

Macchina frigorifera e pompa di calore: fondamenti

- **prof. arch. Laura Bellia**
- **prof. ing. Francesco Minichiello**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale (Sezione DETEC), Scuola
Politecnica e delle Scienze di Base, Università degli Studi di
Napoli Federico II**

**(Nota: si ringrazia vivamente il prof. ing. Pietro Mazzei, sui cui
preziosi appunti si basano parti delle diapositive seguenti)**

MACCHINA FRIGORIFERA E POMPA DI CALORE

1. APPROCCIO FISICO-TECNICO

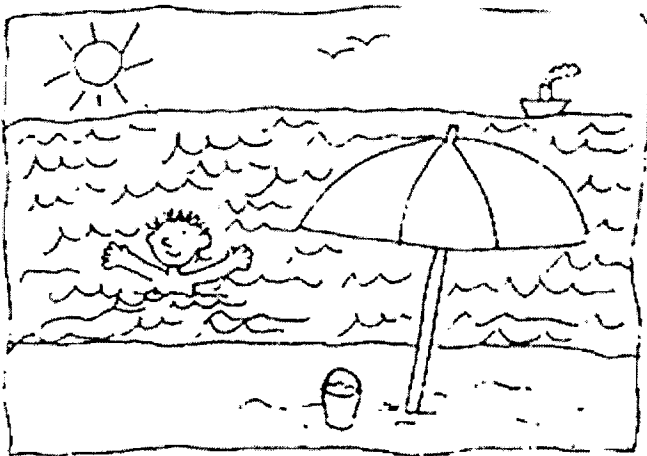
Richiami di Fisica Tecnica

SET Serbatoio di Energia Termica: è un sistema ideale di volume costante e di capacità termica infinita atto al trasferimento di energia solo come calore; questa energia è trasferita a temperatura costante e senza generazione di entropia.

$$T_{\text{SET}} = \text{cost.} \quad V_{\text{SET}} = \text{cost.} \quad S_{\text{gen}} = 0$$



Ad esempio,
l'individuo può essere
considerato un SET
rispetto al termometro



Il mare può essere
considerato un SET
rispetto all'individuo che
vi si immerge

I bilanci di energia e di entropia per questo sistema (chiuso) sono:

$$\Delta U_{\text{SET}} = Q$$

$$\Delta S_{\text{SET}} = \int (\delta Q/T)_{\text{SET}} = (Q/T)_{\text{SET}}$$

SEM Serbatoio di **E**nergia **M**eccanica: è un sistema atto al trasferimento di energia solo come lavoro; questa energia è trasferita senza generazione di entropia

$$S_{\text{gen}} = 0$$

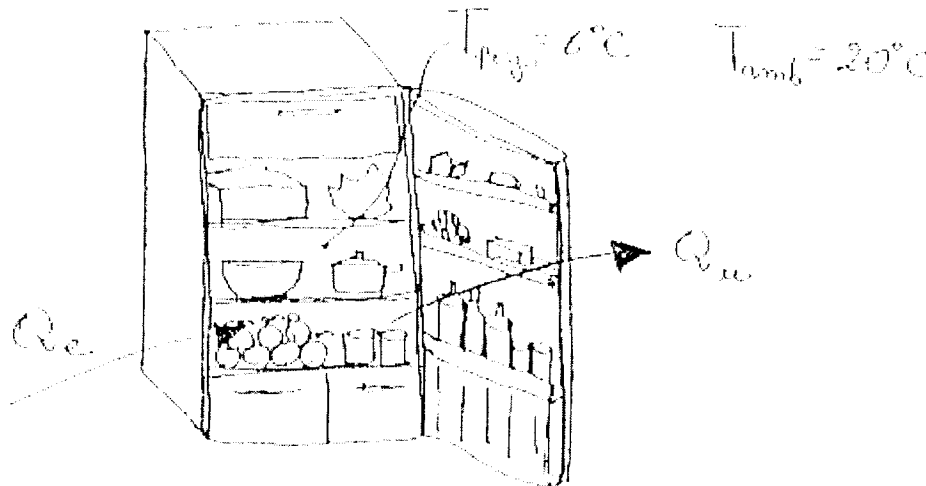
I bilanci di energia e di entropia per questo sistema sono:

$$\Delta U_{\text{SEM}} = L$$

$$\Delta S_{\text{SEM}} = 0$$

Macchina frigorifera e pompa di calore

Esempio di macchina frigorifera



Per mantenere costante la temperatura nella cella frigorifera deve essere:

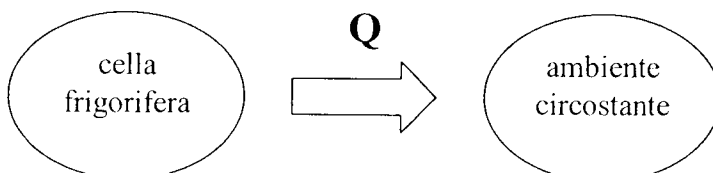
$$\Delta U = 0$$

ovvero

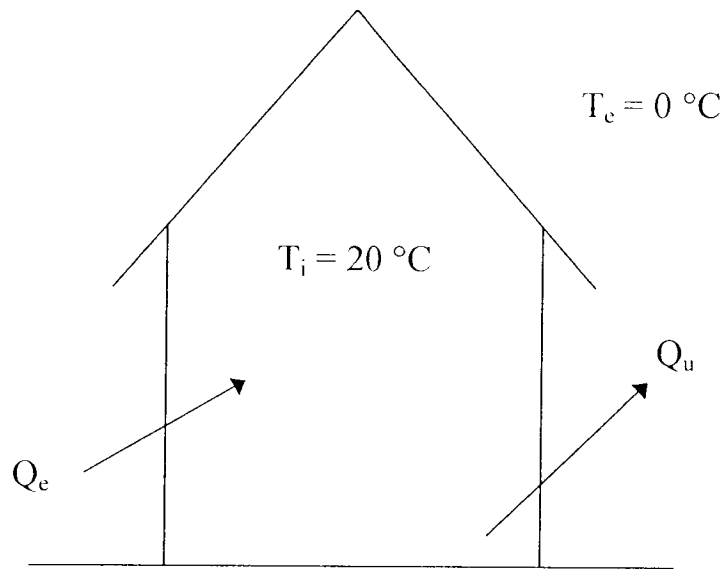
$$Q_e = Q_u$$

Occorre cioè asportare con continuità una quantità di energia termica (Q_u) pari a quella che rientra attraverso le pareti del frigorifero (Q_e) a causa della differenza di temperatura esistente tra l'ambiente esterno e la cella frigorifera.

Questa energia termica va riversata nell'ambiente in quanto esso è l'unico SET disponibile.



Esempio di pompa di calore



Per mantenere costante la temperatura nel locale deve essere

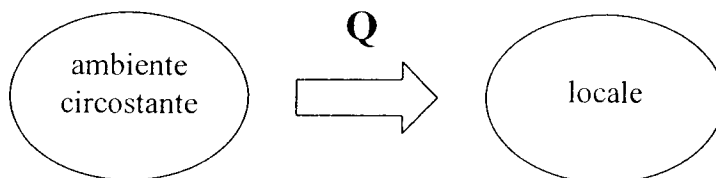
$$\Delta U = 0$$

ovvero

$$Q_c = Q_u$$

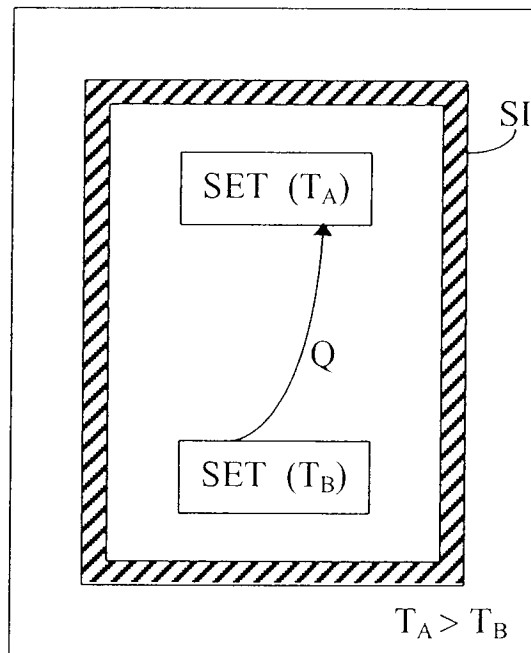
Occorre cioè fornire con continuità una quantità di energia termica (Q_e) pari a quella che esce attraverso le pareti del locale (Q_u) a causa della differenza di temperatura esistente tra l'ambiente esterno ed il locale.

Questa energia termica va prelevata dall'ambiente in quanto esso è l'unico SET disponibile.



In entrambi i casi c'è l'esigenza di trasferire energia termica da un sistema a temperatura inferiore ad uno a temperatura superiore. Tale processo non può avvenire spontaneamente.

Infatti, dato un sistema isolato (SI), risulterebbe negativa la generazione di entropia S_{gen} , il che è impossibile:



$$\Delta S_{SI} = \Delta S_{SET A} + \Delta S_{SET B}$$

$$\Delta S_{SI} = +Q/T_A - Q/T_B = S_{gen}$$

$$S_{gen} = Q (1/T_A - 1/T_B) < 0$$

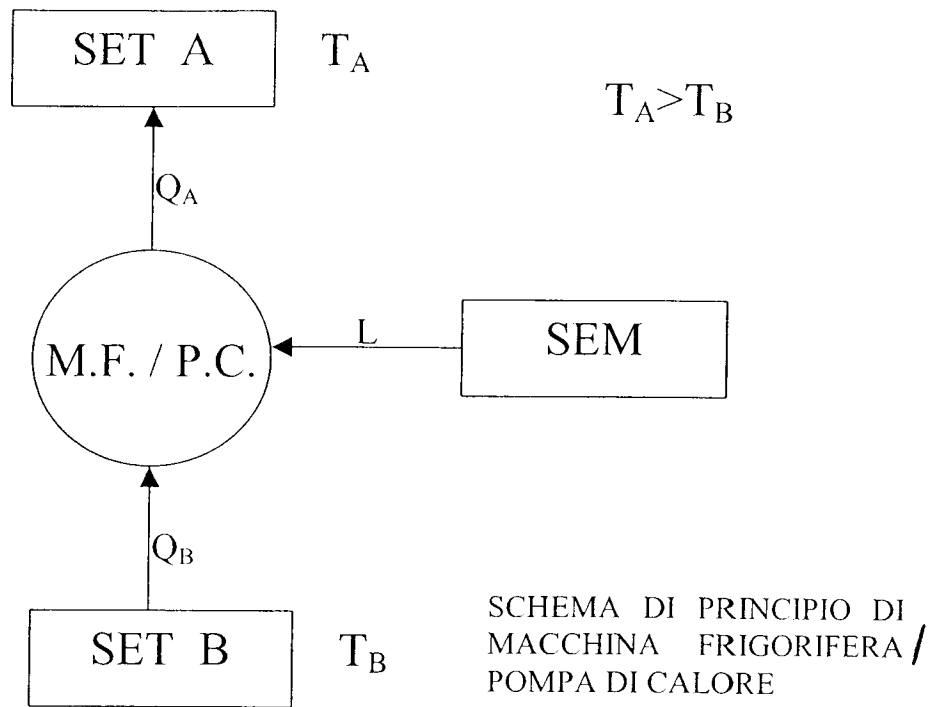
Perchè il processo sia termodinamicamente possibile occorre quindi che il flusso entropico in ingresso al SET A sia maggiore di quello in uscita dal SET B:

