

Renato Lazzarin

ABSTRACT

Circa i due terzi dell'energia complessivamente utilizzata nel settore industriale a livello mondiale è destinata alla produzione termica con un 30% imputabile alla produzione di vapore vivo. Una parte rilevante di tale energia diventa calore di scarto di poca o nessuna utilità all'interno dello stabilimento. Le nuove pompe di calore ad alta temperatura (HTHP) permettono di valorizzare questi cascami termici con una produzione termica a 150 °C e produzione di vapore tecnologico. Le pompe di calore ad altissima temperatura (VHTHP) in fase avanzata di realizzazione hanno superato i 180 °C. In questo articolo si vedranno le principali novità e prospettive in questo settore

Introduzione

La diffusione delle pompe di calore nel settore residenziale è in continua crescita con numeri che hanno superato i 100 milioni



Pompe di calore industriali stato dell'arte e prospettive

di apparecchi installati. Nel mondo industriale, grande consumatore di energia termica, viceversa non si riscontra una significativa diffusione di pompe di calore. La prima motivazione che viene addotta è che i livelli di temperatura richiesti per il calore prodotto sono molto più elevati che non nel riscaldamento delle abitazioni. Questo è vero solo in parte. Se si considera la distribuzione dei livelli di temperatura nei comparti industriali più importanti (*Figura 1*), si vede che i livelli richiesti in alcuni comparti industriali superano spesso i 200 °C, segnatamente nei settori dei metalli, non metalli e della chimica. Tuttavia in altri comparti

dall'industria alimentare alla cartaria, quote rilevanti di domanda termica si trovano sotto i 200 °C, quando non sotto i 150 o i 100 °C. Se per le tradizionali pompe di calore di impiego corrente si tratta di temperature ben al di sopra delle loro possibilità tecniche, questo non vale per apparecchi pensati proprio per il mondo industriale che, già in prodotti commerciali, superano facilmente i 100 °C, arrivando talvolta sopra i 150 °C.

Molto interessante è anche la curva cumulativa della domanda di energia termica da parte dell'industria USA (*Figura 2*). Al di sotto dei 200 °C si colloca circa la metà



La diffusione delle pompe di calore nel settore residenziale è in continua crescita con numeri che hanno superato i 100 milioni di apparecchi installati

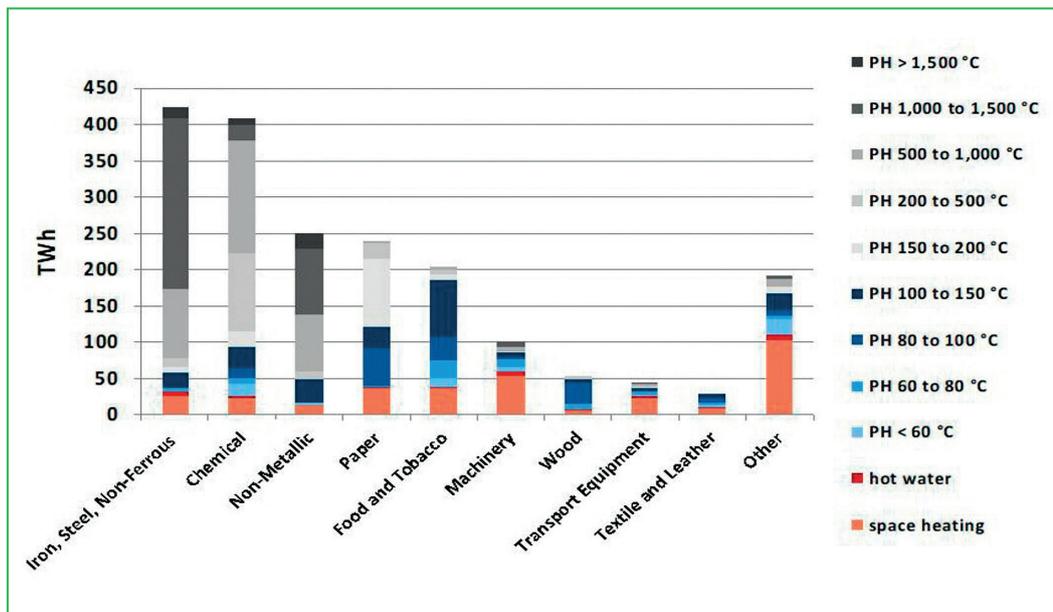


Figura 1 - Livelli termici e quantità coinvolte per la domanda di energia termica in diversi comparti industriali.

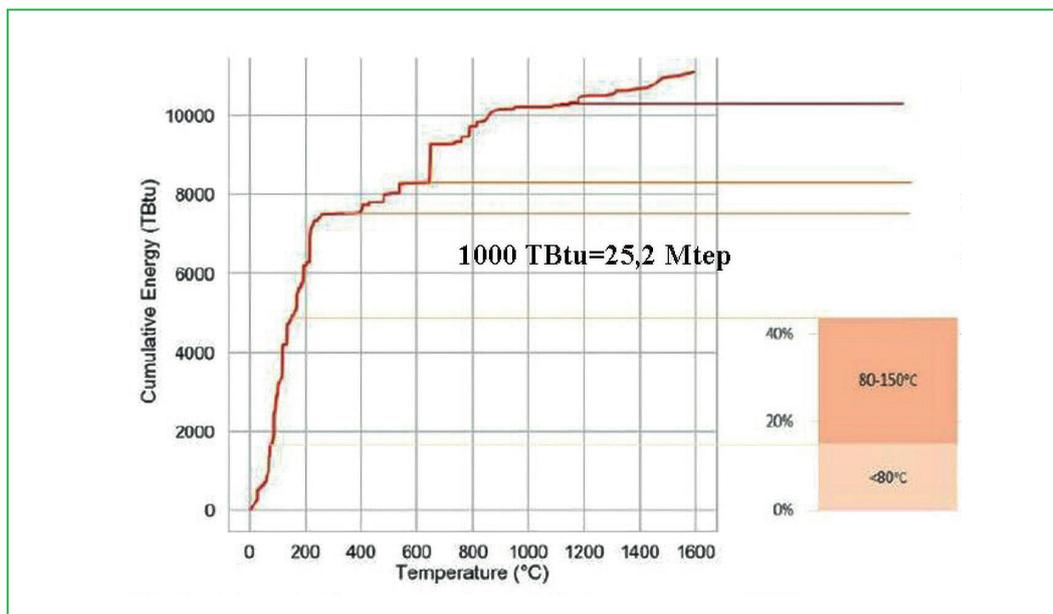


Figura 2 - Curva cumulativa della domanda di energia termica dall'industria USA in funzione della temperatura.

della domanda complessiva con il 40% della domanda al di sotto dei 150 °C. Un altro motivo della scarsa diffusione è nella ridotta conoscenza delle tecniche disponibili e del loro adattamento a processi industriali da parte non solo degli utilizzatori, ma anche di consulenti, progettisti e installatori.

