

19. Cicli frigoriferi

unità

Obiettivi

- ▶ Conoscere il ciclo termodinamico inverso
- ▶ Conoscere gli organi dell'impianto di un ciclo frigorifero
- ▶ Conoscere i fluidi frigoriferi
- ▶ Sapere cos'è una pompa di calore
- ▶ Sapere cos'è la cogenerazione

19.1 ● Generalità

- ▶ Si definiscono **macchine frigorifere** quelle macchine che realizzano un impianto che funziona al reciproco dell'impianto a vapore, per cui un impianto frigorifero può essere considerato una macchina termica operatrice.

Un impianto frigorifero utilizza l'energia meccanica per sottrarre calore da una sorgente fredda e cederlo a una sorgente più calda. Gli impianti frigoriferi trovano largo impiego per raffreddare locali in cui si conservano prodotti alimentari, come i magazzini frigoriferi o i frigoriferi domestici, oppure trovano impiego negli impianti di condizionamento ambientale. Gli impianti frigoriferi sono ancora usati nella produzione del ghiaccio dall'acqua o del ghiaccio secco dalla CO₂ oppure per la liquefazione di gas.

19.2 ● Ciclo termodinamico inverso

Si sa che un ciclo termodinamico è costituito da una serie di trasformazioni operate su un fluido in modo tale che esso torni alle condizioni iniziali di pressione, volume e temperatura.

Le trasformazioni comportano scambi di calore tra il fluido e l'esterno; se il ciclo termodinamico trasforma il calore in lavoro esso viene denominato **ciclo diretto**; se invece il ciclo termodinamico serve per trasferire calore da un corpo a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta esso è denominato **ciclo inverso**.

Per poter realizzare un ciclo inverso, in base al secondo principio della termodinamica, occorre somministrare lavoro meccanico al fluido. Se il ciclo inverso si realizza per sottrarre calore da un ambiente che deve essere mantenuto a temperatura più bassa della temperatura esterna, esso viene denominato **ciclo frigorifero**.

Se il ciclo inverso è realizzato per somministrare calore ad un ambiente che deve essere mantenuto a temperatura più elevata di quella esterna si parla di **pompa di calore**.

Nella realizzazione di un ciclo inverso il fluido circola in quattro organi separati che formano un circuito chiuso; essi sono:

- 1) uno scambiatore di calore o evaporatore in cui il fluido a temperatura più bassa riceve calore dall'ambiente freddo;
- 2) un organo (compressore) in cui si somministra energia meccanica al fluido per comprimerlo ed elevarne la temperatura e per farlo circolare nei vari organi dell'impianto;



- 3) uno scambiatore di calore (condensatore) in cui il fluido a temperatura più elevata cede calore all'ambiente caldo;
- 4) un organo di espansione in cui il fluido espande passando da una pressione maggiore ad una pressione più bassa diminuendo la propria temperatura.

Lo schema di un impianto frigorifero è riportato in [figura 19.1](#) e il ciclo corrispondente nel piano entropico T, S è riportato nella [figura 19.2](#).

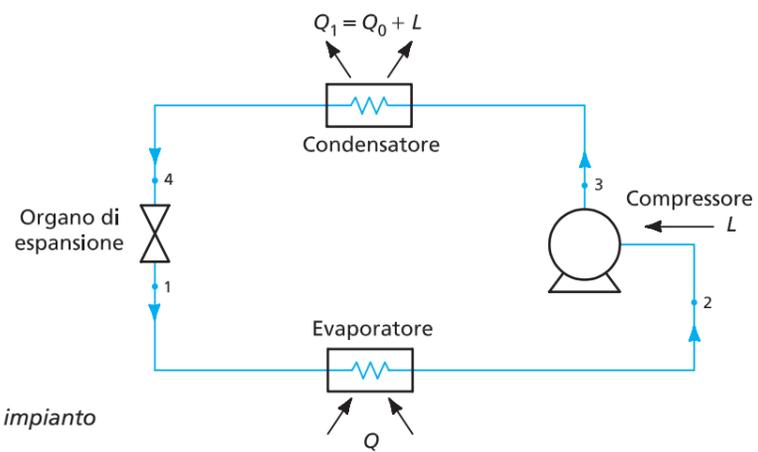


Fig. 19.1 – Schema di un impianto frigorifero.

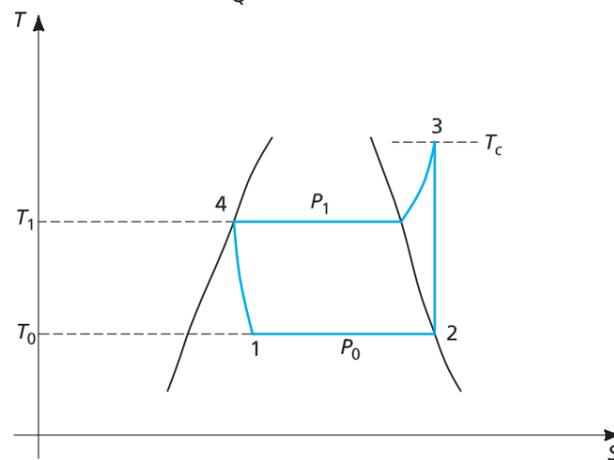


Fig. 19.2 – Ciclo frigorifero in T, S .

