dimensioni), molto spesso si preferisce sostituirlo con la valvola di laminazione, la quale, di ridotti costi economici, svolge una funzione più che soddisfacente. La soluzione più economica viene adottata in ambito domestico o per strutture di non grandi dimensioni, mentre per grossi macchinari viene preferita la turbina, il cui costo è ammortizzato dal risparmio energetico.

La valvola di laminazione è collocata tra la serpentina del condensatore e la cella frigorifera, ha la forma di un capillare in modo che il fluido perda pressione nella strozzatura.

Il dimensionamento della strozzatura deve essere verificato per ogni macchina, in quanto per ogni configurazione esiste il tubo di strozzamento ideale, e di solito viene trovato empiricamente.

Esiste un punto ottimo di chiusura della valvola che produce la massima performance della macchina.

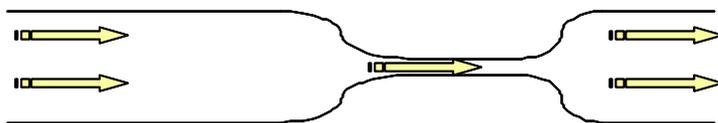


Fig.6

Fig.6 Principio di funzionamento della valvola di laminazione

Lo scopo della v.di l. è di abbassare la temperatura del fluido. Fornendo un grosso salto di pressione, dovuto alla strozzatura centrale, si ottiene un forte abbassamento della temperatura della miscela. (Fig.4)

Mentre utilizzando la turbina la trasformazione (3-4)

(Fig.4) è *Isoentropica e reversibile*, utilizzando la valvola di laminazione tale trasformazione (3-4') è *Isoentalpica e irreversibile* in quanto non viene scambiato ne calore ne lavoro, comunque perdiamo la completa conoscenza della trasformazione, ossia in tale tratto tratteggiato la variazione delle grandezze termodinamiche avviene liberamente, per cui dobbiamo accontentarci di conoscere lo stato della miscela nei soli punti (3) e (4) e non nei punti interni di tale tratto (Fig.4)

Di seguito sono riportati altri diagrammi termodinamici che descrivono la macchina frigorifera in funzione di diverse grandezze termodinamiche. La conoscenza dell'uno o dell'altro grafico non comporta nessuna differenza sia sul piano qualitativo che quantitativo. Il più usato per questi scopi è il diagramma P-H (Fig.9)

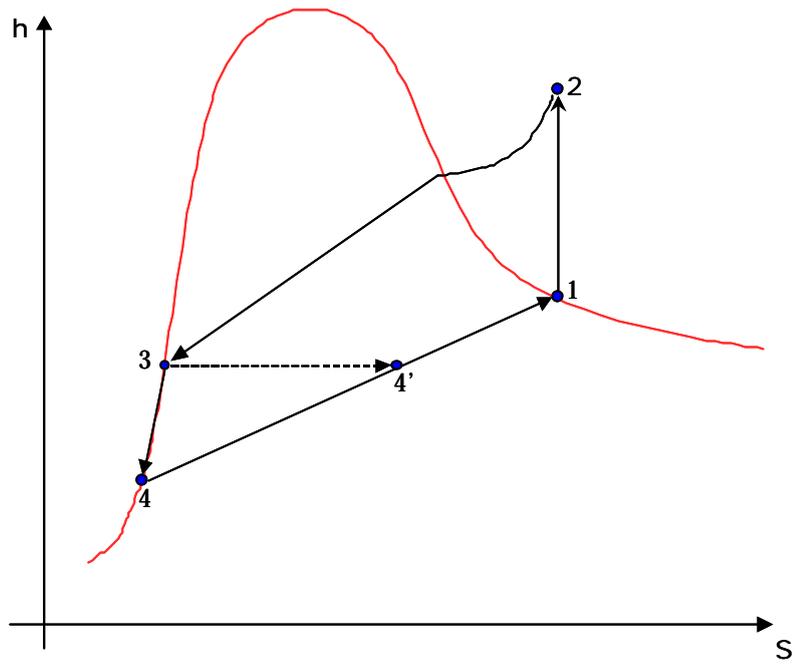


Fig.7 – Diagramma h – S (di Mollier)

