



Ultimi sviluppi sugli scambiatori di calore ad aria

In molti settori della refrigerazione, la CO₂ rappresenta una soluzione eccellente e a basso impatto ambientale; LU-VE Group ha contribuito in modo significativo allo sviluppo di questa tecnologia, grazie all'utilizzo del suo moderno impianto di prova, che consente di valutare le prestazioni di scambiatori di calore ad aria operanti con CO₂, sia evaporatori sia gas cooler

A cura della redazione

Il nuovo impianto di prova ha permesso di avviare un progetto specifico per la CO₂, con l'obiettivo primario di migliorare la conoscenza dei fenomeni di scambio termico in evaporazione, condensazione e durante il raffreddamento dei gas in condizioni trans-critiche. Scopo della ricerca, inoltre, è studiare l'influenza dell'olio sul coefficiente di scambio termico interno.

Il documento descrive le attività di laboratorio condotte negli anni, l'affidabilità del software che calcola le prestazioni e i potenziali miglioramenti delle macchine.

In particolare, è stato possibile identificare un metodo in grado di simulare il comportamento del fluido nella regione trans-critica, considerando tutti i parametri che influenzano le prestazioni reali.

Introduzione

La CO₂ è stata utilizzata a partire dalla metà del diciannovesimo secolo come fluido refrigerante negli impianti di terra e a bordo delle navi, in virtù dei suoi diversi vantaggi:

- costo ridotto;
- buone proprietà di scambio termico;
- non infiammabile, qualità molto importante in caso di perdite nelle sale macchine;
- possibilità di funzionare in condizioni sub-critiche, sfruttando l'acqua di mare a bassa temperatura per condensare nelle applicazioni navali.

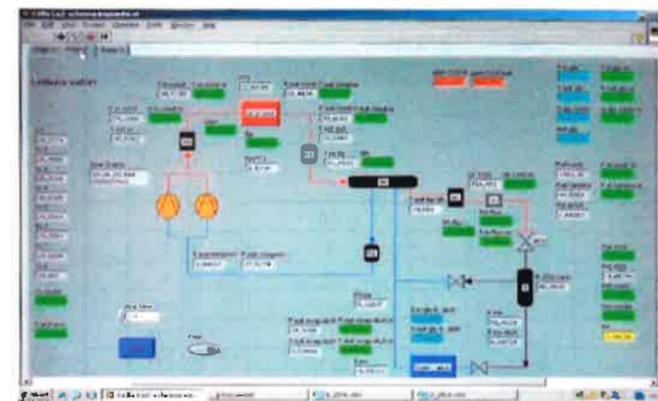
L'arrivo dei refrigeranti sintetici (CFC, HCFC) e lo sviluppo della tecnologia dei compressori nella prima metà del ventesimo secolo ha portato all'abbandono dell'uso della CO₂ come refrigerante.

La maggiore attenzione riguardo i problemi ambientali, che ha messo in discussione l'utilizzo di CFC e HCFC, ha portato ad una rivalutazione dell'anidride carbonica.

Celebri gli articoli di Gustav Lorentzen negli anni '90, a tal proposito.

Numerosi studi sull'anidride carbonica come fluido secondario sono stati pubblicati successivamente, soprattutto per la refrigerazione commerciale nei supermercati.

LU-VE Group ha cominciato a studiare gli scambiatori di calore raffreddati ad aria per la CO₂ all'i-



Programma dedicato di acquisizione dati



Impianto di prova LU-VE

nizio del nuovo millennio e dal 2012 si è dotata di un sofisticato laboratorio per la sperimentazione di gas coolers ed aero-evaporatori. Questo articolo raccoglie i risultati delle analisi sperimentali e l'ottimizzazione del modello di calcolo utilizzato in LU-VE per il dimensionamento degli scambiatori.

Impianto di prova

L'impianto a CO₂ è stato pensato per poter testare gas coolers ed aero-evaporatori. La pressione massima di esercizio è di 120 bar.