$$Q_A \geq Q_B T_A/T_B$$

É quindi necessario somministrare energia meccanica nella misura di

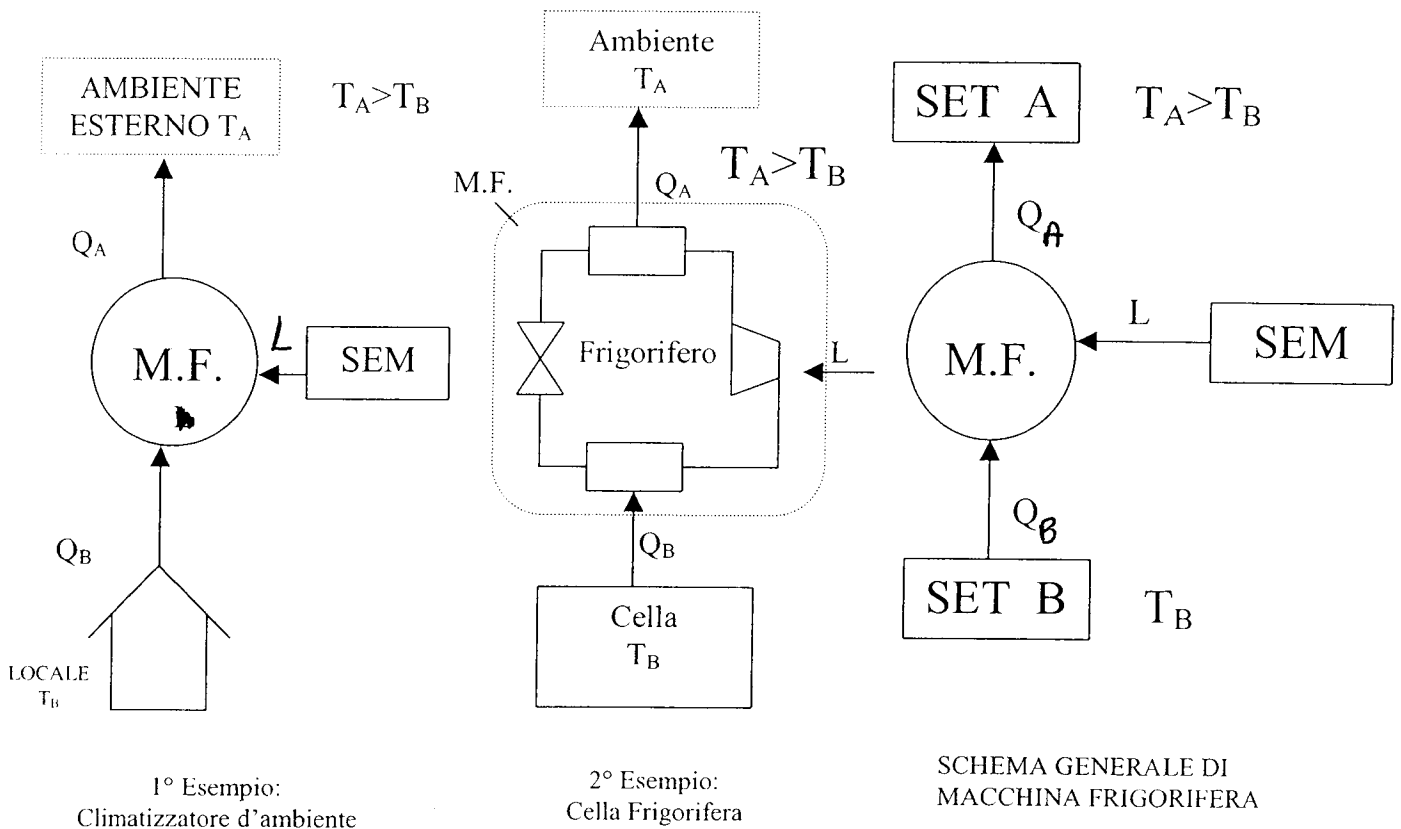
$$L = Q_A - Q_B$$

Tale energia rappresenta il **costo termodinamico** di questa operazione.



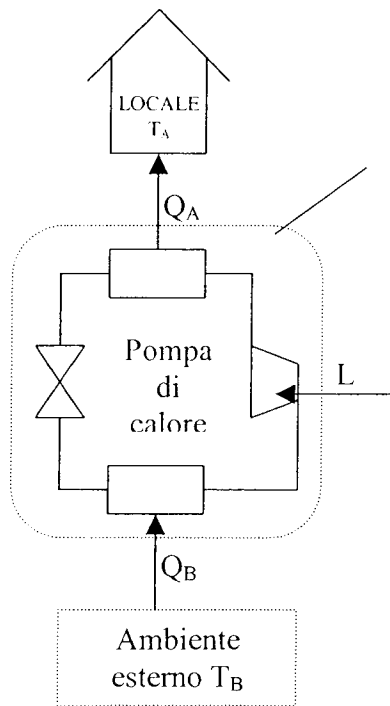
Il sistema che realizza questo trasferimento è detto:

macchina frigorifera se l'esigenza è quella di asportare l'energia termica dal SET a temperatura inferiore

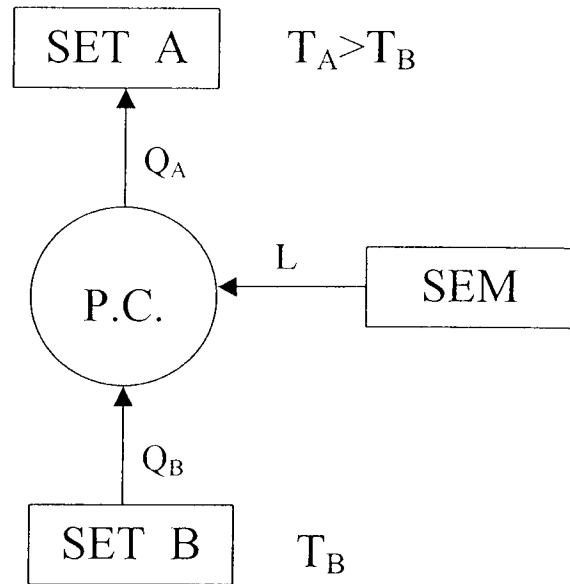


pompa di calore

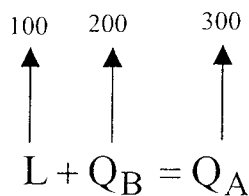
se l'esigenza è quella di fornire l'energia termica al SET a temperatura superiore



Esempio:
Pompa di calore per riscaldamento di locali



SCHEMA GENERALE DI POMPA DI CALORE



Bilancio di energia per M.F. / P.C. :

Da questo bilancio si evince la convenienza dell'uso di una pompa di calore (spesa =100, risultato utile =300) rispetto ad una tradizionale caldaia o stufa elettrica (spesa =100, risultato utile < 100).

Il parametro adimensionale che descrive la qualità termodinamica delle trasformazioni è il **coefficiente di prestazione (COP)**:

nel caso di macchina frigorifera

il COP rappresenta il rapporto tra energia termica da asportare dal SET a temperatura inferiore e l'energia meccanica da somministrare

$$COP_f = Q_B / L$$

nel caso di pompa di calore

il COP rappresenta il rapporto tra l'energia termica da fornire al SET a temperatura superiore e l'energia meccanica da somministrare

$$\text{COP}_p = Q_A / L$$

Ad esempio, $\text{COP}_p = 300/100 = 3$

$$\text{Si noti che risulta } \text{COP}_p = \frac{Q_A}{L} = \frac{L + Q_B}{L} = 1 + \frac{Q_B}{L} \geq 1$$

Per una macchina frigorifera, fissata la quantità di energia termica da asportare, se le trasformazioni sono reversibili risulta $S_{\text{gen}} = 0$, per cui:

$$Q_{A,\text{rev}} = Q_B T_A / T_B$$

$$L_{\text{rev}} = Q_{A,\text{rev}} - Q_B = Q_B (T_A / T_B - 1)$$

$$\text{COP}_{f,\text{rev}} = Q_B / L_{\text{rev}} = T_B / (T_A - T_B)$$

L_{rev} rappresenta il minimo lavoro necessario per sottrarre la quantità di energia termica Q_B dal SET a temperatura T_B .

Nel caso reale il lavoro richiesto è maggiore

$$L = Q_A - Q_B = Q_B (T_A / T_B - 1) + T_A S_{\text{gen}}$$

$$L - L_{\text{rev}} = T_A S_{\text{gen}}$$

Questo *lavoro aggiunto* è direttamente proporzionale all'entropia generata nel sistema.

Analogamente, per una pompa di calore, fissata la quantità di energia termica da fornire, se le trasformazioni sono reversibili risulta $S_{\text{gen}} = 0$, per cui:

$$Q_{B,\text{rev}} = Q_A T_B / T_A$$

$$L_{\text{rev}} = Q_A - Q_{B,\text{rev}} = Q_A (1 - T_B / T_A)$$

$$\text{COP}_{p,\text{rev}} = Q_A / L_{\text{rev}} = T_A / (T_A - T_B)$$

L_{rev} rappresenta il minimo lavoro necessario per trasferire la quantità di energia termica Q_A al SET a temperatura T_A .

Nel caso reale il lavoro richiesto è maggiore:

$$L = Q_A - Q_B = Q_A (1 - T_B / T_A) + T_B S_{gen}$$

$$L - L_{rev} = T_B S_{gen}$$

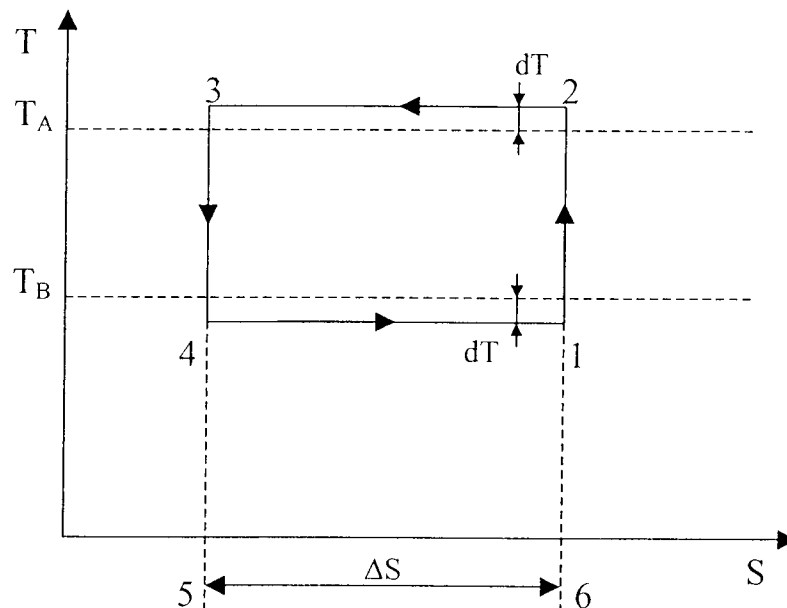
Questo *lavoro aggiunto* è direttamente proporzionale all'entropia generata nel sistema.

Si verifica che risulta:

$$0 \leq COP_F < COP_{F,rev} < \infty$$

$$1 \leq COP_{P.C.} < COP_{P.C.,rev} < \infty$$

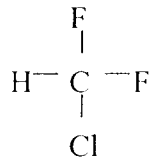
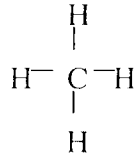
Una macchina reversibile di rilevante importanza è la **macchina di Carnot** che opera secondo un ciclo inverso; il ciclo termodinamico seguito da questa macchina è costituito da quattro trasformazioni: due isoterme lungo le quali avvengono i trasferimenti di energia termica e due adiabatiche che, essendo reversibili, sono isoentropiche.



2. REFRIGERAZIONE MEDIANTE SISTEMA A COMPRESSIONE DI VAPORE

Tali sistemi si basano sulla capacità di assorbire notevoli quantità di energia termica nella ebollizione di una massa unitaria di un fluido di lavoro.