Un terzo motivo era legato alla non standardizzabilità di queste macchine che andavano generalmente progettate e realizzate su misura per ciascuna applicazione. Oggi molti costruttori mettono a disposizione macchine anche di grande potenza da inserire rapidamente nelle linee produttive.

Va considerato anche il costo relativamente elevato di realizzazione e di installazione che si scontra con tempi di investimento per l'industria che richiedono di solito periodi molto brevi (qualche anno, quando non qualche mese). Questo aspetto deve essere collegato con l'incertezza nei costi futuri dell'energia, molto altalenante nel passato soprattutto riguardo ai prodotti petroliferi, ma oggi apparentemente in costante ascesa.

Per quanto riguarda la valutazione del COP della pompa di calore delle indicazioni sono date dal rapporto di Carnot, tenendo conto che nelle moderne macchine si riesce ad arrivare a circa il 60% del COP di Carnot:

$$COP = 0.6 \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Fissando una temperatura utile T_1 di 100 °C, il divario con la sorgente fredda a temperatura T_2 per un COP di almeno 3, che garantirebbe un discreto risparmio energetico, non dovrebbe superare i 75 °C. Per una temperatura utile di 150 °C si consideri la *Tabella 1* che in corrispondenza ai

ΔT	COP
60	4,2
70	3,6
80	3,2
90	2,8
100	2,5
110	2,3
120	2,1

Tabella 1 - Stima del COP ottenibile da una pompa di calore industriale che operi a 150 °C in funzione della differenza fra tale temperatura e quella della sorgente fredda.

divari di temperatura fra temperatura utile e sorgente fredda fornisce il COP ottenibile secondo la precedente relazione. Anche considerando una produzione termoelettrica con un rendimento di produzione e distribuzione del 40%, la parità in termini di energia primaria richiede un COP di almeno 2,5.

Secondo la tabella il massimo divario non potrebbe superare i 100 °C, richiedendo una sorgente fredda ad almeno 50 °C. Per avere una concreta superiorità in termini di energia primaria il divario dovrebbe stare entro 70-80 °C con una sorgente "fredda" alle stesse temperature del divario consentito (70-80 °C).

Vengono perciò escluse le sorgenti fredde tradizionali delle pompe di calore (aria esterna, terreno, acque superficiali o sotterranee) e la sorgente fredda più adatta è il recupero termico, legato al calore di scarto, spesso abbondantemente presente nelle attività industriali.

Queste considerazioni perdono evidentemente validità nel caso di energia elettrica prodotta per altra via, da idroelettrica a fotovoltaica a nucleare.

Alcune valutazioni indicano che circa il 20% dell'energia complessivamente utilizzata nel mondo è destinata al settore industriale. Una buona parte di questa (66%) è destinata alla produzione di calore che per una frazione importante diventa calore di scarto. Si deve tener conto che il 30% del consumo energetico nell'industria manifatturiera è imputabile alla produzione di vapore tecnologico, produzione realizzabile con pompe di calore industriali.

Generalità

Nelle pompe di calore industriali il legame fra la temperatura della sorgente fredda e quella dell'energia termica messa a disposizione è illustrato nella *figura 3* che riporta in ascissa le temperature della sorgente fredda e in ordinata le temperature utili prodotte.



Oggi molti costruttori mettono a disposizione macchine anche di grande potenza da inserire rapidamente nelle linee produttive.

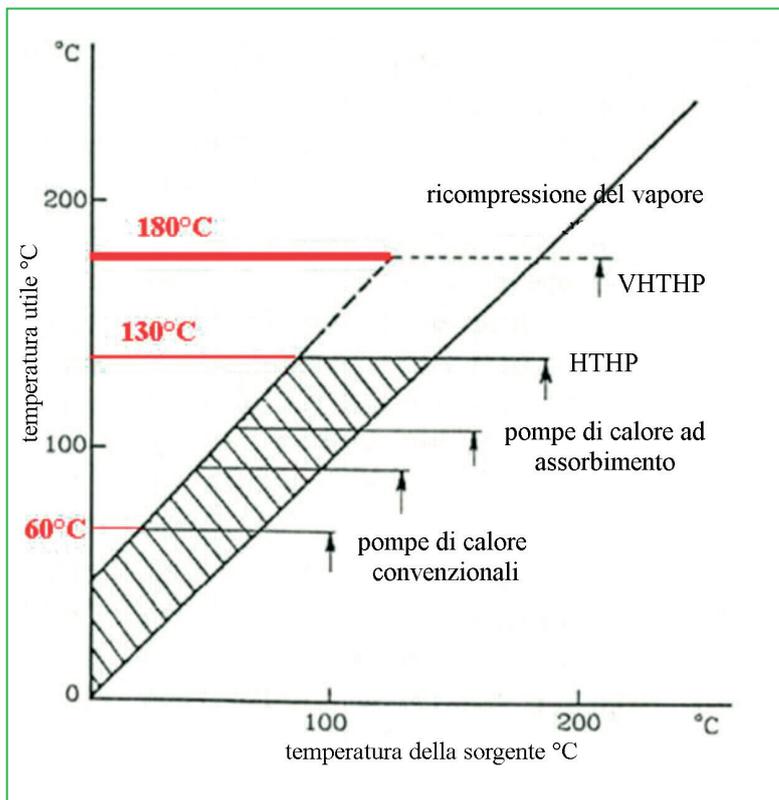


Figura 3 - Collegamento fra varie tipologie di pompe di calore fra la temperatura della sorgente e la temperatura utile.

Al primo livello sono poste le pompe di calore convenzionali con un valore tipico limite di 60 °C. Se dalla linea da cui parte l'indicazione in rosso della temperatura si scende in verticale si trova il valore caratteristico per la temperatura della sorgente fredda, nel caso attorno a 10 °C.

Il livello superiore segnato di 130 °C è quello delle attuali pompe di calore per impiego industriale, indicate come HTHP (High Temperature Heat Pumps): scendendo in verticale dal punto di incrocio fino all'ascissa si trova un valore attorno agli 80 °C.

La linea successiva di una temperatura utile di 180 °C richiede una sorgente fredda a temperature superiori ai 100 °C ed è relativa alle pompe di calore prossime venturo, indicate come VHTHP (Very High Temperature Heat Pumps).