Un programma dedicato è stato sviluppato internamente utilizzando LabView per monitorare e acquisire i dati.

Unit	GAS COOLER 1	GAS COOLER 2	GAS COOLER 3
Fins mat.	Al	Al	Al
Tube type	Smooth	Smooth	Smooth
Tube mat.	Cu K65	Cu K65	Cu K65
Fins spacing	2,1	2,1	2,1
n° tubes	40	40	40
n° rows	4	4	3
n° circuits	5	5	4
Tube diameter	5/16"	5/16"	5/16"
Coil length	1.215	1.215	1.215
Frontal area	1,215	1,215	1,215
Fan type / Rpm	8P/465	EC/807	EC/675
Air volume rate	3.956	6.650	6.502

Tabella 1

I test sono stati condotti effettuando un bilancio termico tra l'unità di prova e un gruppo di contrasto al fine di garantire l'attendibilità dei dati sperimentali.

Ciò ha richiesto un grande dispendio di tempo per la taratura della strumentazione di misura e in particolare per la definizione delle dispersioni della camera climatica di prova.

Caratteristiche degli scambiatori testati

In laboratorio sono state testate parecchie macchine. In questa prima parte ci concentriamo sul confronto di 3 gas cooler, le cui caratteristiche sono elencate in tabella 1. Il tubo utilizzato è in materiale K65, una lega di rame in cui è contenuto un piccolo quantitativo di ferro, il quale aumenta notevolmente la resistenza meccanica. I circuiti sono stati disegnati tutti uguali, rispettando la regola del controcorrente e il drenaggio di possibili ristagni di olio, che come si vedrà successivamente, è la principale causa di perdita di prestazione di un gas cooler.

Al termine dell'attività sperimentale è stata condotta una serie di confronti tra dato teorico atteso e quello sperimentale.

Il codice di calcolo LU-VE

Il software di calcolo utilizza correlazioni di Gnielinski e Colburn modificate per lo scambio termico con fluido monofase e bifase rispetti-

vamente. Per il calcolo delle perdite di carico, il codice utilizza la correlazione di Lockhart - Martinelli modificata.

Le proprietà termodinamiche e di trasporto dell'anidride carbonica sono ricavate dal programma Refprop 8.0. L'obiettivo del lavoro è quello di verificare la validità di queste correlazioni per il caso specifico di funzionamento con CO₂.

Il codice calcola lo scambio termico nei gas cooler considerando i flussi in controcorrente, mentre nei condensatori i flussi sono incrociati nella parte dedicata al de-surriscaldamento e in controcorrente nella zona di cambio di fase.

I coefficienti delle correlazioni di scambio termico sono ricavati da prove sperimentali condotte nei laboratori LU-VE Group in condizioni standard.

Considerando la peculiarità delle condizioni di funzionamento dei gas cooler rispetto alle condizioni di calcolo più comuni, sono state necessarie alcune verifiche circa l'adattabilità del codice a queste circostanze specifiche.

La prima analisi ha riguardato la verifica della bontà dell'approssimazione di flusso incrociato. Per valutare l'influenza del salto medio logaritmico (e in particolare del DT_{ml}), si è impiegato il codice alternativo "X3FLOW" per gas cooler, sviluppato in LU-VE Group, che permette di eseguire calcoli in tre dimensioni (seguendo la forma reale dei circuiti), dividendoli in volumi finiti e risolvendo a flusso incrociato, con le equazioni classiche del metodo ϵ -NTU, gli N scambiatori elementari. Nonostante il calcolo più rigoroso del codice X3FLOW (ma anche computazionalmente molto più oneroso), l'analisi eseguita confrontando le prestazioni globali ottenute con il codice LUVE standard e il codice X3FLOW non ha evidenziato particolari scostamenti di calcolo; di conseguenza si è deciso di non apportare nessuna modifica al metodo di calcolo del DT_{ml} . La seconda analisi ha valutato l'effetto di forti gradienti di temperatura tra tubi adiacenti, che possono portare a flussi termici per conduzione lungo l'aletta. Per valutare l'influenza dello scambio termico conduttivo tra due ranghi

