

Pompe di calore a CO₂

ANCHE A SEGUITO DEL RECENTE ACCORDO DI KIGALI SULLA MESSA AL BANDO DEGLI IDROFLUOROCARBURI, PER I REFRIGERANTI COSIDDETTI NATURALI SI APRONO INTERESSANTI POSSIBILITÀ DI UTILIZZO E SVILUPPO. NELL'ARTICOLO SI VALUTA IL COMPORTAMENTO DELLE POMPE DI CALORE CON REFRIGERANTE CO₂ PER LA PRODUZIONE DELL'ACQUA CALDA.



"DÜRR THERMEA"

Ormai da diverso tempo (anni '80) sono in corso studi ed esperienze per un più ampio utilizzo dell'anidride carbonica (CO₂ o R-744 nella classificazione Ashrae) come refrigerante in sostituzione degli HFC. L'anidride carbonica rappresenta un fluido naturale privo di effetti sull'ozono stratosferico e con contributo all'effetto serra (GWP) di 1, contro il valore di 1900 (kg CO₂ /kg di refrigerante) dell'R-410A e un valore di 1300 per l'R-134a. Questo significa, in parole povere, che l'impatto sul riscaldamento globale della CO₂ è inferiore di 1900 volte rispetto all'R-410A e di 1300 volte rispetto all'R-134a. In aggiunta a ciò, è un refrigerante di classe 1A, cioè non tossico e non infiammabile;

a ulteriore suo vantaggio presenta una capacità frigorifera volumetrica molto elevata, da 5 a 8 volte superiore, ad esempio, a quella dell'R-22 e dell'R-717 (ammoniaca), il che significa che, a parità di potenza frigorifera resa, necessita di una cilindrata del compressore sensibilmente minore rispetto a quanto richiesto da altri refrigeranti e una sezione dei tubi del circuito frigorifero pure minore. Per contro, l'anidride carbonica è caratterizzata da elevate pressioni di funzionamento nel condensatore e nell'evaporatore, con valori medi che oscillano tra 35 e 75 bar, inoltre è inodore ed ha un peso specifico maggiore di quello dell'aria, caratteristiche che possono comportare problemi di

sicurezza per le persone nel caso di fughe di grandi quantitativi all'interno degli ambienti. Un altro aspetto peculiare della CO₂ è che dopo la compressione, se il vapore si trova a una temperatura superiore a quella del punto critico, che è di circa 31 °C, non si produce il cambiamento di stato (ossia non condensa e non passa allo stato liquido). A titolo di riferimento, nella figura 1 è riportato il diagramma pressione-entalpia della CO₂, sul quale sono delineati i due cicli di lavoro caratteristici di questo fluido: subcritico e transcritico. Invece, nella figura 2 è riportato un ciclo transcritico sul diagramma temperature-entalpie. Esso consente di rilevare le condizioni principali per risalire al COP del ciclo.

Le opportunità (e i limiti) della CO₂

Le caratteristiche di cui sopra hanno finora condizionato l'uso della CO₂ ad applicazioni, subcritiche con sistemi di refrigerazione in cascata, e, solo più di recente, ad applicazioni transcritiche che si sono dimostrate interessanti per il funzionamento con pompa di calore ad alta temperatura, per il riscaldamento ambientale e la produzione acqua calda sanitaria, queste ultime con apprezzabili valori di efficienza energetica.

A differenza del ciclo subcritico, nel ciclo transcritico il trasferimento dell'energia verso il dissipatore non avviene a temperatura costante ma attraverso un raffreddamento progressivo del fluido a pressione pressoché costante (figura 3). Non si ha invece il passaggio dalla fase vapore a quella liquida, mancando la condensazione della CO₂, ma solo il raffreddamento, cosicché al posto del condensatore trova impiego un cosiddetto raffreddatore di gas, denominato per l'appunto gas cooler.

Le principali caratteristiche del ciclo transcritico sono riassumibili in:

- Alta efficienza nel riscaldamento dell'acqua data dalla mancanza della fase di condensazione: i profili di temperatura dei due fluidi nello scambiatore sono molto vicini, e quindi lo scambio termico risulta molto efficiente. In questo modo è possibile avere agevolmente temperature in uscita dell'acqua decisamente più alte rispetto ai refrigeranti tradizionali, anche in presenza di temperature ambientali basse.

- Efficienza del ciclo (COP), che viene influenzata soprattutto dalla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler.