La figura 4 riassume le tecniche prevalenti nel campo delle pompe di calore per impiego industriale. La prima ramificazione identifica due famiglie:

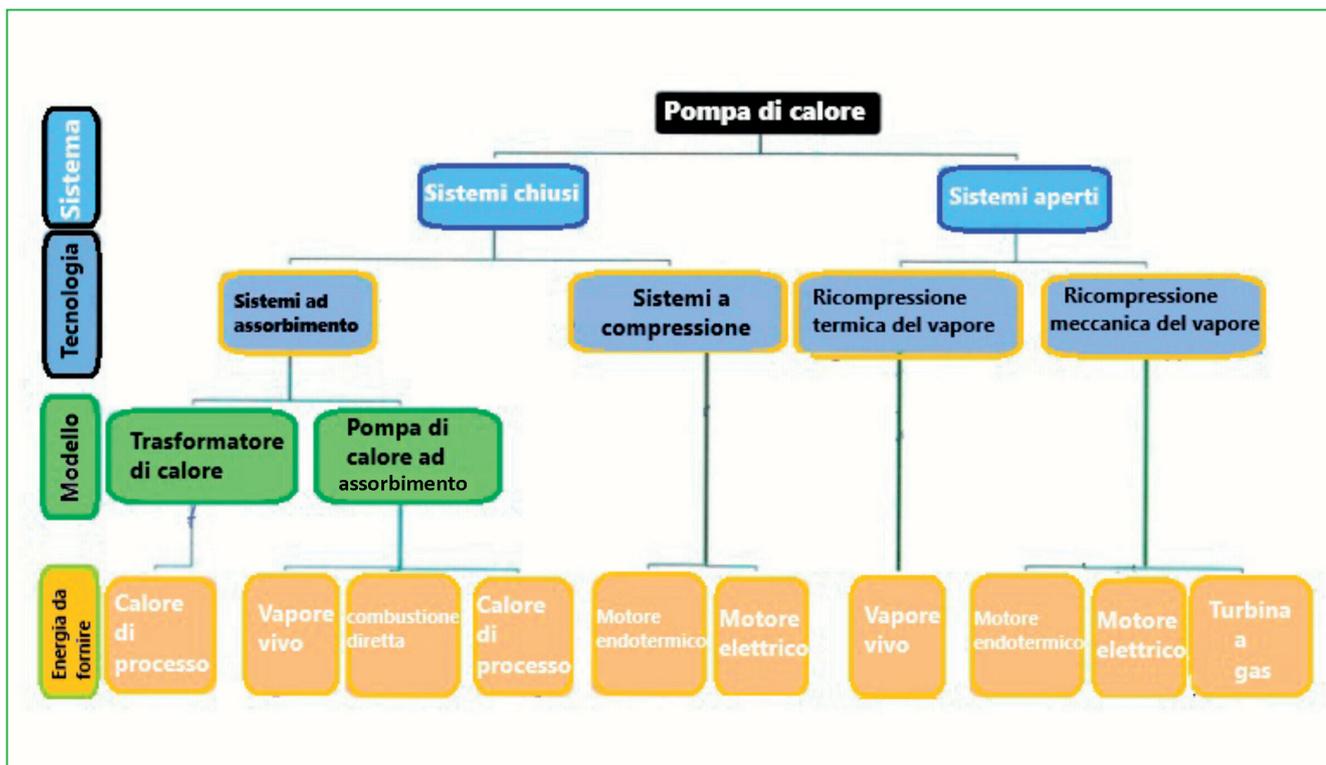


Figura 4 - Ramificazione delle diverse tecnologie per pompe di calore industriali.

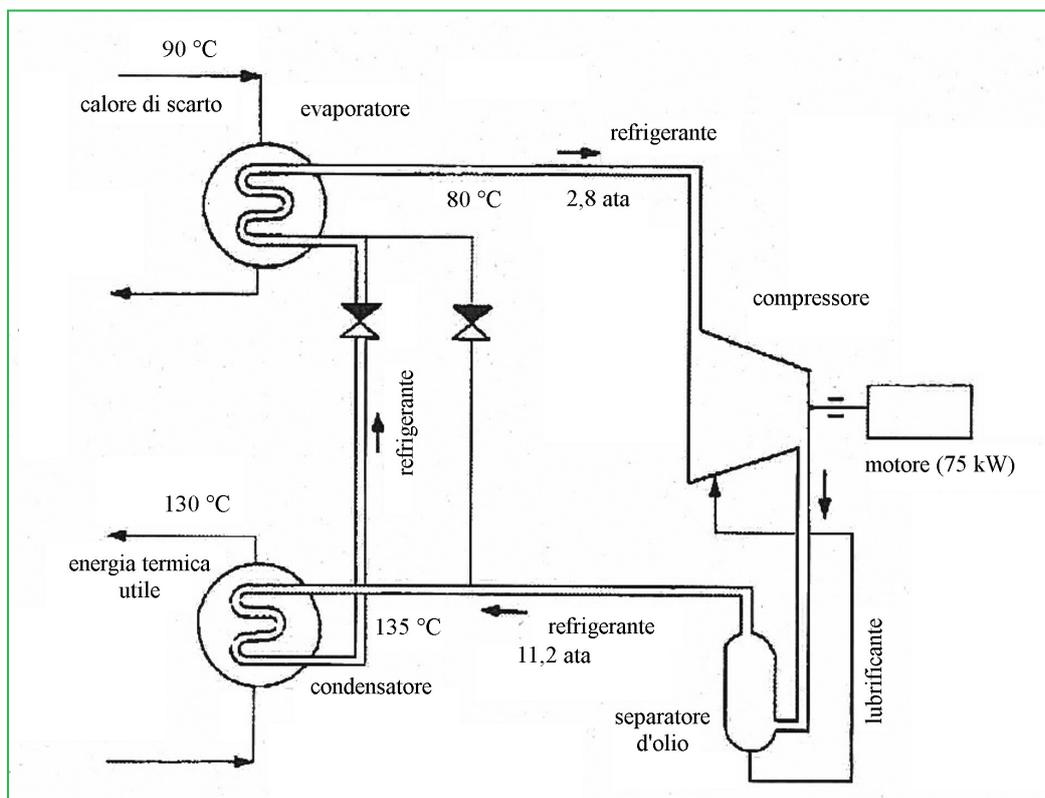


Figura 5 - Pompa di calore a compressione a temperatura elevata operante su calore di scarto a 90°C.

- pompe di calore a ciclo chiuso;
- pompe di calore a ciclo aperto.

Le pompe di calore a ciclo aperto trovano impiego tipicamente industriale.

Provvedono a ricomprimere meccanicamente il vapore ovvero possono farlo con un processo termico.

Le pompe di calore a ciclo chiuso si dividono a loro volta in due grandi famiglie:

- pompe di calore a compressione;
- pompe di calore ad assorbimento.

Entrambe le tipologie presentano molte somiglianze con le pompe di calore a compressione meccanica o ad assorbimento.

Un'importante eccezione è data dal fatto che fra le pompe di calore ad assorbimento vi è un gruppo indicato come *trasformatori di calore*.