Si consideri, ad esempio, l'R-22:
serie del metano CH₄

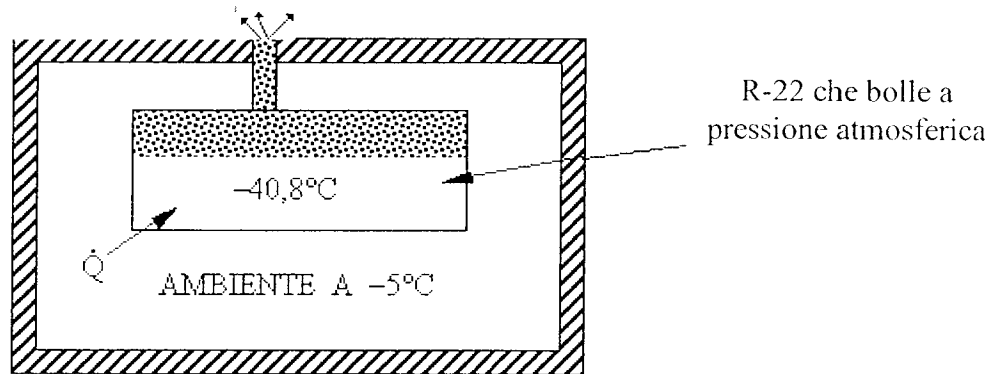


CHClF₂ detto HCFC

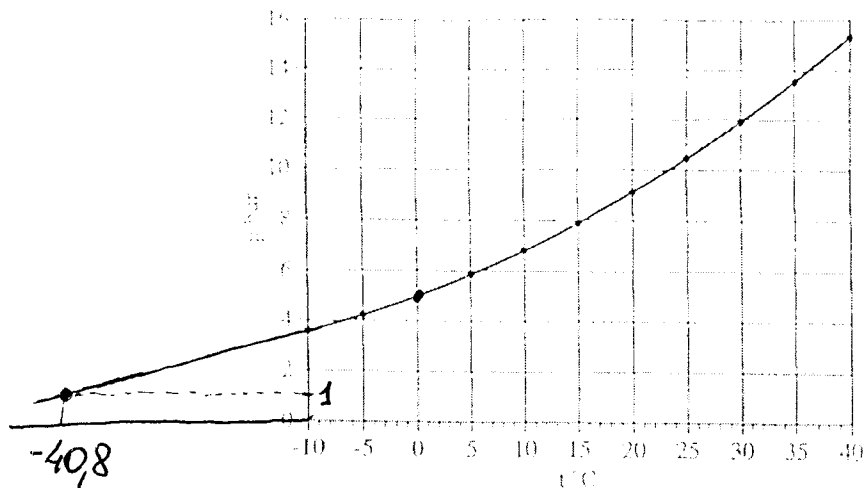
Cloro Fluoro Carburo (non saturo, c'è ancora H)

Bolle a pressione atmosferica alla temperatura $T = -40,8^{\circ}\text{C}$

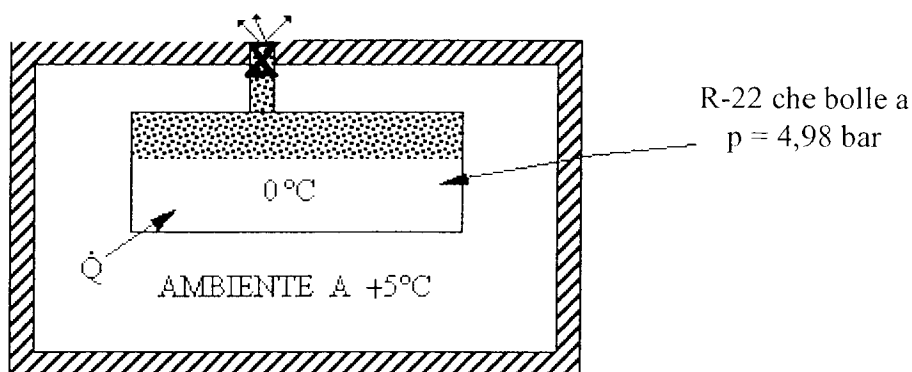
Pertanto, dato un recipiente contenente un fluido refrigerante (R-22), a contatto con l'atmosfera, il fluido bolle (a pressione atmosferica bolle alla temperatura di $-40,8^{\circ}\text{C}$) sottraendo calore \dot{Q} all'ambiente, che quindi viene mantenuto freddo ad una temperatura ad esempio pari a -5°C .



Applicando una valvola che strozza il flusso di vapore uscente, la pressione nel recipiente tende ad aumentare, e con essa la temperatura a cui avviene l'ebollizione, come si evince dall'andamento della linea di saturazione della sostanza nel diagramma p-T:



Pressione di saturazione per l'R-22

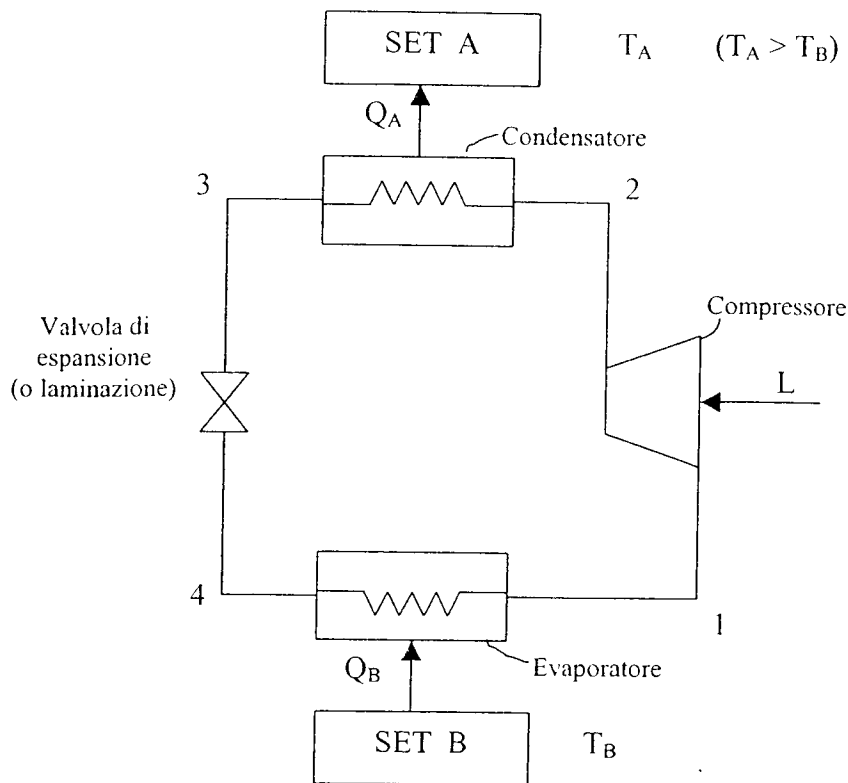


In questo modo, quindi, si riesce a cambiare, a seconda delle esigenze, la temperatura a cui avviene l'ebollizione del fluido frigorifero.

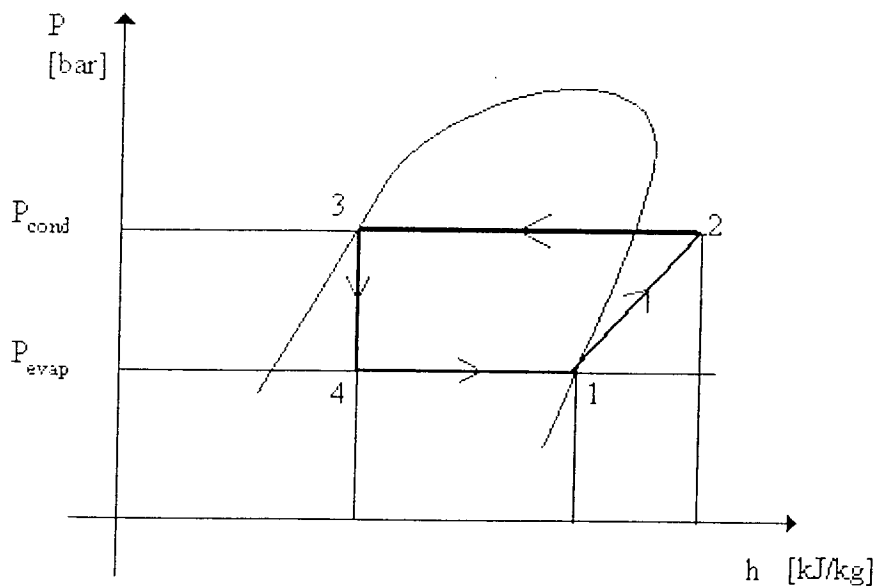
È evidente che, regolando opportunamente la pressione alla quale avviene la vaporizzazione dell' R-22, si può raffreddare un fluido termovettore (ad esempio acqua da 12°C a 7°C) necessario per problemi di condizionamento d'aria.

Il fluido vaporizzato va però recuperato e riportato in fase liquida alla pressione opportuna. A tal fine, il vapore prodotto nell'evaporatore va compresso in modo che possa essere successivamente condensato a temperatura prossima a quella dell'ambiente esterno.

Lo schema di principio di macchina frigorifera / pompa di calore di pag. 5 allora diventa:



Il ciclo del fluido refrigerante è utile rappresentato sul diagramma di stato p-h (nell'ipotesi ideale di assenza di perdite di carico):



Il fluido refrigerante nell'evaporatore, sottraendo calore (Q_B) al SET a temperatura inferiore (SET B), bolle fino a portarsi nella condizione di vapore saturo secco (1) o di vapore leggermente surriscaldato. Successivamente il fluido viene compresso dal compressore, da cui esce in condizioni di vapore surriscaldato (2); nel condensatore, cedendo calore Q_A al SET A, il fluido è prima desurriscaldato, poi condensato, uscendo quindi nelle condizioni di liquido saturo (3). Si noti che la pressione del fluido è stata incrementata nel compressore per cui risulta: $P_2 \cong P_3 > P_1 \cong P_4$. Il liquido

condensato (3), caldo e ad alta pressione, attraversa poi la valvola di espansione o laminazione: attraversando la valvola la sua pressione si abbassa dal livello alto ($P_3 \cong P_2$) al livello basso ($P_4 \cong P_1$); inoltre, il fluido in parte vaporizza, raffreddandosi di conseguenza (produzione di vapore di flash, inutile ai fini della “produzione del freddo”): si porta così nelle condizioni di vapore saturo (4). A questo punto (4) il ciclo ricomincia: nell’evaporatore il fluido passa, a pressione quasi costante, dalle condizioni di vapore saturo (4) a quelle di vapore saturo secco (1), ecc...

Si noti che, se si trascurano le perdite di carico nell’evaporatore e nel condensatore, risulta $P_4 = P_1$ e $P_3 = P_2$, altrimenti si ha $P_1 < P_4$ e $P_3 < P_2$.

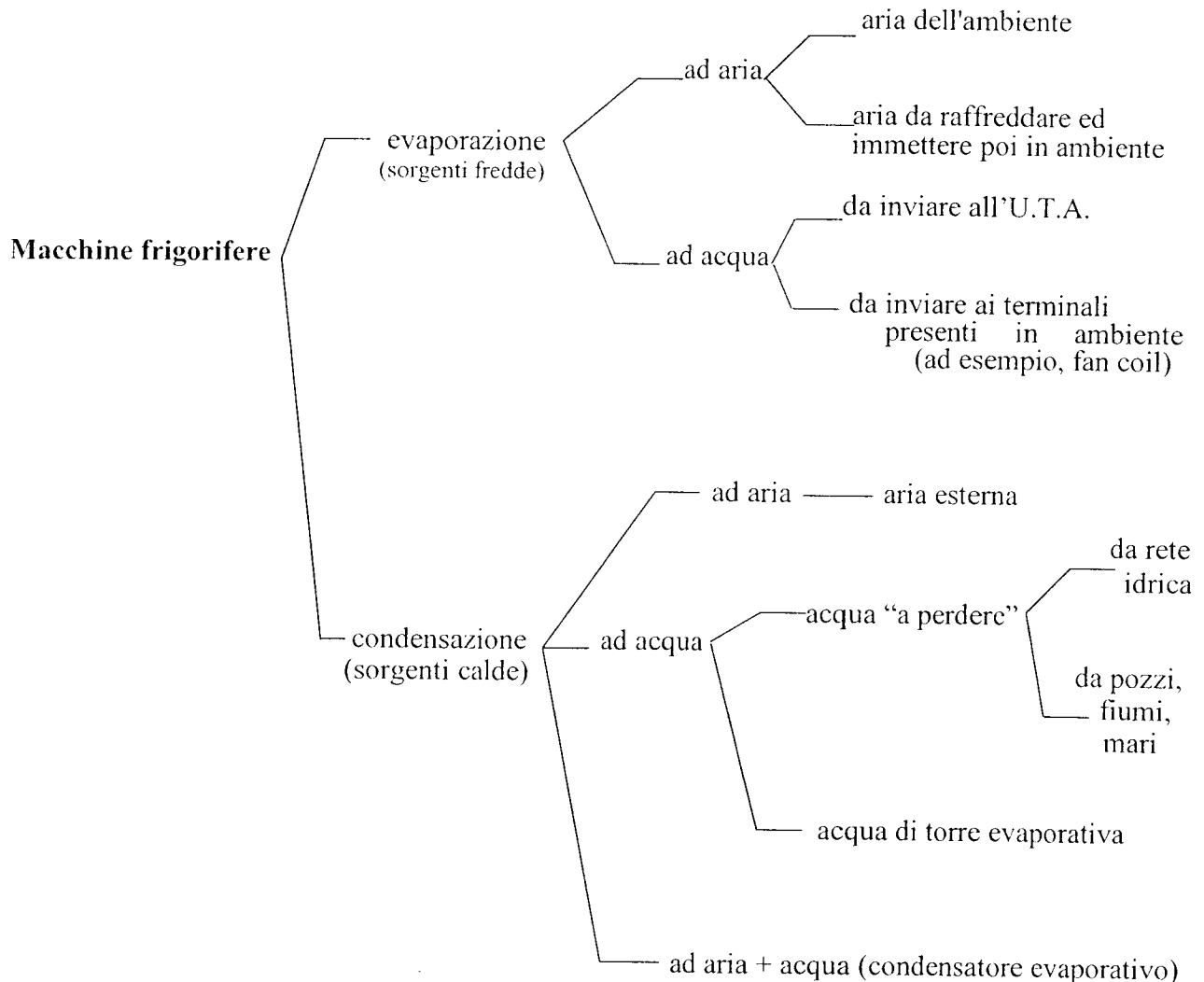
Quanto sopra descritto vale sia per macchina frigorifera che per pompa di calore: nel primo caso l’effetto utile avviene nell’evaporatore (il fluido refrigerante, bollendo, sottrae il calore Q_B al SET B, in modo da mantenerlo a bassa temperatura - si pensi, ad esempio, ad una cella frigorifera o ad un ambiente da climatizzare nella stagione estiva); nel caso di pompa di calore l’effetto utile si ha nel condensatore (il fluido, per condensare, cede la quantità di calore Q_A al SET A, mantenendolo in tal modo ad alta temperatura - si pensi, ad esempio, ad un ambiente da riscaldare nella stagione invernale).

