

**Corso di**

---

**IMPIANTI TECNICI per l'EDILIZIA**

**Macchine frigorifero**



Prof. Paolo ZAZZINI  
Dipartimento INGEO  
Università "G. D'Annunzio" Pescara  
[www.lft.unich.it](http://www.lft.unich.it)

## LA PRODUZIONE DEL FREDDO

Per **refrigerazione** si intende il **trasferimento di calore** da un ambiente in cui risulta in eccesso ad un altro in cui può essere agevolmente smaltito.

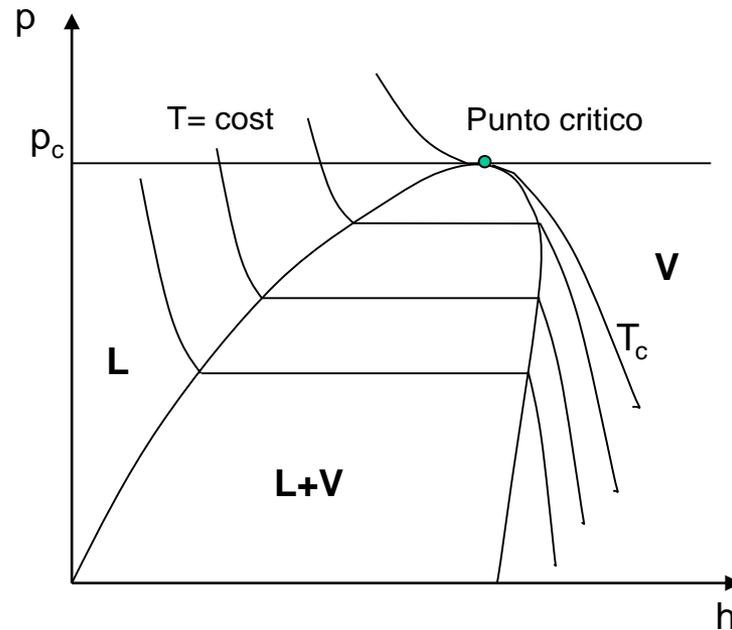
Questo **processo** viene **realizzato da un fluido refrigerante** (sistema termodinamico) **in un circuito frigorifero.**

Il fluido refrigerante deve avere la **capacità di asportare calore dall'ambiente da refrigerare** *evaporando a bassi valori di pressione e temperatura* e **cederlo all'ambiente esterno** *condensando a più elevate pressione e temperatura.*

Il calore che il fluido refrigerante asporta coincide con il suo **calore latente di vaporizzazione** (*calore necessario all'unità di massa [J/kg] di una sostanza per effettuare il passaggio di stato dell'evaporazione ad un certo valore della temperatura*).

**Ad ogni valore della temperatura** corrisponde un **certo valore del calore latente** di vaporizzazione

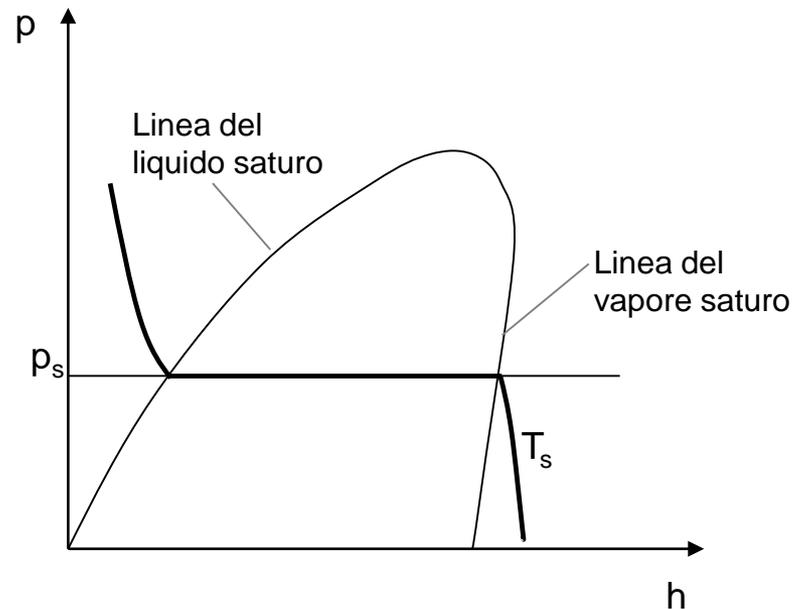
## Diagramma pressione entalpia



**Punto critico:** punto di massimo della curva.

Al di sopra della **temperatura critica** il fluido si presenta **solo allo stato gassoso**, al di sotto della temperatura critica, possono avvenire **passaggi di stato** (vaporizzazione e condensazione)

Si definisce **temperatura di saturazione** di un fluido, **in corrispondenza di un certo valore della pressione**, quella alla quale *ha luogo il processo di vaporizzazione al valore considerato della pressione*

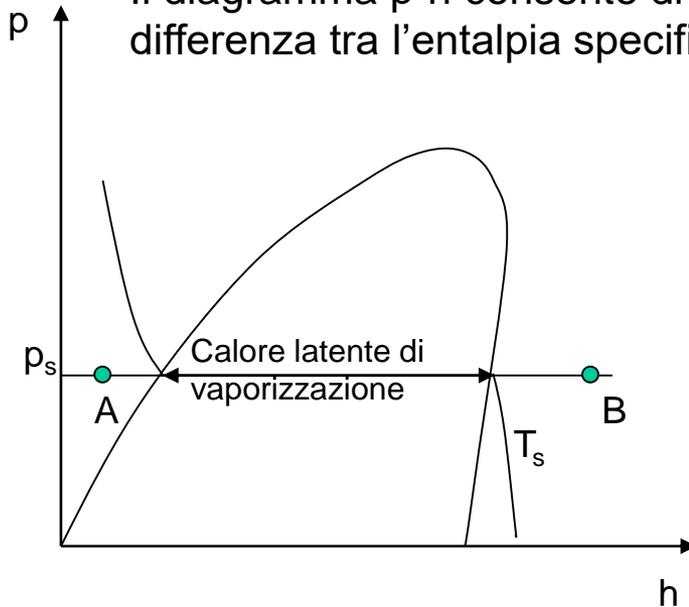


Un liquido che, **per una data pressione**, si trovi **alla temperatura di ebollizione**, si dice **saturo**.

Un **vapore** che, **per una data pressione**, si trovi **alla temperatura di condensazione** si dice **saturo**.

