

# Compressori e ventilatori. Impianti frigoriferi

## Compressori e ventilatori

I compressori si possono classificare secondo lo schema seguente:

Volumetrici	Dinamici (turbocompressori)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• alternativi</li> <li>• rotativi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• centrifughi</li> <li>• assiali</li> </ul>

Con il termine **soffianti** si indicano i compressori in cui il gas è sottoposto a un salto di pressione molto limitato.

### Compressori volumetrici alternativi

L'aumento di pressione è ottenuto comprimendo il gas con stantuffi a tenuta entro i cilindri; sono adatti per grandi variazioni di pressione con portate limitate.

Il moto traslatorio dello stantuffo è ottenuto dal moto rotatorio di un motore elettrico interponendo un meccanismo di biella-manovella.

Il funzionamento può essere *a semplice effetto* o *a doppio effetto* (una mandata a ogni corsa).

Il compressore è caratterizzato dal **rapporto di compressione manometrica**:

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

Il compressore funziona come un sistema aperto; il lavoro esterno netto scambiato tra fluido e stantuffo, considerando adiabatica la compressione, è dato da:

$$l_{ad} = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left( 1 - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

Se la compressione fosse isoterma il lavoro, di minor entità, sarebbe:

$$l_{is} = R \cdot T \cdot \frac{p_2}{p_1}$$

In realtà la compressione comporta un aumento di temperatura e il calcolo più attendibile è effettuato con una politropica sostituendo a  $k$ , nell'espressione del lavoro, un esponente adeguato (per es. 1, 3).

Il ciclo effettivo si scosta dal ciclo teorico principalmente per l'azione delle valvole.

Il volume residuo del gas al termine della compressione  $V_3$  è detto *spazio nocivo*, in quanto il gas contenuto torna a espandersi nella corsa successiva

impedendo che lo spazio disponibile per la nuova carica coincida con la cilindrata  $V$ .

Si definisce il *coefficiente di spazio nocivo*:

$$m = \frac{V_3}{V}$$

Tenuto conto del rendimento del compressore  $\eta_c$  la **potenza assorbita dal compressore** è:

$$N_{ass} = \frac{Q_m \cdot l_{ad}}{\eta_c}$$

La portata massica  $Q_m$  si ricava dalla portata volumetrica in aspirazione:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho_{asp}$$

**Portata volumetrica** per un funzionamento *a semplice effetto*:

$$Q_v = \eta_v \cdot z \cdot \pi \frac{D^2}{4} \cdot C \cdot \frac{n}{60}$$

Il rendimento volumetrico  $\eta_v$  tiene conto sia dello spazio nocivo sia delle perdite attraverso le valvole.

Con il funzionamento *a doppio effetto* non si ottiene un raddoppio della portata a causa della presenza dello stelo di collegamento allo stantuffo, che riduce il volume disponibile.

La regolazione di portata e potenza è effettuata mediante uno strozzamento della portata all'aspirazione.

Con l'aumento del rapporto di compressione  $\pi$  il volume finale del gas si riduce e tende a coincidere con lo spazio nocivo; per questo motivo per valori  $\pi > 6 \div 8$  si ricorre a **compressori multistadio**: il fluido percorre in serie due o più cilindri raggiungendo via via pressioni più elevate.

Per evitare eccessivi riscaldamenti del gas si introduce una **refrigerazione intermedia**: tra uno stadio e quello successivo il gas viene raffreddato attraversando uno scambiatore di calore. In questo modo si riduce il lavoro di compressione in quanto la successione di adiabatiche con la refrigerazione intermedia a pressione costante si avvicina a una compressione isoterma.