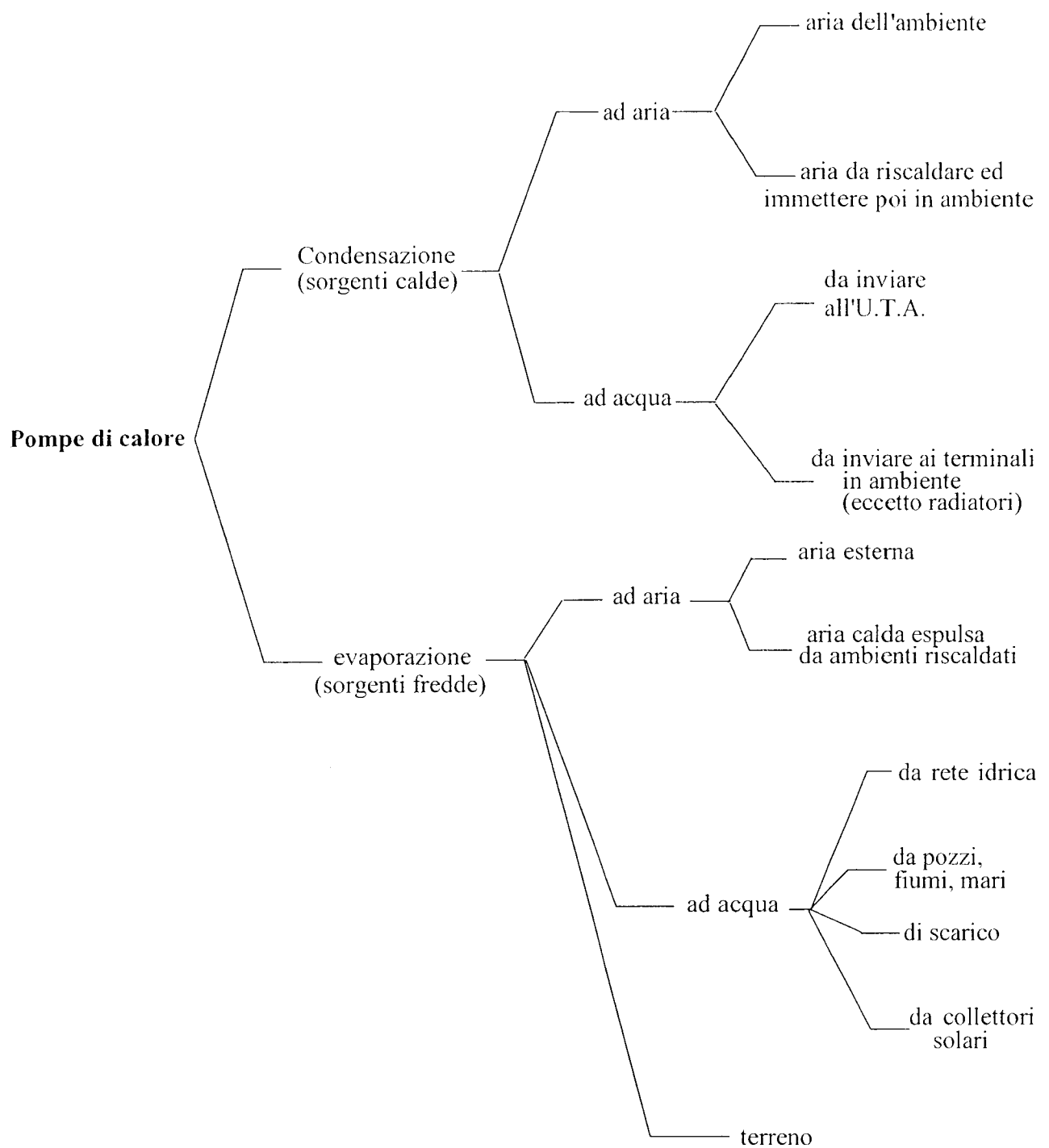
3. VARI TIPI DI MACCHINE FRIGORIFERE E POMPE DI CALORE A COMPRESSIONE DI VAPORE

Si riportano nel seguito alcuni esempi di applicazione di macchina frigorifera e di pompa di calore, per cui i SET vengono sostituiti nello schema dai fluidi effettivamente utilizzati per lo scambio termico. È pertanto utile esaminare più in dettaglio quali siano le sorgenti più comunemente utilizzate per l'evaporazione ("sorgenti fredde") e per la condensazione ("sorgenti calde").

Si osservi che molto spesso tali sorgenti sono costituite da acqua e da aria, per cui bisognerà prevedere dei ventilatori e dei canali per veicolare l'aria, delle pompe e delle tubazioni per veicolare l'acqua. Tale aspetto risulta di particolare importanza anche per quanto concerne le interazioni tra impianto ed edificio, nel caso di applicazioni di macchine frigorifere e pompe di calore agli impianti di climatizzazione.

Segue una possibile classificazione delle più comuni sorgenti calde e fredde.





Nel seguito sono esaminate alcune configurazioni.

a) Macchina frigorifera/pompa di calore aria-aria.

Per piccoli impianti (raffrescamento e riscaldamento di locali singoli) è spesso utilizzata aria sia come sorgente calda che fredda: è il caso dei climatizzatori autonomi (da finestra) di tipo "monoblocco" (i componenti sono assemblati in un unico elemento) e dei climatizzatori autonomi di tipo "split system", che prevedono invece un'unità interna ed una esterna tra loro collegate.

Nelle figure X.1 e X.2 sono presentati gli schemi di funzionamento rispettivamente della macchina frigorifera e della pompa di calore (si noti che i valori numerici delle temperature sono solo indicativi). Si osservi anche che nelle figure X.1÷X.7 Q_{co} equivale a Q_A e Q_{ev} equivale a Q_B .

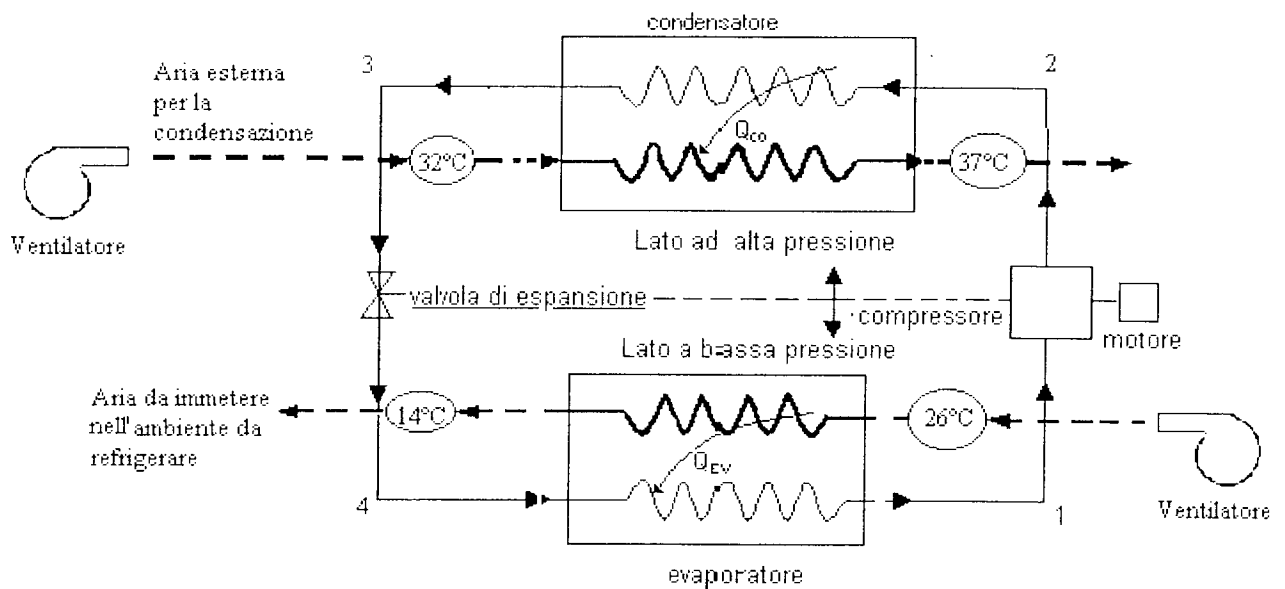


Figura X.1 schema di funzionamento di una macchina frigorifera con evaporazione ad aria e condensazione ad aria.

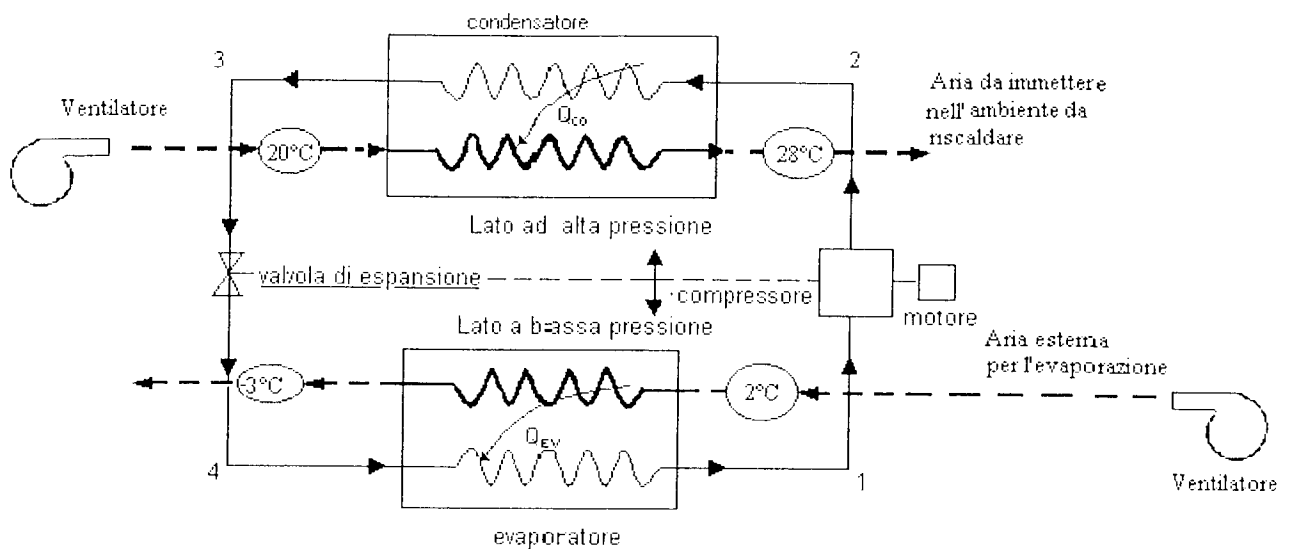


Figura X.2 schema di funzionamento di una pompa di calore con evaporazione ad aria e condensazione ad aria.