Si dice **saturo umido** se è in presenza di liquido, **saturo secco** se è in assenza di liquido.

Il diagramma p-h consente di determinare il **calore latente di vaporizzazione** come differenza tra l'entalpia specifica del vapore saturo e quella del liquido saturo



$$dq = dh + dl'$$

**Liquido sottoraffreddato:** liquido ad una temperatura più bassa di quella di saturazione alla pressione considerata (**punto A**)

**Vapore surriscaldato:** vapore ad una temperatura più elevata di quella di saturazione alla pressione considerata (**punto B**)

**L'entalpia di un vapore saturo** è data dalla *somma dell'entalpia del liquido saturo più il calore latente di vaporizzazione.*

**Es: Entalpia del vapor d'acqua saturo**

entalpia dell'acqua a 100°C = 413,4 kJ/kg (calore necessario a portare l'acqua da 0 a 100°C)

calore latente di vaporizzazione a 100°C = 2257 kJ/kg

$$h = 413,4 + 2257 = 2670,4 \text{ kJ/kg}$$

La **temperatura di saturazione** di un liquido dipende **esclusivamente dalla pressione**

*Temperatura di ebollizione dell'acqua a 101,325 kPa (pressione atmosferica): 100 °C*

*Essa aumenta all'aumentare della pressione (recipiente sigillato) e diminuisce al diminuire di questa (es. in alta montagna)*

Es. a 31.15 kPa (0,3 atm) vale 70 °C

a 198.54 kPa (1,96 atm) vale 120 °C

Caratteristiche di un **buon fluido frigorifero**:

**Non infiammabile, non tossico, non nocivo** per l'ambiente, **non corrosivo** per i tubi.

**Ridotto volume specifico** per diminuire la cilindrata del compressore.

**Compatibile con gli olii lubrificanti** impiegati nei compressori.

**Bassa temperatura di saturazione** alla pressione atmosferica (es. temperatura di saturazione dell'ammoniaca alla  $p_{\text{atm}}$ : -33,35 °C)

**Valori della pressione di saturazione alle temperature richieste non inferiori a quella atmosferica** (per evitare ingressi d'aria nel circuito).

**Elevati valori del calore latente di vaporizzazione alla pressione atmosferica**, per ridurre la quantità di fluido presente a parità di effetto frigorifero ottenuto.

## Tipologie di refrigeranti utilizzate

Fino a circa trenta anni fa i refrigeranti utilizzati erano:

**CFC:** clorofluorocarburi totalmente alogenati

**HCFC:** idroclorofluorocarburi parzialmente alogenati,

Fluidi di sintesi derivanti da metano ( $\text{CH}_4$ ) ed etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) in cui gli atomi di idrogeno sono sostituiti totalmente o parzialmente da Cloro e Fluoro

L'utilizzo incontrollato di questi fluidi (commercialmente denominati **freon**) ha determinato un **assottigliamento della fascia di ozono** ( $\text{O}_3$ ), che costituisce un utile filtro contro le radiazioni U.V.

Nella stratosfera **le molecole di CFC** vengono **dissociate dalla radiazione solare** liberando **atomi di cloro in grado di distruggere l'ozono**.

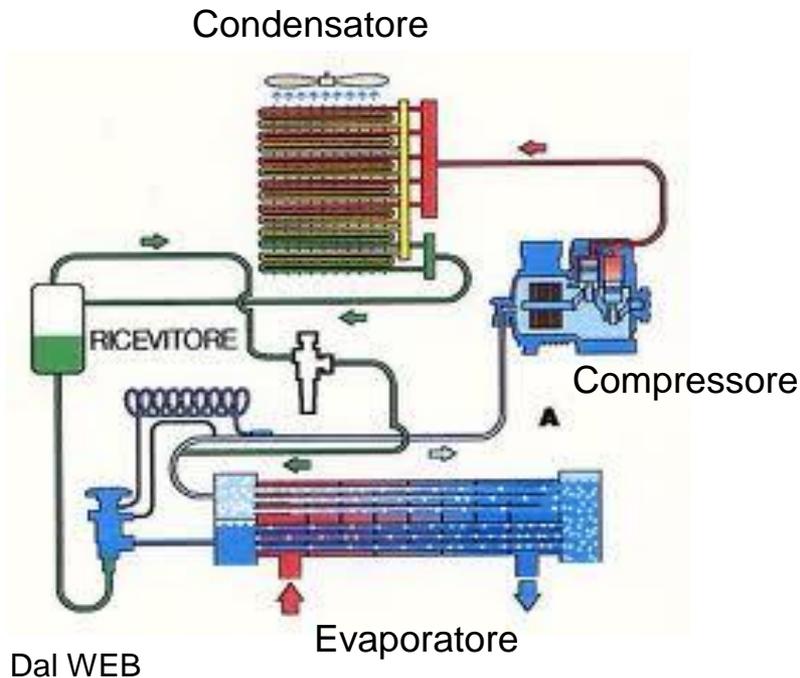
Gli HCFC, data la presenza di atomi di idrogeno, **presentano minore stabilità** che riduce la vita media di circa 10 volte, **risultando meno nocivi**.

A seguito del **protocollo di Montreal** (1992) e successive leggi nazionali applicative (in Italia **L. 549/93**), **sia i CFC che gli HCFC sono stati progressivamente eliminati e sostituiti con nuovi fluidi privi di cloro (HFC) a potenziale distruttivo dell'ozono nullo** (Ozon Depletion Power = 0 ).