All'aumentare della temperatura si riduce il calore ceduto dall'anidride carbonica, ma il lavoro di compressione rimane invariato, e pertanto in COP, per sua definizione diminuisce. Ne consegue che le pompe di calore a CO₂ si adattano bene alla produzione di acqua calda sanitaria, ma

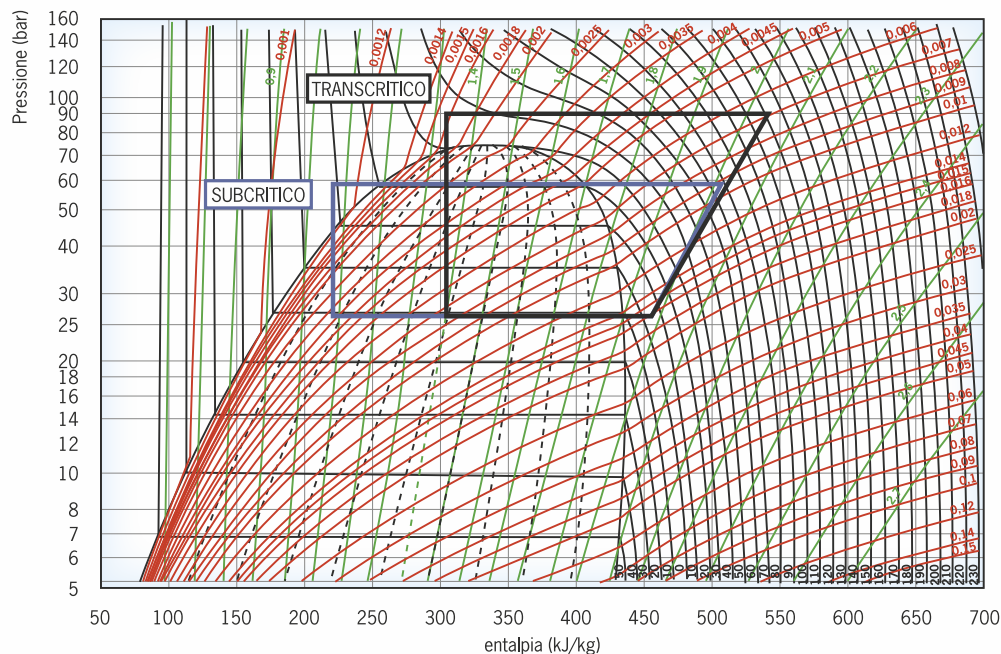


Fig. 1 - Il grafico pressioni - entalpia dell'R744 con delineati i due differenti cicli rappresentativi: subcritico (blu) e transcritico (nero). Si notino le elevate pressioni di esercizio di entrambi i cicli (Emerson Climate Technologies).

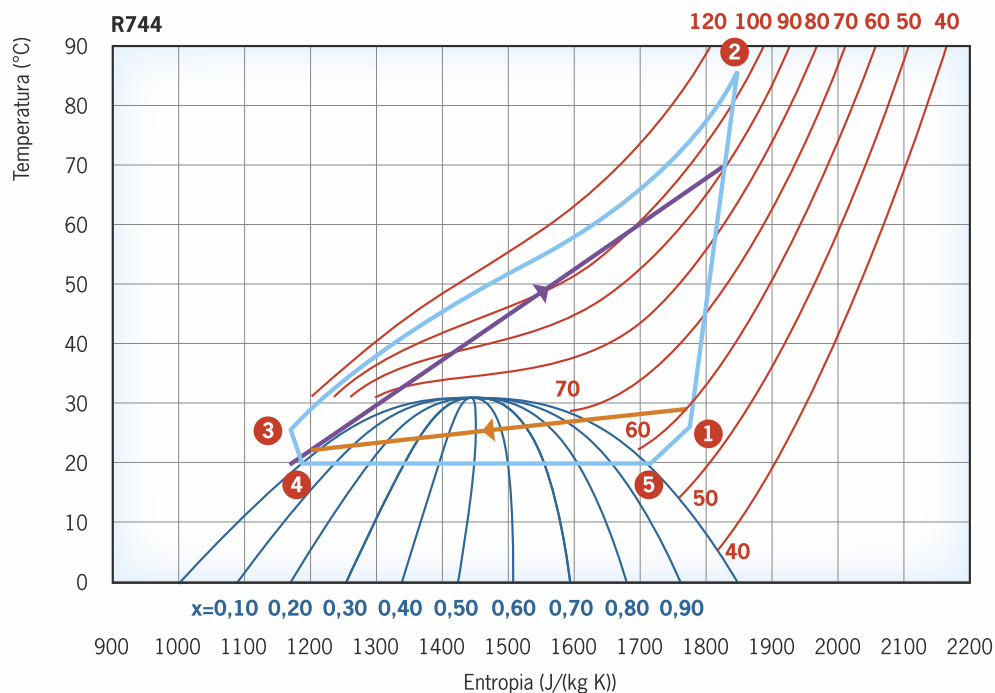


Fig. 2 - Rappresentazione del ciclo transcritico della CO₂ sul diagramma T-S che mette in evidenza le temperature di lavoro del gas cooler e le alte temperature raggiunte dall'acqua in uscita (Frigotherm Ferrari).

non al riscaldamento degli ambienti (il ridotto salto termico tra mandata e ritorno ridurrebbe molto il COP). Il COP del ciclo è invece scarsamente influenzato dalla temperatura di evaporazione, diminuendo di poco an-

che con temperature esterne assai basse.