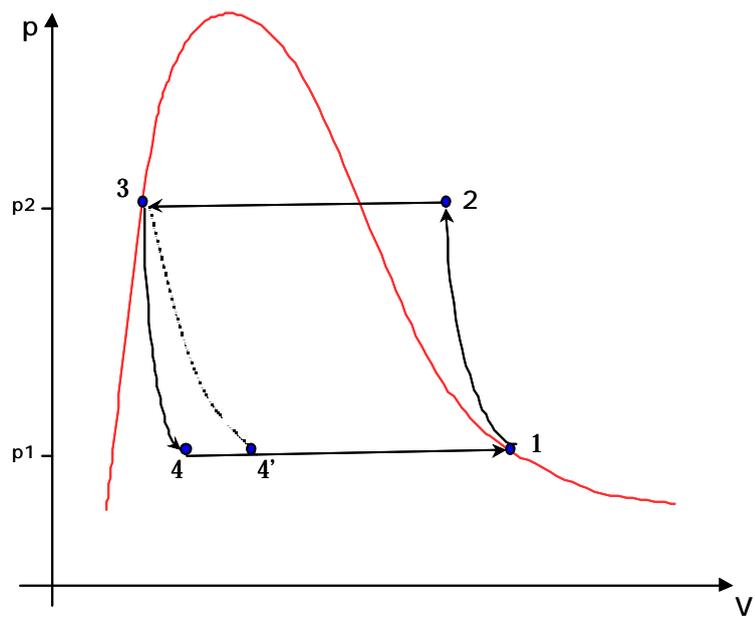


Fig.8 Diagramma p – V

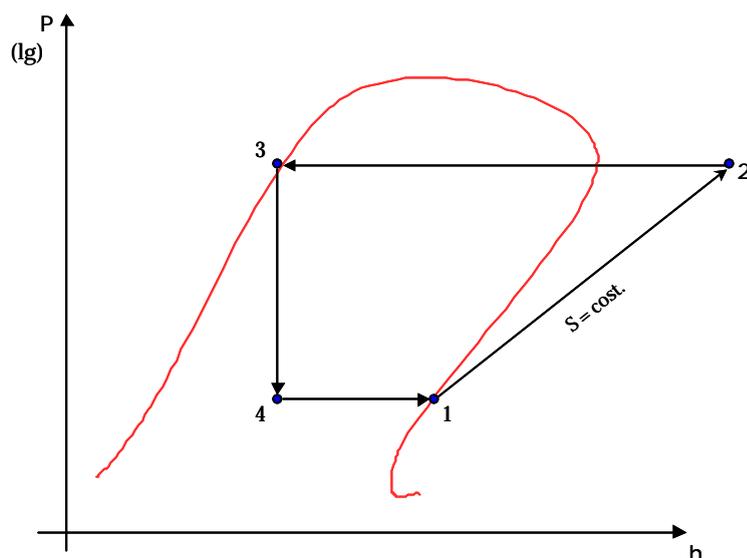


Fig.9 Diagramma P - h

Tale diagramma è il più apprezzato nell'utilizzo pratico in quanto le trasformazioni termodinamiche sono descritte tramite leggi di funzionalità diretta di primo grado. Ciò semplifica i calcoli e assicura con maggiore precisione la correttezza dei dati estratti da tale grafico.

Miscela refrigeranti

Il buon funzionamento della macchine frigorifere è essenzialmente basato sul fluido termodinamico che scorre attraverso le tubature del macchinario. Ogni fluido è caratterizzato da proprietà termodinamiche differenti; quindi fluidi diversi garantiscono a macchinari identici rendimenti diversi. Risulta evidente, a questo punto, l'importanza della scelta della miscela refrigerante che garantisca al mio apparato frigorifero il rendimento più elevato possibile.