Le trasformazioni sono:

- trasformazione 1-2: 1 kg di fluido a temperatura T_0 più bassa di quella dell'ambiente esterno assorbe calore Q_0 da questo e passa, a temperatura e pressione costanti, allo stato di vapore; il tutto avviene in un evaporatore;
- trasformazione 2-3: il fluido viene aspirato e compresso in teoria adiabaticamente in un compressore aumentando la propria temperatura e la propria pressione e quindi la propria entalpia; l'aumento di entalpia si può leggere in un diagramma p, h pressione-entalpia e vale $L = h_3 - h_2$;
- trasformazione 3-4: il fluido cede calore a pressione costante all'ambiente esterno che si trova a temperatura minore e si raffredda; esso condensa in un condensatore e nel punto 4 è diventato tutto liquido.

Il calore ceduto Q_1 vale:

$$Q_1 = h_3 - h_4$$

esso è la somma del calore assorbito Q_0 durante l'evaporazione e di quello del lavoro di compressione;



- trasformazione 4-1: il fluido espande attraverso una valvola o un capillare abbassando la propria pressione (laminazione isoentalpica) e la propria temperatura; il liquido raffreddandosi cede calore che serve a vaporizzare parte del liquido stesso.

Si definisce effetto frigorifero Q_0 la quantità di calore assorbita da 1 kg di fluido nel passare dallo stato 1 allo stato 2; risulta comodo leggere tale valore in un diagramma p, h :

$$Q_0 = h_2 - h_1$$

Si definisce **coefficiente di effetto frigorifero** ε di un ciclo frigorifero il rapporto tra il calore assorbito da 1 kg di fluido durante la vaporizzazione e il lavoro L speso per la compressione:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_2}$$

ed essendo $L = Q_1 - Q_0$ si ha:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{Q_1 - Q_0} = \frac{T_0 \cdot \Delta S}{T_1 \cdot \Delta S - T_0 \cdot \Delta S} = \frac{T_0}{T_1 - T_0}$$

Se si moltiplicano numeratore e denominatore della relazione $\varepsilon = \frac{Q_0}{L}$ per la portata massica Q_m del fluido che circola nell'impianto, si ottiene il rapporto tra la potenza frigorifera o calore assorbito q nell'unità di tempo e la potenza meccanica P spesa o lavoro fornito nell'unità di tempo:

$$\varepsilon = \frac{Q_0 \cdot Q_m}{L \cdot Q_m} = \frac{q}{P}$$

Questa relazione è utile per determinare la potenza teorica di un compressore in un impianto frigorifero, avendo fissato la potenza frigorifera q , note le temperature T_0 e T_1 :

$$P = \frac{q}{\varepsilon} \quad [\text{W}]$$

È comodo introdurre il coefficiente φ caratteristico del ciclo che esprime il numero di kJ prodotti per ogni m^3 di fluido aspirato dal compressore. Esso si ottiene dividendo il valore $Q_0 = h_2 - h_1$ (fig. 19.3) letto sul diagramma pressione-entalpia, per il volume specifico in m^3/kg del fluido all'aspirazione cioè al punto 2:

$$\varphi = \frac{Q_0}{v_2} \quad [\text{kJ}/\text{m}^3]$$

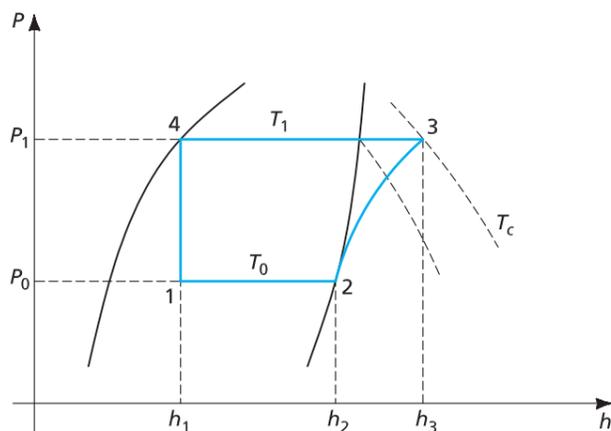


Fig. 19.3 – Ciclo frigorifero in P, h .



Tale coefficiente φ può essere anche riferito alla potenza frigorifera q ed alla portata volumetrica Q_v ; infatti moltiplicando numeratore e denominatore per la portata massica Q_m si ottiene:

$$q = Q_0 \cdot Q_m \quad [\text{kJ/s}]$$

e

$$Q_v = v_2 \cdot Q_m \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Quindi si può scrivere che:

$$\varphi = \frac{q}{Q_v} \quad [\text{kJ}/\text{m}^3]$$

La conoscenza del coefficiente φ permette di determinare la cilindrata del compressore, avendo prefissato la potenza frigorifera e le temperature; infatti:

$$Q_v = \frac{q}{\varphi} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

La cilindrata teorica V del compressore si ottiene moltiplicando la portata volumetrica Q_v per il numero di aspirazioni effettuate dal compressore in un secondo.

Quindi:

$$V = \frac{Q_v}{n \cdot 60}$$

in cui n è il numero di giri al minuto del compressore.

19.3 ● Fluidi frigoriferi

Un fluido frigorifero deve soddisfare molte proprietà sia dal punto di vista termodinamico e chimico-fisico che dal punto di vista della sicurezza.

