



Cambiamenti climatici: i ghiacciai si ritraggono, l'acqua diminuisce, i raggi solari intrappolati aumentano l'effetto serra



ESPERIENZA CON SISTEMI DI REFRIGERAZIONE CON R744 ED IMPLEMENTAZIONE DI MULTI EIETTORI ED EVAPORATORI ALLAGATI

**D. AGOSTINI
FRIGO-CONSULTING LTD.**

ESPERIENZA CON SISTEMI DI REFRIGERAZIONE CON R744 ED IMPLEMENTAZIONE DI MULTI EIETTORI ED EVAPORATORI ALLAGATI

Dario Agostini

FRIGO-CONSULTING LTD., Via Zamenhof 817, 36100 Vicenza
Tel. +39 0444 1620650, E-mail: d.agostini@frigoconsulting.com

Abstract

Due impianti di refrigerazione con CO₂, dotati di compressione parallela ed eiettori, sono stati progettati, installati ed avviati nel 2014 in un supermercato in Svizzera. Sono stati realizzati sia con alcuni componenti aggiuntivi per commutarne il funzionamento sia con alcuni strumenti di misura per poter verificare il funzionamento in differenti modalità operative e secondo diversi metodi di controllo. Si analizzano qui i dati raccolti durante il primo anno di funzionamento.

Da fine 2014 i due impianti funzionano con gli eiettori operativi. Gli eiettori recuperano parte del lavoro di espansione che altrimenti sarebbe perso. Essi convogliano il liquido e il vapore dal separatore liquido, posto a valle degli evaporatori TN, al ricevitore del liquido in media pressione. Grazie agli eiettori del liquido e al separatore di liquido TN, le pressioni di aspirazione degli impianti A e B sono state aumentate. Inoltre i due impianti sono dotati ciascuno di un separatore di liquido BT e di due scambiatori interni di calore per poter innalzare le rispettive pressioni di aspirazione nelle parti BT. Passando dal funzionamento in modalità booster a quello con eiettori, il consumo di energia degli impianti si è ridotto dal 15 al 20%. A seconda del tipo di applicazione, della regione climatica e della richiesta di recupero di calore, grazie all'ausilio degli eiettori l'aumento di efficienza energetica annuale di un sistema di refrigerazione CO₂, rispetto ad un sistema ordinario con compressione parallela, è compreso tra il 15 e il 25%.

Keywords: CO₂ booster transcritico, compressione parallela, eiettore, field test, recupero di calore

1. Introduzione

Le installazioni CO₂-Booster transcritiche stanno diventando il tipo di impianto di refrigerazione preferito da sempre più gruppi europei del retail. A seconda della località, che gli impianti siano concepiti per un efficiente recupero di calore con basse temperature ambiente o per operare con alte temperature ambiente, grazie alle alte pressioni di funzionamento, essi sono caratterizzati da elevate perdite di carico per l'espansione nella valvola di alta pressione. Nel corso degli anni sono state testate diverse soluzioni in tali impianti per ridurre queste perdite. Dalla prima installazione con compressione parallela (Giroto, Minetto 2008) realizzata nel 2009, la compressione parallela si è molto diffusa e alcuni retailers la richiedono oggi come standard. Sono state implementate e testate anche altre varianti come il sottoraffreddamento all'uscita dal gas cooler o l'impiego di unità di compressione-espansione. Un'altra possibilità per ridurre tali perdite di carico è l'impiego degli eiettori. Nel 2013 è stato avviato un impianto di refrigerazione CO₂ transcritico con 3 eiettori (Schoenenberger, 2013). Esso impiega un metodo semplice e sicuro per ridurre drasticamente il consumo di energia di un impianto di refrigerazione CO₂ transcritico. Dopo un anno di esperienza, sono stati realizzati altri due impianti più evoluti con cinque eiettori ciascuno ed evaporatori allagati sia in TN che in BT. Questi impianti sono completamente identici ed operano nello stesso luogo. Ciò permette un confronto diretto tra differenti modalità di funzionamento, il loro comportamento e il loro consumo energetico.