Storicamente il fluido maggiormente adottato per tali utilizzi è stato l'ammoniaca, di formula: NH_3 . Le caratteristiche termodinamiche di questo fluido assieme al suo basso costo di produzione ne hanno fatto per anni la miscela prescelta per impianti frigoriferi. L'ammoniaca, inoltre, è una molecola inerte nei confronti dei macchinari e non ne danneggia il funzionamento neanche su periodi di lunga durata.

Oltre a tanti pregi, l'ammoniaca, ha svelato anche qualche controindicazione nel corso degli anni: Non è difficilmente infiammabile ed è nociva all'uomo se inalata in quantità considerevole. Malgrado il primo svantaggio indicato non sia da sottovalutare a causa del secondo svantaggio la società ha deciso di tutelarsi ampliando la ricerca chimica verso nuovi preparati sintetici rigorosamente inerti nei confronti dell'uomo.

Il miglior ritrovato in tal direzione, malgrado i suoi effetti "collaterali" sull'ambiente (vedi scheda) è una molecola appartenente alla famiglia dei *Clorofluorocarburi* il *Freon 12*. Venne siglato con la lettera F quello prodotto dall'azienda chimica "Dupont" (che per prima lo mise in commercio), mentre con la lettera R (refrigerants) quello prodotto altrove; il gas in questione ha brillanti proprietà termodinamiche ed un costo di produzione relativamente basso. La molecola è assolutamente non nociva al nostro organismo e ciò ha condotto ad un impiego dello

stesso in ambito domestico. Tale caratteristica è stata sfruttata dal mercato per abbassare i costi degli impianti stessi risparmiando così sulla qualità dei sistemi di controllo riguardanti la fuoriuscita dal fluido: guarnizioni ecc... In strutture dimensionalmente più vaste in cui l'impianto refrigerativo è isolato dall'ambiente umano l'utilizzo dell'ammoniaca è ancora molto valido. Il Freon si trova in varie versioni: le più conosciute sono: R12 (o F12), di struttura molecolare CCl_2F_2 , R13 di struttura CF_3Cl , R11 la cui molecola è CCl_3F e R22 di struttura $CHClF_2$. Negli allegati alle dispense di questo insegnamento è disponibile una tabella in formato PDF, fornita dalla Dupont, che mostra le proprietà fisiche di diverse miscele, tra le quali anche quelle del Freon 12.

“Conseguenze di CFC e Freon 12...”

L'impiego, come gas refrigeranti, dei CFC (cloro-fluoro-carburi) ed in particolare del gas Freon 12 per le sue ottime caratteristiche termodinamiche ha prodotto effetti inaspettati sull'ambiente. L'utilizzo smodato di questo gas si è riscontrato, ormai da più di 20 anni, sia stato una, per non dire la principale, concausa del buco dell'ozono. L'inserimento nell'ambiente di questo “nuovo” gas, creato chimicamente in laboratorio, ha alterato lo strato di ozono stratosferico assottigliandolo drasticamente in special modo alle alte latitudini polari.

Questo effetto prende il nome di buco dell'ozono. Per ulteriori informazioni si veda:

(<http://www.epa.gov/spdpublic/title6/608/report.pdf>),

(<http://utenti.tripod.it/alfaberg/ozlait.html>)

Essendo i CFC gas stabili non vengono degradati dall'ambiente, pioggia, agenti atmosferici o chimici, così hanno la possibilità di immettersi nel ciclo naturale raggiungendo a tempo debito gli strati più alti della stratosfera. A contatto con i raggi ultravioletti i CFC vengono lentamente smembrati in ioni cloro, fluoro e carbonio. Essendo fortemente instabili reagiscono con le molecole di ozono distruggendole. La pericolosità dei fluidi frigogeni è misurata da un indicatore detto ODP (Ozone depletion potential), che individua la potenzialità distruttiva di un composto in relazione al R11.