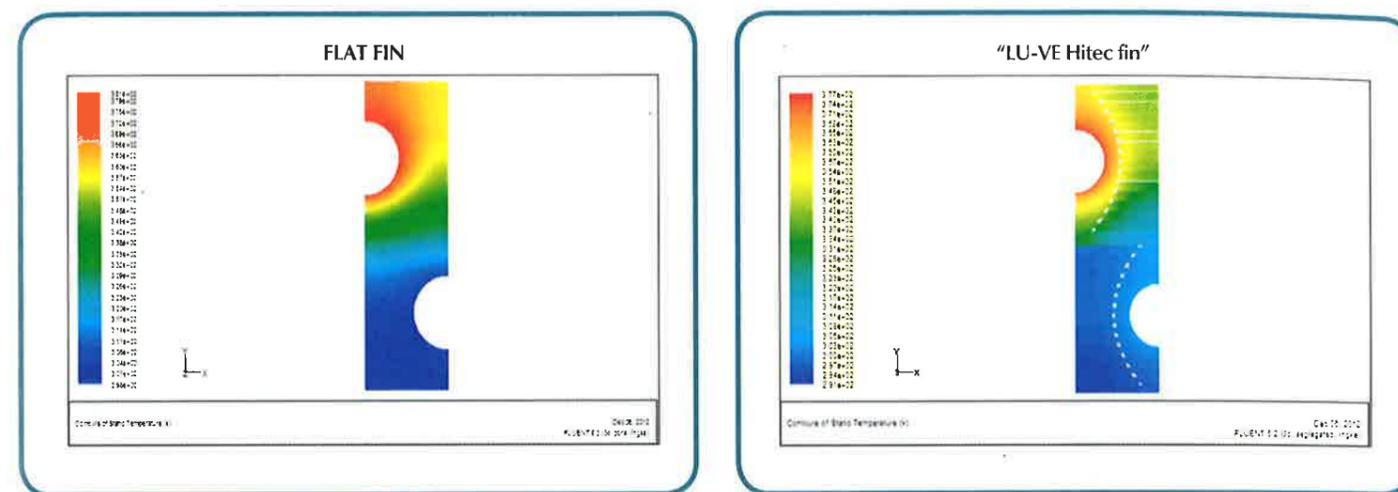


Figure 3 a e 3b - CFD configurazioni simulate

aventi una sensibile variazione di temperatura del fluido nei tubi, si è utilizzato la CFD per eseguire alcune simulazioni.

Come base di riferimento, è stata simulata un'aletta liscia con due differenze di temperatura tra il fluido che scorre nei tubi:

- 70/70 °C DELTA 0 °C
- 110/30 °C DELTA 80 °C.

Le stesse differenze di temperatura sono state poi mantenute approssimativamente uguali nella configurazione di alette "LU-VE Hitec".

Dai risultati delle quattro simulazioni CFD si evince che, quando le differenze di temperatura sono nulle, lo scambio termico conduttivo in prossimità della zona media tra i ranghi è anch'esso nullo (zona adiabatica); mentre, quando la differenza di temperatura dei fluidi aumenta, si notano due differenti comportamenti per le due tipologie di aletta: a) per l'aletta liscia, il peso dello scambio conduttivo (negativo dal punto di vista dello scambio termico globale dell'aletta) rispetto al totale è di circa il 37%, valore non trascurabile; b) nel caso dell'aletta "LU-VE Hitec", invece, gli intagli fungono da interruzione allo scambio conduttivo, riducendo il valore pesato sul totale a circa il 4%, valore in questo caso trascurabile.

Questo risultato conferma come la tecnologia LU-VE permetta di sfruttare al meglio le potenzialità della CO₂.