2. Luogo dell'installazione

Il luogo dell'installazione si trova nella Svizzera centrale, a 450 metri di altitudine sul livello del mare, con una temperatura media annuale di +9.6°C. Il supermercato ha un'area vendita di circa 5250 metri quadrati con una lunghezza totale di banchi pari a 130 metri per quelli TN e di 38 metri per quelli BT. I banchi TN non hanno chiusure. Inoltre ci sono cinque celle frigorifere TN per un volume totale di 493 metri cubici e quattro celle di congelazione BT con un volume totale di 128 metri cubici. La richiesta frigorifera totale è suddivisa tra due identiche centrali frigorifere. In più, ci sono degli scambiatori per il recupero di calore per riscaldare l'acqua sanitaria e riscaldare l'ambiente. In primis il calore è usato per il supermercato, un suo eccesso viene inviato ad altre utenze nella shopping mall.

3. Sistemi di refrigerazione

I due sistemi di refrigerazione per l'area vendita consistono ciascuno di quattro compressori TN e di due compressori HT. La CO₂ in mandata dai compressori TN ed HT attraversa gli scambiatori per il recupero di calore sia per l'acqua sanitaria che per il riscaldamento ambiente prima di rilasciare calore all'esterno tramite il gas cooler. A valle del gas cooler, la CO₂ espande dall'alta alla media pressione nell'eiettore o nella valvola di alta pressione. La fase del vapore nel ricevitore di media pressione è surriscaldata da un IHX prima di essere compressa dai compressori HT. Se questi compressori non dovessero avere una cilindrata sufficiente per elaborare tutto il vapore, una parte di esso espande nella linea di aspirazione dei compressori TN. La fase del liquido nel ricevitore di media pressione è sottoraffreddata attraverso due IHX nella linea di aspirazione dei compressori BT prima di alimentare gli evaporatori TN e BT. La CO₂ proveniente dagli evaporatori BT è surriscaldata nell'IHX prima di essere compressa dai tre compressori BT.

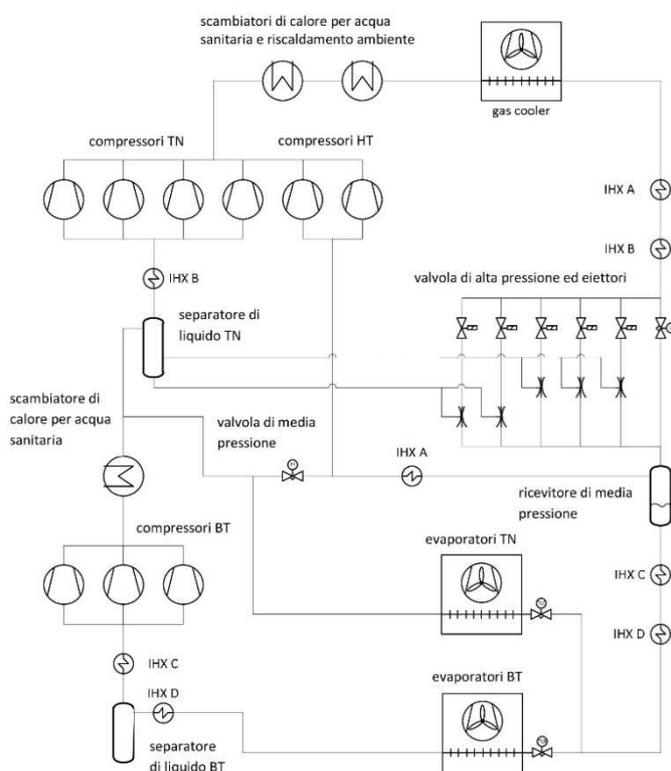


Figura 1: Schema P-I del sistema di refrigerazione a CO₂ transcritico con compressione parallela e multi eiettore.

