

2.8 La pompa di calore

2.8.1 Introduzione

La **pompa di calore** è un dispositivo che consente di estrarre calore da una sorgente a bassa temperatura con un consumo ridotto di energia elettrica, e di “pomparlo” in un elemento (in genere un fluido) a temperatura più alta. Questo avviene attraverso un circuito chiuso percorso da uno speciale fluido (*frigogeno*) che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione, assume lo stato di liquido o di vapore. In altre parole, la pompa di calore recupera calore dall’ambiente esterno fornendo sotto forma di calore una quantità di energia maggiore dell’energia elettrica impiegata per il suo funzionamento.

La sorgente dalla quale si estrae calore è detta **sorgente fredda**, mentre il fluido nel quale il calore viene pompato è chiamato **pozzo caldo**.

Il funzionamento della pompa di calore

Il funzionamento della pompa di calore è simile a quello di un frigorifero utilizzato non per sottrarre calore (cioè per raffreddare), ma per erogare calore, cioè per riscaldare un ambiente.

Nella pompa di calore circola un fluido che, durante il ciclo, passa continuamente dallo stato liquido a quello di gas nell’**evaporatore** e da quello di gas a quello liquido nel **condensatore**.

Schematicamente, il principio di funzionamento della pompa di calore è rappresentato dalla figura 2.31. La pompa assorbe una quantità di calore Q_1 dalla sorgente fredda T_1 e, utilizzando una quantità di energia E fornita da un compressore (generalmente mosso da un motore elettrico), trasferisce al pozzo caldo T_2 una quantità di calore Q_2 equivalente alla somma di Q_1 ed E , in un ciclo “ideale” (privo cioè di perdite energetiche).

Se il calore Q_1 è disponibile “gratuitamente” (perché è prelevato da aria o acqua dell’ambiente o “di recupero”), allora il calore “utile” Q_2 si ottiene con la sola spesa di energia E .

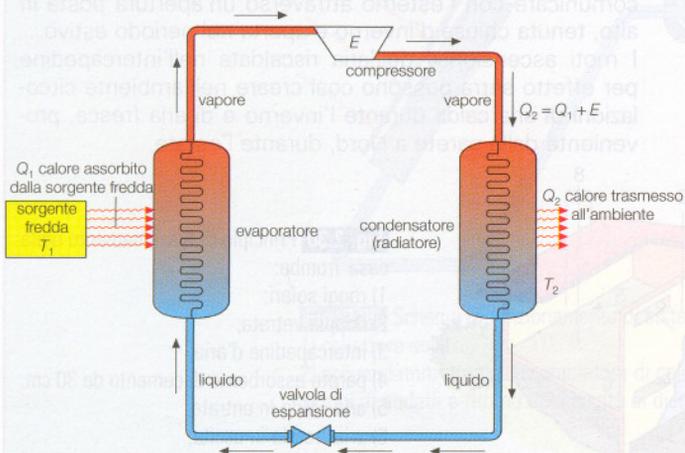


Fig. 2.31 Schema di funzionamento della pompa di calore.

Tipi di pompa di calore

A seconda della sorgente fredda dalla quale viene attinguta l’energia e del fluido al quale essa viene trasferita, la pompa di calore può essere di uno dei seguenti tipi: **aria-aria**, **aria-acqua**, **acqua-aria**, **acqua-acqua** (il primo termine indica la sorgente fredda e il secondo il pozzo caldo). Il calore prodotto può essere ceduto all’ambiente attraverso ventilconvettori, serpentine o canalizzazioni (vedi [unità 13](#)).

Efficienza della pompa di calore

La “convenienza” dell’operazione sopra descritta viene valutata attraverso il **coefficiente di prestazione (COP)**, dato dal rapporto fra l’energia ottenuta, cioè il calore utile (calore ceduto al pozzo caldo) e l’energia elettrica spesa:

$$\frac{\text{calore utile}}{\text{energia spesa}} = \frac{Q_2}{E}$$

Il COP varia a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento e ha, in genere, valori prossimi a 3. Questo significa che per ogni kWh di energia elettrica consumato, la pompa fornisce 3 kWh (10 800 J) di calore al mezzo da riscaldare.

approfondimento

Il COP per un ciclo ideale

In termodinamica si dimostra che per un ciclo “ideale” il coefficiente di prestazione raggiunge il valore:

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{E} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Nei calcoli di questo tipo la temperatura non va espressa in gradi Celsius °C, ma in kelvin K che, come è noto, partono dallo *zero assoluto*: 1 K = -273 °C.