La figura 3 mostra, per le quattro configurazioni simulate, l'andamento della temperatura di aletta nella zona di mezzera dei ranghi. Inoltre, le mappe colorate riportano la temperatura di aletta. Come si può notare, la configurazione specifica degli intagli, permette un ottimo scambio di calore in senso radiale ai tubi (ottima efficienza di aletta), impedendo lo scambio nocivo tra le zone attorno ai tubi di ranghi attigui (taglio termico).

Risultati sperimentali e confronti con codice LU-VE in condizioni trans-critiche

Un'intensa attività di test è stata condotta, comprendo un range di pressioni da 80 a oltre 110bar. Molti parametri sono stati studiati, così come la presenza di olio lubrificante nel circuito.

Come osservato in letteratura [Dang, Wang], infatti, il formarsi di uno strato di olio nei tubi del circuito può portare ad una riduzione significativa del coefficiente di scambio termico interno, anche oltre il 70% [Dang].

Si è quindi ricercato un coefficiente moltiplicativo "RHTC" di riduzione del coefficiente di scambio interno (HTC) e di aumento delle perdite di carico, su una analisi dei dati sperimentali. In letteratura sono stati trovati alcuni studi relativi alla determinazione dell'HTC in zone ipercritiche, in presenza di olio nel circuito. Le variabili

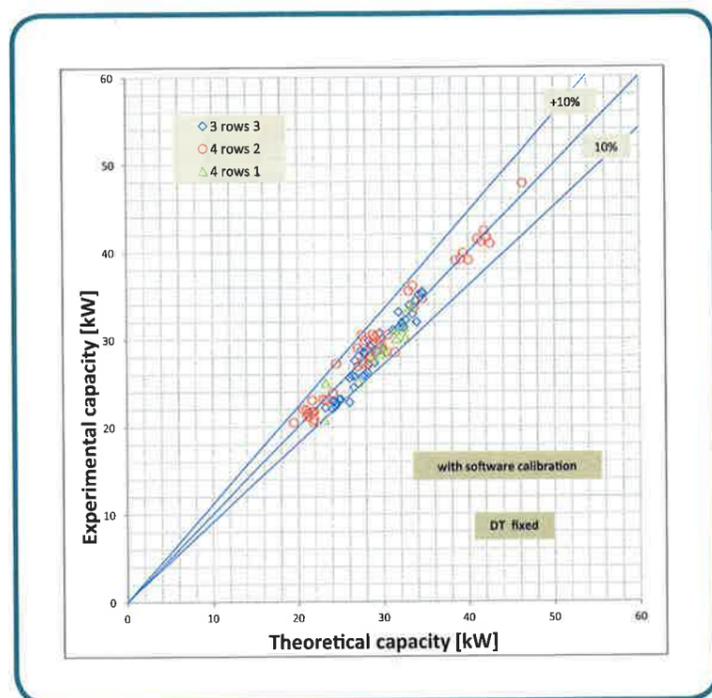


Figura 4 - Andamento della potenza teorica/calcolata rispetto a quella sperimentale