Per quanto riguarda le caratteristiche termodinamiche è opportuno che i fluidi frigoriferi abbiano una elevata temperatura critica, molto al di sopra delle temperature di condensazione che si realizzano nei cicli stessi; questa circostanza è necessaria per aumentare il coefficiente di effetto. Inoltre i fluidi frigoriferi devono avere una bassa temperatura di solidificazione per non solidificare durante il loro impiego nell'impianto. È ancora necessario che abbiano un elevato calore di vaporizzazione che si traduce in un elevato effetto frigorifero per unità di massa e infine devono avere pressioni di saturazione non inferiori a 1 bar per evitare che entri aria all'interno del circuito.

Per quanto riguarda le caratteristiche chimico-fisiche, i fluidi frigoriferi devono presentare una composizione chimica stabile, non devono reagire con i materiali con cui vengono a contatto, devono avere bassa tendenza ad assorbire acqua onde evitare fenomeni di corrosione e buone caratteristiche di trasmissione del calore.

Per quanto riguarda la sicurezza si richiede che i fluidi frigoriferi non siano tossici per l'organismo umano, non siano irritanti per la pelle, gli occhi e gli organi dell'apparato respiratorio e infine che non siano infiammabili a contatto con l'aria.

Di seguito si dà cenno dei fluidi frigoriferi attualmente più usati (CFC 114, CFC 502) e di quelli di nuova generazione, destinati a sostituirli (HFC 134a, 407C, 410A).

- **CFC 114**

È il refrigerante più utilizzato negli impianti di climatizzazione di grosse dimensioni e presenta il vantaggio di avere bassa pressione di condensazione.

- **CFC 502**

Miscela con composizione e temperatura di saturazione costanti durante l'evaporazione (per cui non presenta quello che viene definito *effetto glide*). Ha bassa temperatura di evaporazione e questo costituisce un vantaggio perché offre maggiori possibilità di raffreddamento dei motori dei compressori.



- HFC 134a (Freon R134a)**
 Refrigerante puro, cioè non ottenuto per miscela, pertanto si mantiene inalterato durante le fasi di condensazione ed evaporazione. Viene considerato un refrigerante di nuova generazione, perché ha influenza trascurabile rispetto all'ozono e all'effetto serra.
 Per le sue caratteristiche, è adeguato alla sostituzione del CFC-12 nei frigoriferi e nei congelatori domestici.
- HFC 407C (R407c)**
 Miscela composta di R32, R125 e R134a. Presenta il problema, comune a molte miscele, di dar luogo all'*effetto glide*, fenomeno che si verifica durante le fasi di condensazione ed evaporazione per cui le pressioni di lavoro rimangono invariate ma i componenti del fluido si separano.
- HFC 410A (R410a)**
 Miscela composta di R32 e R125 con *effetto glide* quasi trascurabile. Sostituisce egregiamente l'R22 negli impianti di climatizzazione perché ha maggiore resa frigorifera e consente di utilizzare componenti di minori dimensioni. Questo tuttavia è anche uno svantaggio perché impone di riprogettare gli impianti.

TAB. 19.1 Caratteristiche di alcuni fluidi frigoriferi.

Tipo	Formula chimica	Pressione di saturazione [bar]		Volume specifico [m ³ /kg]	Calore latente di vaporiz. [kJ/kg]	Prod. frig. volumetrica [kJ/m ³]	ODP ⁽¹⁾	GWP		
		-10°C	25°C							
NATURALI	Vapore d'acqua (R718)	H ₂ O		0.0317		2257		0	0	
	Ammoniaca (R717)	NH ₃	2.899	10.00	0.419	1369	2700	0	<1	
	Anidride carbonica (R774)	CO ₂							1	
	Propano (R290)	C ₃ H ₈							3	
	Idrocarburi in genere	-								
SINTETICI	CFC (cloro-fluoro-carburi)	R11	CFCℓ ₃	0.257	1.064	0.612	182	267	1	4000
		R12	CF ₂ Cl ₂	2.193	6.517	0.077	162	1608	0.9 ÷ 1	8500
		R13	CF ₃ Cl	15.202	35.5	0.010	150		?	?
	HCFC (idro-cloro-fluoro-carburi)	R22	CHF ₂ Cl	3.545	10.438	0.065	234	2623	0.04 ÷ 0.06	1700
		R123	CHCl ₃ CF ₃	0.204	0.913	0.690	170	215	0.01 ÷ 0.02	93
	HFC (idro-fluoro-carburi)	R407C	mixture							1500
R134a		C ₂ H ₂ F ₄	2.005	6.655	0.100	217	1589	0	1300	

⁽¹⁾ L'ODP (Potenzialità di distruzione dell'Ozono) è espressa convenzionalmente con riferimento alla massa del fluido frigorifero R11.