Il risparmio massimo si ottiene per una refrigerazione alla pressione intermedia:

$$p = \sqrt{p_1 \cdot p_2}$$

### Compressori volumetrici rotativi

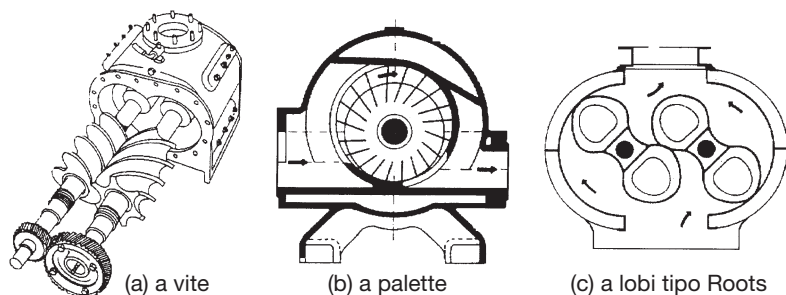
I compressori rotativi possono funzionare a frequenze di rotazione elevate con rumore e vibrazioni limitate, in accoppiamento diretto con turbine e motori elettrici.

Trovano largo impiego per rapporti di compressione non eccessivamente elevati.

Gli svantaggi possono essere costituiti da:

- rendimento poco elevato;
- usura delle parti mobili;
- perdite volumetriche per una tenuta non perfetta.

I tre tipi più comuni di compressori rotativi sono:



Le macchine rotative sono usate anche come pompe a vuoto: aspirando aria da un ambiente vi realizzano una depressione, talvolta vicina al vuoto assoluto.

## Turbocompressori e ventilatori

I **turbocompressori** sono macchine operatrici a gas che funzionano secondo i principi generali delle macchine dinamiche (pompe centrifughe, turbine). Il campo delle prestazioni, pressioni e portate, è molto ampio. I turbocompressori possono essere radiali centrifughi o assiali.

Normalmente sono multistadio, costituiti da una successione di giranti collegate da canali a sezione crescente, che svolgono la funzione di diffusore convogliando il gas sullo stadio successivo.

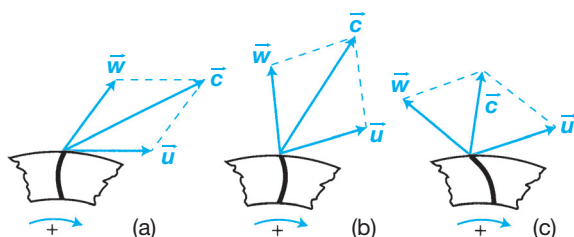
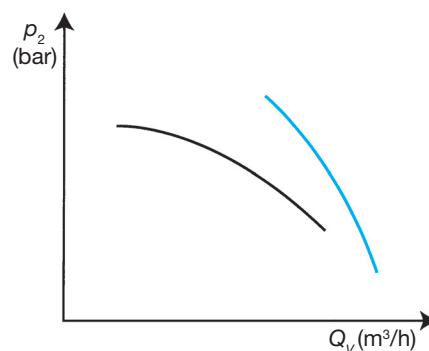
I turbocompressori *assiali* hanno la struttura di una turbina multipla a reazione: su un rotore sono distribuite diverse corone di palette di altezza decrescente dall'entrata verso l'uscita; il distributore porta le palette fisse che deviano il getto tra uno stadio e il successivo.

Sono adatti per portate anche molto elevate, con rapporti di compressione intermedi e raggiungono i migliori rendimenti tra tutte le macchine operatrici a gas (fino al 90%).

### Curve caratteristiche

La curva caratteristica dei compressori assiali è più ripida: il campo di funzionamento è più limitato rispetto a quello del compressore centrifugo; il vantaggio è di poter offrire discreti aumenti di pressione alla mandata con una riduzione limitata della portata.

Il **ventilatore** è una macchina operatrice con la funzione di provocare lo spostamento di una portata di aeriforme senza una variazione significativa della pressione.