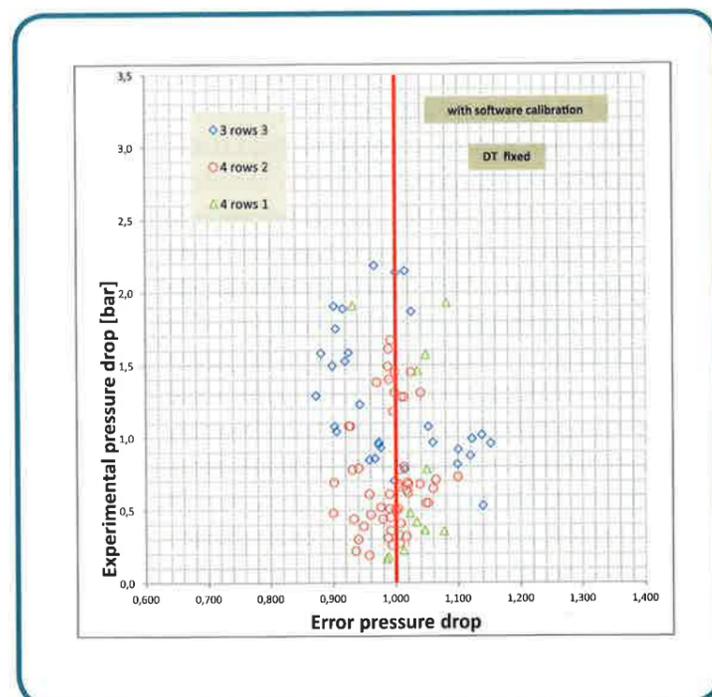


Figura 5 - Andamento degli errori delle perdite di carico

sondate e correlate alla penalizzazione dell'HTC, sono le seguenti:

$$RHTC = f(\text{diametro int., } \rho v, \text{ flusso termico, pressione, } \omega, T_{CO_2}, \text{ tipo di olio})$$

Analizzando i dati pubblicati, si è riscontrato un'ottima corrispondenza tra le nostre conclusioni e quelle citate, in particolare con concentrazioni in massa di olio attorno al 3-5%. È stata poi condotta una ricerca bibliografica sulle correlazioni disponibili, confermando come più valida quella di Gnielinski (valida per $2300 < \text{Reynolds} < 5000000$). I coefficienti correttivi individuati risultano molto poco dipendenti dalle condizioni operative. Nel grafico di figura 4 si riporta l'andamento della potenza teorica/calcolata rispetto a quella sperimentale. Sul grafico sono riportate due linee di demarcazione dell'errore percentuale tra le due grandezze del $\pm 10\%$. In figura 5 si riporta l'andamento degli errori delle perdite di carico, in funzione del valore delle stesse, espresse in bar. La dispersione è contenuta entro i $\pm 15\%$, valore del tutto apprezzabile.

Risultati sperimentali e confronti con codice LU-VE in condizioni subcritiche

Il livello delle prestazioni in condizioni sub-critiche è molto importante. Come mostrato in figura 6, l'impianto deve operare per la maggior parte dell'anno in tali condizioni, le migliori in termini di efficienza dell'intero ciclo a CO₂. Il gas cooler è il componente che vede modificare di più il suo comportamento tra condizioni trans-critiche e sub-critiche e deve garantire un'elevata efficienza di scambio termico in entrambi i casi. Per questa ragione, la sua costruzione deve comportare un equilibrio ottimale tra le due condizioni. Lo scopo della campagna sperimentale è stato quindi di migliorare la comprensione dei fenomeni di scambio termico e allo stesso tempo calibrare il software di calcolo per garantire una corretta previsione delle prestazioni. Gli esperimenti sono stati condotti in un campo di pressione particolarmente ampio, diminuen-

do la temperatura di condensazione fino a 10°C. Inoltre, sono state apportate variazioni significative sia al surriscaldamento del gas in ingresso al condensatore che al sottoraffreddamento del liquido.

È stato quindi possibile verificare accuratamente il software nelle tre differenti zone: de-surriscaldamento iniziale, transizione di fase, e sottoraffreddamento.

La parte che ha richiesto maggiore attenzione è stata la zona del de-surriscaldamento, a causa dell'influenza dell'olio che crea un sottile film resistente tra la CO₂ e il tubo.

Nel grafico di figura 7 si riporta l'andamento dell'errore tra la potenza teorica/calcolata rispetto a quella sperimentale, in funzione della pressione del refrigerante in entrata all'unità. Gli errori risultano essere contenuti e indipendenti dalla pressione; in particolare anche nella zona prossima al punto critico.

L'andamento dei punti delle tre configurazioni provate è ben disperso attorno al valore unitario. La Figura 8 mostra l'andamento degli errori delle perdite di carico lato interno CO₂ (calcolo/sperimentale), in funzione del valore misurato, espresso in bar. La dispersione è contenuta entro un valore accettabile. Gli errori aumentano al diminuire del valore misurato, questo per ragioni di incertezza sperimentale.