Fluido	ODP
R11	1
R12	1
R22	0,05
HFC generico	0

Un solo ione di cloro può distruggere migliaia di molecole di ozono rendendole così inutilizzabili come barriera protettiva anti raggi UV per la salvaguardia della crosta terrestre.

Riconoscendo la gravità del problema, nel 1987 a Montreal più di 150 paesi hanno firmato un accordo per eliminare i composti chimici ritenuti dannosi per l'ozono. Per una consultazione è disponibile il Protocollo di Montreal all'indirizzo: http://www.unep.org/ozone/mont_t.shtml. Inoltre sono stati creati organi di controllo e nuove legislazioni che gestiscono e controllano l'immissione in atmosfera di gas sperimentali e vietano l'utilizzo di gas considerati pericolosi

Non ancora del tutto banditi sono gli HCFC ed i gli HFC: i primi, come il R22 sono gli idrofluorocarburi, la loro molecola, per via dell'idrogeno è molto meno stabile, e ha poca probabilità di raggiungere gli stati alti dell'atmosfera; gli HFC sono idrofluorocarburi, dove l'atomo di cloro è del tutto assente, sono composti che non possono in alcun modo interferire con l'ozono, però sono tra le cause dell'effetto serra (<http://utenti.tripod.it/alfaberg/gw2it.html>).

I così detti gas serra formano nella troposfera una coltre che impedisce la fuoriuscita delle radiazioni, emesse di riflesso dalla terra, nello spazio. Questo fenomeno è causa dell'aumento delle temperature e della variazione climatica in particolare sulle grandi città dove sono emessi quotidianamente grossi quantitativi di CO₂ ed altri gas serra.

Proprio per questo problema ai fluidi frigogeni è anche associato un altro indice il GWP (Global Warming Potential); per R11 GWP = 1, e GWP_{CFC} >> GWP_{HCFC}. Al momento è molto diffuso nelle applicazioni civili il R134a, che al momento non pare avere effetti dannosi per l'ambiente.

La legge 549 del 28/12/1993 disciplina in Italia l'uso delle sostanze ritenute lesive per l'ozono.

Rendimento

Il rendimento di una macchina frigorifera viene chiamato *Effetto utile frigorifero* ed è definito dal rapporto del calore estratto con il lavoro speso per compiere l'operazione.

$$h_F = \frac{Q_{EV}}{L}$$

Questo rapporto, a differenza dei normali rendimenti delle macchine termiche, può essere maggiore di 1 ed in genere può arrivare fino a 5 o a 6.

In alternativa all'effetto utile frigorifero, può essere usato il COP (Coefficient of Performance) che è relativo alla macchina utilizzata come pompa di calore nei mesi estivi.

$$COP = \frac{Q_C}{L}$$

ma : $Q_C = Q_{EV} + L$ quindi $COP = \frac{Q_{EV} + L}{L} = h_F + 1$

Osservando i diagrammi della trasformazione, si può notare che in ogni passaggio qualche proprietà termodinamica rimane costante.

Ad esempio:

○ $1 \Rightarrow 2 : dQ = 0$

Quindi, ricordando la definizione dell'entalpia: $\Delta h = \Delta Q + L$

Posso scrivere $\Delta h = L$

$$L = h_2 - h_1$$

○ $4 \Rightarrow 1 : L = 0$

Come prima: $\Delta h = \Delta Q$

Ma $\Delta Q = Q_{EV}$

$$Q_{EV} = h_1 - h_4$$

Alla luce di questi risultati posso esprimere l'Effetto utile frigorifero in funzione dei valori delle entalpie che possono essere ricavati dalle tabelle termodinamiche relative alla particolare miscela.

$$h_F = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Analogamente, questi passaggi possono essere svolti anche per trovare il COP in funzione delle entalpie.

$$COP = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}$$