La struttura è quella dei turbocompressori centrifughi o assiali (a elica) con una differenza nella forma delle palette: nei compressori la soluzione più conveniente è quella con le palette rivolte all'indietro rispetto al senso del

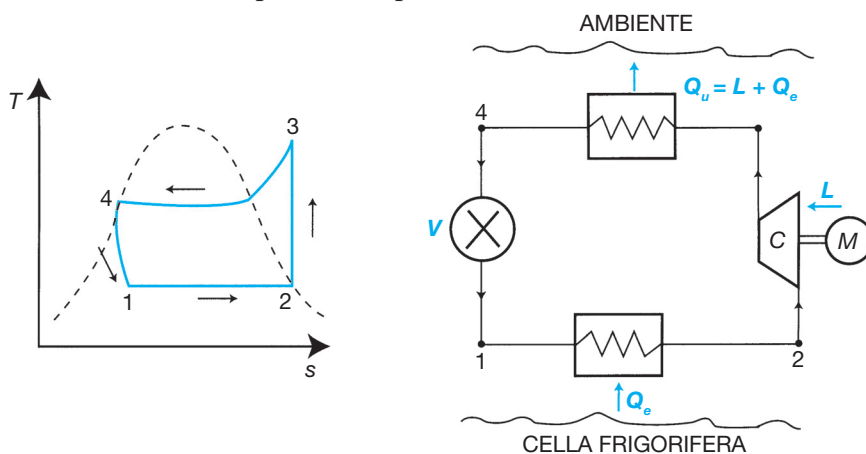
moto, mentre nei ventilatori le palette sono curvate in avanti per aumentare la velocità in uscita.

Per il calcolo della **potenza** il ventilatore può essere considerato come una macchina idraulica essendo molto ridotta la variazione di pressione e quindi pressoché costante la massa volumica. Tra l'entrata e l'uscita la variazione di carico per una portata unitaria è determinata essenzialmente dalla variazione di energia cinetica  $\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$ .

## Impianti frigoriferi e pompe di calore

### Il ciclo inverso

L'impianto frigorifero realizza un **ciclo inverso** con la funzione di mantenere a bassa temperatura  $T_{min}$  un ambiente (per esempio una cella frigorifera) prelevandone energia termica da riversare nell'ambiente circostante che si trova a una temperatura superiore  $T_{max}$ .



Alla temperatura minima del ciclo avviene la vaporizzazione del fluido che compie il ciclo (fluido refrigerante); alla temperatura massima avviene la sua condensazione. L'assorbimento di lavoro è dovuto al compressore, azionato da un motore elettrico; nella valvola di laminazione V avviene uno *strozzamento* della portata fluida (con setto poroso o tratto di capillare o valvola semichiusa), con conseguente caduta di temperatura e pressione. L'**espansione** viene considerata **isoentalpica**.

Il ciclo assorbe calore  $Q_e$  dall'ambiente freddo e cede il calore  $Q_u$  all'ambiente caldo a spese di una quantità di lavoro  $L$ :

$$Q_u = Q_e + L$$

Lo scambio energetico utile in questo ciclo è  $Q_e$ , mentre l'energia spesa è  $L$ ; si definisce l'**efficienza** (o resa) **frigorifera**:

$$\varepsilon = \frac{Q_e}{L}$$

Se si realizzasse un ciclo inverso di Carnot l'efficienza sarebbe pari a:

$$\varepsilon = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}}$$

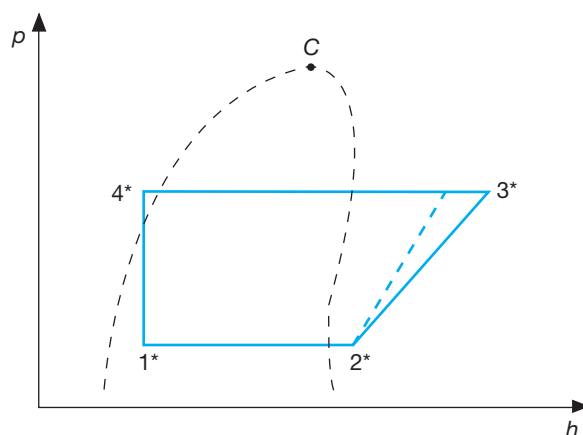
Spesso il ciclo frigorifero viene rappresentato su un diagramma in coordinate entalpia-pressione, in cui i due passaggi di stato sono tratti orizzontali ( $p = \text{costante}$ ) e l'espansione isoentalpica è verticale.