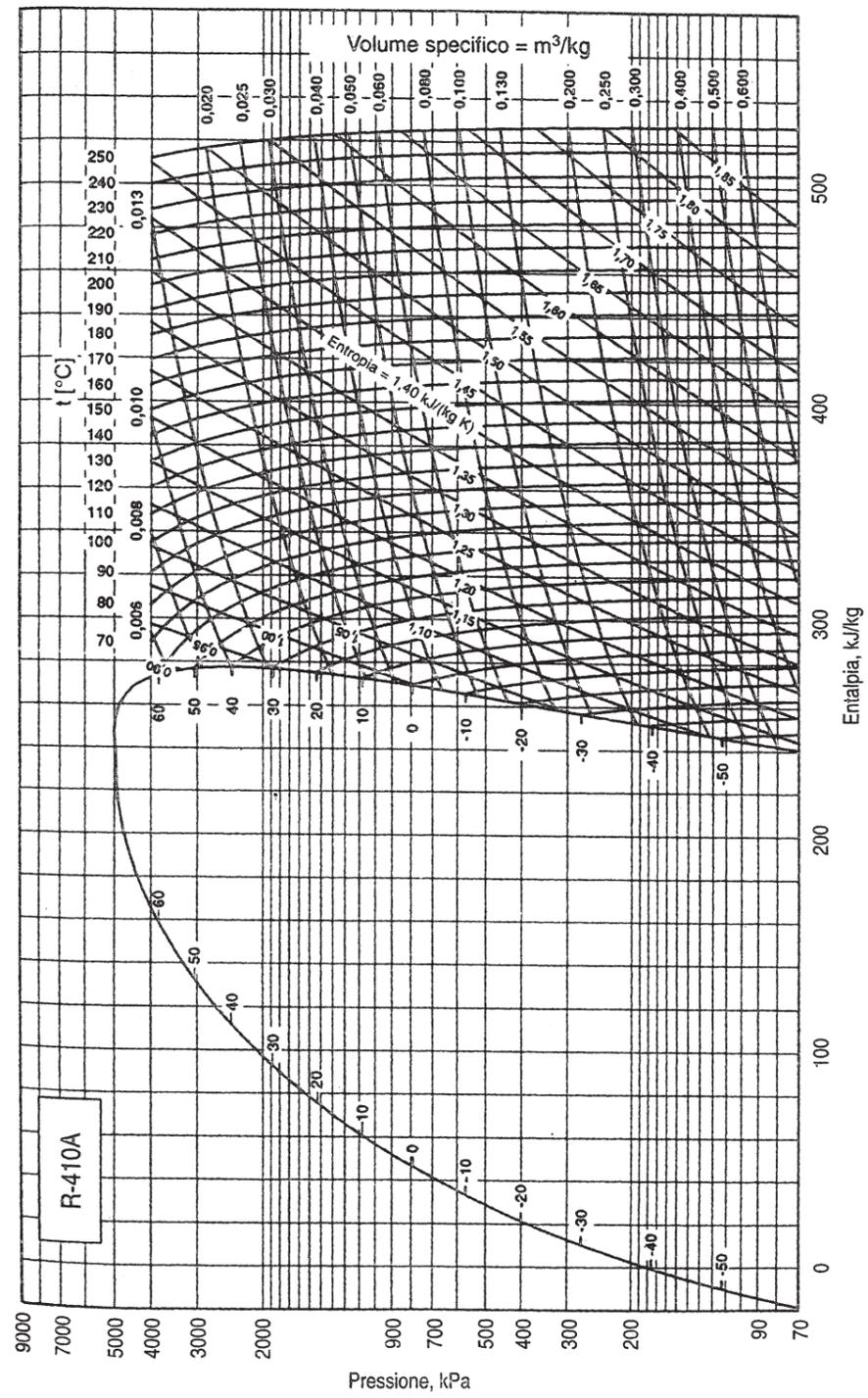


Fig. 19.4 – Diagramma pressione-entalpia per il fluido frigorifero (f.f.) R410A.

ESERCIZIO 1

In una macchina frigorifera con potenza di 4 kW agisce un fluido R410A che opera fra la temperatura di evaporazione di -5°C e quella di condensazione di 40°C : dimensionare il compressore che funziona a 1400 giri al minuto, ipotizzando che il fluido alla fine della compressione si trova a temperatura di 70°C .

Soluzione

Dal diagramma di fig. 19.4 (pag. 385) si legge che la pressione assoluta è:

$$\begin{aligned} p_0 &= 700 \text{ kPa a } -5^{\circ}\text{C} \\ p_1 &= 2500 \text{ kPa a } 40^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

e che l'entalpia vale

$$\begin{aligned} h_2 &= 275 \text{ kJ/kg per il vapore secco} \\ h_4 &= h_1 = 112 \text{ kJ/kg per il liquido} \end{aligned}$$

per $T = 70^{\circ}\text{C}$ e per $p = 2500 \text{ kPa}$ l'entalpia vale $h_3 = 350 \text{ kJ/kg}$.
L'effetto frigorifero per ogni kg di fluido è:

$$Q_0 = h_2 - h_1 = 275 - 112 = 163 \text{ kJ/kg}$$

Il lavoro speso per comprimere 1 kg di fluido è dato da:

$$L = h_3 - h_2 = 350 - 275 = 75 \text{ kJ/kg}$$

Il coefficiente di effetto frigorifero vale:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L} = \frac{163}{75} = 2,17$$

Sempre dal diagramma, il valore del volume specifico per il vapore secco è:

$$v_2 = 0,038 \text{ m}^3/\text{kg}$$

il valore del coefficiente φ è dato da:

$$\varphi = \frac{Q_0}{v_2} = \frac{163}{0,038} = 4289,5 \text{ kJ/m}^3$$

e quindi la potenza teorica del compressore è data da:

$$P = \frac{q}{\varepsilon} = \frac{4000}{2,17} = 1843 \text{ W} \approx 1,84 \text{ kW}$$

La portata teorica aspirata dal compressore in un'ora vale:

$$Q_v = \frac{q}{\varphi} = \frac{4000 \cdot 3600}{4289,5 \cdot 1000} = 3,36 \text{ m}^3/\text{h}$$

Poiché il compressore compie 1400 giri al minuto, la cilindrata teorica è data da:

$$V = \frac{3,36 \cdot 10^6}{1400 \cdot 60} = 40 \text{ cm}^3$$

ESERCIZIO 2

Si abbia un ciclo frigorifero che funziona elaborando R410A a temperatura di evaporazione di -10°C e a temperatura di condensazione di 35°C ; la potenza della macchina frigorifera sia di 5 kW e alla fine della compressione il fluido si trova a temperatura di 80°C .
Calcolare la cilindrata teorica del compressore che funziona a 1400 giri al minuto.