Si è visto dunque che nelle applicazioni transcritiche viene a mancare il classico condensatore dei normali impianti a espansione diretta: al suo

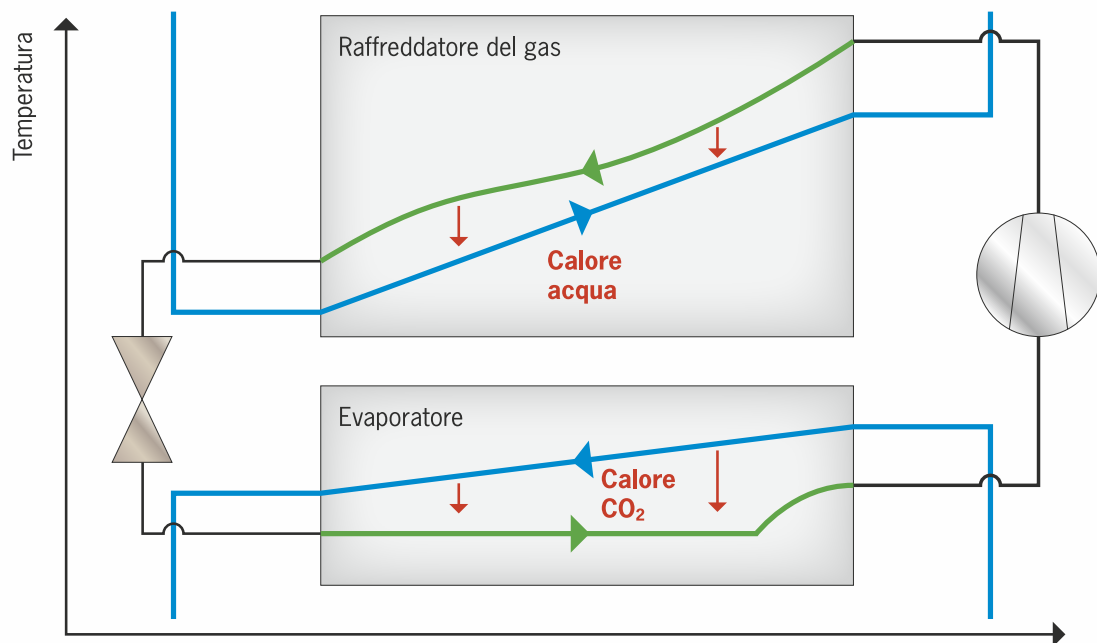


Fig. 3 - Schema del ciclo della CO₂, in cui si evidenzia l'andamento delle temperature negli scambiatori. Nel gas cooler la temperatura della CO₂ non si mantiene costante come in un qualsiasi condensatore, ma diminuisce lungo il percorso: questo porta ad un aumento dell'efficienza dello scambio termico (Frigotherm).



Fig. 4 - Pompa di calore compatta a CO₂ progettata per produrre acqua calda in applicazioni commerciali e industriali. L'acqua viene riscaldata in un solo passaggio dalla temperatura di rete fino anche a 90 °C, rendendo possibile lo stoccaggio in serbatoi d'acqua progettati per la stratificazione. Un controllore consente un funzionamento continuo per ogni condizione climatica (Enex).

posto subentra invece un raffreddatore di gas, o gas cooler, nel quale il vapore di CO₂, ad alta temperatura e pressione, cede il proprio calore al fluido da riscaldare (acqua), raffreddandosi senza però condensare. Per questa ragione la resa complessiva dell'impianto è molto influenzata dal progetto dello scambiatore di calore di alta pressione.

Per certi aspetti, anzi, il comportamento della CO₂ si rivela opposto a quello dei cicli tradizionali con HFC: infatti il COP tende a diminuire quanto più la temperatura dell'acqua in ingresso da riscaldare si avvicina al valore del punto critico (31 °C). Inoltre, le maggiori pressioni di lavoro dei cicli a CO₂ rispetto a quelli a espansione diretta con refrigeranti HFC producono due fenomeni positivi: una minore influenza delle perdite di carico sulle prestazioni del circuito e un aumento del coefficiente di scambio termico all'interno dell'evaporatore e del gas cooler. Questo consente di lavorare con dei differenziali di temperatura molto bassi all'interno degli scambiatori di calore, inferiori a quelli degli scambiatori tradizionali dei sistemi

con HFC valori che possono essere contenuti in 2 °K, ottenendo di conseguenza un aumento dell'efficienza energetica del ciclo.