**Potenza assorbita** dal compressore:

$$N_{\text{ass}} = \frac{Q_m(h_{3^*} - h_{2^*})}{\eta_c}$$

**Potenza frigorifera utile:**

$$N_f = Q_m \cdot (h_{3^*} - h_{4^*})$$



## Impianti ad assorbimento

Il ciclo frigorifero ad assorbimento si basa sulla soluzione di un fluido refrigerante (ammoniaca) in un fluido assorbente (acqua).

*La caratteristica peculiare del ciclo si ha nella fase di ritorno alla pressione alta del ciclo; non si ha compressione del vapore, ma il suo assorbimento, tramite un **assorbitore**, in una soluzione acquosa, che poi viene trasferita con una pompa nel **generatore**.*

Fornendo calore dall'esterno, dalla soluzione concentrata si separa di nuovo il vapore di ammoniaca, che torna al condensatore, mentre la soluzione impoverita di  $\text{NH}_3$  dal generatore torna per gravità nell'assorbitore.

Il calore utilizzato per la separazione può essere prodotto da resistenze elettriche, dalla combustione di gas o, più convenientemente, può essere recuperato da acqua calda o vapore residuo di un processo industriale, altrimenti dispersi in atmosfera. L'energia spesa per il pompaggio della soluzione è trascurabile in confronto a quella che si renderebbe necessaria per la compressione del vapore.

La presenza dell'acqua nell'impianto impedisce di lavorare a temperature prossime o inferiori a  $0^\circ\text{C}$ ; praticamente il ciclo ad assorbimento si utilizza per produrre acqua refrigerata a  $4\text{-}5^\circ\text{C}$ . Gli impianti più piccoli si utilizzano per esempio nei camper, con alimentazione a GPL o con resistenze elettriche; dimensioni maggiori (potenze anche dell'ordine di centinaia di kilowatt) si riscontrano in campo industriale, sfruttando recuperi di calore inutilizzato o nella cosiddetta **trigenerazione** (elettricità, caldo, freddo). La mancanza del compressore favorisce una maggior silenziosità dell'impianto e una maggior durata nel tempo.

## Fluidi refrigeranti

Il fluido che nell'impianto ha la funzione di convogliare il calore da un ambiente all'altro attraverso i passaggi di stato è detto **fluido refrigerante** (o frigorifero o frigorifero). La scelta del fluido è dettata da diverse esigenze, tecniche, economiche e di sicurezza; le condizioni ideali sono:

- non infiammabile, tossico, irritante o corrosivo;
- chimicamente stabile, inerte e poco solubile in acqua;

- non dannoso per l'ambiente (distruzione dell'ozono atmosferico, effetto serra);
- elevata temperatura critica e bassa temperatura di solidificazione;
- grande calore di vaporizzazione e volumi massici non troppo elevati;
- con passaggi di stato a pressioni non troppo alte, per ridurre il lavoro di compressione;
- costi contenuti.

Un parametro importante è il **coefficiente di produzione frigorifera volumetrica**, dato dal rapporto tra il calore di vaporizzazione e il volume massico del vapore saturo:

$$\varphi = \frac{q_v}{v_{vs}} \quad \text{J/kg} \cdot \text{kg/m}^3 = \text{J/m}^3$$

Un refrigerante con alto coefficiente fornisce pari effetto frigorifero (calore sottratto all'ambiente freddo) con minor portata volumetrica, quindi con minor potenza richiesta al compressore.