Soluzione

Dal diagramma di fig. 19.4 (pag. 385):

per $T = -10^\circ\text{C}$ $p_0 = 580 \text{ kPa}$
per $T = 35^\circ\text{C}$ $p_1 = 2\,200 \text{ kPa}$
per il vapore secco $h_2 = 260 \text{ kJ/kg}$
per il liquido $h_4 = h_1 = 108 \text{ kJ/kg}$
per $T = 80^\circ\text{C}$ e per $p = 2\,200 \text{ kPa}$

$$h_3 = 346 \text{ kJ/kg}$$

L'effetto frigorifero vale:

$$Q_0 = h_2 - h_1 = 260 - 108 = 252 \text{ kJ/kg}$$

Il lavoro speso per comprimere 1 kg di fluido è dato da:

$$L = h_3 - h_2 = 346 - 260 = 180 \text{ kJ/kg}$$

Il coefficiente di effetto frigorifero è dato da:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L} = \frac{252}{180} = 1,4$$

Dal diagramma il volume specifico per il vapore secco è:

$$v_2 = 0,048 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Il coefficiente φ vale:

$$\varphi = \frac{Q_0}{v_2} = \frac{252}{0,048} = 5\,250 \text{ kJ/m}^3$$

La potenza teorica del compressore è data da:

$$P = \frac{q}{\varepsilon} = \frac{5\,000}{1,4} = 3\,571 \text{ W} = 3,57 \text{ kW}$$

La portata oraria teorica vale:

$$Q_v = \frac{q}{\varphi} = \frac{5\,000 \cdot 3\,600}{5\,250 \cdot 1\,000} = 3,43 \text{ m}^3/\text{h}$$

Quindi la cilindrata teorica del compressore è data da:

$$V = \frac{3,43 \cdot 10^6}{1\,400 \cdot 60} = 40,83 \text{ cm}^3$$

19.4 ● La pompa di calore

Si è definito ciclo frigorifero quel ciclo in cui, tramite somministrazione di lavoro, un fluido assorbe calore da una sorgente a bassa temperatura e lo cede ad una sorgente a temperatura più elevata. In tali cicli il calore ceduto alla sorgente a temperatura elevata è disperso nell'aria e non viene utilizzato.

Un ciclo in cui ci si propone di utilizzare il calore ceduto a temperatura più elevata è detto ciclo a pompa di calore, per l'analogia del trasporto del calore da una temperatura più bassa ad una temperatura più elevata, con la pompa che solleva un fluido da una quota inferiore a una quota superiore.



Il ciclo a pompa di calore non differisce dal ciclo frigorifero: cambia soltanto l'organo utilizzatore.

Le pompe di calore sono impiegate per il riscaldamento di locali o di acqua e dove non occorra una temperatura elevata.

La pompa di calore non si è diffusa molto perché per il riscaldamento doveva competere con gli altri sistemi comunemente usati che risultavano di costo meno elevato. Essa torna di attualità solo oggi a causa della crisi energetica perché il rendimento degli impianti comincia ad avere un'importanza fondamentale.

Tecnicamente le pompe di calore si possono ripartire in categorie diverse in base alla sorgente dalla quale estraggono il calore e dalla sorgente alla quale viene ceduto il calore. I tipi più comuni di pompe di calore per il riscaldamento dei locali possono avere come sorgente fredda e come sorgente calda l'aria o l'acqua. Si hanno quindi le seguenti possibilità:

- pompa di calore aria-aria
- pompa di calore acqua-aria
- pompa di calore aria-acqua
- pompa di calore acqua-acqua.

La prima soluzione è quella più adottata per i piccoli impianti di tipo monofamiliare: una serie di tubi alettati costituisce l'evaporatore che assorbe il calore dell'aria esterna; un'analoga serie di tubi alettati costituisce il condensatore che cede calore all'aria interna.

In una pompa di calore commerciale come i comuni frigoriferi si usa per il suo ciclo non un gas ma una sostanza che passa dallo stato liquido a quello di vapore al variare della pressione cui è sottoposta mentre circola nell'impianto.

Quando una certa quantità di sostanza passa dalla fase liquida a quella di vapore, viene assorbita energia sotto forma di calore di vaporizzazione; al contrario nella trasformazione della sostanza da vapore a liquido viene ceduta energia sotto forma di calore di condensazione. Naturalmente per ogni sostanza, a pressione prefissata, il passaggio di stato avviene ad una ben definita temperatura che nel corso del processo rimane costante.

La pompa di calore funziona proprio in base a quanto detto.