Si parla talvolta di macchina "invertibile", o in modo improprio, di macchina "reversibile" o di ciclo "reversibile", volendo intendere che l'impianto funziona sia da frigorifero (evaporatore all'interno, condensatore all'esterno o a contatto con l'esterno) che da pompa di calore (l'evaporatore all'interno diventa condensatore, mentre lo scambiatore posto all'esterno o a contatto con l'esterno assume la funzione di evaporatore). Si noti che l'aria trattata (riscaldata in inverno, raffrescata in estate) può anche non essere aria ambiente, ma aria esterna o aria mescolata che attraversa un'unità di trattamento dell'aria dotata di batteria a fluido refrigerante e successivamente viene immessa in ambiente.

Nel caso di pompa di calore, la scelta dell'aria esterna (talvolta si può utilizzare come sorgente fredda l'aria espulsa da ambienti riscaldati) come sorgente fredda è quella più frequentemente adottata, presentando il vantaggio di essere gratuita e sempre disponibile; il principale svantaggio dipende, invece, dalla variabilità della temperatura, che determina variazioni nel COP. Al ridursi della temperatura dell'aria esterna, si ha una riduzione del COP_p , proprio in corrispondenza di una maggiore richiesta da parte dell'utenza. Non si progetta comunque la pompa di calore in base alla temperatura esterna minima assoluta, poiché ciò comporterebbe un sovradimensionamento dell'impianto ed un aumento anche dei costi di esercizio per la maggior parte del periodo di funzionamento. Viene quindi assunta un'opportuna temperatura esterna di progetto, adeguata per un buon funzionamento della pompa di calore per gran parte del periodo di riscaldamento. Negli intervalli di tempo in cui la temperatura esterna risulta inferiore si prevede l'utilizzo di sistemi di riscaldamento integrativi che devono essere semplici e poco

costosi per le spese di installazione, anche se con bassi rendimenti, dovendo funzionare per un periodo ridotto (ad esempio, impianti di riscaldamento elettrico).

Un altro problema connesso all'uso dell'aria esterna come sorgente fredda, per la pompa di calore, è quello della formazione di brina: se la superficie esterna dell'evaporatore si trova ad una temperatura inferiore a 0°C , il vapor d'acqua presente nell'aria solidifica, depositandosi sotto forma di brina sulla batteria di scambio, ostruendo lo scambio termico. È quindi necessario effettuare lo sbrinamento della batteria mediante la temporanea inversione del senso di percorrenza del fluido refrigerante, in modo che l'evaporatore funga momentaneamente da condensatore. Lo sbrinamento periodico, di solito comandato da un temporizzatore o da un elemento sensibile, riduce però il COP_P medio dell'impianto.

b) Macchina frigorifera con evaporazione ad acqua e condensazione ad aria ovvero pompa di calore con condensazione ad acqua ed evaporazione ad aria.

Si tratta di un impianto frequentemente utilizzato per impianti di climatizzazione centralizzati (si tratta di impianti mediamente più grossi rispetto al caso a). In estate (figura X.3) l'acqua viene raffreddata (valori tipici sono: $T_{\text{mandata}} = 7^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ritorno}} = 12^{\circ}\text{C}$).

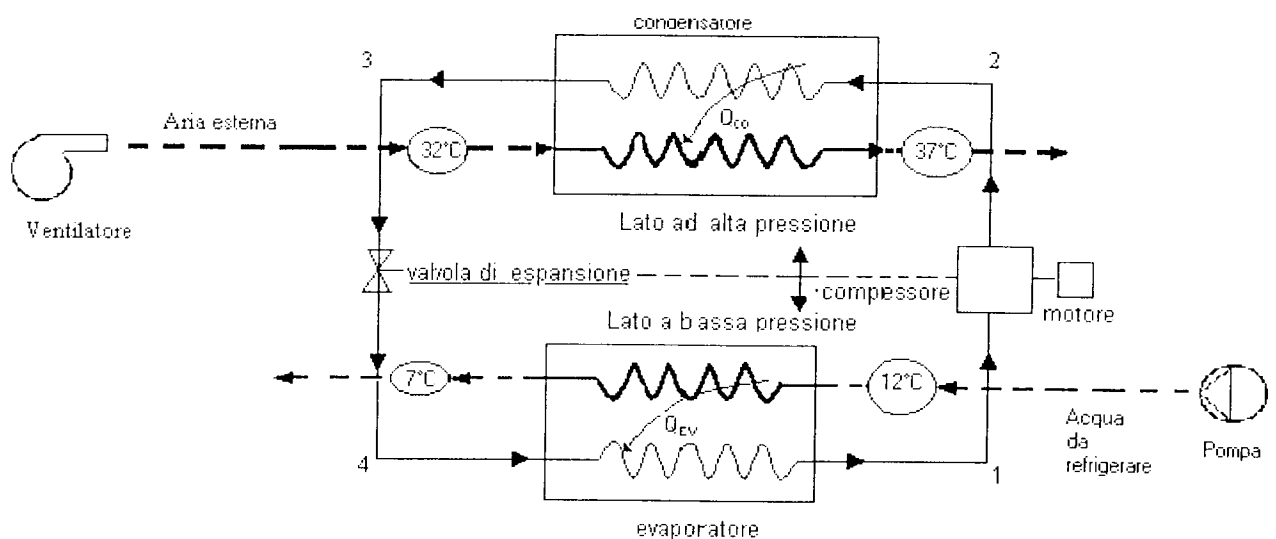


Figura X.3 schema di funzionamento di una macchina frigorifera con evaporazione ad acqua e condensazione ad aria.

In inverno (figura X.4) l'acqua viene riscaldata (valori tipici sono: $T_{\text{mandata}} = 45 - 50^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{ritorno}} = 40 - 45^{\circ}\text{C}$).

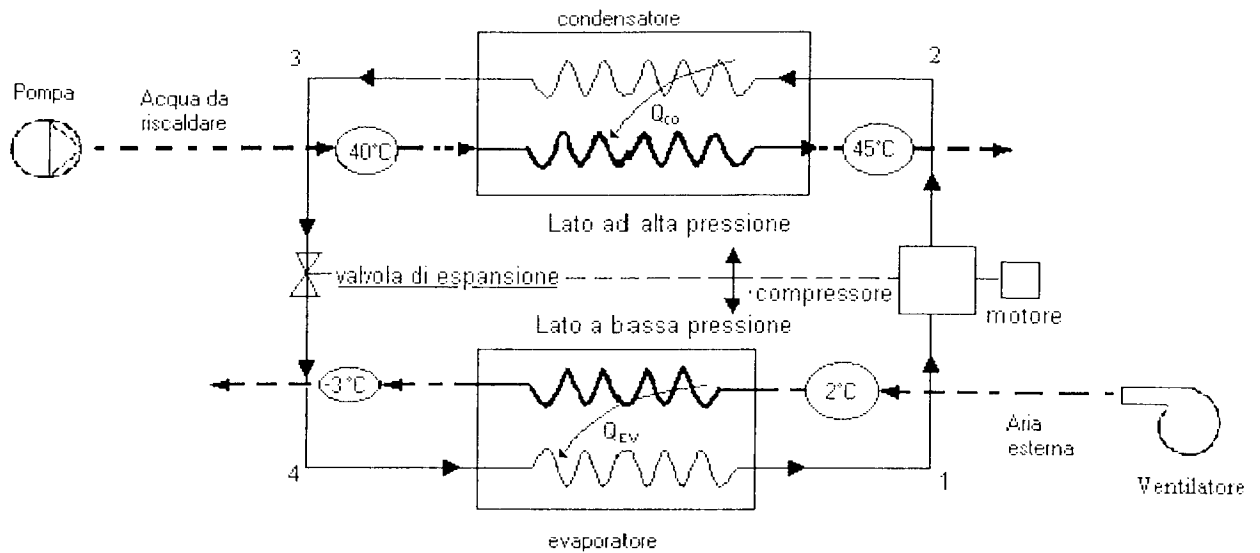


Figura X.4 schema di funzionamento di una pompa di calore con evaporazione ad aria e condensazione ad acqua.

In entrambi i casi l'acqua viene inviata alla batteria di una unità di trattamento dell'aria (U.T.A.) o ai terminali ad acqua presenti in ambiente, ad esempio mobiletti ventilconvettori ("fan-coil"). In regime invernale il livello termico raggiunto dall'acqua sconsiglia l'impiego di radiatori come corpi scaldanti, che necessiterebbero di acqua più calda (all'incirca 80 °C).

L'impianto in esame generalmente garantisce sempre il funzionamento estivo da frigorifero; talvolta funziona anche da pompa di calore in regime invernale. In questo caso viene riscaldata acqua che successivamente deve cedere calore all'ambiente mediante l'uso di altri scambiatori (i corpi scaldanti): il doppio scambio termico comporta una più elevata temperatura di condensazione ed una conseguente riduzione del COP_P , rispetto al caso a) di pompa di calore con condensazione ad aria. Sia nel caso di macchina frigorifera che di pompa di calore il vantaggio consiste nel non far circolare negli ambienti il fluido frigorifero e/o nel consentire un trattamento più preciso dell'aria da immettere in ambiente.

Nella fig.A della pagina allegata è riportata la configurazione reale di una macchina frigorifera con evaporazione ad acqua e condensazione ad aria.

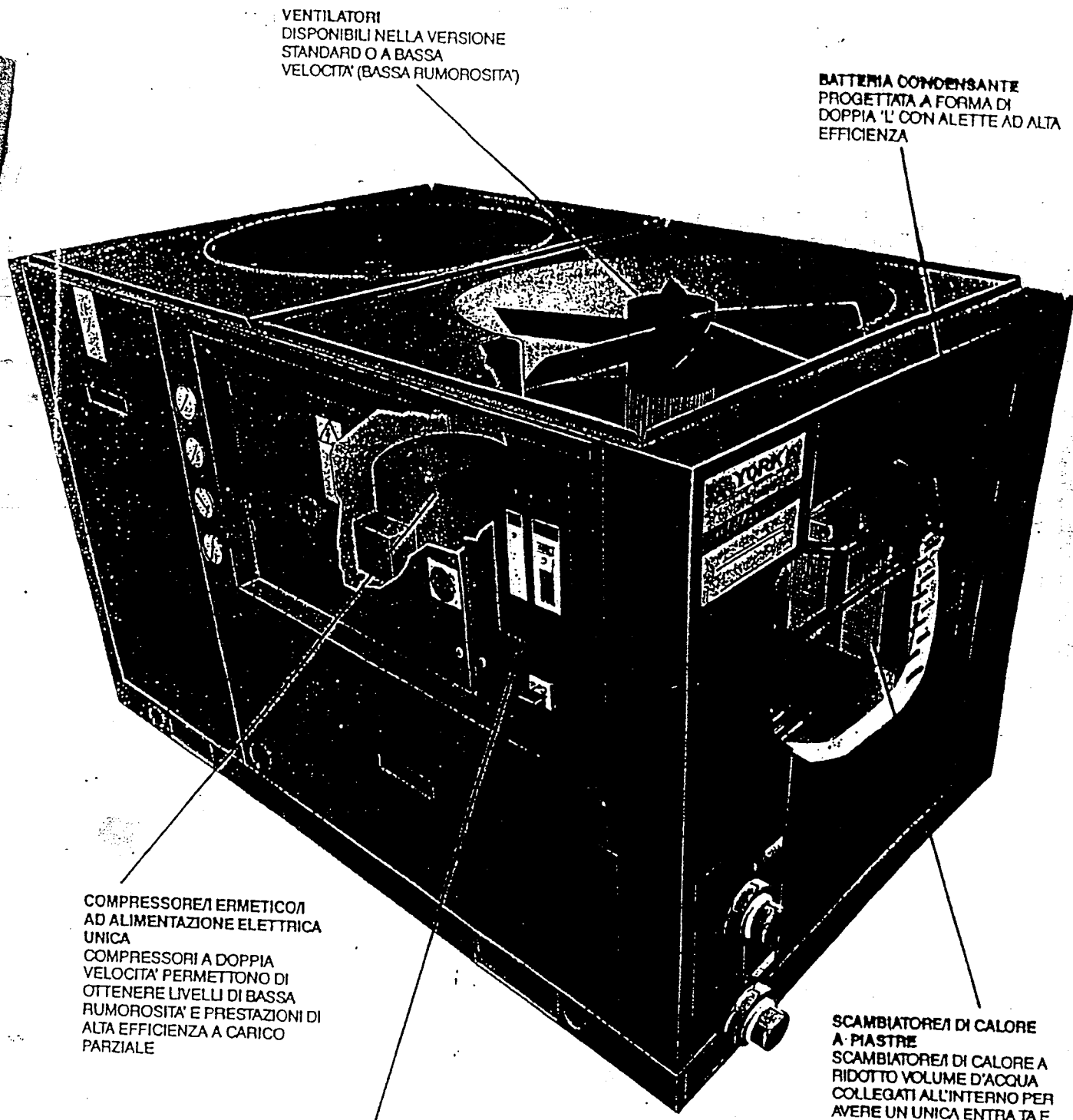
c) **Macchina frigorifera con evaporazione ad acqua e condensazione ad acqua** (acqua "a perdere" o di torre evaporativa) o **aria – acqua** (condensatori evaporativi).