In condizioni normali di funzionamento il ciclo sarà tarato al valore ottimale di pressione al gas cooler, mentre in condizioni estreme si opererà un aumento di pressione incrementando la resa termica ed evitando l'utilizzo di resistenze elettriche supplementari che penalizzano notevolmente l'impianto.

Nei climi freddi la sua convenienza energetica è stimata intorno al 5% rispetto ai normali sistemi con HFC, ma nei climi più caldi, come quelli dell'Europa del sud, si subisce invece un aumento del consumo di energia dello stesso valore.

Le pompe di calore a CO₂

Presente ormai da diversi anni in Giappone, la tecnologia denominata "Eco Cute" (dove "eco" sta per ecologica e il termine inglese "cute" è simile nella pronuncia al termine giapponese che sta per produzione di acqua calda) sviluppa l'utilizzo di pompe di calore per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria basata sull'uso dell'anidride carbonica. Tale tecnologia ha permesso di raggiungere valori di COP di rilievo, che rendono queste macchine competitive con le tradizionali caldaie in termini di utilizzo dell'energia primaria.

Lo sviluppo della pompa di calore a CO₂ ha dovuto affrontare soprattutto due tipi di problemi: lo sviluppo di una idonea tipologia di scambiatore di calore capace di lavorare con le alte pressioni in gioco (e a questo riguardo i sistemi a piastre saldobrasate non sono stati giudicati sufficientemente

Fig. 6 - Installazione in esterno di un modello di pompa di calore a CO₂ aria-acqua. L'unità è composta da una sezione motoevaporante con gas cooler incorporato e da una sezione di accumulo dell'acqua per impieghi termosanitari collegate idraulicamente tra loro (Sanden).

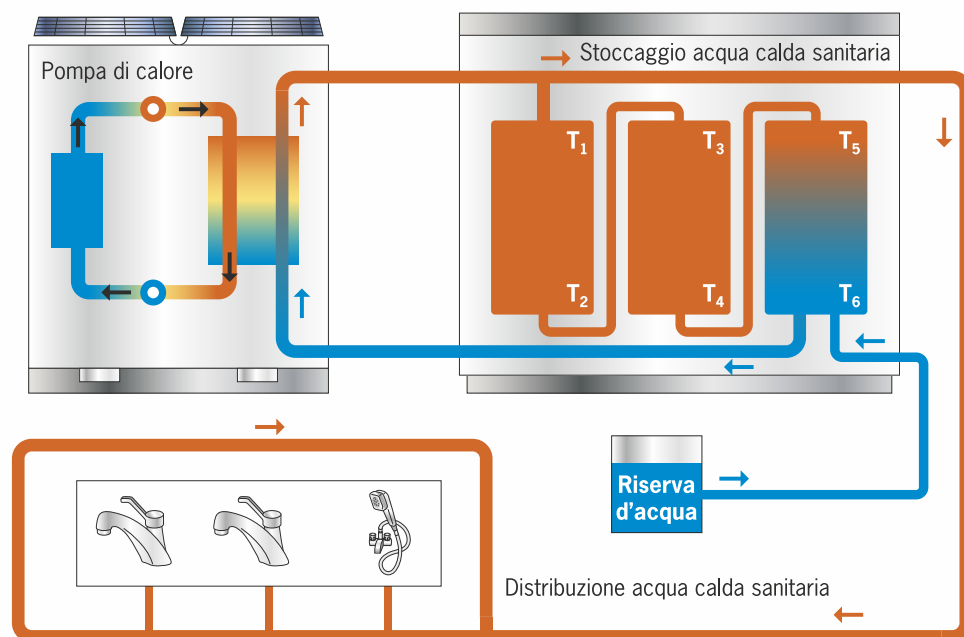


Fig. 5 - Schema del funzionamento di una pompa di calore a CO₂ per la produzione di acqua calda. I serbatoi di accumulo progettati per la stratificazione consentono di andare incontro all'utilizzo variabile dell'utenza e ottimizzano il funzionamento della pompa di calore (Enex).