Per trasformare in kelvin una temperatura espressa in gradi Celsius occorre dunque aggiungere 273.

Per esempio, nel caso di una pompa di calore operante in un ciclo “ideale” tra 5 e 50 °C si avrebbe:

$$\text{COP}_{\text{ideale}} = \frac{273 + 50}{(273 + 50) - (273 + 5)} = \frac{323}{45} = 7,2$$

In pratica il COP effettivo è assai inferiore a quello di un ciclo ideale, a causa delle perdite energetiche e delle differenti condizioni che caratterizzano un ciclo reale.

approfondimento

Definizione di pompa di calore

Il **D.Lgs. 192/05** (vedi [pag. 9](#)) definisce la **pompa di calore** come *dispositivo o impianto che sottrae calore dall’ambiente esterno o da una sorgente di calore a bassa temperatura e lo trasferisce all’ambiente a temperatura controllata.*

2.8 La pompa di calore

2.8.2 Il ciclo termico della pompa di calore

Analizziamo, attraverso un esempio, la sequenza dei processi di trasformazione che avvengono durante un ciclo termico.

Riferendoci alla figura 2.32, supponiamo che la pompa debba scaldare acqua a 50 °C prelevando calore dall'aria esterna, la cui temperatura varia tra +25 °C d'estate e +5 °C d'inverno, e consideriamo la condizione d'esercizio più gravosa (quella invernale). Supponiamo inoltre che il fluido utilizzato sia quello commercialmente designato con la sigla R 12 che bolle o condensa a 53 °C quando la sua pressione è di 13 bar e a -1 °C quando la sua pressione è di 3 bar*. Queste pressioni si prestano bene all'uso dei normali compressori di serie, che forniscono buoni rendimenti.

Le caratteristiche iniziali del fluido nel punto A siano: pressione 3 bar, temperatura -1 °C, entalpia specifica 353 kJ/kg.

Analizziamo le varie fasi del ciclo.

Compressione (da A a B)

Il gas compresso si scalda con aumento dell'entalpia di una quantità di poco inferiore all'energia assorbita dal compressore. All'uscita del compressore (punto B), le caratteristiche del gas saranno: pressione 13 bar, temperatura 100 °C, entalpia (353 + 54) = 407 kJ/kg.

to B), le caratteristiche del gas saranno: pressione 13 bar, temperatura 100 °C, entalpia (353 + 54) = 407 kJ/kg.

Condensazione (da B a C)

Il gas entra nel condensatore posto nell'ambiente da riscaldare (acqua a 50 °C). Poiché il gas è più caldo, si raffredda cedendo calore e, quando la sua temperatura è scesa fino a 53 °C, comincia a condensare e all'uscita del condensatore (punto C) è completamente liquido con le seguenti caratteristiche: pressione ancora di 13 bar, temperatura uguale a quella del condensatore, 50 °C, entalpia scesa a 248 kJ/kg.

Il liquido ha dunque ceduto all'ambiente che deve scaldare (407 - 248) = 159 kJ/kg.

Espansione (da C a D)

Il liquido passa attraverso una valvola in un ambiente dove la pressione è di nuovo di soli 3 bar.

Espandendosi esso si raffredda e in parte evapora. All'ingresso dell'evaporatore (punto D), esso è una miscela di liquido e gas con queste caratteristiche: pressione ridotta a 3 bar, temperatura -1 °C.

Evaporazione (da D ad A)

Ora il fluido entra nell'evaporatore posto nell'ambiente freddo, che ha comunque una temperatura (5 °C) superiore a quella del fluido. Perciò quest'ultimo assorbe calore e completa la sua evaporazione. L'assorbimento di calore, che è di circa 105 kJ/kg, avviene senza alcuna spesa di energia ed è proprio questa la fase che giustifica il vantaggio economico di tutta l'operazione.

* Ricordiamo che il **bar** è l'unità di misura della pressione del Sistema Internazionale, equivalente all'incirca a 1 atmosfera e quindi anche a circa 1 kg/cm².