Si tratta di apparecchi che utilizzano scarichi termici a temperature non utili all'a-

zienda, valorizzando una parte di tale energia ad un livello termico utile. Per fissare le idee, da uno scarico termico ad 80 °C si potrebbe produrre vapore a 130 °C valorizzando circa il 50% dell'energia tratta dal calore di scarto.

L'ultimo ramo della figura riporta il motore delle varie tecnologie che può essere un motore elettrico ma anche un motore a c.i. come anche energia termica sotto forma di vapore o di flussi termici caldi.

Le pompe di calore industriali a compressione di vapore

Lo schema di funzionamento è molto simile a quello di una pompa di calore convenzionale (Figura 5). L'evaporatore riceve energia da un cascame termico industriale (nel caso a partire da 90 °C) non utile all'interno dello stabilimento. Il vapore viene portato ad una pressione più elevata da un compressore meccanico.



Le pompe di calore a ciclo aperto trovano impiego tipicamente industriale.



Per queste macchine i problemi più gravi sono relativi all'identificazione di adatti refrigeranti che non provochino problemi alle alte temperature in termini di stabilità con la garanzia di adeguata lubrificazione del compressore.

A tale pressione si può avere una condensazione ad una temperatura utile a produrre, ad esempio, vapore vivo (130 °C).

Per queste macchine i problemi più gravi sono relativi all'identificazione di adatti refrigeranti che non provochino problemi alle alte temperature in termini di stabilità con la garanzia di adeguata lubrificazione del compressore.

Si devono tenere presente a questo proposito i crescenti vincoli sulle sostanze refrigeranti che si sono susseguiti a partire dal Protocollo di Montreal (1987) in avanti e riguardanti non solo l'ODP (*Ozone Depletion Potential*), ma sempre di più il GWP (*Global Warming Potential*) che hanno reso la vita particolarmente difficile ai costruttori di pompe di calore industriali.

In termini brutalmente riassuntivi si può affermare che nessun refrigerante soddisfa integralmente sia ai requisiti di tipo ambientale che a quelli relativi alla sicurezza (infiammabilità, tossicità) che a quelli termodinamici, fin qui poco evidenziati e che riguardano:

- pressioni di condensazione che non siano troppo elevate;

- pressioni di evaporazione che non siano troppo basse e possibilmente superiori alla pressione atmosferica;
- temperatura critica elevata in modo da consentire il processo di condensazione;
- possedere un'elevata capacità termica volumetrica (VHC - Volumetric Heating Capacity- $J m^{-3}$) in modo da limitare la volumetria che il compressore deve trattare per una certa potenza termica;
- consentire valori elevati del COP nel campo di temperatura considerato.

Per forti dislivelli di temperatura si passa ai due stadi di compressione. Operando con due compressori si possono impiegare due refrigeranti diversi, adatti ai campi di temperatura considerati. Un esempio con doppio scambiatore e due stadi in cascata è rappresentato in *figura 6* sia nello schema a blocchi che nelle trasformazioni sul piano pressione entalpia. Sono previsti due refrigeranti diversi, uno per lo stadio a bassa temperatura (LT) e l'altro per quello ad elevata temperatura (HT). L'elemento centrale è il condensatore LT che è al tempo stesso l'evaporatore HT. In questo

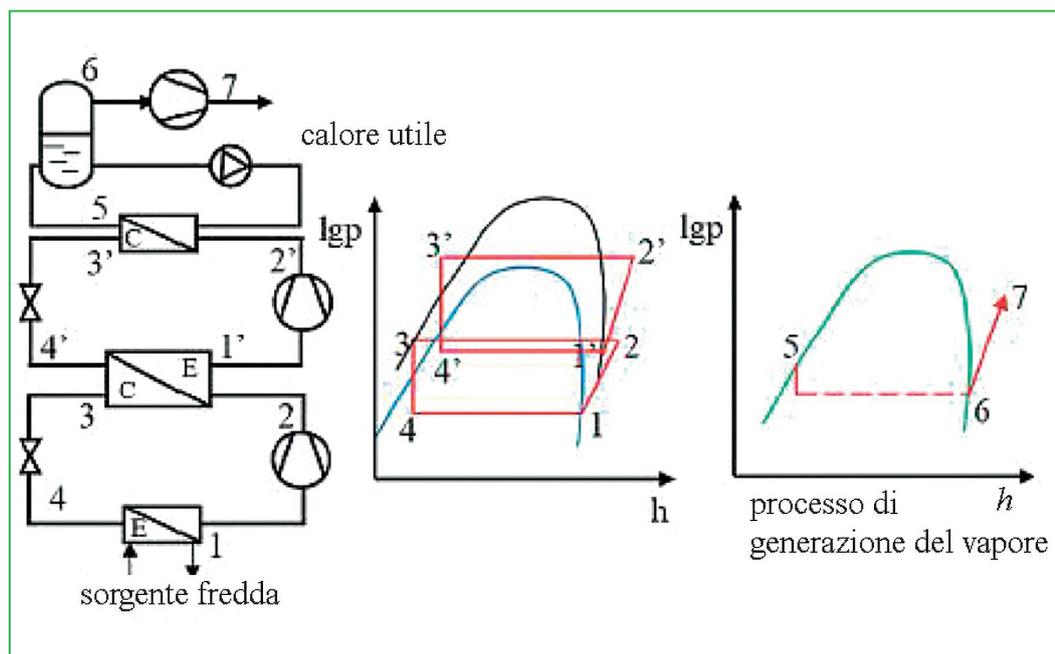


Figura 6 - Schema di un ciclo a due stadi in cascata con refrigeranti diversi

il refrigerante LT passa da 2 a 3, mentre il refrigerante HT passa da 11 a 12. Il ciclo LT si confronta con la sorgente fredda che fa evaporare il refrigerante da 5 a 6. Il ciclo HT ottiene l'effetto utile dalla condensazione da 8 a 9 (attenzione che i diagrammi di figura sono su scale diverse). I due scambiatori provvedono come già visto al sottoraffreddamento del refrigerante condensato e al surriscaldamento del vapore prima del compressore.

Le pompe di calore industriali ad assorbimento

La pompa di calore ad assorbimento per uso industriale presenta lo stesso schema delle pompe di calore ad assorbimento convenzionali. Cambiano le temperature e le concentrazioni nelle miscele impiegate che sono sempre le due coppie acqua-bromuro di litio ed ammoniaca-acqua.

Un esempio di macchina è rappresentato in figura 7. La struttura è basata su due recipienti cilindrici.

Quello in basso si trova alla pressione più bassa e contiene evaporatore ed assorbitore; quello superiore è alla pressione più elevata e contiene generatore e condensatore. La miscela impiegata in questo caso è $H_2O-LiBr$.