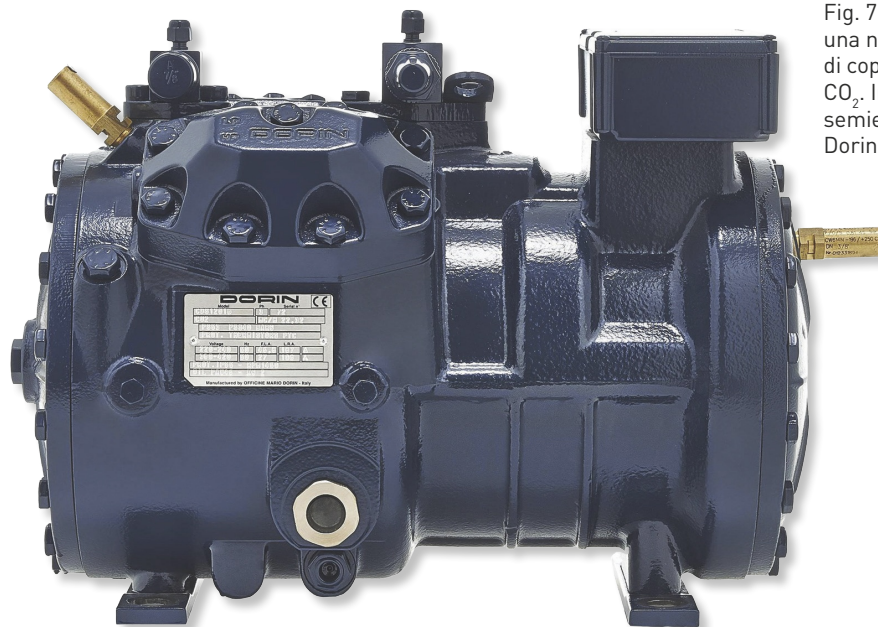
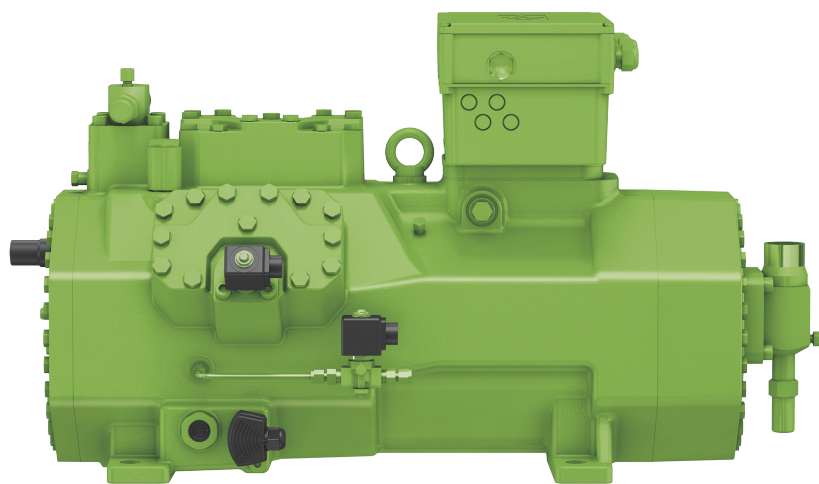


Fig. 7 - I costruttori stanno realizzando una nuova serie di compressori in grado di coprire l'intera gamma di lavoro della CO₂. In questa immagine il compressore semiermetico per cicli subcritici di Dorin.

Fig. 8 - La tedesca Bitzer ha di recente presentato un nuovo compressore a 6 cilindri a magneti permanente per impieghi transcritici in grado di modulare la potenza tra il 10% e il 100%.



affidabili), e la progettazione di un nuovo compressore, anch'esso idoneo per trattare le elevate pressioni tipiche della CO₂.

Per mezzo delle pompe di calore ad anidride carbonica si può produrre acqua calda fino a 90 °C ed oltre, temperature difficilmente raggiungibili con i sistemi tradizionali (pompe di calore con fluidi alogenati in ciclo subcritico). La macchina, per le caratteristiche proprie della CO₂, risulta inoltre molto compatta (figura 4). Poiché il 20% circa della richiesta di energia in ambito residenziale (impianti di piccola e grossa taglia) nei paesi industrializzati è dovuta proprio al riscaldamento di acqua sanitaria e con una domanda in continuo aumento, l'utilizzo di pompe di calore a CO₂ si prospetta oggi come una valida alternativa ai sistemi tradizionali.

Nello schema di figura 5 viene evidenziata la sequenza di operazioni della pompa di calore con serbatoio di accumulo per produzione di acqua calda sanitaria. L'acqua riscaldata alla temperatura impostata, viene inviata ai serbatoi di accumulo. La portata d'acqua, che è variabile e controllata tramite una pompa con motore elettronico ad alta efficienza, viene poi distribuita attraverso i serbatoi, agli utilizzatori.

Si nota dallo schema che è possibile accumulare acqua calda senza prelievo, prelevare acqua con la pompa di calore non in funzione, o con un funzionamento combinato.