La linea di aspirazione dei due eiettori del liquido è collegata alla parte con la CO₂ in fase liquida nel separatore del liquido TN. Ciò permette di convogliare il liquido dal separatore di liquido TN al ricevitore in media pressione, aspirato grazie all'espansione della CO₂ nella parte in alta pressione fino alla media pressione. La linea di aspirazione dei tre eiettori del vapore è collegata alla fase vapore presente nel separatore del liquido dei compressori TN. Gli eiettori del vapore precomprimono il vapore dalla pressione di aspirazione dei compressori TN sino a quella dei compressori HT, sempre grazie all'espansione della CO₂ dalla parte in alta pressione a quella di media pressione. In tal modo, la portata del vapore è compressa dai compressori HT anziché da quelli TN. I compressori HT funzionano in condizioni operative migliori rispetto ai compressori TN e necessitano di minor energia per comprimere la stessa quantità CO₂. Il liquido nella linea di aspirazione BT evapora tramite l'IHX D grazie al sottoraffreddamento del liquido in media pressione. Se la quantità di liquido proveniente dagli evaporatori BT fosse maggiore di quanto l'IHX D permetta di far evaporare, il liquido ristagna nel suo separatore BT. Lo IHX C, in ogni caso, surriscalda la CO₂ prima che raggiunga i compressori BT. La possibilità di rimuovere il liquido dalle linee di aspirazione TN e BT, prima che raggiunga i rispettivi compressori, permette di ridurre il set point di surriscaldamento negli evaporatori TN e BT o anche di far operare gli impianti con allagamento degli evaporatori. Questo garantisce un maggior valore del coefficiente di scambio termico negli evaporatori, ed in conclusione, la temperatura di evaporazione può essere aumentata.

3.1 Condizioni di progetto

Gli impianti di refrigerazione sono stati progettati considerando di poter funzionare sia nella tradizionale modalità operativa booster con valori di surriscaldamento standard sia in modalità operativa con eiettori e con surriscaldamento ridotto o nullo. In caso di inattesi problemi, è possibile commutare il funzionamento nell'una o nell'altra modalità operativa. Inoltre, ciò da la possibilità di comparare le due modalità operative o differenti set points operativi. Infatti sono stati installati dei componenti aggiuntivi per commutare il funzionamento e degli strumenti di misura per poter indagare sui diversi modi operativi. Grazie all'esperienza acquisita, i prossimi impianti potranno essere semplificati. Ciascuno degli impianti fornisce una capacità di refrigerazione di 95 kW in TN e di 29 kW in BT. Sono stati considerati i seguenti parametri di progetto:

	Modalità operativa Booster	Modalità operativa con Eiettori
Compressori HT	±0°C / 35 bar _a	+3°C / 38 bar _a
Compressori TN	-8°C / 28 bar _a	-2°C / 33 bar _a
Compressori BT	-33°C / 13 bar _a	-26°C / 16 bar _a
Temperatura min. / max. di uscita dal gas cooler	+5°C / +36°C	+8°C / +36°C
Alta pressione min. / max	45 bar _a / 92 bar _a	50 bar _a / 92 bar _a
Min. set point di surriscaldamento agli evaporatori	8 K	0 K – 4 K