La bassa pressione che nelle macchine frigorifere ad assorbimento di questo tipo è dell'ordine di un migliaio di Pa qui supera i 5-6000 Pa. L'alta pressione è attorno a 70-80 kPa, in ogni caso sub atmosferica. Il punto di partenza per analizzare la macchina è l'evaporatore da cui il refrigerante, nel caso acqua viene fatto evaporare dal calore fornito dalla sorgente fredda. Il vapore viene assorbito alla temperatura intermedia con sviluppo di calore utile. La soluzione risulta diluita dall'assorbimento di vapore d'acqua e deve essere riconcentrata. Una pompa la invia al generatore dove il riscaldamento separa vapore d'acqua dalla soluzione che così viene riconcentrata ed inviata nuovamente all'assor-

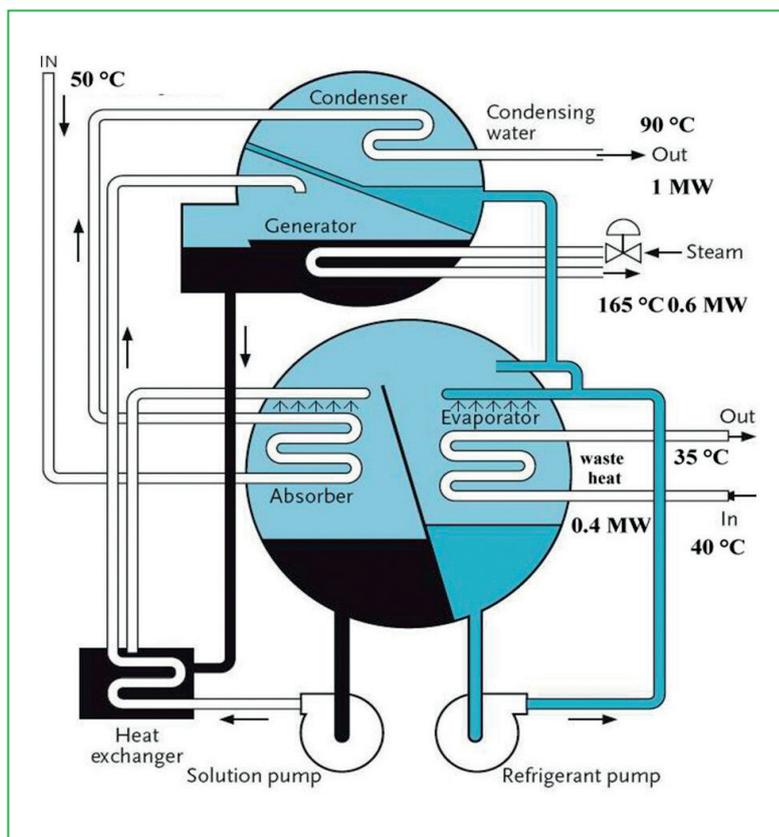


Figura 7 - Schema di una pompa di calore ad assorbimento industriale

bitore. Il vapore si dirige al condensatore dove passa in fase liquida alla temperatura intermedia con effetto utile ed il refrigerante può chiudere il ciclo sull'evaporatore da dove si era partiti.

La sorgente fredda nel caso considerato è calore di scarto a 40 °C che fa evaporare l'acqua che migra verso l'assorbitore dove avviene l'assorbimento con un primo sviluppo termico che permette un riscaldamento di una portata d'acqua inizialmente a 50 °C che si porta a circa 75 °C. La soluzione diluita nell'assorbitore va inviata tramite una pompa al generatore che restituisce la soluzione concentrata calda con un utile scambio termico fra i due flussi in uno scambiatore di calore delle soluzioni. Il generatore riceve un riscaldamento dall'esterno, nel caso tramite vapore tecnologico a 165 °C.

Si sviluppa vapore d'acqua che migra verso il condensatore dove si ha un secondo



La pompa di calore ad assorbimento per uso industriale presenta lo stesso schema delle pompe di calore ad assorbimento convenzionali

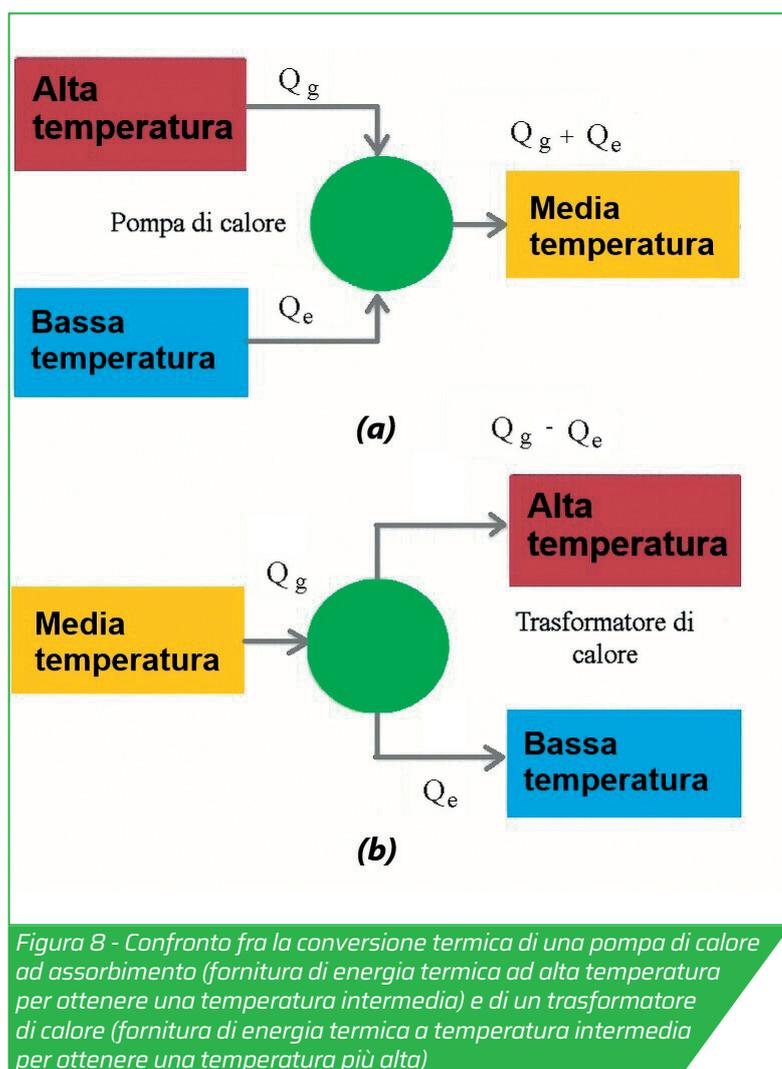


Figura 8 - Confronto fra la conversione termica di una pompa di calore ad assorbimento (fornitura di energia termica ad alta temperatura per ottenere una temperatura intermedia) e di un trasformatore di calore (fornitura di energia termica a temperatura intermedia per ottenere una temperatura più alta)



Il trasformatore di calore compie una funzione del tutto diversa, sfruttando energia termica a livello di temperatura non utile per valorizzarne una parte a livello termico utilizzabile

effetto utile con un riscaldamento dell'acqua fino a 90 °C. Lo schema considerato si riferisce ad una macchina reale realizzata dalla Mitsubishi-York con una potenza di 1 MW con la fornitura di 0,6 MW tramite vapore tecnologico. Quindi il COP è circa 1,7 e va considerato molto elevato per un'alimentazione termica.