Essa schematicamente è composta da una valvola di espansione, da un evaporatore messo a contatto con la sorgente fredda che può essere aria, acqua o anche il suolo, da un compressore e da un condensatore a contatto con l'aria o l'acqua da riscaldare.

Il fluido usato è scelto tra quelli che hanno una pressione di poco superiore a quella atmosferica e che evaporano a temperature intorno ai -10°C ; a pressione più elevata tali fluidi condensano intorno ai $40 \div 50^{\circ}\text{C}$, temperatura adatta per cedere calore all'acqua o all'aria da riscaldare. Le sostanze più usate sono le stesse usate nei frigoriferi.

APPROFONDIMENTO ► Il Protocollo di Kyoto

La «Convenzione-quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici», approvata a New York il 9 maggio 1992, costituisce il primo trattato internazionale riferito specificamente ai cambiamenti climatici.

Lo strumento attuativo della Convenzione è il Protocollo di Kyoto, che stabilisce per i Paesi industrializzati e per i Paesi con economie in transizione obiettivi di riduzione delle emissioni di 6 gas-serra non controllati dal Protocollo di Montreal per la protezione della fascia di ozono.

Il Protocollo di Kyoto impegna i Paesi industrializzati e quelli ad economia in transizione (i Paesi dell'est europeo) a ridurre complessivamente del 5,2% nel periodo 2008-2012 le principali emissioni antropogeniche di gas capaci di alterare l'effetto serra naturale del nostro pianeta.

I 6 gas-serra sono:

- l'anidride carbonica (CO_2), prodotta dall'impiego dei combustibili fossili in tutte le attività energetiche e industriali, oltre che nei trasporti;



- il metano (CH₄), prodotto dalle discariche dei rifiuti, dagli allevamenti zootecnici e dalle coltivazioni di riso;
- il protossido di azoto (N₂O), prodotto nel settore agricolo e nelle industrie chimiche;

e inoltre:

- gli idrofluorocarburi (HFC);
- i perfluorocarburi (PFC);
- l'esafluoruro di zolfo (SF₆),

tutti e tre impiegati nelle industrie chimiche e manifatturiere.

L'anno di riferimento per la riduzione delle emissioni dei primi 3 gas è il 1990, mentre per i rimanenti 3 è possibile scegliere tra il 1990 e il 1995. La riduzione complessiva del 5% viene ripartita in maniera diversa: per i Paesi dell'Unione europea nel loro insieme la riduzione deve essere dell'8%, per gli Stati Uniti del 7% e per il Giappone del 6%. Nessuna riduzione, ma solo stabilizzazione è prevista per la Federazione Russa, la Nuova Zelanda e l'Ucraina. Possono, invece, aumentare le loro emissioni fino all'1% la Norvegia, fino all'8% l'Australia e fino al 10% l'Islanda. Nessun tipo di limitazione alle emissioni di gas-serra viene previsto per i Paesi in via di sviluppo.

Per l'Unione europea Kyoto ha fissato, a conclusione dell'impegnativa negoziazione, una riduzione dell'8%, tradotta poi dal Consiglio dei Ministri dell'Ambiente dell'UE del 17 giugno 1998 negli obiettivi di riduzione delle emissioni dei singoli Stati membri. Per l'Italia è stato stabilito che entro il 2008-2012 il nostro Paese riduca le proprie emissioni nella misura del 6,5% rispetto ai livelli del 1990.

Il Protocollo di Kyoto è stato finora ratificato da 121 Paesi, e i Paesi industrializzati o ad economia in transizione che l'hanno ratificato erano responsabili nel 1990 del 44,2% delle emissioni di CO₂ provenienti dai Paesi sviluppati. Dopo la decisione degli Stati Uniti (36,1% delle emissioni di CO₂ nel 1990) di non ratificare il Protocollo, nell'ottobre 2004 si è avuta, invece, la notifica da parte della Federazione Russa (17,4% delle emissioni di CO₂ nel 1990).

19.5 ● La cogenerazione

Finora si è esaminato il funzionamento delle diverse macchine a fluido e si è messo in evidenza quali fattori determinano il rendimento di ciascuna di esse.

Nella produzione di energia meccanica si è visto che i motori a combustione interna sono quelli che presentano il rendimento più basso. L'aspetto principale del problema energetico rispetto agli usi finali dell'energia stessa riguarda l'energia termica. In particolare sono gli usi di energia termica a bassa e media temperatura che costituiscono gli impianti realizzati con i più bassi rendimenti e con la peggiore efficienza.

Per sottolineare quanto poco razionale sia il modo di sfruttare il combustibile, che è la fonte di energia maggiormente usata, si possono fare due considerazioni:

- si brucia combustibile per ottenere energia meccanica o elettrica ma solo il 30 ÷ 40 per cento dell'energia potenzialmente posseduta dal combustibile è trasformata in energia nella forma desiderata; si disperde nell'ambiente la maggior parte dell'energia disponibile sotto forma di calore a bassa temperatura;
- si brucia combustibile capace di fornire elevata temperatura per assicurare il calore necessario al riscaldamento delle case a temperatura molto bassa, intorno ai 20 °C. L'uso di una sorgente pregiata come il gasolio o il metano per produrre energia poco pregiata a bassa temperatura è inadeguato.

Uno dei metodi per migliorare l'efficienza di un impianto è quello di adottare la cogenerazione, ossia recuperare il calore che si disperde senza poterlo utilizzare.