Gli evaporatori dei banchi verticali, di quelli serviti, delle celle TN e BT come pure delle macchine del ghiaccio sono calcolati e dimensionati per funzionare con un convenzionale surriscaldamento di 8 K. Grazie a ciò, gli evaporatori hanno la stessa dimensione che avrebbero nei sistemi convenzionali. Inoltre i banchi non hanno alcun tipo di chiusure, nonostante esse permetterebbero un addizionale riduzione del consumo

energetico. In un tradizionale booster con compressione parallela, il controllo dell'alta pressione avviene grazie alla valvola di controllo dell'alta pressione. Funzionando con gli eiettori, cinque di essi operano in parallelo a questa valvola. Così è possibile verificare differenti modalità di controllo dell'alta pressione. Una modalità prevede l'uso della valvola di controllo dell'alta pressione in combinazione agli eiettori. Questa modalità presenta il vantaggio che la differenza tra il set point del valore dell'alta pressione e il suo valore effettivo sia simile a quella dei sistemi booster tradizionali. Un'altra modalità prevede di controllare l'alta pressione esclusivamente con gli eiettori. Questo offre il vantaggio che tutta la portata di massa espande attraverso gli eiettori, permettendo di avere il massimo beneficio dall'energia di espansione, anche se ci si attende che la differenza tra il set point del valore dell'alta pressione e il suo valore effettivo sia maggiore che nella modalità tradizionale.

Diversi fattori, come le condizioni di ingresso del flusso primario, di quello aspirato e come la necessità di coprire il fabbisogno totale dell'installazione, influenzano la progettazione degli eiettori ed il loro abbinamento in un sistema ad eiettori multipli (Banasiak et al. 2011, Hafner et al. 2012). Ovviamente non esiste una geometria *unica* per tutte le condizioni di operatività dell'installazione. Ci sono diversi modi per dimensionare e gestire gli eiettori. Gli eiettori possono essere attivati e disattivati secondo il livello del liquido nel separatore, oppure secondo il valore dell'alta pressione oppure secondo le rispettive pressioni ottimali di progetto. Gli eiettori degli impianti citati hanno ugelli di diverso diametro e sono dimensionati per diversi valori dell'alta pressione, come pure per aspirare il liquido o precomprimere il vapore. A seconda del set point dell'alta pressione, della differenza tra il valore di set point e quello reale dell'alta pressione, del valore di pressione ottimale per ciascun eiettore, come pure del livello del liquido nel separatore, si attivano gli eiettori in quel momento più idonei.

3.2 Avviamento dell'impianto

Gli impianti, nell'agosto 2014, sono stati dapprima avviati e tarati per funzionare secondo la convenzionale modalità di funzionamento di un booster con compressione parallela e surriscaldamento standard di 8 K. A novembre l'impianto A è stato commutato a funzionare con surriscaldamento ridotto negli evaporatori. Dopo un mese di esperienza in questa modalità di funzionamento dell'impianto A, a dicembre 2014, anche l'impianto B viene commutato nella modalità di funzionamento con eiettore. Da allora entrambi gli impianti hanno continuamente funzionato nella modalità con eiettori.

4. Esperienza operativa

4.1 Consumo di energia durante l'avviamento

Il grafico 1 mostra il consumo di energia quotidiano, convertito in consumo annuale per metro di lunghezza di banco durante il periodo di commutazione al funzionamento con eiettore. I consumi rappresentati consistono nel consumo totale di energia di ciascun impianto.

L'asse del tempo è diviso in tre periodi: nel primo periodo entrambi gli impianti A e B hanno funzionato nella modalità booster tradizionale. Nel periodo intermedio, l'impianto A ha funzionato con gli eiettori attivi, mentre invece quello B era ancora funzionante in modalità booster tradizionale. Durante l'ultimo periodo, entrambi gli impianti hanno funzionato nella modalità con eiettori attivi.

Nel primo periodo, prima di commutare l'impianto A nella modalità con eiettore, il consumo energetico tra i due impianti differiva del 5%. Ciò è dovuto probabilmente alla richiesta frigorifera leggermente maggiore nell'impianto B. Altri influenti fattori, come temperatura esterna, temperatura e umidità in area vendita, richiesta dal recupero di calore, periodo di apertura del mercato, comportamento dello staff e della clientela, sono trascurati perché i due impianti operano sulla stessa area vendita.