I trasformatori di calore

Con il suggestivo termine trasformatore di calore si intende una pompa di calore ad assorbimento con un funzionamento del tutto diverso dagli schemi visti fin qui. La classica pompa di calore ad assorbimento permette la valorizzazione di energia termica a bassa temperatura con una forn-

tura di energia termica a temperatura più elevata (e quindi con un valore energetico maggiore), mettendo a disposizione energia termica a temperatura intermedia. Si potrebbe dire che, se questa operazione è resa possibile dalla fornitura di energia meccanica nella pompa di calore a compressione, la stessa operazione si ottiene con la fornitura di calore ad elevato livello di temperatura nella pompa di calore ad assorbimento.

Il trasformatore di calore compie una funzione del tutto diversa, sfruttando energia termica a livello di temperatura non utile per valorizzarne una parte a livello termico utilizzabile. La parte rimanente va dissipata. Questo aspetto è ben illustrato in figura 8 che mostra nella parte alta la fornitura di energia ad alta temperatura per poter valorizzare l'energia termica a bassa temperatura portando il tutto alla temperatura intermedia.

Nella parte bassa si vede come invece l'energia fornita alla macchina sia ad una temperatura intermedia e come una parte venga valorizzata ad elevata temperatura e l'altra vada dissipata.

Per avere un'idea delle potenzialità dei trasformatori di calore basti sapere che, disponendo di calore di scarto a 90 °C, se ne può valorizzare circa metà a 140 °C.

Le pompe di calore a ciclo aperto

Uno dei processi industriali più dispendiosi dal punto di vista energetico è la separazione di due liquidi (concentrazione), in particolare quando uno di essi sia l'acqua. Infatti molto spesso tale separazione avviene mediante vaporizzazione di uno dei liquidi. Nel caso si tratti di acqua, la vaporizzazione ha un costo dell'ordine di 2500 kJ/kg (0,7 kWh/kg).

Questo vapore non è di solito ad un livello di pressione e temperatura che lo possa rendere utile all'interno dello stabilimento e quindi nessun significativo recupero risulta possibile.

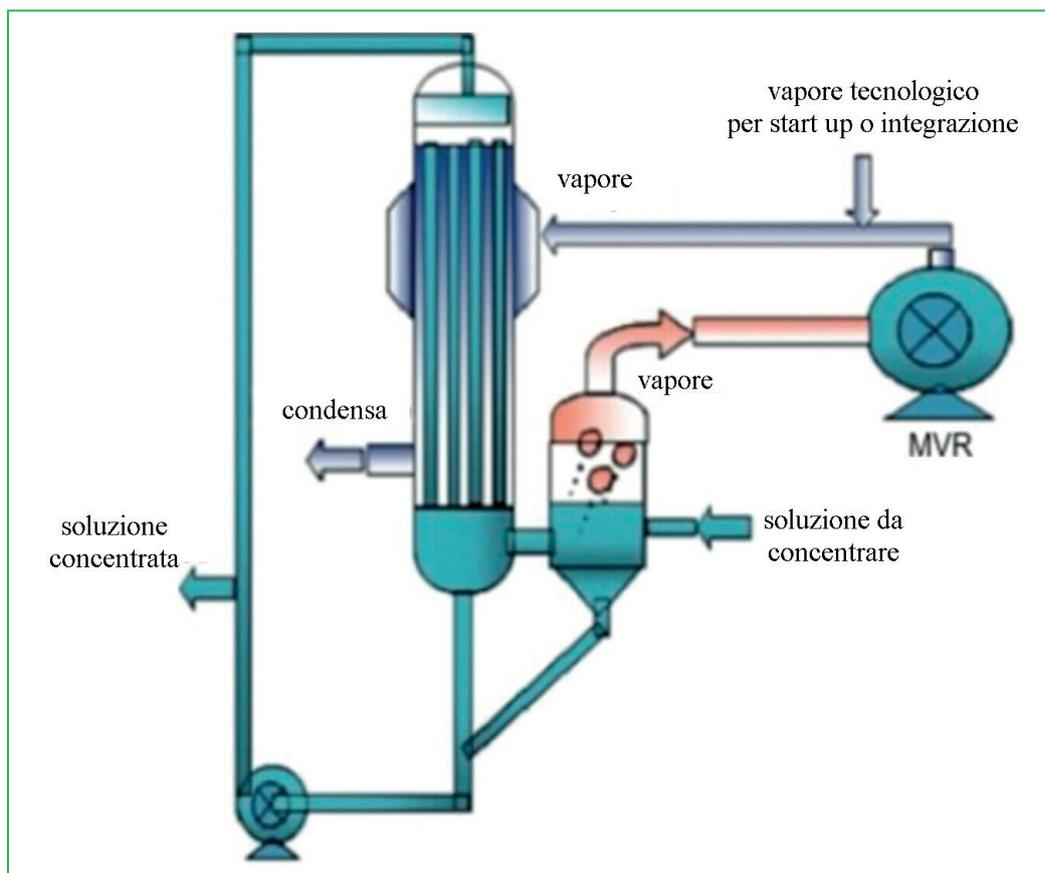


Figura 9 - Rappresentazione schematica di una pompa di calore a ciclo aperto a ricompressione meccanica del vapore

La figura 9 schematizza un sistema di concentrazione MVR. Il processo richiede del vapore vivo per essere innescato. La sua condensazione produce vapore dalla soluzione che viene aspirato e compresso ad una pressione sufficiente affinché la condensazione avvenga ad una temperatura idonea ad uno scambio termico con una superficie accettabile. Attualmente si considera che basti una differenza di temperatura dell'ordine di 10 K e talvolta si scende anche a valori vicini a 5 K. Per il modesto rapporto di compressione non si ricorre ai consueti compressori volumetrici, ma si utilizzano dei *blowers*, come convenzionalmente sono indicati compressori a basso livello di compressione, superiore a quello dei ventilatori, ma modesto rispetto ai compressori tradizionali. Con un rapporto di compressione di 1,4 che, per

vapore d'acqua aspirato a 100 °C, consentirebbe una condensazione a 110 °C, il sistema MVR, con rendimento isentropico della compressione di 0,65, richiede 25 kWh di energia meccanica per 1000 kg di acqua evaporata. A questa va aggiunta l'energia richiesta per la fase di *start up* che dipende evidentemente dalla gestione del processo, ma che si può considerare cautelativamente incrementando del 5% la quota energetica fornita dall'esterno. In ogni caso il COP risulterebbe superiore a 20.