## CIRCUITO FRIGORIFERO

Un circuito frigorifero è costituito da:

**Un evaporatore:** scambiatore di calore in cui il fluido evapora asportando calore latente dall'ambiente da refrigerare



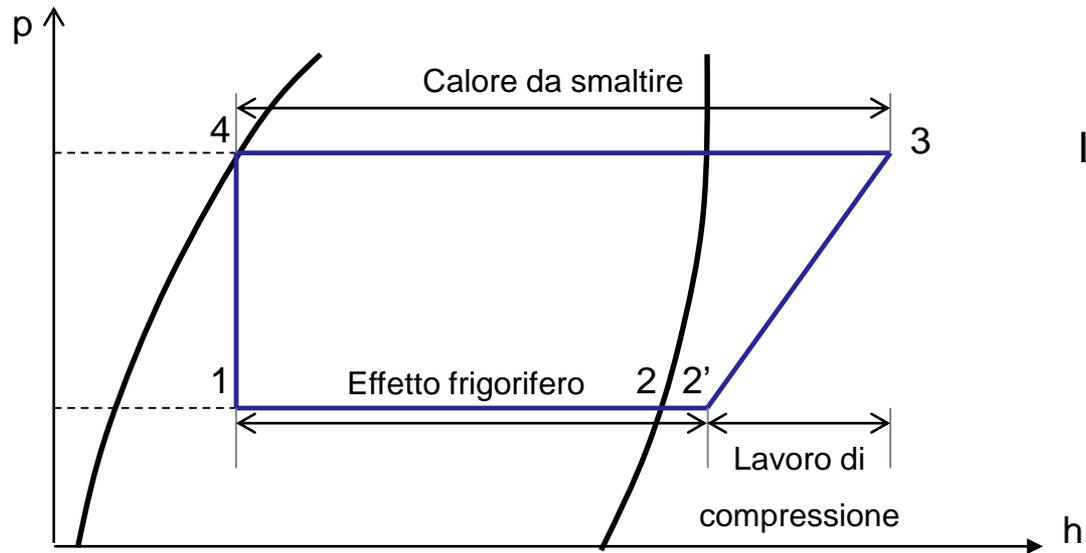
**Un compressore** che aspira il fluido refrigerante evaporato e lo comprime innalzandone pressione e temperatura

**Un condensatore** in cui il vapore condensa cedendo il calore latente di condensazione all'ambiente circostante

**Una valvola di laminazione** in cui il condensato si espande diminuendo di pressione e temperatura riportandosi al punto iniziale del ciclo.

**Una serie di tubazioni** di collegamento fra i vari organi

## Descrizione del ciclo frigorifero in un diagramma p-h.



I Principio della Termodinamica

$$dq = dh + dl'$$

Tratto 1-2': trasformazione isobara nell'**evaporatore** senza lavoro tecnico:  $dq = dh$

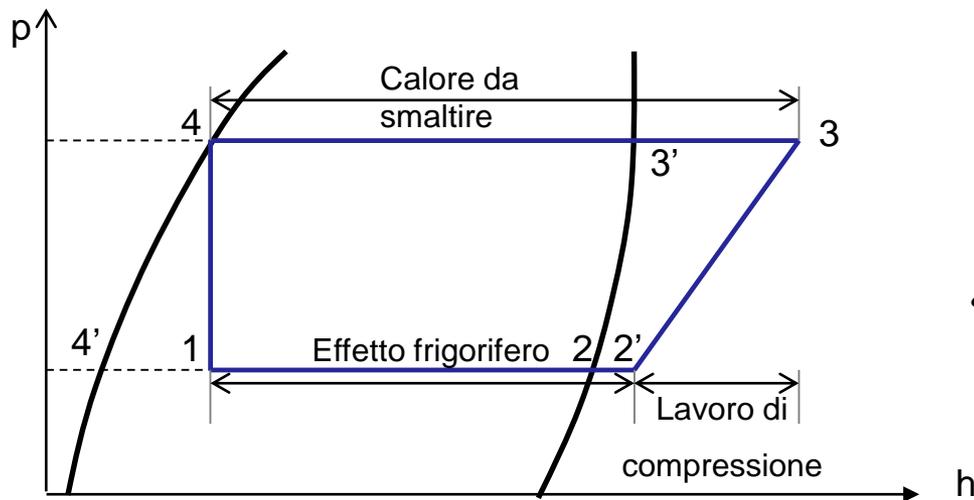
Tratto 3-4: trasformazione isobara nel **condensatore** senza lavoro tecnico:  $dq = dh$

Tratto 2'-3: trasformazione adiabatica di compressione nel **compressore**:  $dl' = -dh$

Il diagramma p-h consente di **determinare agevolmente** l'effetto frigorifero ed il lavoro di compressione:

**Effetto frigorifero:**  $q_{12'} = h_{2'} - h_1$

**Lavoro di compressione:**  $l_{2'3} = h_3 - h_{2'}$



**Coefficiente di effetto utile  $\varepsilon$**   
(COP: coefficient of performance)

$$\varepsilon = \frac{\text{effetto frigorifero}}{\text{lavoro di compressione}} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_3 - h_{2'}}$$

**Tratto 4-1:** Il liquido saturo espande attraversando la valvola di laminazione evaporando parzialmente; la trasformazione ha luogo rapidamente, praticamente senza cessione né guadagno di calore (**isoentalpica**); il tratto 4'-1 non è più sfruttabile per produrre effetto frigorifero

**Tratto 1- 2':** La miscela liquido + vapore entra nell'evaporatore dove asporta calore dall'ambiente da refrigerare (effetto frigorifero); il refrigerante deve uscire in condizioni di **vapore surriscaldato (2')** anziché saturo secco (2) per evitare danni al compressore

**Tratto 2'- 3:** Il compressore aspira il vapore surriscaldato nello stato 2' e lo comprime in modo adiabatico fino allo stato 3; il lavoro meccanico del compressore si traduce in aumento del contenuto entalpico del vapore

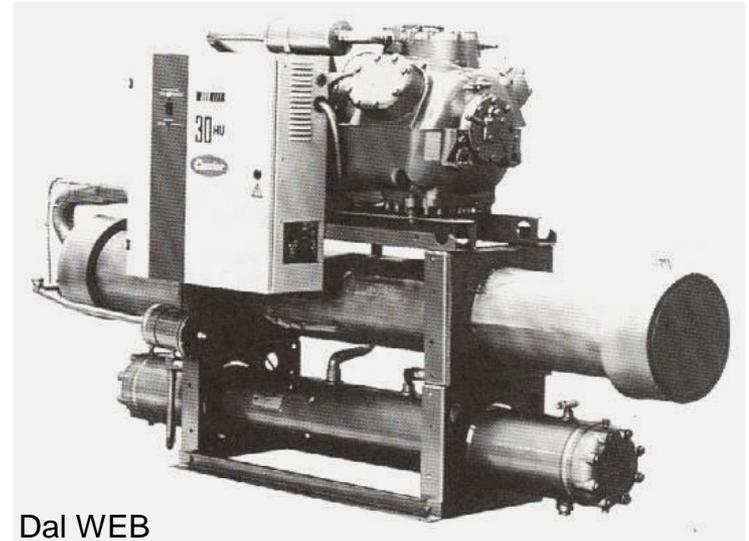
**Tratto 3- 4:** Il vapore surriscaldato entra nel condensatore, si raffredda fino al punto 3' e successivamente condensa fino al punto 4; per aumentare l'effetto frigorifero si può sottoraffreddare il fluido in modo da diminuire l'entalpia di ingresso all'evaporatore.