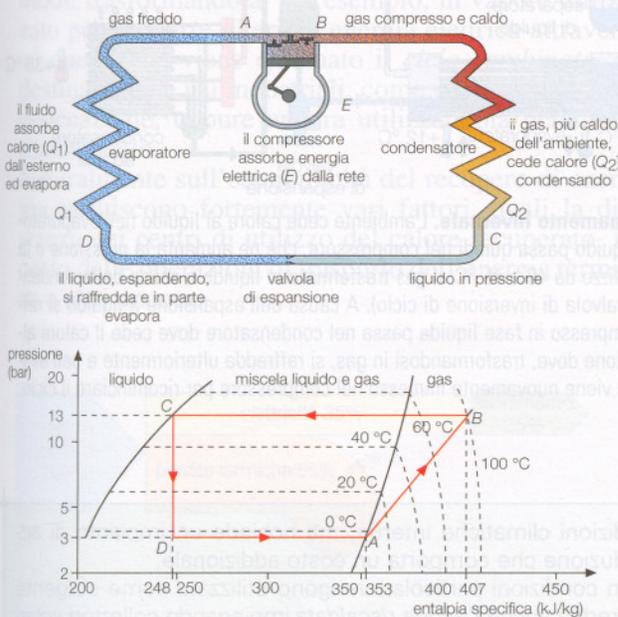


Fig. 2.32

Coefficiente di prestazione del ciclo

Come risulta dall'esempio, si spende energia solo nella fase di compressione e si ricava calore utile nella fase di condensazione. Ogni kilogrammo di fluido assorbe dal compressore 54 kJ e cede all'ambiente caldo 159 W. Ne risulta un coefficiente di prestazione di 159 : 54 = 2,9, mentre il coefficiente di prestazione ideale (vedi pag. 34) è invece pari a

$$\text{COP}_{\text{ideale}} = \frac{273 + 50}{50 - 5} = 7,2$$

La differenza fra i due valori è dovuta alle perdite energetiche e alle differenti condizioni che si verificano nel ciclo reale, diverso da quello ideale (di Carnot).

richiami di fisica

L'entalpia

L'entalpia è una grandezza termodinamica che corrisponde al **contenuto di calore a pressione costante** di un fluido; la sua unità di misura è quindi la stessa del calore, cioè,

nel Sistema Internazionale, il joule (J) e i suoi multipli (kJ = kilojoule = 1000 joule).

Ricordiamo che 1 kJ = 0,24 kcal. Nel diagramma di figura 2.32 è indicata l'entalpia "specifica" ossia "per unità di massa" del fluido, espressa in kJ/kg.

2.8 La pompa di calore

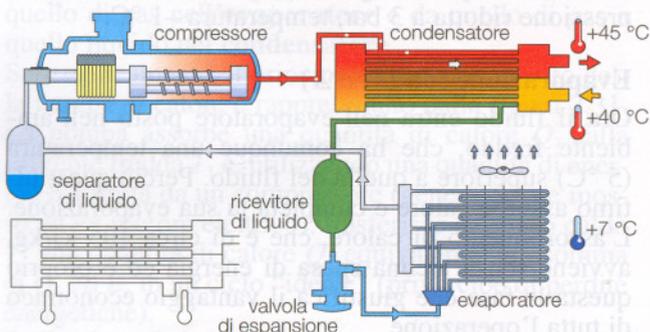
2.8.3 La pompa di calore a ciclo reversibile

Una pompa di calore può essere usata sia per riscaldare sia per raffreddare e, contemporaneamente a quest'ultima funzione, anche per deumidificare. La maggiore convenienza si realizza nell'impiego della macchina per tutte e tre le funzioni, ossia nella climatizzazione integrale nell'arco dell'anno.

Per il solo riscaldamento è conveniente ricorrere alla pompa di calore quando essa deve operare entro limitati intervalli di temperatura. Tale condizione si verifica più frequentemente nel riscaldamento di acqua sanitaria e di acqua di piscine, ma anche nel riscaldamento, quando però vengono impiegati sistemi nei quali il calore viene trasferito all'ambiente con circolazione forzata di aria, riscaldata dal condensatore direttamente o tramite acqua a temperatura moderata (non più di 50 °C) (vedi

unità 9).

Condizioni favorevoli per l'utilizzo della pompa di calore per produrre energia termica si possono anche presentare in ambiente industriale, quando esiste disponibilità di calore risultante da lavorazioni industriali.