Le applicazioni industriali dei sistemi MVR sono crescenti. Un costruttore dichiara la realizzazione di oltre 2500 impianti di questo tipo.

I processi appena descritti si possono realizzare anche con ricompressione termica, ma non vi è spazio in questo articolo per poterne parlare.



Le applicazioni industriali dei sistemi MVR sono crescenti. Un costruttore dichiara la realizzazione di oltre 2500 impianti di questo tipo

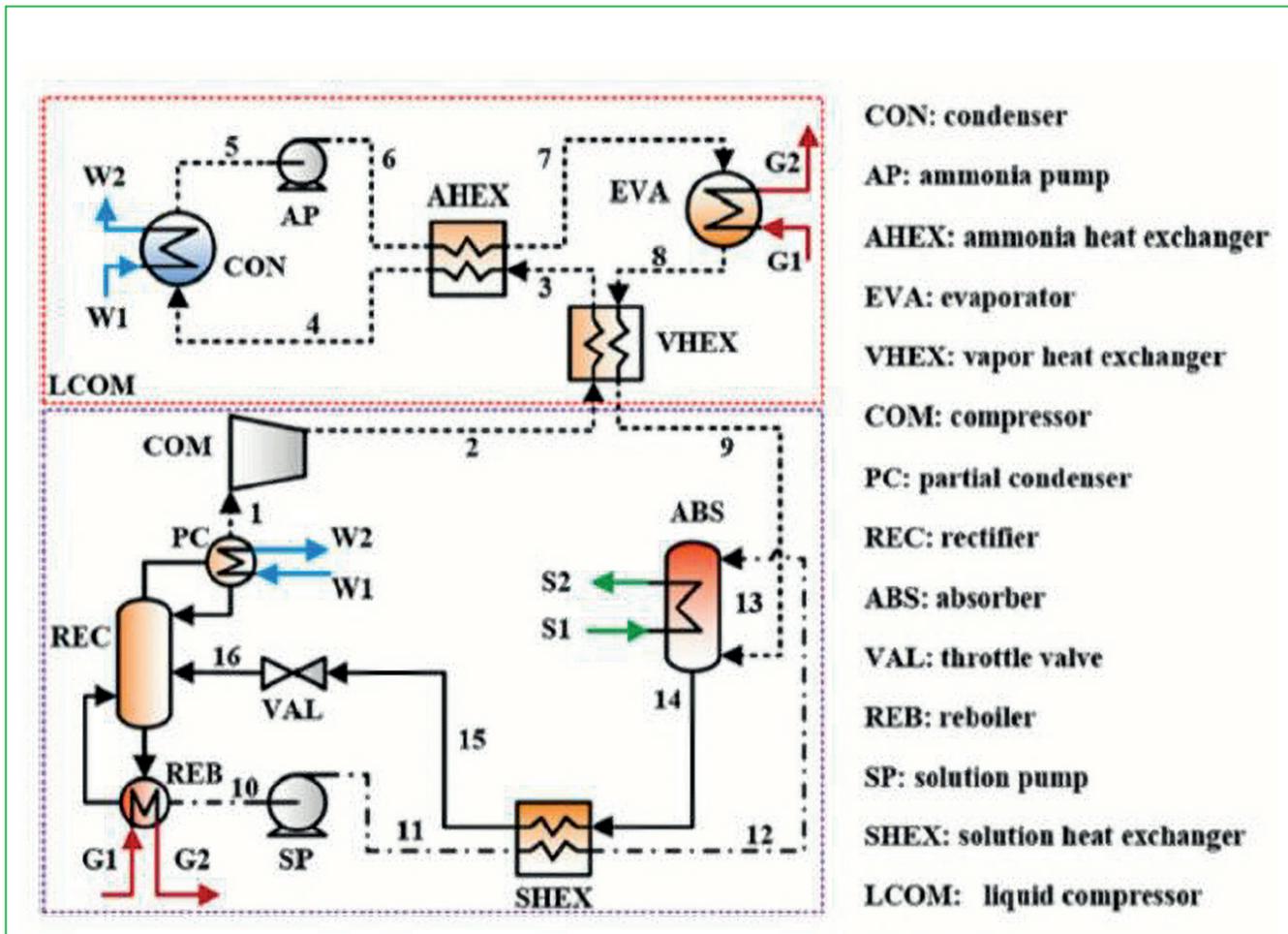


Figura 10 - Schema di una pompa di calore ibrida compressione-assorbimento.

“
All’aumentare della temperatura del calore prodotto le pompe di calore a compressione devono operare a pressioni crescenti, in modo particolare quelle che utilizzano ammoniaca

Le pompe di calore ibride assorbimento/compressione

All’aumentare della temperatura del calore prodotto le pompe di calore a compressione devono operare a pressioni crescenti, in modo particolare quelle che utilizzano ammoniaca. Una soluzione per limitare la pressione raggiungendo temperature anche elevate è il ricorso al ciclo ibrido assorbimento/compressione. Uno schema è rappresentato in figura 10.

Il punto di partenza può essere il cosiddetto *desorber* (DES), una sorta di parziale generatore che viene riscaldato dalla sorgente fredda, da cui la soluzione esce in condizioni di saturazione con parziale evaporazione di ammoniaca.

Nel separatore liquido-vapore (LVS) si separa il vapore di ammoniaca che viene aspirato dal compressore (COM). La soluzione ora impoverita in ammoniaca viene portata dalla pompa della soluzione (SP) ad una pressione più alta. Di lì dopo lo scambiatore di calore si miscela con il vapore proveniente dal compressore ed entra nell’assorbitore (ABS) dove si ha lo sviluppo termico utile. La soluzione, ora diluita, dopo lo scambio termico con la soluzione proveniente dal separatore di liquido, passa alla pressione più bassa nel *desorber* dove la soluzione verrà rigenerata. In questo ciclo il compressore deve portare il vapore ad una pressione più ridotta rispetto a quella che ci sarebbe stata a parità

di temperatura con il ciclo tradizionale. Il COP di queste macchine deve tenere conto del lavoro necessario a compressore e pompa e dell'efficienza η dei loro motori elettrici:

$$COP = \frac{Q_{ABS}}{W_{SP} + W_{COM}} \eta_{el}$$

dove Q_{ABS} rappresenta il calore utile e W_{SP} e W_{COM} sono rispettivamente i valori di lavoro di pompa e compressore, mentre η_{el} è il rendimento dei loro motori elettrici. Nei prototipi si sono ottenuti valori superiori a 3 e viene presentato da un costruttore un apparecchio in fase di commercializzazione (Figura 11).