## Le macchine frigorifero

Le macchine frigorifero a **compressione di vapore** possono essere dotate di **condensatore** raffreddato ad **aria** o ad **acqua**: **nelle applicazioni impiantistiche** (potenze frigorifere tra 100 e 500 kW) i gruppi frigoriferi con condensatore ad aria sono i più comuni

Esempio di **macchina frigorifero a semplice compressione** di vapore con **condensatore raffreddato ad acqua**.

Il **condensatore** si distingue dall'evaporatore per le **maggiori dimensioni**



Indipendentemente dal fluido refrigerante del condensatore si possono trovare **macchine frigorifere delle seguenti tipologie:**

**A singolo circuito frigorifero con un solo compressore**  
(per potenze fino a 100 kW)

**A doppio circuito frigorifero**

Le macchine a **singolo circuito** con un solo compressore sono caratterizzate da:

**Basso costo** se confrontate con macchine di pari potenza a due circuiti

**Basso grado di affidabilità:** un guasto al compressore causa il fuori servizio della macchina

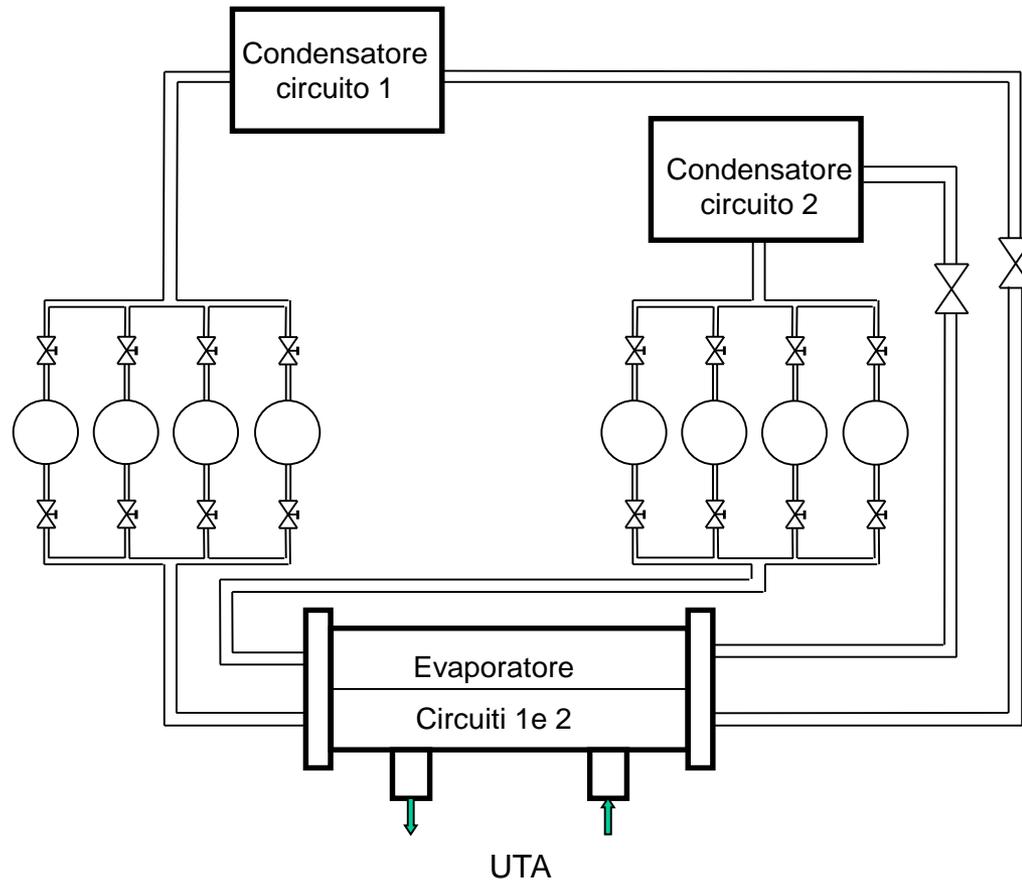
L'utilizzo di **più compressori in parallelo** consente di evitare il rischio suddetto: il **compressore in avaria** può essere **intercettato** senza pregiudicare il funzionamento dei rimanenti

Se si verifica però la **bruciatura del motore**, il mancato rapido intervento può causare la **messa in circolo di acidi** che danneggiano **l'intero circuito** deteriorando **l'isolamento degli avvolgimenti** elettrici degli altri compressori e provocandone nel tempo la successiva bruciatura.

## Macchine a **doppio circuito frigorifero**

Su ciascun circuito sono montati uno o più compressori in parallelo (fino a 4)

Nell'evaporatore **due circuiti per il fluido frigorifero ed uno per l'acqua**



Questa soluzione consente di arrivare ad **elevate potenze** con compressori alternativi (**fino a 900 kW**)

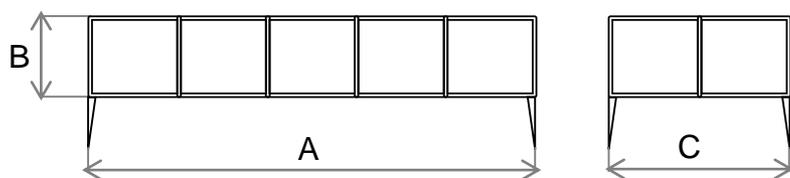
Nella gamma di potenze tra 100 e 900 kW costituisce la **soluzione più comune** poiché **consente la continuità del servizio** nel caso di guasto ad un circuito sia pure a carico ridotto

Permane il **rischio legato alla presenza di più compressori in parallelo** per la bruciatura di un motore

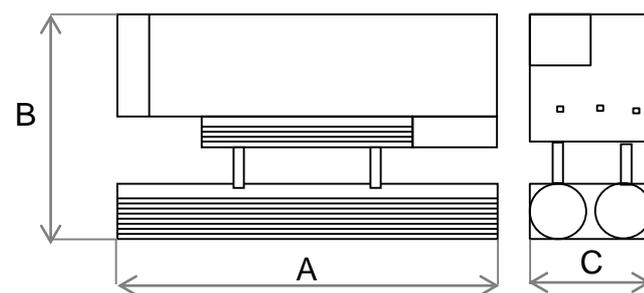
Inoltre **un eccessivo frazionamento della potenza frigorifera** su più compressori comporta una **diminuzione di rendimento** [compressori di potenza piccola (100 kW) hanno rendimento più basso di quelli più grandi (200-300 kW)]