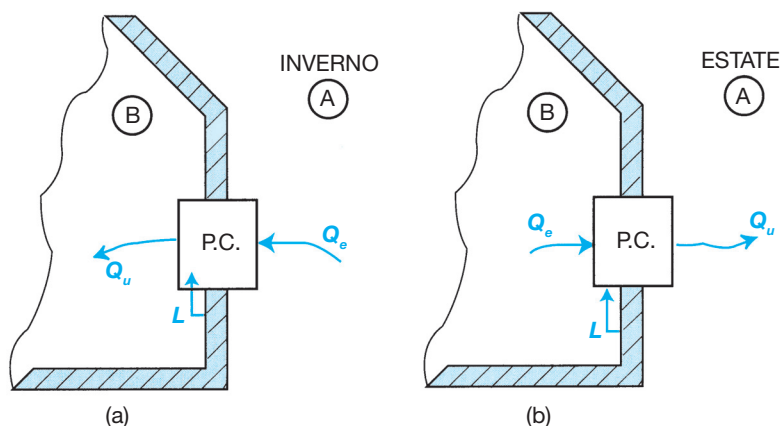
Per i refrigeranti è ampiamente diffusa la **designazione** contenuta nella norma americana ASHRAE Standard 34, costituita dalla lettera R (refrigerante), seguita da un codice alfanumerico che dipende dalla composizione chimica.

A partire dal 1990 è stato sottoposto a restrizioni sempre più pesanti l'uso dei **freon** (refrigeranti sintetici al cloro e fluoro), essendo stati indicati come responsabili della riduzione dell'ozono nell'atmosfera terrestre a causa della diffusione di atomi di cloro.

Si verifica attualmente un rinnovato interesse per **refrigeranti naturali**, come l'ammoniaca, l'anidride carbonica, il propano e l'isobutano.

### Le pompe di calore

Un ciclo inverso può essere usato anche per uno scopo diverso dalla refrigerazione; mettendo in comunicazione l'impianto con un ambiente freddo A e uno caldo B e fornendo lavoro, si può prelevare calore dall'ambiente freddo per «pomparlo» nell'ambiente caldo, come in un impianto idraulico si pompa un liquido da un livello basso a un livello alto. In tal caso si parla di **impianto a pompa di calore**.



L'impianto ha la struttura dell'impianto frigorifero, ma è reversibile: una valvola permette di invertire la funzione dei suoi scambiatori di calore, invertendo il flusso degli scambi termici.

La pompa di calore, posta in un'abitazione B a contatto con l'ambiente esterno A, può funzionare d'inverno per il riscaldamento e d'estate per la refrigerazione.

Dal punto di vista energetico l'efficienza però non è la stessa nei due casi:

#### a) Riscaldamento

$Q_u$  è il calore fornito all'ambiente da riscaldare,  $L$  è l'energia elettrica spesa per azionare il compressore; per l'efficienza è in uso nel settore la denominazione anglosassone **COP** (*Coefficient Of Performance*):

$$\text{COP} = \frac{Q_u}{L}$$

#### b) Refrigerazione

$Q_e$  è il calore sottratto all'ambiente da raffreddare,  $L$  ha lo stesso significato del caso precedente; la definizione di efficienza ricalca quella considerata per gli impianti frigoriferi ed è indicata con il coefficiente **EER** (*Energy Efficiency Ratio*):

$$\text{EER} = \frac{Q_e}{L}$$

Dal primo principio si ha  $Q_e = Q_u - L$  e quindi si ottiene:

$$\text{EER} = \frac{Q_u - L}{L} = \text{COP} - 1$$

*In fase di riscaldamento la pompa di calore ha un'efficienza superiore di un'unità a quella in fase di refrigerazione.*

Il motivo sta nel fatto che in fase di riscaldamento l'impianto può prelevare dall'ambiente freddo energia  $Q_e$  del tutto gratuita (aria esterna, acqua, terreno). Esistono diverse soluzioni di impianto possibili a seconda dell'ambiente da cui si preleva calore e del fluido a cui esso viene fornito: aria-aria, acqua-aria, aria-acqua, acqua-acqua.

Sull'efficienza influisce in modo decisivo il salto di temperatura su cui opera l'impianto; per esempio, se nel riscaldamento di ambienti l'aria esterna scende al di sotto dei 2 °C, l'efficienza risulta troppo bassa e diventa necessario anche un sistema di sbrinamento.

*Le pompe di calore sono adatte a fornire calore a bassa temperatura (acqua sanitaria, riscaldamento di locali o di acqua per piscine, produzione di calore per alcuni processi industriali, essiccazioni...).*