Si tratta di impianti meno utilizzati rispetto al caso b), anche perché non sempre è facilmente disponibile l'acqua per la condensazione. Macchine frigorifere di questo tipo vengono utilizzate generalmente per impianti molto grandi: l'acqua refrigerata (valori tipici sono: $T_{mandata} = 7^{\circ}C$, $T_{ritorno} = 12^{\circ}C$) viene inviata alle batterie di una U.T.A. o ai terminali ad acqua presenti in ambiente.

York® YCLA

Il gruppo refrigeratore super compatto YORK, modello YCLA è stato progettato per conciliare affidabili componenti ad elevate prestazioni di funzionamento.

I modelli YCLA 12, 14 e 17 con un solo circuito refrigerante, I modelli YCLA 15, 20, 25, 30, 35 con doppio circuito refrigerante - rese frigorifere nominali da 37 a 100 kW.



VENTILATORI
DISPONIBILI NELLA VERSIONE
STANDARD O A BASSA
VELOCITA' (BASSA RUMOROSITA')

BATTERIA CONDENSANTE
PROGETTATA A FORMA DI
DOPPIA 'L' CON ALETTE AD ALTA
EFFICIENZA

COMPRESSORE/ERMETICO/AD ALIMENTAZIONE ELETTRICA UNICA
COMPRESSORI A DOPPIA VELOCITA' PERMETTONO DI OTTENERE LIVELLI DI BASSA RUMOROSITA' E PRESTAZIONI DI ALTA EFFICIENZA A CARICO PARZIALE

SCAMBIATORE/ DI CALORE A-PIASTRE
SCAMBIATORE/ DI CALORE A RIDOTTO VOLUME D'ACQUA COLLEGATI ALL'INTERNO PER AVERE UN UNICA ENTRATA E USCITA PER L'ACQUA REFRIGERATA.

MICROPROCESSORE
CONSENTE UN ACCURATO CONTROLLO DELL'ACQUA REFRIGERATA IN USCITA. SCHEDA D'INTERFACCIAMENTO.

Fig. A

18 bis



L'acqua "a perdere" è quella che non necessita di ricircolo: può essere fornita da rete idrica, o provenire da pozzi, fiumi, o mare. Per la fornitura da rete idrica i costi sono molto elevati, mentre per l'acqua di pozzo, fiume, o mare, occorre prestare attenzione alla qualità dell'acqua per evitare problemi di corrosione.

In figura X.5 è presentato lo schema di funzionamento della macchina frigorifera nel caso di condensazione con acqua di torre evaporativa: sono anche riportati i valori numerici relativi a temperatura e pressione del fluido frigorifero R-22 (si è assunta una temperatura di condensazione di 35°C, a cui corrisponde una pressione di saturazione di 13,6 bar).

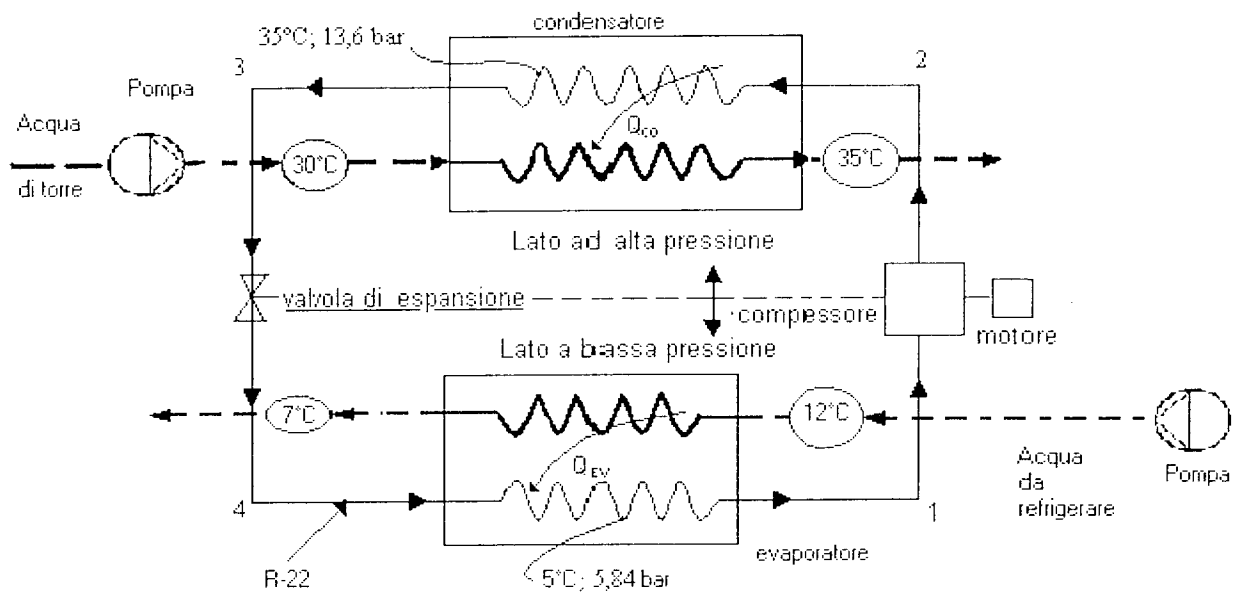
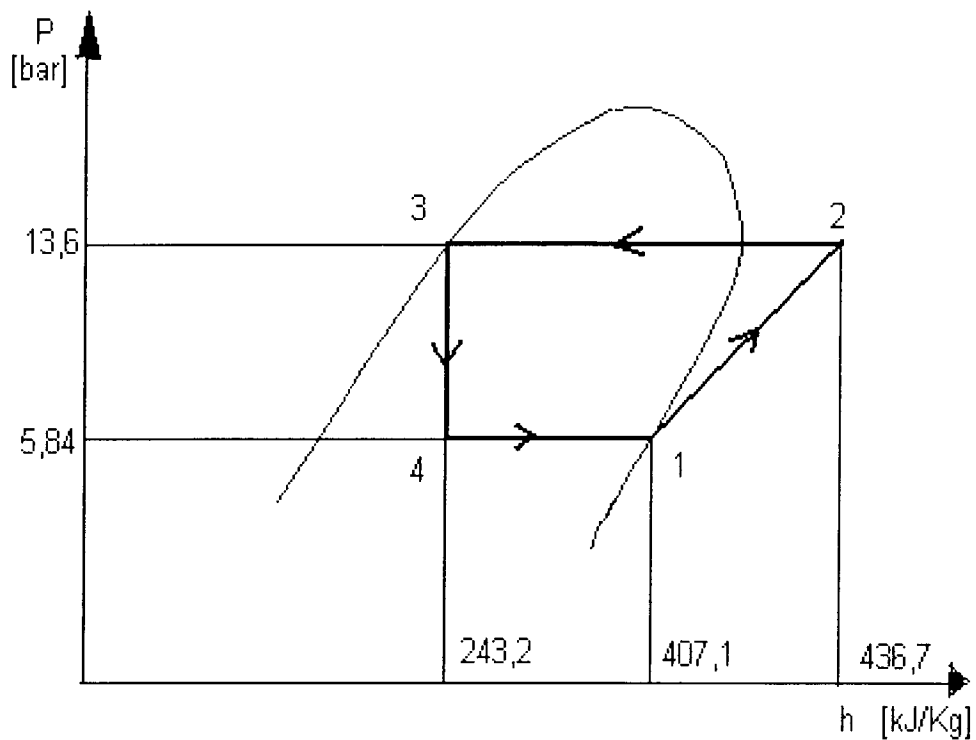
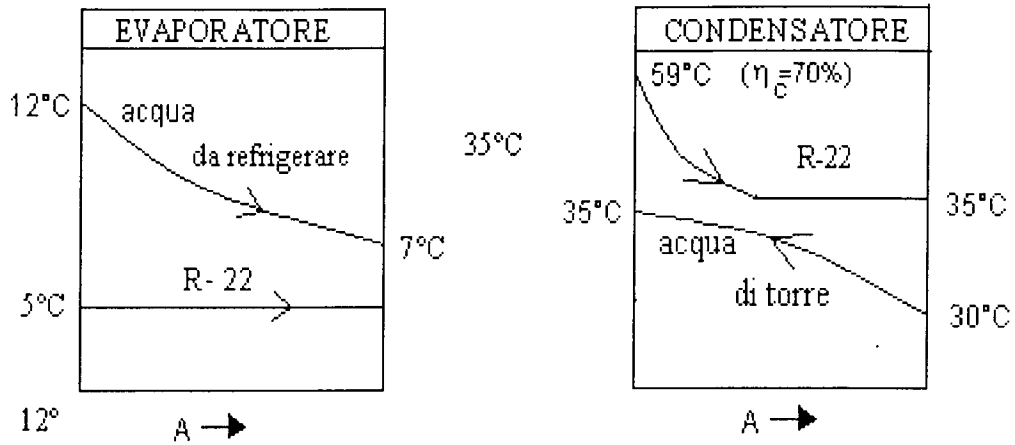
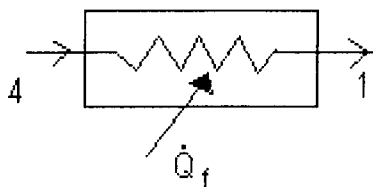


Figura X.5 schema di funzionamento di una macchina frigorifera con evaporazione ad acqua e condensazione con acqua di torre evaporativa.

Per questo caso sono anche riportati gli andamenti delle temperature dei fluidi nell'evaporatore e nel condensatore, nonché il ciclo sul piano p-h:



EVAPORATORE



$$\dot{m} h_4 + \dot{Q}_f = \dot{m} h_1$$

d) Pompa di calore con condensazione ad acqua ed evaporazione ad acqua.

E' la versione "invertita" della macchina frigorifera con evaporazione ad acqua e condensazione con acqua "a perdere", descritta nell'ambito del punto c). Si tratta di macchine

(figura X.6) meno utilizzate del caso b), e comunque solo per grandi impianti, anche per problemi di reperibilità dell'acqua per l'evaporazione.

Per l'acqua da riscaldare, valori tipici di temperatura sono: $T_{mandata} = 45-50^{\circ}\text{C}$, $T_{ritorno} = 40-45^{\circ}\text{C}$. Riguardo all'acqua "a perdere" come sorgente fredda vale quanto detto in c). E' talvolta possibile impiegare, come sorgente fredda, il calore recuperato dall'acqua di scarico proveniente da ambienti civili (lavatrici, lavapiatti, bagni, docce) o industriali. L'acqua, come sorgente fredda, può anche provenire, riscaldata, da collettori solari.