## Dimensioni tipiche indicative

Condensatore raffreddato ad aria



Condensatore raffreddato ad acqua



Potenza frigorifera (kW)	Peso (kg)	Dimensioni (m)		
		A	B	C
80	1050	3,0	1,5	2,0
100	1300	3,0	1,5	2,0
130	1650	4,0	1,5	2,0
150	1750	4,0	1,5	2,0
180	2050	5,0	1,5	2,0
200	2100	5,0	1,5	2,0
260	3300	4,5	2,2	2,2
300	3400	4,5	2,2	2,2
400	3950	5,5	2,2	2,2
460	5000	7,0	2,2	2,2
550	5200	7,0	2,2	2,2

Potenza frigorifera (kW)	Peso (kg)	Dimensioni (m)		
		A	B	C
60	430	1,9	1,3	0,5
130	730	2,8	1,35	0,5
195	1250	2,8	1,4	0,6
290	2570	3,0	1,7	0,75
360	2900	3,0	1,7	0,75
575	4350	3,8	1,85	1,0
780	4950	3,8	1,9	1,0
870	4950	3,8	1,9	1,0
1000	6560	3,8	2,0	1,4
1250	6560	3,8	2,0	1,4

E' ancora a volte utilizzata, nella pratica ingegneristica, una particolare unità di misura appartenente al Sistema Tecnico degli Ingegneri denominata **Frigoria (Frig)**.

E' una unità di energia che si usa per **misurare l'effetto frigorifero** di una macchina frigorifera

$$1 \text{ Frig} = 1 \text{ kcal}$$

Ricordando che:  $1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$

si ha:  $1 \text{ Frig} = 4186 \text{ J}$

L'unità di potenza corrispondente ad essa è pertanto la **Frigoria per ora (Frig/h)**

$$\text{Si ha: } 1 \frac{\text{Frig}}{\text{h}} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = \frac{4186 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 1,163 \text{ W}$$

$$\text{da cui: } 1 \text{ W} = 0,86 \frac{\text{Frig}}{\text{h}}$$

## La centrale frigorifero

Le **macchine frigorifero** sono **collocate in un locale tecnico** (centrale frigorifero) da cui si diramano le tubazioni che trasportano l'acqua refrigerata verso la UTA o i fan coil.

La **centrale frigorifero** può essere **localizzata nel piano cantinato** (piano più basso dell'edificio) a causa del **peso elevato delle macchine frigorifero**, in **posizione** possibilmente **baricentrica** per ridurre i tratti orizzontali delle tubazioni che collegano la centrale stessa alle utenze

**In alternativa**, può essere **collocata in un locale separato dall'edificio**, specialmente per **grossi impianti** (ospedali, grossi edifici pubblici, centri commerciali...)

***Nella centrale frigorifera troviamo:***

*Gruppi frigorifero*

*Collettori di distribuzione*

*Pompe di circolazione per il circuito dell'evaporatore*

*Pompe di circolazione per il circuito del condensatore  
(se raffreddato ad acqua)*

*Sistemi di regolazione e controllo*

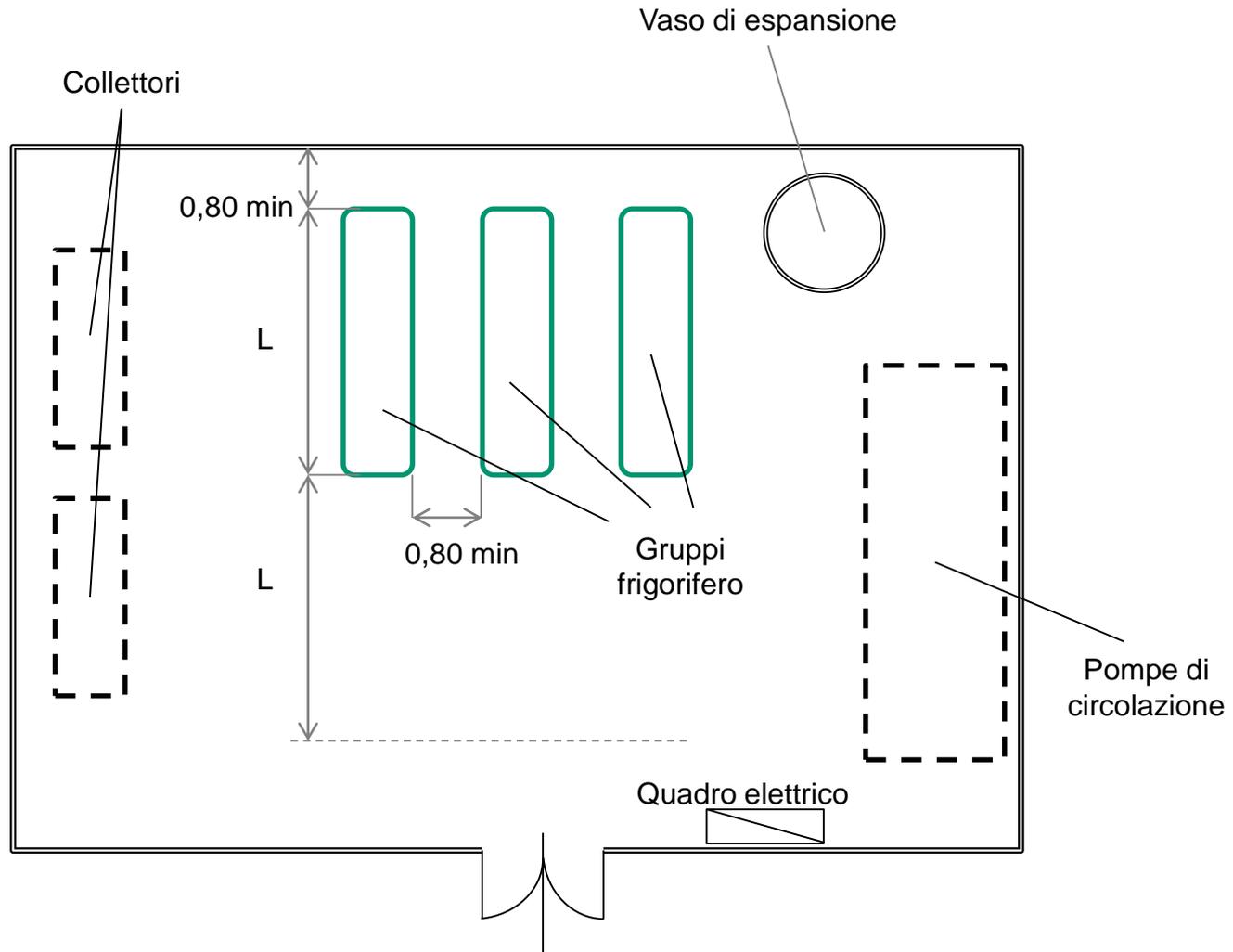
*Quadro elettrico*

Dalla centrale frigorifero si diramano **tubazioni di collegamento dell'evaporatore** alla UTA e del **condensatore** alle **torri evaporative**