Nel periodo intermedio, con l'impianto A funzionante in modalità operativa con eiettore, il suo consumo medio di energia cala da 2160 kWh/m-a a 1612 kWh/m-a. Ciò corrisponde ad una riduzione del 25% di energia consumata durante il funzionamento con eiettore rispetto al funzionamento come un impianto booster convenzionale con compressione parallela. Durante lo stesso periodo il consumo medio dell'impianto B è sceso da 2284 kWh/m-a a 2170 kWh/m-a, che corrisponde ad una riduzione del 5%. Conseguentemente, la riduzione del consumo di energia del periodo in esame può essere assunta pari al 20%. Nel terzo periodo, che parte dal momento in cui l'impianto B funziona in modalità con eiettore, il suo consumo di energia scende del 24%, da 2170 kWh/m-a a 1657 kWh/m-a. Per l'impianto A, nello stesso periodo, il consumo di energia cala del 9%, da 1612 kWh/m-a a 1465 kWh/m-a. La commutazione dell'impianto B alla modalità di funzionamento con eiettore riduce di circa il 15% i consumi. La differenza residua commutando gli impianti A e B al funzionamento con eiettore, è dovuta ai differenti set points in evaporazione.

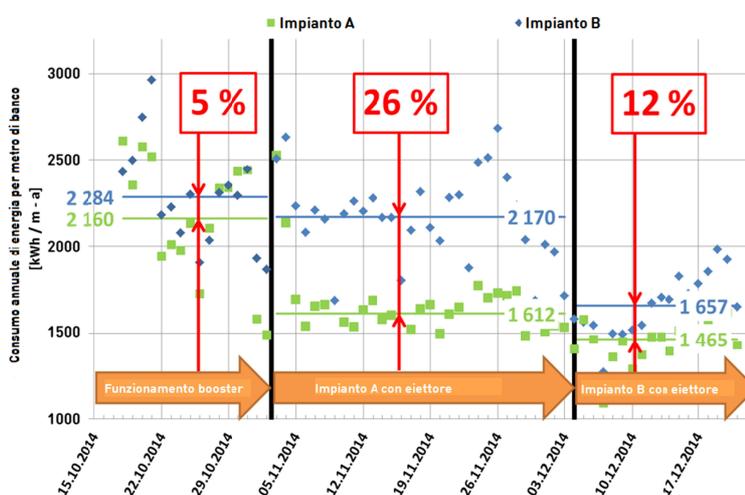


Grafico 1: Consumi energetici degli impianti A e B raffigurati come consumi annuali per metro di banche.

L'impianto A funziona con un set point di -2°C come temperatura di evaporazione in TN, invece quello B funzionava con un set point di -4°C , a causa di un banco servito carne che aveva difficoltà a raggiungere il range di temperatura tra -1°C e $+1^{\circ}\text{C}$. In seguito è stato innalzato il set point dell'impianto B a -3°C , grazie alla sostituzione degli ugelli della valvola di espansione del banco servito.

4.2 Funzionamento durante il periodo estivo

Il grafico 2 illustra diversi parametri operativi dell'impianto B nella giornata del 2 luglio 2015 durante il periodo di apertura del mercato, che va dalle ore 8.00 alle ore 20.00. I valori della temperatura sono riferiti all'asse y a sinistra mentre quelli della pressione, come quelli del livello del liquido, si riferiscono all'asse y a destra. In questo periodo la temperatura esterna si è attestata tra valori compresi tra $+23.2^{\circ}\text{C}$ al mattino e $+32.8^{\circ}\text{C}$ al pomeriggio.