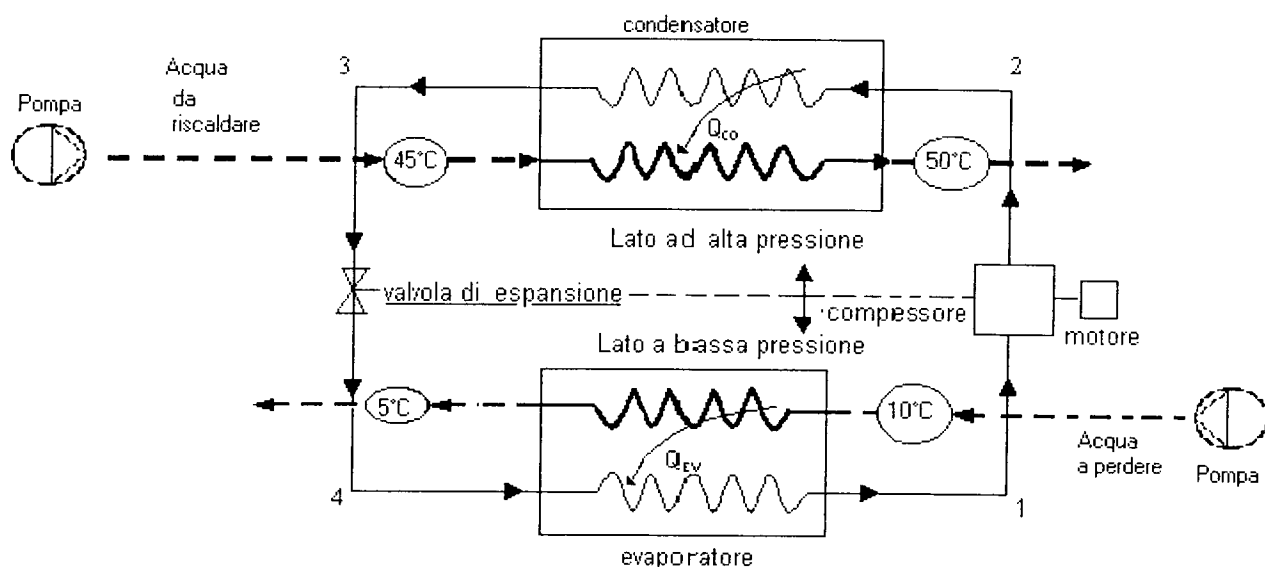


Figura X.6 schema di funzionamento di una pompa di calore con condensazione ad acqua ed evaporazione con acqua "a perdere".

e) Impianto frigorifero con evaporazione ad aria e condensazione ad acqua o aria - acqua

E' un tipo di configurazione usata abbastanza raramente. Fa eccezione il sistema innovativo di macchina frigorifera ovvero pompa di calore ad anello chiuso (WLHP "Water Loop Heat Pump" system), la cui analisi esula però da questa trattazione.

f) Pompa di calore con condensazione ad acqua ed evaporazione mediante scambio termico con il terreno¹.

Anche il terreno può costituire un'interessante sorgente fredda per le pompe di calore destinate al riscaldamento di edifici (figura X.7).

¹Quando si usa come sorgente fredda l'acqua o il terreno, è rara la presenza di un condensatore ad aria.

Le realizzazioni non sono molto diffuse, soprattutto a causa delle grandi dimensioni dello scambiatore, che richiedono molto spazio. Anche per il terreno vi sono variazioni di temperatura, sebbene di minore entità rispetto all'aria esterna.

Per ottenere una buona uniformità di temperatura occorrerebbe interrare lo scambiatore ad una profondità di almeno un metro; i costi di installazione relativi a questo sistema sono elevati e la manutenzione può risultare difficoltosa.

Per l'acqua da riscaldare, valori tipici di temperatura sono: $T_{mandata} = 45-50^{\circ}\text{C}$, $T_{ritorno} = 40-45^{\circ}\text{C}$.

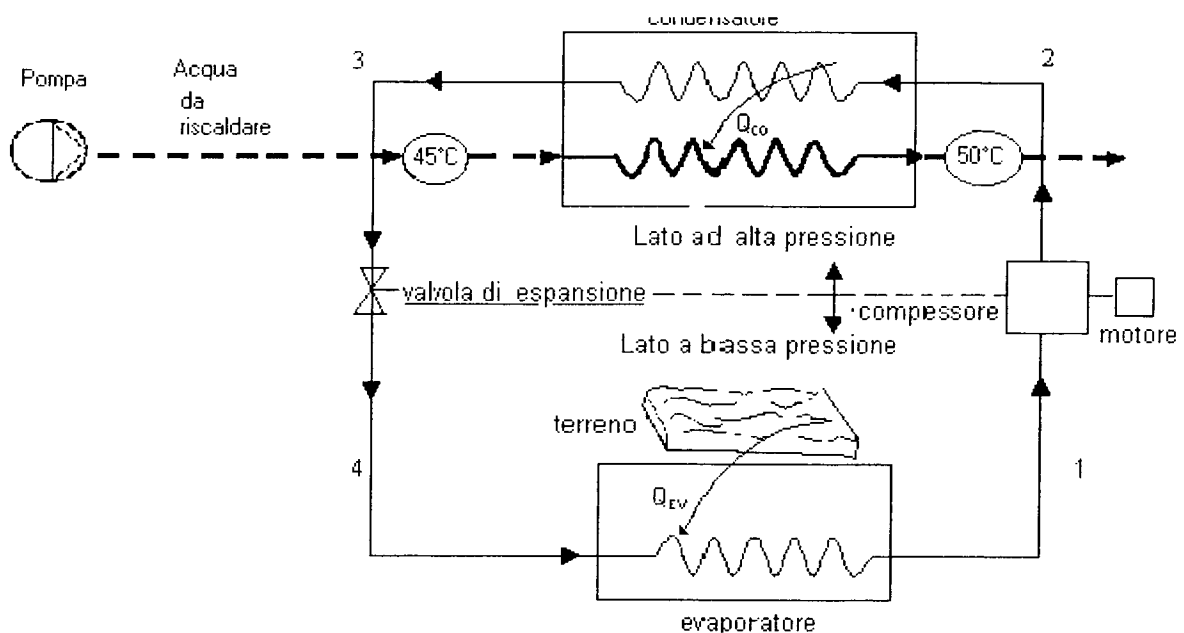


Figura X.7 schema di funzionamento di una pompa di calore con condensazione ad acqua ed evaporazione mediante scambio termico col terreno.

Per quanto riguarda l'impiego di energia solare nel funzionamento delle pompe di calore, occorre osservare che, in qualche misura, tutte le sorgenti fin qui citate risentono del calore proveniente dal sole, ma questo effetto viene esaltato dall'impiego di collettori solari. Questi possono essere utilizzati per incrementare la temperatura dell'aria che interagisce termicamente con l'evaporatore (evaporatore ad aria, caso a). La maggior parte dei sistemi lavora per via indiretta, utilizzando un fluido intermedio, in genere acqua (come accennato in d). In alcuni casi il fluido refrigerante viene fatto circolare all'interno del collettore stesso che funge da evaporatore. I collettori solari possono essere anche impiegati come sistemi ausiliari durante il funzionamento della pompa di calore, oppure per la produzione di acqua calda sanitaria.

Occorre, infine, citare le **pompe di calore azionate da motore a combustione interna**, con cui è possibile attingere elevati valori del coefficiente di utilizzazione dell'energia primaria (CUEP), in quanto si può realizzare il recupero del calore di scarico del motore.

Ad esempio, si consideri un motore a gas alimentato da energia del combustibile (energia primaria) pari a 100 unità; 30 sono trasformate in energia meccanica dal motore (rendimento pari al 30%) e vanno ad alimentare il compressore di una pompa di calore con $COP = 3$: si ottengono 90 unità di energia per il riscaldamento.

Supponendo che delle 70 unità di calore di scarico del motore ne vengono recuperate 55, si ottengono in definitiva $90+55=145$ unità di energia termica per il riscaldamento, a fronte di 100 unità spese. In tal caso il $CUEP = 1,45$.

Se la pompa di calore fosse elettrica, per 100 unità di energia primaria, si ottengono 30 unità di energia elettrica (per semplicità si è posto pari a 30% il rendimento di conversione), per cui, con $COP = 3$, si ottengono le sole 90 unità di energia termica per il riscaldamento, con un $CUEP = 0,90$.

4. ANCORA SULLE POMPE DI CALORE A COMPRESSIONE DI VAPORE

- Termine usato per apparecchiature che abbiano la finalità di riscaldare e che operino ciclicamente prelevando energia a bassa temperatura “ pomandola “ verso l'utenza a temperatura maggiore .
- Si tratta pur sempre di macchina frigorifera con evaporatore collegato alla sorgente di energia ed il condensatore all'utenza.

$COP_{p.c.} = Q_{co}/L$ pompa di calore a compressione di vapore

$COP_{p.c. id.} = T_A/(T_A - T_B)$ $T_A = T_{co}$ [K] temperatura utenza

$T_B = T_{ev}$ [K] temperatura sorgente

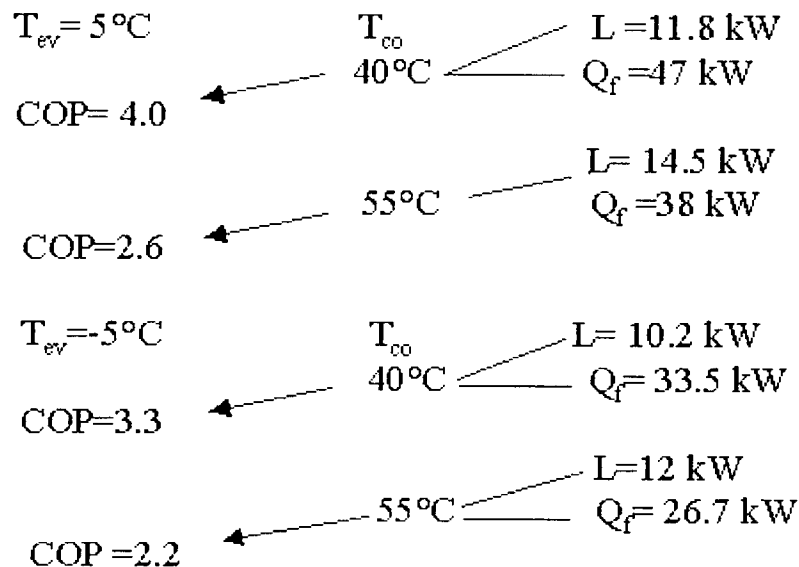
- Le più diffuse sono quelle elettriche – compressore mosso da motore elettrico-
- Q_{co} : da qualche kW fino a 15 MW
- La stessa macchina può operare come pompa di calore e come refrigeratore (macchina reversibile – valvole a 4 vie-)
- Svariate, come si è visto, sono le possibili sorgenti: la più comune è l'aria esterna.

5. CONDENSAZIONE NELLE MACCHINE FRIGORIFERE A COMPRESSIONE DI VAPORE

- Come si è visto, per una macchina frigorifera ideale (assenza di ogni attrito, viscosità del fluido nulla, nessuna espansione libera, differenza di temperatura caldo-freddo negli scambiatori tendente a zero) il COP_{id} dipende soltanto dalle temperature degli ambienti freddo ($T_B=T_{ev}$) e caldo ($T_A=T_{co}$):

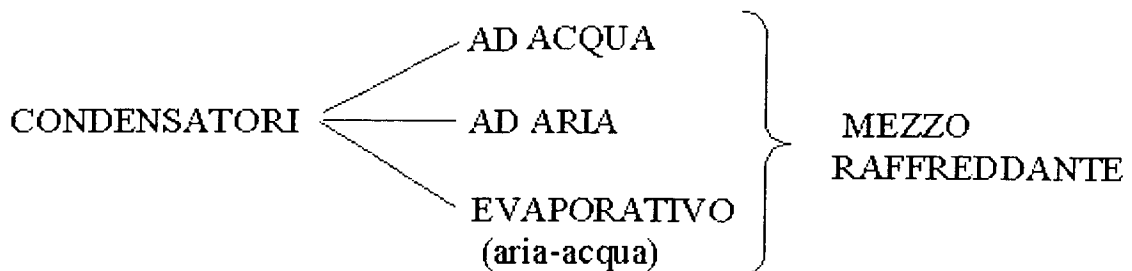
$$COP_{f,id} = T_B / (T_A - T_B) \quad ; \quad T \text{ [K]} \quad ; \quad (COP_f = Q_B / L)$$

- Considerando T_B fisso per ogni specifica applicazione, si osserva che $COP_{f,id}$ decresce al crescere di T_A : questa tendenza vale qualitativamente anche per macchine reali
- La potenza meccanica unitaria ($1/COP_f$) aumenta al crescere della temperatura di condensazione
Esempio:



CONDENSATORI DI MACCHINE FRIGORIFERE

Si tratta di scambiatori di calore per lo smaltimento verso l'ambiente esterno della Q_{co} , pari alla somma di $Q_{ev} + L$. Possono essere classificati sulla base del mezzo raffreddante:



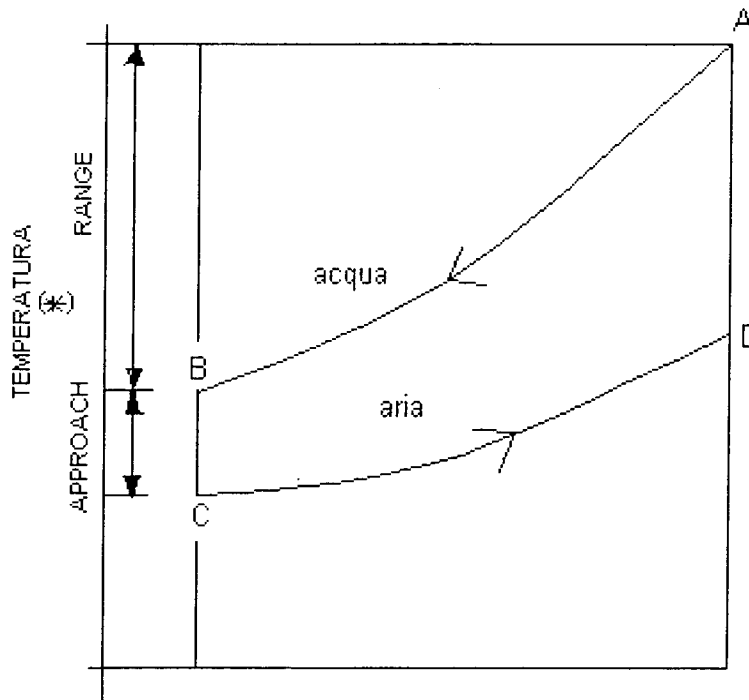
A) CONDENSATORI AD ACQUA

- I condensatori raffreddati ad acqua più usati sono degli scambiatori di calore a tubi e mantello (3.5 ÷ 35000 kW);

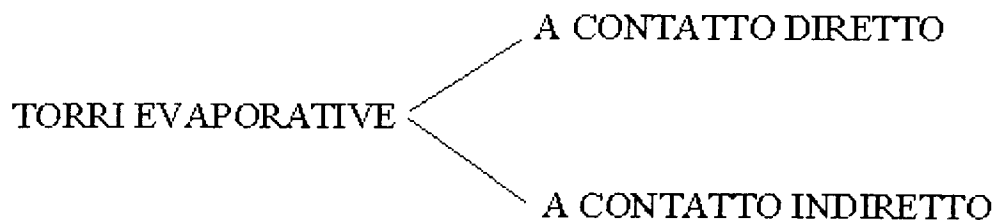
- L'acqua refrigerante fluisce all'interno dei tubi, il fluido frigorifero tra il mantello e l'esterno dei tubi.
- Esempi di tipologie: vedi figura nella pagina allegata.
- L'acqua di refrigerazione impiegata nel condensatore deve, ovviamente, essere riciclata. Si usano a tal fine le torri evaporative.

TORRI EVAPORATIVE

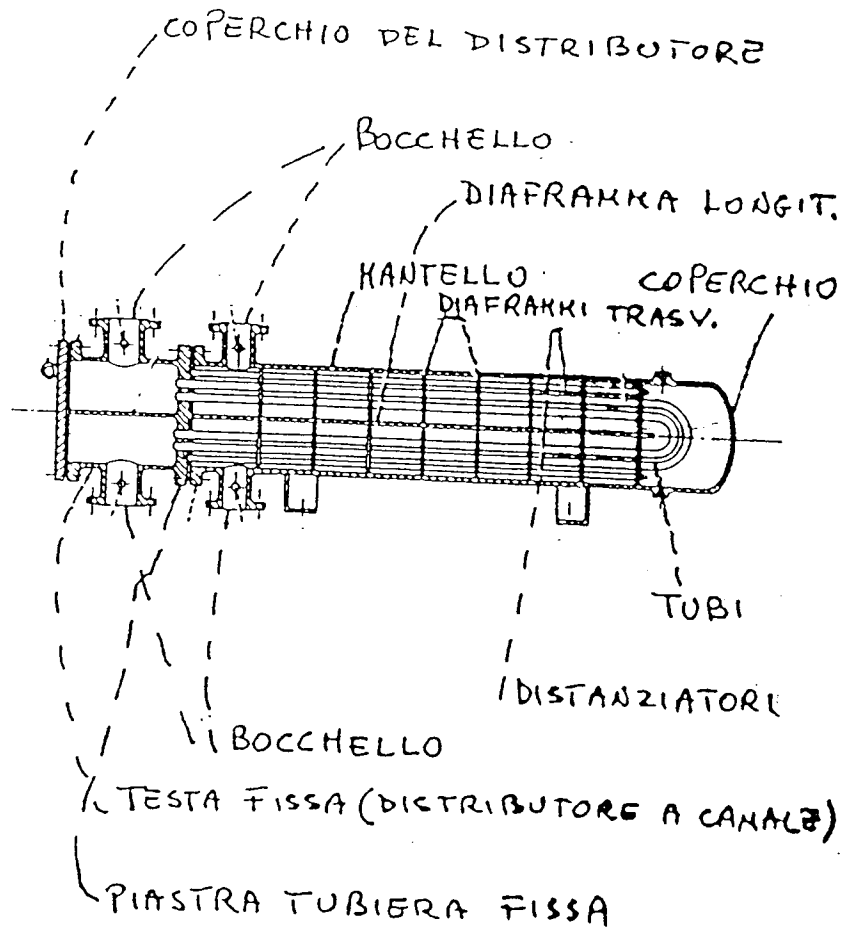
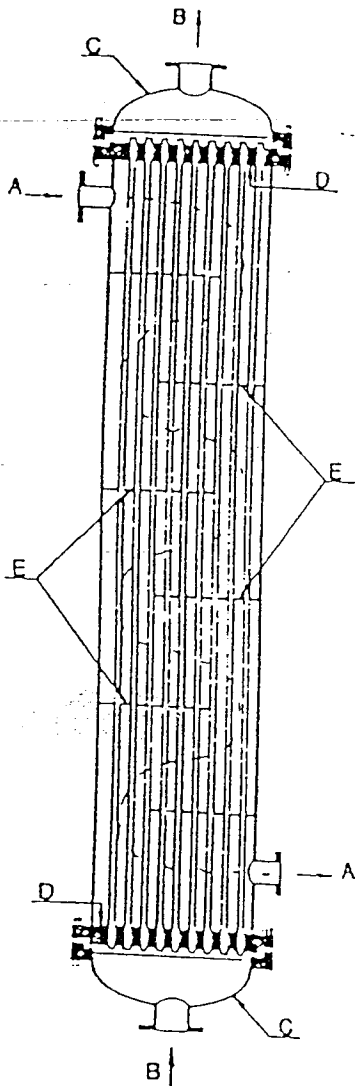
- Nelle torri evaporative l'interazione avviene tra l'acqua da raffreddare (resa nella forma di fini goccioline) e l'aria atmosferica:



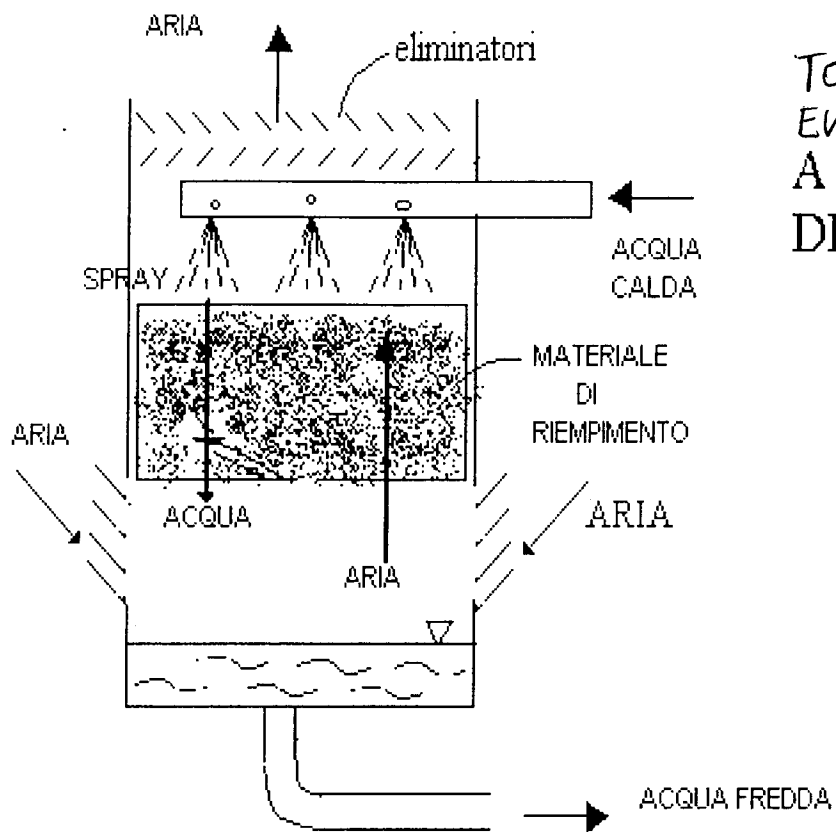
PRINCIPALI TIPOLOGIE



CONDENSATORE AD ACQUA

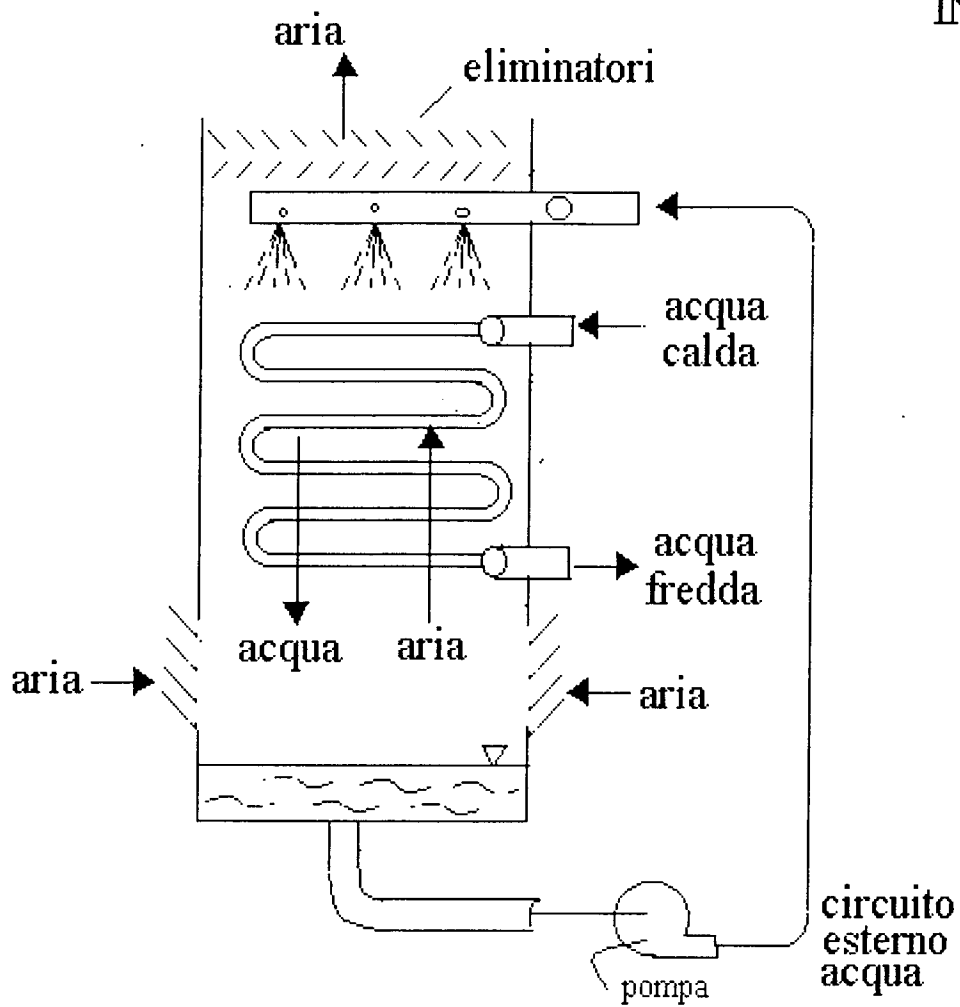


Scambiatore a fascio tubiero tipo 1-1
 A) bocchelli. B) bocchelli. C) fondo bombato.
 D) piastra tubiera. E) diaframmi.



TORRE
EVAPORATIVA
A CONTATTO
DIRETTO

TORRE EVAPORATIVA A CONTATTO INDIRETTO



- si evita la contaminazione
- il fluido raffreddato può non essere acqua

C) CONDENSATORI EVAPORATIVI (ARIA-ACQUA)

Molto razionali appaiono i condensatori evaporativi: il fluido frigorifero è direttamente raffreddato evaporativamente (uno step in meno del condensatore ad acqua + torre; temperatura di condensazione minore che in quello ad aria: il limite è $T_{bb} < T_{ba}$)