Un modello di pompa di calore a CO₂ per acqua calda sanitaria e riscaldamento disponibile sul mercato è visibile in una installazione esterna nella figura 6; in questo caso il sistema è diviso in due sezioni distinte collegate tra loro: la sezione evaporante che comprende anche lo scambiatore di calore tra la CO₂ allo stato di vapore caldo proveniente dal compressore e l'acqua da riscaldare proveniente dal serbatoio d'accumulo, e la sezione di

accumulo alla quale si collega il circuito dell'acqua calda sanitaria e quello del riscaldamento ambientale. Le due sezioni sono quindi collegate tra loro idraulicamente in circuito chiuso. Il serbatoio d'accumulo attraverso uno scambiatore di calore alimenta il circuito sanitario e può alimentare altresì il circuito chiuso di riscaldamento.

I compressori per CO₂

Come detto, la maggiore densità dell'anidride carbonica rispetto agli idrofluorocarburi consente di dimensionare il compressore con una cilindrata minore, di norma 1/5 in meno di quello necessaria per l'R404A. Per

lo stesso motivo anche le tubazioni, specie sul lato aspirazione, sono di dimensioni minori. A parità di lavoro svolto, comunque le dimensioni della macchina rimangono pressoché le stesse di un sistema HFC, in quanto le maggiori pressioni di esercizio, oltre a richiedere un'attenta progettazione e una maggiore cura dei dettagli, "irrobustiscono" la macchina.

Le temperature elevate di scarico dell'R744 (a causa della alto indice di compressione) comportano di norma la necessità di una compressione a due stadi, specie per i sistemi a bassa temperatura che espellono il calore direttamente in ambiente.

I compressori per CO₂, oltre a dover supportare pressioni di lavoro molto più elevate rispetto a quelle tipiche dei refrigeranti HFC possono essere soggetti, in certe condizioni, ad ingresso di CO₂ liquida. Per questa ragione è stata perfezionata nei compressori scroll la tecnologia di consentire l'espulsione di CO₂ liquida dalle spirali attraverso delle aperture nella spirale fissa, sovrastata da una specie di valvola a lamelle, come nei compressori alternativi.

La CO₂ liquida presenta inoltre una elevata capacità di lavare l'olio lubrificante dalle parti mobili del compressore e questo ha reso necessario l'uso di idonei oli polimeri (POE), e il progetto di particolari pompe dell'olio per i compressori scroll, che invece mancano nelle versioni per funzionamento con i refrigeranti HFC.

Per quanto riguarda i compressori frigoriferi per le piccole applicazioni, sono stati sviluppati da tempo compressori alternativi semiermetici di varia capacità e tipologia studiati espressamente per la CO₂. Dorin, ad esempio, offre modelli alternativi semiermetici monostadio e bistadio in grado di funzionare in cicli transcritici e modelli monostadio per funzionamento in cicli subcritici (figura 7).

In questo campo va segnalato anche il nuovo compressore Ecoline+ a sei cilindri con magneti permanente ad avviamento diretto che Bitzer ha pre-

LA CO₂ PER I CLIMI CALDI

Si è detto che l'efficienza di un sistema CO₂ a ciclo semplice si riduce drasticamente quando la temperatura ambiente supera i 30 °C.

Per ovviare questo limite termodinamico, che penalizza i paesi del sud Europa, è interessante segnalare la soluzione Enjector della società trevigiana Enex, sistema che combina tre differenti scelte progettuali quali:

- Sovralimentazione degli evaporatori.
- Compressori ausiliari per la ri-compressione del vapore di flash.
- Pre-compressione con eiettori.

Sovralimentazione degli evaporatori

Oggi il limite imposto all'aumento della pressione di aspirazione è dato dalla differenza di temperatura tra l'aria di raffreddamento e la temperatura di evaporazione. Per evitare il rischio di avere del liquido in aspirazione al compressore tale differenza deve essere compresa tra 6 - 10 K ma in realtà, per sicurezza, viene mantenuta spesso sopra i 10 K. Questo comporta che per una data temperatura dell'aria la massima temperatura di evaporazione deve essere inferiore di almeno 10 K. Viceversa ogni grado di aumento della temperatura di evaporazione riduce di circa il 3% il consumo di energia.

Con la sovralimentazione il surriscaldamento può essere nullo, e non c'è più il vincolo della differenza minima. Per contro si ha liquido all'uscita degli evaporatori ma con un eiettore il liquido "recuperato" dagli evaporatori può essere facilmente "pompato" nel ricevitore di liquido, da dove è possibile alimentare nuovamente gli evaporatori.