La temperatura di uscita della CO_2 dal gas cooler varia parallelamente alla temperatura ambiente tra $+26.4^{\circ}\text{C}$ e $+36.5^{\circ}\text{C}$. L'alta pressione in questo periodo ha assunto valori compresi tra 68.4 bar_a e 88.3 bar_a , in funzione della temperatura di uscita dal gas cooler. La media pressione, compresa tra valori di 36.3 bar_a e 40.7 bar_a , ha avuto un valore medio di 39.4 bar_a . La linea azzurra mostra la temperatura di evaporazione TN, con un valore medio pari a -3.1°C . La temperatura di evaporazione in BT ha avuto nello stesso periodo un valore medio di -26.5°C , indicato dalla linea blu scuro. La linea verde

rappresenta invece il livello del liquido nel separatore del liquido TN, il cui livello è variato tra il 7 e il 40%. Nella parte più bassa del grafico si indica lo stato operativo dei compressori e degli eiettori.

Si nota che almeno un eiettore è sempre attivo. A loro è assegnata una priorità in funzione dell'alta pressione e del livello del liquido nel separatore per mantenere l'alta pressione. La qualità del controllo dell'alta pressione è comparabile a quella di un sistema tradizionale. Il numero di cicli di accensione e spegnimento dei compressori è ridotto rispetto ad un impianto tradizionale. Inoltre di tanto in tanto aumenta il livello del liquido nel separatore TN.

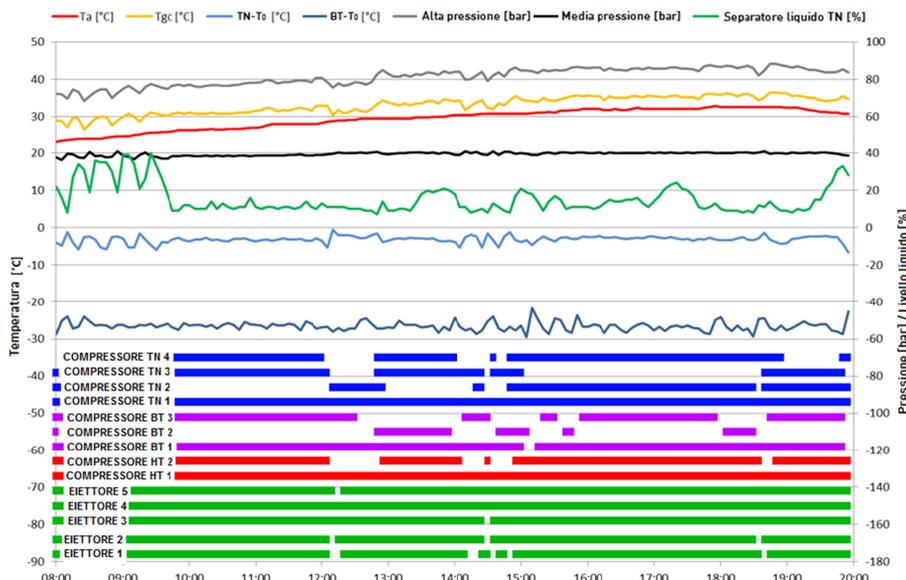


Grafico 2: parametri operativi dell'impianto B funzionante con eiettori durante il 2 luglio 2015

Si ritiene che ciò sia in relazione ad un'elevata richiesta di refrigerazione. Il set point della temperatura di evaporazione dei compressori TN, come pure il set point della pressione intermedia, variano secondo il livello di liquido nel separatore TN. Si nota che incrementando il livello del liquido calano sia la temperatura di evaporazione dei compressori TN che la pressione intermedia. Una modalità alternativa per la regolazione consisterebbe nel variare il surriscaldamento anziché la temperatura di evaporazione.