Il locale deve avere dimensioni tali da consentire l'installazione delle diverse apparecchiature e lo **spazio intorno ad esse per le operazioni di manutenzione** (80 cm tutt'attorno agli apparecchi e su un lato lo **spazio necessario** per l'**estrazione** dell'intero fascio tubiero del condensatore o dell'evaporatore).

Inoltre il locale deve essere **sufficientemente illuminato** (300-500 lux)

# Caratteristiche dimensionali della centrale frigorifero



## **Le torri evaporative di raffreddamento dell'acqua**

Nelle macchine frigorifero il **calore sottratto all'evaporatore sommato al lavoro meccanico assorbito al compressore deve essere smaltito al condensatore**

**Lo smaltimento di tale energia termica può essere effettuato ad aria o ad acqua**

Durante la condensazione il **refrigerante** si mantiene **a pressione e temperatura costanti**, cedendo il calore latente di condensazione al fluido utilizzato (aria o acqua), **la cui temperatura va aumentando tra l'ingresso e l'uscita dello scambiatore**, avvicinandosi alla temperatura di condensazione del fluido refrigerante

La **quantità di calore da smaltire** in un impianto può essere valutata dal diagramma p-h; **per calcoli di prima approssimazione, può essere stimata pari alla potenza frigorifera resa aumentata del 25 %**

Negli **impianti con condensatori ad acqua**, il raffreddamento dell'acqua in uscita dal condensatore viene effettuato in apposite macchine denominate “**Torri evaporative di raffreddamento**”. Esse sono **collegate alla centrale frigorifero** con un **circuito idraulico** costituito da due tubazioni (mandata e ritorno)

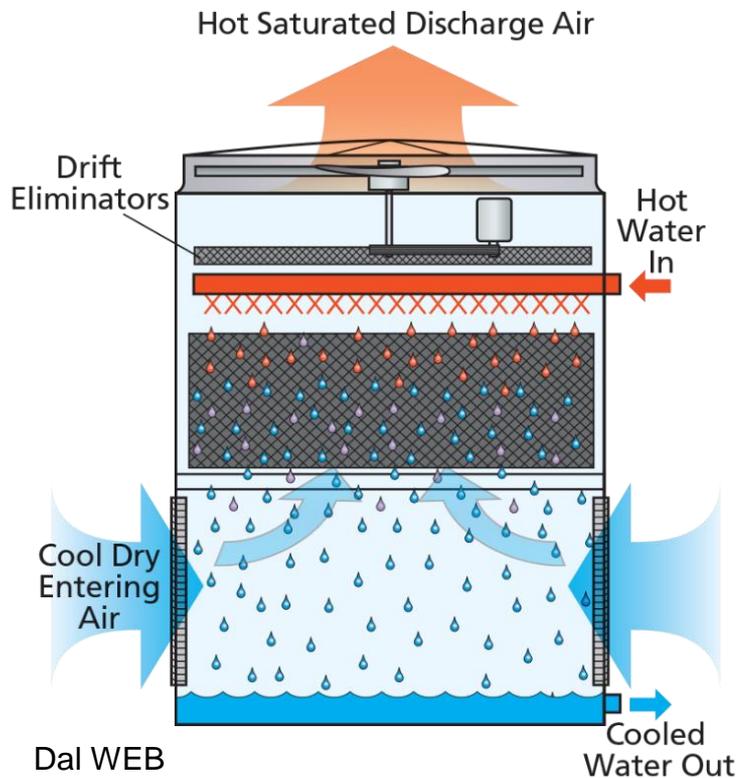


Dal WEB

L'installazione delle torri evaporative deve tener conto della **forte rumorosità** (presenza dei ventilatori e getto d'acqua polverizzata sul pacco evaporante), dell'**elevato ingombro** e del **notevole peso**, per cui vengono in genere poste alla **sommità dell'edificio**, lontane da finestre, o, in alternativa, al **suolo** a sufficiente distanza dall'edificio.

La **collocazione in un locale interno non è opportuna** poiché *tale locale dovrebbe prevedere aperture di congrue dimensioni* per l'ingresso dell'aria esterna ed uno scarico all'esterno per l'aria umida uscente dalla torre

**L'acqua calda in uscita dal condensatore** viene pompata ad un banco di ugelli spruzzatori nella parte alta della torre che distribuiscono l'acqua polverizzata sull'intera superficie interna della torre occupata dal materiale di riempimento

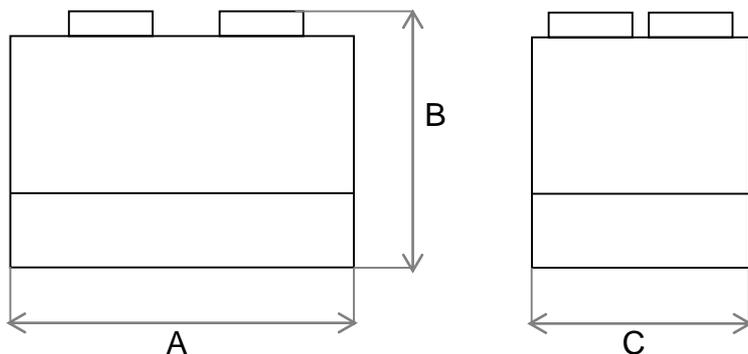


Nella caduta verso il basso **l'acqua polverizzata scambia in contro corrente con un flusso d'aria esterna** soffiata o aspirata da un ventilatore; **una piccola parte** dell'acqua nebulizzata **evapora** asportando **calore latente di vaporizzazione** dalla **restante parte di acqua** che, in tal modo **si raffredda**.