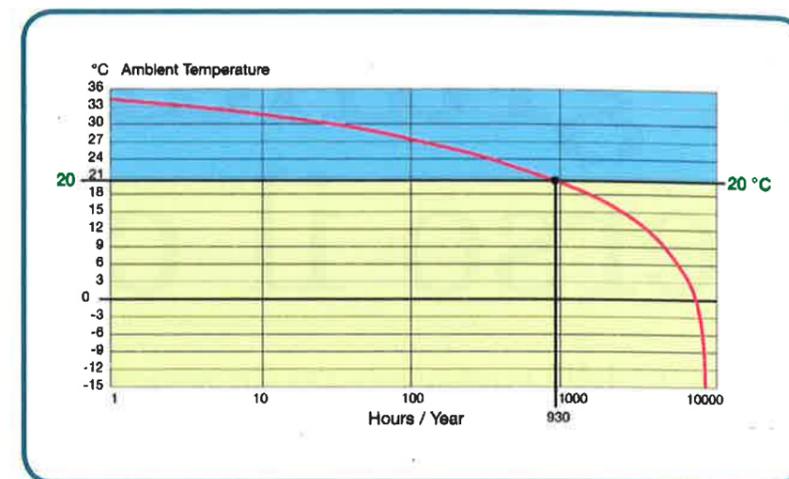


Figura 6 - Diagramma della distribuzione della temperatura (in uno stato dell'Europa Centrale)

Conclusioni

In conclusione, l'intensa campagna sperimentale nei laboratori LU-VE Group ha consentito un aumento delle conoscenze del comportamento della CO₂, fornendo una base ancora più solida per il dimensionamento dei gas coolers sia in condizioni trans-critiche che sub-critiche. La precisione del software è certamente elevata, così da garantire una notevole affidabilità dei dati prestazionali dichiarati.

Si ringrazia LU-VE Group per il materiale fornito

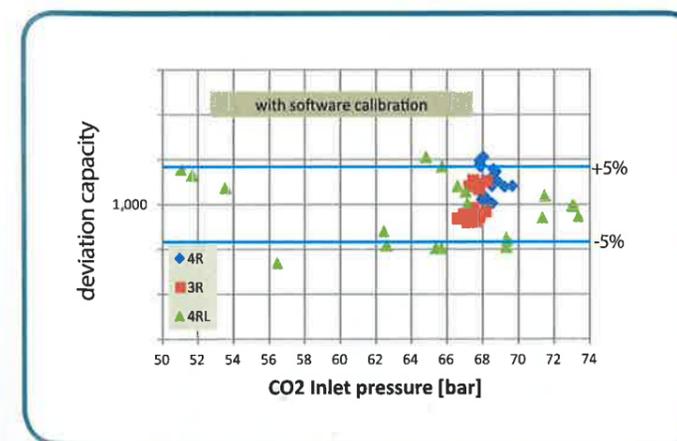


Figura 7 - Andamento dell'errore di potenza in funzione della pressione del refrigerante in entrata

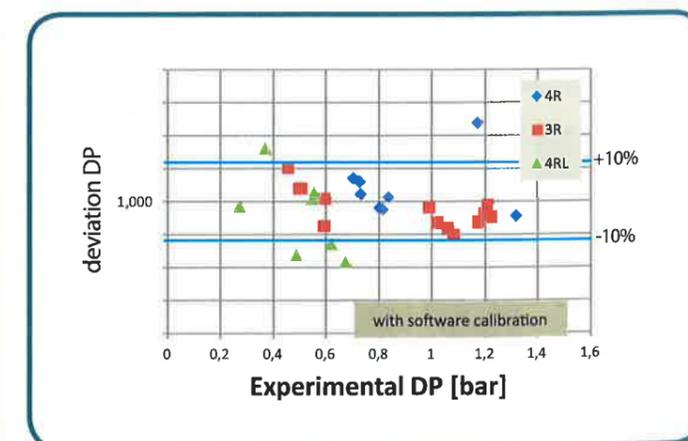


Figura 8 - Andamento degli errori delle perdite di carico lato interno