5. Conclusioni

Due impianti a CO₂ con eiettori con compressione parallela e 5 eiettori ciascuno sono stati progettati, installati ed avviati nel 2014 in un supermercato in Svizzera. Ciascun impianto è stato progettato per una capacità di refrigerazione di 95 kW in TN e di 29 kW in BT. I due impianti di refrigerazione sono stati progettati per poter funzionare sia come booster convenzionali con surriscaldamento standard sia come impianti con eiettore con surriscaldamento ridotto o nullo. Sono stati installati delle parti aggiuntive e della strumentazione di misura, per poter commutare al funzionamento in modalità booster tradizionale o con eiettori attivi, così da poter indagare sulle differenti modalità operative e di controllo. Gli eiettori recuperano parte del lavoro di espansione che sarebbe altrimenti perso nell'espansione dall'alta alla media pressione. Il lavoro recuperato è usato per inviare il liquido e il vapore dal separatore del liquido, posto a valle degli evaporatori TN, al ricevitore di media pressione, posto a monte di tutti gli evaporatori. Inoltre gli impianti sono equipaggiati con un separatore di liquido BT e due IHX, che permettono di aumentare l'omologa temperatura di evaporazione. Gli impianti lavorano

tutto l'anno nella modalità operativa con eiettore, così da avere un'alta efficienza con elevate temperature ambiente estive e durante il recupero di calore invernale.

Grazie all'eiettore del liquido e al separatore del liquido TN, la corrispondente pressione di aspirazione dell'impianto A è stata innalzata da -8°C a -2°C mentre nel caso dell'impianto B da -8°C a -3°C . Grazie inoltre al separatore di liquido in BT e ai due scambiatori di calore per il sottoraffreddamento del liquido, la pressione di aspirazione in BT degli impianti A e B è stata innalzata da -33°C a -26°C . Il set point del surriscaldamento degli evaporatori varia tra 0 K e 4 K, a seconda del tipo di evaporatore. Con questi set points, tutti i banchi e le celle TN e BT raggiungono la richiesta temperatura nonostante l'incremento della temperatura di evaporazione. Si ritiene che un incremento della temperatura di evaporazione permetta di ridurre i cicli di sbrinamento degli evaporatori TN.

Si nota che il consumo di energia degli impianti A e B a seguito dell'avviamento è stato ridotto tra il 15 e il 20% commutando alla modalità operativa con eiettore. Inoltre traspare che in questa modalità operativa gli impianti hanno un comportamento stabile. Il numero di cicli di accensione e spegnimento dei compressori è ridotto rispetto agli impianti convenzionali. Pure la temperatura di evaporazione denota un comportamento stabile. I set point dell'evaporazione dei compressori TN e BT variano secondo il livello del liquido nei rispettivi separatori, anche se questa funzione si potrà modificare nei prossimi impianti facendo variare il surriscaldamento degli evaporatori. Inoltre, si intravede del potenziale per l'ottimizzazione dei prossimi impianti progettandoli in modo leggermente diverso e semplificandoli.

Il calcolo dell'impianto con le opportune temperature di evaporazione ed ambiente consente di prevedere un aumento di efficienza della centrale del 20%. A seconda dell'applicazione, della regione climatica e della richiesta di recupero di calore, il potenziale di miglioramento dell'efficienza su base annua di un impianto con eiettore rispetto ad un tradizionale sistema R744 con compressione parallela, è compreso tra il 15 e il 25%.

Nomenclatura

HT	alta temperatura (compressore parallelo)
TN	temperatura normale o media temperatura
BT	bassa temperatura
IHX	scambiatore di calore interno

Riferimenti

Banasiak K., Hafner A., and Andresen T., Experimental and numerical investigation on R744 ejector geometry, Proceedings of The 23rd International Congress of Refrigeration, ISBN 978-2-913149-89-2, Prague, Czech Republic, 2011

Schönenberger J.: Frigo Consulting Ltd., DKV AA III.10 Effiziente Kälteerzeugung im Supermarkt mittels CO₂-Booster-Kälteanlage und Ejektor, DKV-Tagung, Hannover 2013

Sergio Giroto, S. M. (2008). Refrigeration systems for warm climates using only CO₂ as a working fluid. In V. Hasse, Proklima - Natural refrigerants - Sustainable ozone- and climate-friendly alternatives to HCFCs (S. 287-301). Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.