Esempi di cogenerazione sono stati già esaminati nelle unità precedenti e riguardano il recupero del calore negli impianti delle turbine a vapore o delle turbine a gas e infine nei motori sovralimentati tramite l'uso del turbo-compressore.

Negli impianti per la produzione di energia elettrica la cogenerazione consiste nel fornire all'utenza contemporaneamente energia elettrica e calore a bassa temperatura.



L'operazione porta notevoli vantaggi di rendimento, come è schematizzato in [figura 19.5](#). Analizzando la figura si osserva che, se si introducono 100 unità di energia in un sistema di cogenerazione, si ottengono 38 unità di energia elettrica, 45 unità di energia termica e 17 unità di perdite.

Con impianti convenzionali separati, per ottenere la stessa quantità di energia termica (45 unità), si hanno 8 unità di perdita, quindi occorre introdurre 53 di energia primaria. Per ottenere la stessa quantità di energia elettrica (38 unità), si hanno 57 unità di perdita, quindi occorre introdurre 95 unità di energia primaria.

In totale, con impianti convenzionali, sono necessarie $53 + 95 = 148$ unità di energia primaria per produrre la stessa quantità di energia termica ed elettrica che si ha con 100 unità di energia primaria in un impianto di cogenerazione. Anche le perdite si riducono di conseguenza, passando da 63 unità con impianti tradizionali a 17 unità con la cogenerazione.

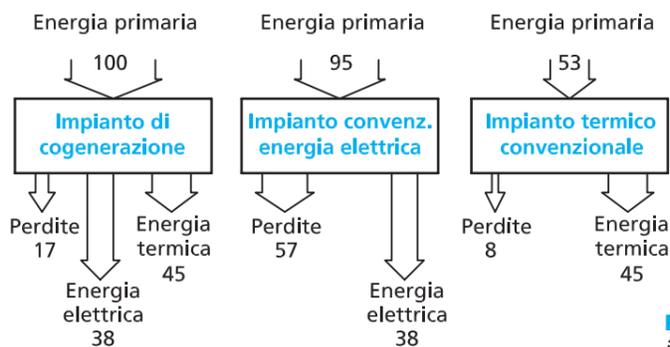


Fig. 19.5 – Vantaggi di rendimento in un impianto di cogenerazione.

Attualmente, la cogenerazione rappresenta l'11-12% della produzione totale di elettricità dell'Unione europea. Se si portasse al 18%, i risparmi di energia potrebbero corrispondere al 3-4% del consumo lordo totale in Europa.

La cogenerazione ha un ruolo importante nell'ambito della politica energetica nei Paesi industrializzati e in via di sviluppo, impegnati nel raggiungimento degli obiettivi fissati nel Protocollo di Kyoto.

Struttura di un impianto di cogenerazione

Il combustibile più diffuso negli impianti di cogenerazione è il gas naturale, tuttavia si tende a ricorrere sempre di più alle energie rinnovabili e ai rifiuti.

Diversamente da una centrale elettrica tradizionale in cui i fumi sono immessi direttamente nell'aria attraverso il camino, i gas di scarico della cogenerazione vengono prima raffreddati e cedono così la loro energia a un circuito ad acqua calda/vapore, quindi vengono immessi nell'aria attraverso il camino.

In un tipico impianto di cogenerazione si distinguono le seguenti parti ([fig.19.6](#)):

- un motore primo;
- un sistema di recupero di calore;
- un sistema di generazione e produzione di energia elettrica.

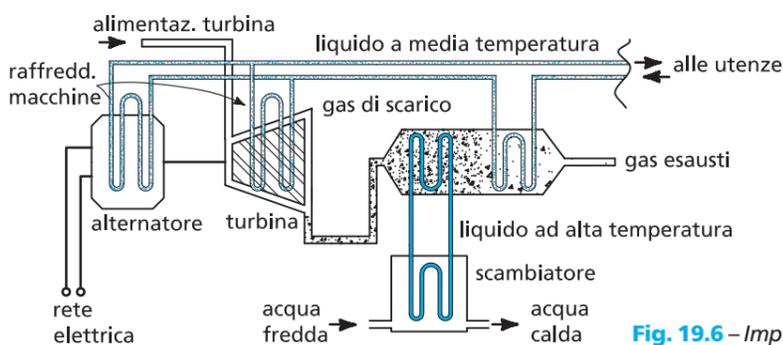


Fig. 19.6 – Impianto di cogenerazione.

In genere gli impianti di cogenerazione si suddividono in base al tipo di motore primo e in base al tipo di impiego.

• **Classificazione in base al motore:**

- **Turbina a vapore**
Sono centrali termoelettriche convenzionali con caldaia dove il vapore estratto dalla turbina viene utilizzato come fonte di energia termica diretta, oppure per riscaldare un mezzo secondario, come l'acqua calda.
- **Turbina a gas**
Il calore dei gas di scarico della turbina viene recuperato per generare vapore o per riscaldare acqua.
- **Motogeneratori**
Sono simili agli impianti di cogenerazione con turbina a gas, ma offrono la possibilità di un ulteriore recupero di calore dai circuiti di raffreddamento e dall'olio lubrificante della macchina.
- **Ciclo combinato**
È una combinazione di una turbina a gas e di una turbina a vapore, in cui il gas di scarico della turbina a gas viene usato per generare vapore. I cicli combinati possono essere realizzati anche con motogeneratori, ma sono meno diffusi. Il principale di questi impianti rispetto alle altre tipologie è il maggiore rendimento nella produzione di energia elettrica.