Per effetto di questa soluzione, la temperatura di evaporazione può essere aumentata fino a

6 K. Il risparmio di energia effettivo è dell'ordine del 13-15%, soprattutto se unito al sistema di ottimizzazione e controllo della pressione di aspirazione.

Compressori ausiliari per la ricompressione del vapore di flash

Il vantaggio dato da questa soluzione è dovuto al fatto che il vapore di flash prodotto durante la prima fase di espansione viene ricompresso prima che raggiunga la pressione più bassa del ciclo, risparmiando una notevole quantità di lavoro al compressore. In una tipica giornata estiva nell'Europa meridionale, l'energia risparmiata per effetto della ricompressione del vapore di flash è dell'ordine del 15%.

Pre-compressione con eiettori

L'energia contenuta nel liquido ad alta pressione proveniente dal gas cooler viene dapprima trasformata in energia cinetica nell'ugello (figura A). La pressione viene così ridotta consentendo l'aspirazione di liquido o vapore a bassa pressione. L'energia cinetica del fluido viene poi ritrasformata in pressione riducendo la velocità tramite il diffusore della sezione di scarico.

L'insieme di queste soluzioni oltre a permettere una migliore funzionalità nelle regioni del sud Europa, consentono un guadagno totale, in termini di efficienza, del sistema del 30% rispetto al ciclo base.

Le soluzioni sopra descritte sono estremamente vantaggiose anche nelle condizioni climatiche dell'Europa settentrionale, durante il periodo di funzionamento del sistema frigorifero in modalità "recupero di calore".

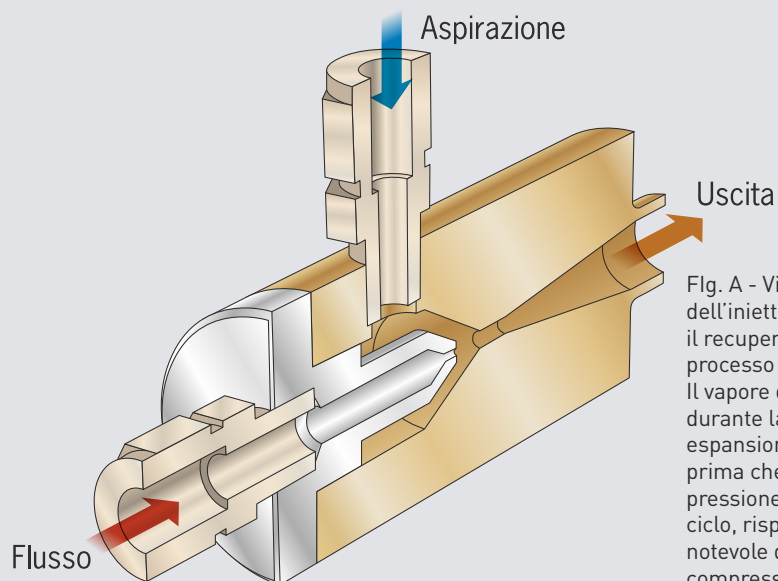
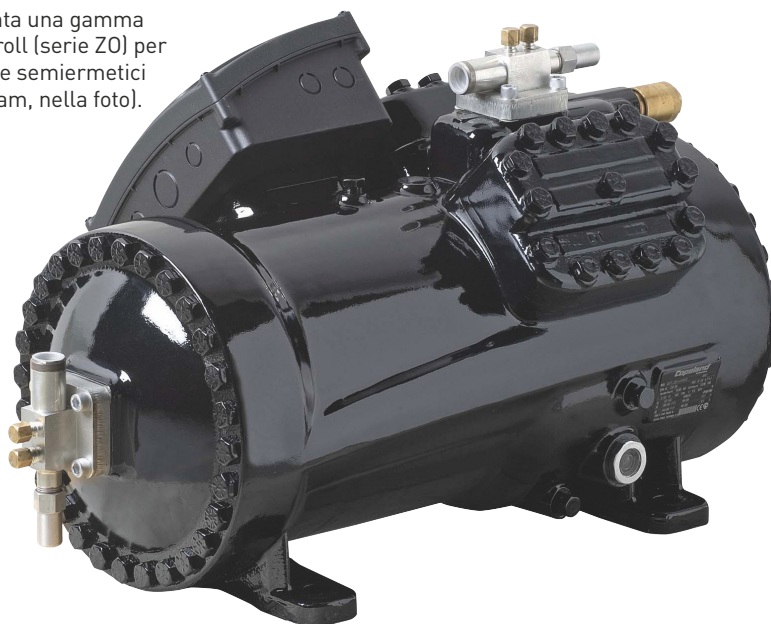


Fig. A - Vista in sezione dell'iniettore che permette il recupero di energia dal processo di espansione. Il vapore di flash prodotto durante la prima fase di espansione viene ricompresso prima che raggiunga la pressione più bassa del ciclo, risparmiando una notevole quantità di lavoro al compressore (Enex).