Conclusioni

La diffusione delle pompe di calore nelle applicazioni industriali è ancora limitata, ma ci sono già svariate proposte relative

ve a macchine ormai in commercio e già preparate per l'installazione. La tecnologia più matura oggi appare quella relativa alle pompe di calore MVR in applicazioni come essiccazioni, concentrazioni e distillazioni, senza dimenticare la dissalazione. Nel prossimo futuro ci si può attendere che le pompe di calore ibride a compressione/assorbimento possano consentire temperature superiori a 200 °C con possibili applicazioni in svariati settori industriali.

Per approfondire

Questo articolo è tratto dall'ottavo capitolo dell'ultimo libro di Renato Lazzarin "Pompe di calore industriali. Nuove prospettive per la produzione di energia termica per l'industria" (Editoriale Delfino, 2024).

Per approfondire il tema si rimanda a questo volume, presentato in anteprima al SAIE di Bologna a ottobre, e ora disponibile in libreria e su tutti gli store online.



La diffusione delle pompe di calore nelle applicazioni industriali è ancora limitata, ma ci sono già svariate proposte relative a macchine ormai in commercio e già preparate per l'installazione

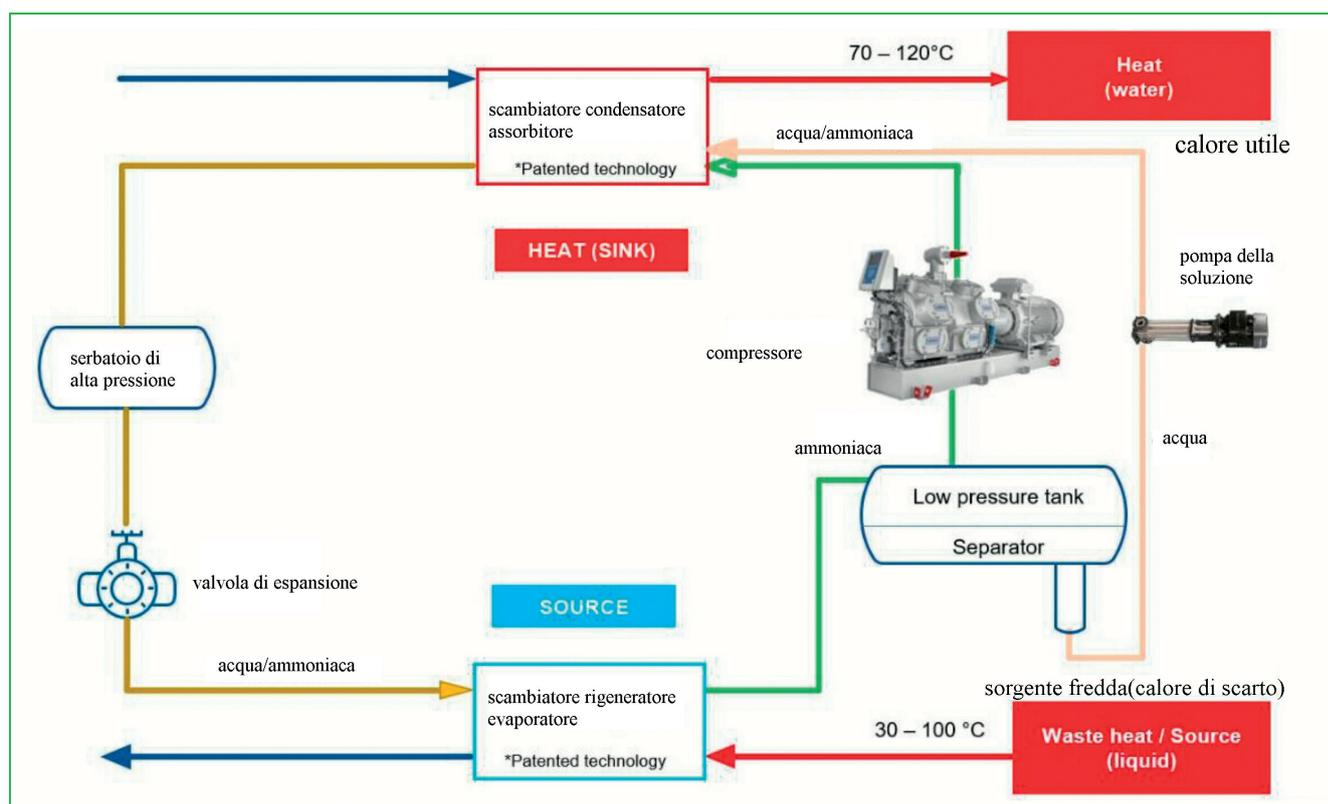


Figura 11 - Schema a blocchi di una pompa di calore ibrida compressione-assorbimento realizzata da Hybrid Energy AS



Questo articolo è tratto dall'ottavo capitolo dell'ultimo libro di Renato Lazzarin "Pompe di calore industriali"

L'autore

Renato Lazzarin, (Belluno 1949) si è laureato in Ingegneria Meccanica nel 1973 e in Scienze Statistiche ed Economiche nel 1979 presso l'Università degli Studi di Padova. È professore emerito nell'Università di Padova, dove insegna Gestione dell'energia nel Corso di Laurea in Ingegneria gestionale. Opera presso il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi industriali – DTG a Vicenza.

È stato Presidente per il triennio 2008-2010 dell'Associazione Italiana del Condizionamento dell'Aria Riscaldamento Refrigerazione – AICARR e Presidente della Commission E1 (Air Conditioning) dell'International Institute of Refrigeration (IIR) nel periodo 2007-2016 e della Section E (Air Conditioning, Heat Pumps and Ener-

gy Recovery) nel periodo 2017-2023. Ha svolto un'intensa attività pubblicistica che ha prodotto oltre a circa 350 lavori su riviste internazionali, nazionali o pubblicati su Atti di Convegni, anche 16 libri di carattere monografico su varie tematiche del risparmio energetico, delle energie rinnovabili e del condizionamento dell'aria.

Uno di questi è stato tradotto in 7 lingue, fra cui russo e cinese. Ha inoltre sviluppato svariate attività di consulenza tecnico-scientifica con molte aziende del settore termotecnico con cui ha realizzato impianti o apparecchiature innovativi nel campo della climatizzazione ambientale (dai primi impianti con pompa di calore geotermica nel 1985, a impianti con pompa di calore ad assorbimento o impianti solari per il condizionamento estivo).