L'aria viene **aspirata** nella parte superiore della torre dal **ventilatore** e scaricata verso l'esterno.

L'acqua raffreddata **si raccoglie sul fondo della torre** da cui poi viene reinviata al condensatore

## Dimensioni tipiche indicative delle torri di raffreddamento evaporative



Potenza (kW)	Peso (kg)	Dimensioni (m)		
		A	B	C
85	480	9,0	2,4	1,2
105	500	9,0	2,4	1,2
175	650	1,8	2,4	1,2
210	680	1,8	2,4	1,2
300	750	1,8	2,7	1,2
330	1000	2,7	2,7	1,2
510	1250	3,7	2,7	1,2
610	1350	3,7	2,7	1,2
875	2000	5,5	2,7	1,2

## I CONDIZIONATORI AUTONOMI

I condizionatori autonomi monoblocco effettuano la **climatizzazione ambientale direttamente** poiché realizzano **autonomamente** i trattamenti di **raffreddamento, deumidificazione, filtrazione e diffusione dell'aria.**

Idonei per **applicazioni** che richiedono **potenze frigorifere non superiori a 6-7 kW** (civili abitazioni, piccoli locali...)

I **CONDIZIONATORI DA FINESTRA** costituivano sino ad un recente passato l'unica soluzione disponibile per il **raffrescamento di piccoli ambienti**



Dal WEB

**Tutti gli organi** che realizzano il ciclo frigorifero sono collocati **all'interno di una piccola macchina** posizionata a finestra (**soluzione mobile**) o incassata in una muratura esterna (**soluzione fissa**)

Gli **SPOT COOLER** sono la naturale evoluzione dei condizionatori da finestra. Sono **macchine mobili** in grado di seguire l'utente nei vari locali a seconda delle necessità.

Macchine molto **compatte** dotate di **filtri** in cui un unico motore serve i due ventilatori

Dal WEB



**Alcuni modelli** possono essere **utilizzati semplicemente come deumidificatori**, effettuando una diminuzione della quantità di vapore presente mediante il fenomeno della condensa

Il **raffreddamento del condensatore avviene mediante aria aspirata dall'ambiente** che deve essere poi **smaltita all'esterno attraverso un tubo di scarico** inserito in un serramento o su una parete

Lo **smaltimento della condensa** viene fatto manualmente

Gli **SPLIT SYSTEM** sono **condizionatori molto diffusi negli ultimi anni** grazie ad una **maggiore potenzialità frigorifera** in grado di condizionare una **civile abitazione** o **piccoli locali commerciali** o per il terziario



Dal WEB

Il trasferimento del **gruppo moto-condensante** all'**esterno** consente di avere una **ridotta rumorosità**, evitando dispersioni di calore all'interno del locale e superando la difficoltà di realizzare aperture nelle finestre.

Le **due unità** sono **collegate da una doppia tubazione flessibile** all'interno della quale circola il fluido refrigerante

L'unità interna è costituita generalmente da un **elettroventilatore centrifugo** e da una **batteria di raffreddamento e deumidificazione ad espansione diretta** dotata di **filtro d'aria**

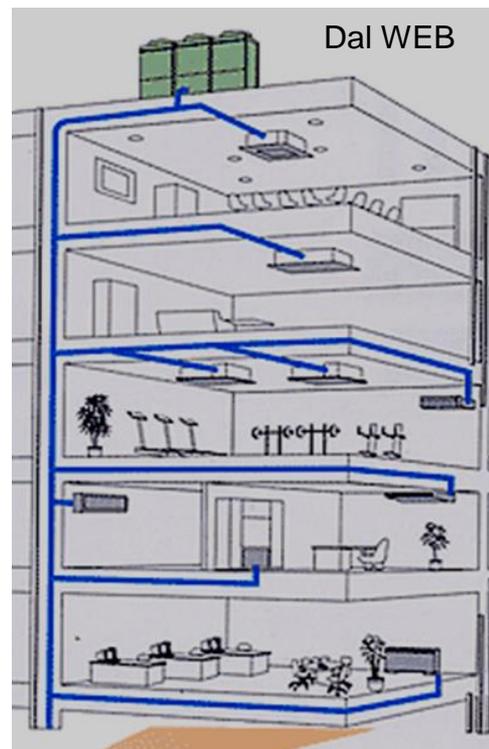


Esempio di unità interna  
a **SOFFITTO**

L'unità interna può essere collocata a **pavimento**, a **parete**, oppure a **soffitto** con l'apparecchio montato orizzontalmente all'interno dello spazio creato dalla eventuale controsoffittatura

Nelle **soluzioni con potenze più piccole**, le **unità motocondensanti** possono essere collocate **su un balcone** o fissate su **opportune staffe** su una parete esterna, mentre le **unità di dimensioni più grandi** devono essere poste sulla **copertura** dell'edificio.

Il **campo di potenze frigorifere** coperto da questo tipo di applicazione è **piuttosto ampio**; nelle situazioni con potenze più elevate si adotta la soluzione di **una unità motocondensante che alimenta più fancoil**



Per **potenze frigorifere superiori a 7- 8 kW** si può adottare la soluzione **ROOF-TOP** con la **macchina di condizionamento autonomo collocata all'esterno** (di solito sulla copertura) e la **distribuzione dell'aria in ambiente attraverso canali** passanti attraverso la copertura dell'edificio

Nella gamma di potenze **da 12 a 17 kW** viene utilizzato **un solo compressore con un unico circuito frigorifero**. Il termostato ambiente aziona il compressore per mantenere la temperatura prefissata (regolazione ON-OFF)



La circolazione dell'aria di raffreddamento del condensatore è assicurata da **uno o due ventilatori elicoidali** posti **nella parte superiore della macchina** con scarico verso l'alto

Dal WEB

Nella versione ad **inversione di ciclo** i condizionatori autonomi possono funzionare come **pompe di calore**

**Pompa di calore:** macchina funzionante secondo un **ciclo frigorifero non con lo scopo di raffreddare** un ambiente, ma **di riscaldarlo** utilizzando il **calore smaltito al condensatore.**

Nei condizionatori ad inversione di ciclo, è possibile **utilizzare la stessa macchina frigorifero** sia per **raffrescare** che per **riscaldare** invertendo la posizione logica del condensatore e dell'evaporatore.