La pompa di calore a ciclo reversibile

Il grande pregio della pompa di calore è quello di poter essere costruita in versione **reversibile**, in modo tale cioè che la stessa pompa che d'inverno fa passare calore dall'esterno freddo all'interno caldo può, d'estate, trasferire calore dall'interno all'esterno per mantenere più fresca la temperatura dei locali (fig. 2.33).

Questo duplice impiego, invernale ed estivo, rappresenta il criterio di sfruttamento della pompa più conveniente per le seguenti ragioni:

- ai due impianti (di riscaldamento e di raffreddamento) se ne sostituisce uno solo con notevole risparmio nella spesa iniziale;
- lo stesso impianto funziona sia d'inverno sia d'estate ripartendo così i costi di acquisto e installazione su un periodo di funzionamento doppio.

La pompa di calore reversibile già nelle condizioni attuali risulta sicuramente conveniente per le abitazioni ma, soprattutto, per i locali commerciali e industriali e lo sarà ancor di più quando una più larga diffusione consentirà di abbassarne i costi di produzione.

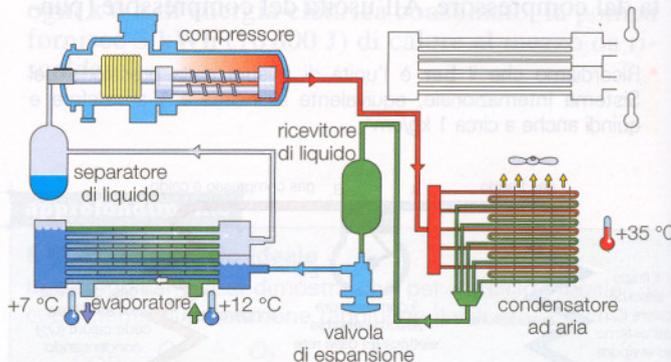


Fig. 2.33 Duplice impiego della pompa di calore in un unico impianto. **a) Funzionamento invernale.** L'ambiente cede calore al liquido nell'evaporatore che, trovandosi a una temperatura più bassa, acquistando calore evapora; il liquido passa quindi nel compressore, che ne aumenta la pressione e la temperatura; nel condensatore il gas "caldo" cede calore e riscalda l'acqua di utilizzo da 40 a 45 °C; il gas trasformato in liquido a causa della condensazione viene fatto espandere nella valvola di espansione (che funge anche da valvola di inversione di ciclo). A causa dell'espansione il liquido si raffredda e torna all'evaporatore. **b) Funzionamento estivo.** Il fluido frigorifero compresso in fase liquida passa nel condensatore dove cede il calore all'esterno; il liquido così raffreddato viene fatto espandere nella valvola di espansione dove, trasformandosi in gas, si raffredda ulteriormente e nell'evaporatore assorbe calore dall'acqua dell'utilizzatore portandola da 12 a 7 °C; il gas viene nuovamente immesso nel compressore per ricominciare il ciclo.

approfondimento

Caratteristiche della sorgente fredda di una pompa di calore

Per il funzionamento della pompa di calore è essenziale che la sorgente fredda sia *illimitata, a temperatura costante e quanto più possibile economica*.

Le principali sorgenti fredde sono:

- l'**aria**, che ha il vantaggio di essere disponibile ovunque; si può utilizzare l'*aria esterna* al locale dov'è installata la pompa di calore, e in questo caso è necessario un sistema di sbrinamento che comporta un ulteriore consumo di energia, oppure l'*aria interna* di recupero da locali *riscaldati*;
- l'**acqua** di falda (che si trova normalmente a temperature intorno ai 10 °C), di fiume o di lago; l'acqua garantisce le prestazioni della pompa di calore senza risentire delle con-

dizioni climatiche interne, ma richiede un impianto di addeuzione che comporta un costo addizionale.

In condizioni particolari vengono utilizzate come sorgente fredda anche l'*acqua riscaldata* impiegando collettori solari e un idoneo sistema di accumulo e il *terreno* che a una profondità di 2-3 metri mantiene una temperatura costante; quest'ultima soluzione è però molto costosa, sia per l'estensione di terreno necessaria sia per la complessità dell'impianto.

Le pompe di calore possono essere impiegate per ottenere acqua calda per usi sanitari o per riscaldamento di ambienti utilizzando apparecchi funzionanti a media temperatura, oppure aria calda per il riscaldamento ambientale e l'essiccazione.