• **Classificazione in base alle categorie di utilizzo:**

- **Cogenerazione industriale:** si generano, in un unico processo, energia elettrica, meccanica e termica a uso industriale; le temperature di lavoro sono dell'ordine di 140°C.
- **Cogenerazione per riscaldamento:** si generano, in un unico processo, energia elettrica, meccanica e termica destinata al riscaldamento in sistemi di teleriscaldamento urbano; le temperature di lavoro sono comprese tra 40 e 140°C.
- **Cogenerazione in agricoltura:** si generano, in un unico processo, energia elettrica, meccanica e termica destinata al riscaldamento di serre e impianti di acquacoltura; le temperature di lavoro sono comprese tra 40 e 140°C.

Un esempio di cogenerazione è il teleriscaldamento della città di Brescia e dei comuni di Bovezzo e di Concesio. Circa cento chilometri di doppia tubazione già nel 1980 servivano 880 utenze allacciate per un totale di circa 8,8 milioni di metri cubi di fabbricato. In un anno venivano erogati circa 1 223 miliardi di kJ per il riscaldamento degli ambienti e per il riscaldamento dell'acqua.

La maggior parte di questo calore veniva prodotta in una centrale elettrica situata alla periferia di Brescia. Lo schema della centrale è riportato in figura 19.7.

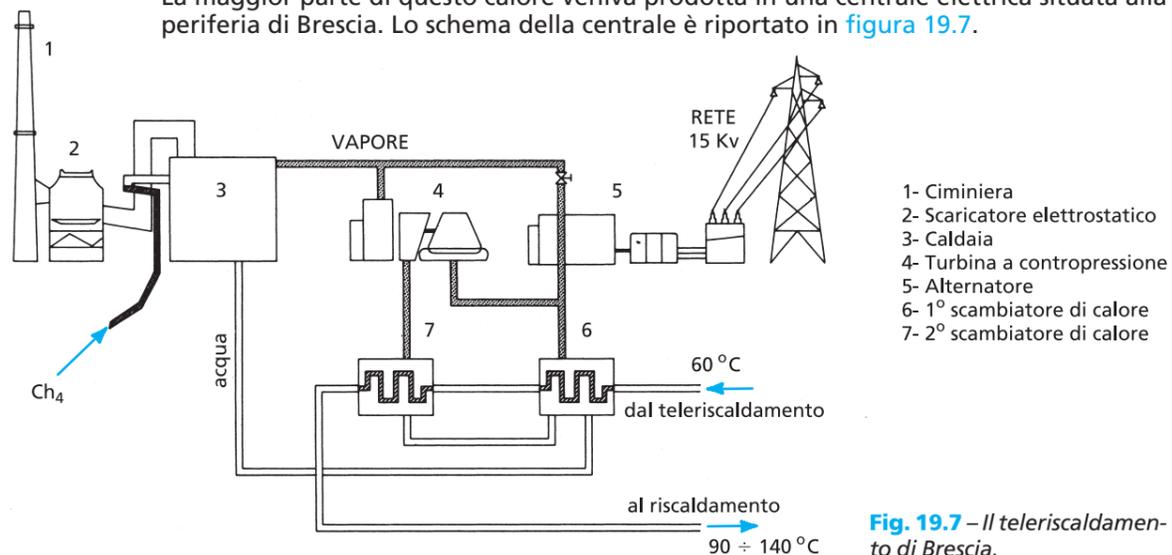


Fig. 19.7 – Il teleriscaldamento di Brescia.

Oggi si servono 1 700 appartamenti. Nella caldaia è prodotto vapore a 95 bar e a 515 °C; il vapore alimenta una turbina a più stadi che a sua volta aziona un alternatore per la produzione di energia elettrica. All'uscita dalla turbina il vapore si trova alla pressione di 1,3 bar ed alla temperatura di 105 °C e condensa in un primo scambiatore di calore a contatto con l'acqua proveniente nella rete di teleriscaldamento a 60 °C. L'acqua di condensazione ritorna alla caldaia mentre l'acqua della rete viene inviata ad un secondo scambiatore di calore dove, a contatto con il vapore surriscaldato spillato dalla turbina, raggiunge la temperatura finale di 140 °C e viene immessa nel circuito del teleriscaldamento. L'acqua calda circola nella rete alla pressione di circa 14 bar e la pressione elevata la tiene allo stato liquido anche se la temperatura è sui 140 °C.

Tra i vantaggi di questo impianto di teleriscaldamento si possono indicare:

- l'eliminazione delle caldaie in ogni condominio o in ogni appartamento e la loro sostituzione con la centrale disposta in periferia della città la quale presenta una ciminiera in cui si depurano i fumi: questo migliora l'inquinamento atmosferico;
- l'utente non deve preoccuparsi dell'approvvigionamento di combustibile;
- lo scambiatore di calore è di piccole dimensioni, richiede pochissima manutenzione, è silenzioso e sostituendo la caldaia non crea rumori e pericolo.

Tra gli svantaggi bisogna ricordare:

- la produzione elettrica deve essere interrotta nel periodo estivo;
- la rete di distribuzione è molto costosa;
- il sistema non è conveniente nei luoghi in cui il clima è mite.