**In estate** (raffrescamento) lo **scambiatore interno** funziona da **evaporatore** e **quello esterno** come **condensatore**, **in inverno** lo **scambiatore interno** funziona da **condensatore** e **quello esterno** come **evaporatore**

IL **COP** è tanto **più elevato** quanto **minore** è la **differenza** tra le due **temperature**

$$\text{COP (Carnot)} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

La pompa di calore ha una **buona efficienza** a condizione che la **temperatura esterna non sia eccessivamente bassa** e che **quella interna non sia eccessivamente alta**

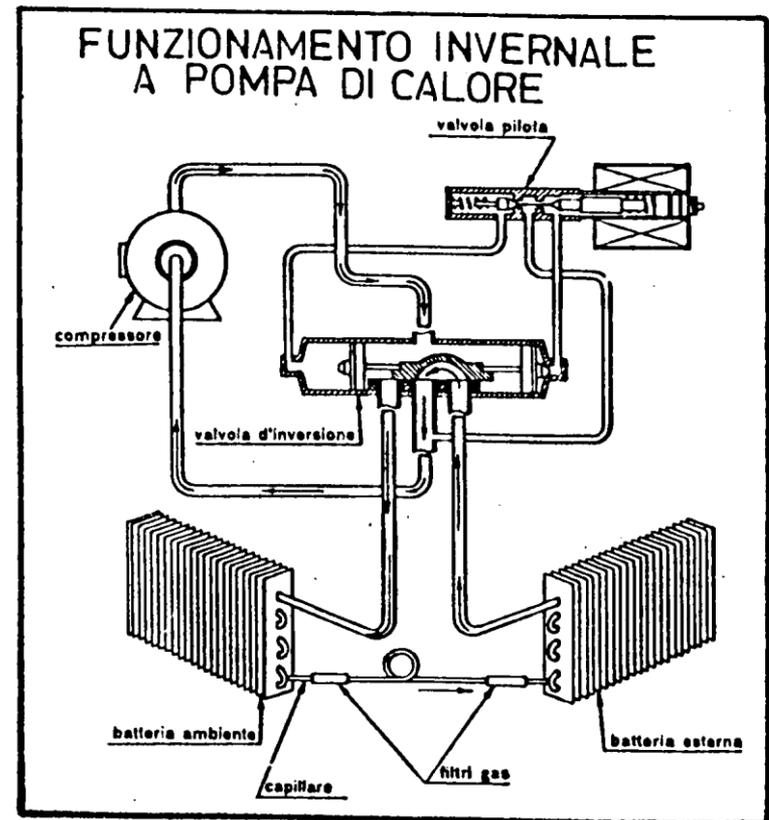
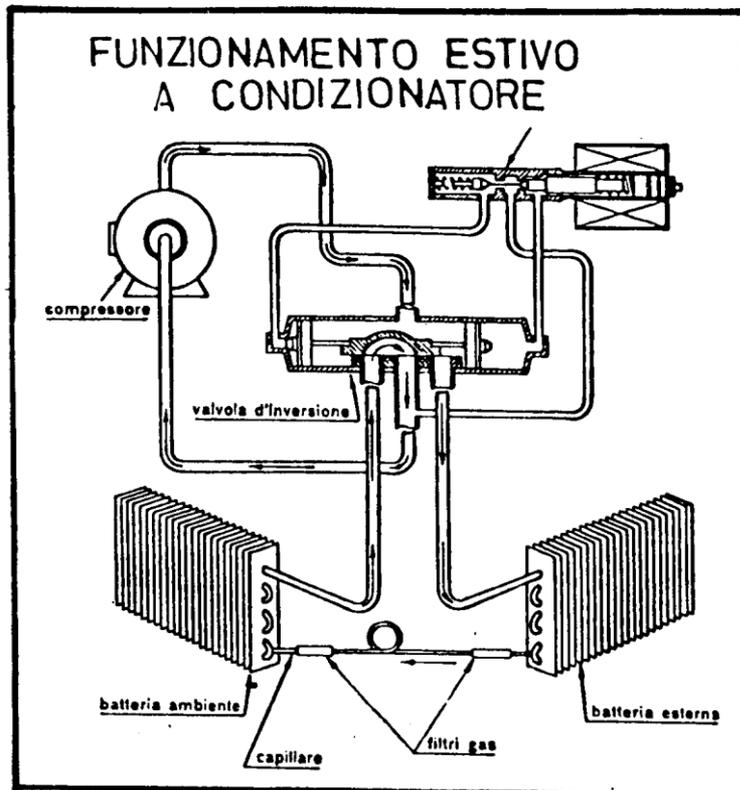
Di solito si hanno valori del coefficiente di prestazione **COP** (calore ceduto all'ambiente / lavoro del compressore), intorno a 3.

Questo significa che, **spendendo energia elettrica di 1 kW** si ottiene una **potenza termica utile di 3 kW**, mentre in una stufa elettrica ad ogni kW di potenza elettrica assorbita, corrisponde un solo kW di potenza termica utile.

Commutazione effettuata attraverso **inversione del senso di percorrenza del circuito da parte del fluido frigorifero**, mediante l'azione di una **valvola a quattro vie**, realizzata con una **valvola pilota**, una **bobina elettromagnetica** ed una **valvola di inversione**.

**Regime estivo:** bobina diseccitata, spillo della valvola pilota a sx, cassetto distribuzione interno della valvola di inversione a sx, il compressore aspira dalla batteria interna (evaporatore)

**Regime invernale:** bobina eccitata, spillo della valvola pilota a dx, cassetto distribuzione interno della valvola di inversione a dx, il compressore aspira dalla batteria esterna (evaporatore)



Dal WEB

Nella tecnica frigorifera, in particolare nel settore della **climatizzazione autonoma**, per misurare la **potenza frigorifera** è molto utilizzata una **unità di misura** appartenente al **sistema anglosassone**, denominata **Btu (British thermal unit )**

Essa è anche utilizzata per misurare il potere calorifico dei combustibili

Una Btu corrisponde alla **quantità di calore** necessaria per innalzare la **temperatura** di **454 grammi di acqua da 60 a 61 gradi Fahrenheit**.

$$1 \text{ Btu} = 1054,8 \text{ J}$$

La corrispondente unità di **potenza** è costituita dal **Btu/h**

$$1 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = \frac{1054,8 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 0,293 \text{ W}$$

$$1 \text{ W} = 3,413 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \Rightarrow 1 \text{ kW} = 3413 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$