Fig. 9 - Copeland presenta una gamma di compressori a CO₂ scroll (serie Z0) per applicazioni subcritiche e semiermetici transcritiche (serie Stream, nella foto).



sentato alla recente fiera Chillventa. Oltre al funzionamento con inverter di frequenza, i nuovi compressori possono essere dotati della nuova regolazione meccanica della capacità, che consente di impostare la potenza frigorifera fra il 10 e il 100% (figura 8). Danfoss offre vari modelli di compressori alternativi ermetici, mentre Copeland propone una serie di compressori scroll per cicli subcritici e compressioni semiermetici per cicli transcritici, di cui un modello è visibile nella figura 9. Altri costruttori hanno pure sviluppato ulteriori modelli di compressori scroll per cicli i transcritici.

Gli scambiatori di calore CO₂-acqua

Il vantaggio di avere profili di temperatura simili tra i due fluidi lungo lo scambiatore si traduce in minori perdite di exergia nello scambio termico, che sono da ritenersi approssimativamente proporzionali, a parità di calore scambiato, alla differenza di temperatura tra i due fluidi. La minore perdita exergetica può costituire un fattore decisivo per assicurare alla CO₂ rendimenti migliori rispetto a quelli realizzati da impianti operanti con fluidi tradizionali.

Di norma lo scambiatore di calore CO₂- acqua è costituito da una serie complanare di tubi capillari di rame paralleli (nei quali circola l'anidride carbonica scaricata dal compressore allo stato di vapore caldo) che si dipartono da un collettore di mandata e si ricollegano a un collettore di uscita. Affacciati al piano di questi tubi sono applicate delle "tasche" entro le quali circola l'acqua da riscaldare.

L'utilizzo di tubi capillari per la CO₂ assicura una elevata resistenza contro le pressioni in gioco e realizza al tempo stesso un elevato coefficiente di scambio termico; l'utilizzo di piastre per il lato acqua con alettatura interna consente a propria volta di ottenere un coefficiente di scambio termico pure elevato per l'acqua. L'unione di queste due tecnologie ha permesso di ottenere uno scambiatore di calore compatto, ad alta efficienza e caratterizzato la piccoli differenziali di temperatura tra i due lati.

Questa ovviamente non è l'unica soluzione sviluppata per gli scambiatori di calore tra il vapore caldo di CO₂ in uscita dal compressore e l'acqua da riscaldare. Sebbene sia possibile in linea di principio utilizzare delle versioni tubodentro tubo, come in certe macchine a espansione diretta, il ri-

schio di inquinamento del circuito della CO₂ da parte dell'acqua in circolo nel tubo esterno per effetto di corrosioni, costringerebbe a ricercare delle soluzioni troppo costose per rivelare le eventuali infiltrazioni. Più gettonata risulta la soluzione di tubi capillari su cui scorre la CO₂ avvolti a spirale su tubo di maggior diametro nel quale fluisce l'acqua.

Prospettive per la CO₂

Le pompe di calore ad alta temperatura funzionanti a CO₂ costituiscono una interessante alternativa per la produzione dell'acqua calda sanitaria e il riscaldamento, potendo assicurare un'apprezzabile efficienza energetica. Tuttavia esse, solo in tempi recenti stanno tentando di implementare altre funzioni, come il condizionamento estivo e soprattutto una migliore efficienza verso i climi caldi (si veda box). Questo, almeno nell'Europa del sud, ne limita non poco il campo di applicazione. Un altro scoglio è quello del prezzo. A queste limitazioni andrebbe poi aggiunto l'impegno di spazio dovuto alle dimensioni delle due sezioni delle macchine, che ne esclude in larga misura la possibilità di impiego in appartamenti condominiali.

Tuttavia la tecnologia Eco Cute è tuttora in evoluzione e un noto costruttore (Mayekawa) ha sviluppato una serie di macchine a recupero di calore in grado di produrre in modo simultaneo acqua calda e refrigerata. Inoltre il campo di impiego delle macchine a CO₂ si è esteso anche per applicazioni non residenziali: alberghiere, ricreative (piscine), industrie alimentari, reparti di imbottigliamento bevande per sterilizzazione bottiglie ecc.

Ed è forse proprio nelle applicazioni speciali che la CO₂, troverà le maggiori possibilità di impiego. Già ora essa è utilizzata in impianti frigoriferi per supermercati, nei distributori automatici per alimenti, nei condizionatori per autoveicoli e in altre applicazioni dove le sue caratteristiche possono venire adeguatamente utilizzare. ■