

Comparazione tecnico-economica tra due aero-evaporatori funzionanti con formazione di brina

Umberto Merlo

LU-VE S.p.A., 20140 Uboldo, Va, Italy
Aprile 2010

1. Introduzione

Il presente documento si propone di illustrare i risultati sperimentali ottenuti dalla comparazione di un aero-evaporatore LU-VE e di un COMPETITOR, nelle condizioni di prova standard (senza contributo latente) e nelle condizioni con formazione di brina.

La maggior parte degli aero-evaporatori funzionano nelle celle frigorifere con formazione di brina, cioè con alti quantitativi di umidità relativa nell'aria. Le prove eseguite in queste condizioni, ci permettono di comprendere nella sua globalità, il comportamento della macchina durante tutto il ciclo reale di funzionamento; da questo, si potranno determinare i costi globali di esercizio, comprensivi dei costi relativi alla sola ventilazione, dello sbrinamento e infine, dell'unità di compressione.

In questo studio sperimentale, metteremo ancora una volta in evidenza il fatto che la superficie esterna (alette + collari) non sia - per un gran numero di applicazioni - un parametro fondamentale per la scelta di un aero-evaporatore.

In dettaglio, vedremo che nonostante l'aero-evaporatore LU-VE abbia il 60% in meno di superficie esterna, riesca ad avere costi di esercizio inferiori dell'8%.

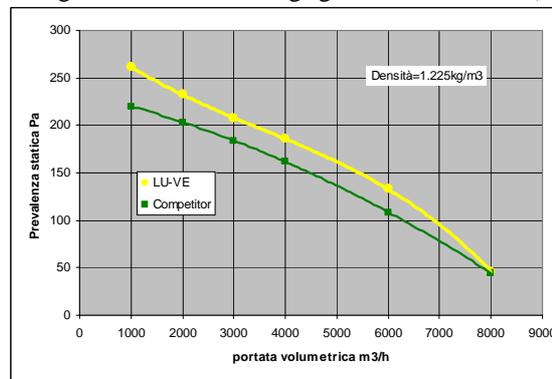
2. Prove di portata d'aria e di potenza frigorifera nelle condizioni standard SC4 (in assenza di contributo latente)

Le prove sperimentali sono state condotte partendo dalla determinazione della portata d'aria e la curva caratteristica del ventilatore (accoppiato alla batteria di scambio), nonché dei relativi assorbimenti elettrici.

Queste informazioni, oltre a permettere un confronto diretto con il dato dichiarato a catalogo, ci permetterà di comprendere come sarà il decadimento della portata d'aria in funzione del carico di brina depositato sulla superficie esterna.

Chiaramente, più la curva si mantiene "verticale", magari senza inversioni di concavità ("punto di sella"), migliore sarà il comportamento dell'aero-evaporatore durante la prova di brina.

Questa caratteristica del gruppo ventilante dipende anche dalla ottimizzazione della conformazione del boccaglio e della griglia (LU-VE utilizza boccaglio alto, gioco radiale ridotto, griglie direzionali, ecc.).



Le prove standard di potenza frigorifera sono state eseguite nelle condizioni SC4, ovvero:

temperatura di cella = -25°C

temperatura evaporazione = -31°C

surriscaldamento pari allo 0,65 del DT1

temperatura liquido a monte della valvola di laminazione = 20°C.

In queste condizioni, tra le più gravose per un aero-evaporatore, si sono ottenuti i risultati riportati in tabella.

| Modello | Diam. ext | Tipo tubo | Passo | Sp. alette | Fluido refrig. prova | Portata aria | | | Delta % | SC | Potenza termica | | Delta % | Potenza Assorbita | | Delta % | Superficie | | Delta % |
|-----------------------|-----------|-----------|-------|------------|-------------------------|--------------|-------|----------|------------|-------|-----------------|----------|------------|-------------------|-----------|------------|------------|-------|------------|
| | mm | | mm | mm | | m3/h | m3/h | CAT/TEST | | | TEST | CATALOGO | | TEST | R404A dry | | TEST | R404A | |
| F50HC 1806 E 7 - LUVE | 13,15 | RIGATO | 7,50 | 0,30 | R507A | 15474 | 16200 | 4,7 | 4 | 11780 | 12510 | -6,0 | 1340 | 1400 | 4,5 | 54,7 | 54,3 | -0,7 | |
| COMPETITOR | 13,45 | RIGATO | 7,00 | 0,15 | R507A | 15072 | 15100 | 0,2 | 4 | 11485 | 10130 | 13,4 | 1500 | 1540 | 2,7 | 87,2 | 94,4 | 8,3 | |
| DELTA COMPETITOR/LUVE | | | -7% | -50% | | -3% | -7% | | | -2% | -19% | | 12% | 10% | | 59% | 74% | | |

In tabella sono riportati nella prima parte le caratteristiche costruttive della batteria di scambio termico; nella seconda parte sono indicati i confronti tra i dati sperimentali di portata aria, potenza frigorifera, assorbimenti elettrici e superficie esterna, rispetto ai valori dichiarati a catalogo.

La portata d'aria e gli assorbimenti elettrici dei gruppi ventilanti sono contenuti entro le tolleranze EUROVENT, mentre la potenza frigorifera e la superficie esterna dell'aero-evaporatore del COMPETITOR sono esterni ai limiti imposti. In particolare, si è notato che l'apparecchio COMPETITOR ha delle carenze progettuali per funzionamento in bassa temperatura, di conseguenza la potenza frigorifera ne ha risentito sensibilmente, tanto che lo scostamento dal dato di catalogo è del 13,4%.

Un altro punto a favore di LU-VE riguarda la migliore efficienza del gruppo ventilante (+15%); in quanto, a fronte di una maggiore portata d'aria (+2,5%), si hanno minori assorbimenti elettrici (-11%).

Inoltre, l'apparecchio LU-VE utilizza spessori di aletta superiori (in questo caso il doppio: 0,30 vs. 0,15 mm), questo per migliorare la robustezza delle alette, il processo tecnologico di costruzione dei collari e l'efficienza (parametro molto importante nelle geometrie ampie, come quelle degli aero-evaporatori).

Vorrei sottolineare come l'aero-evaporatore LU-VE, avente il 60% di superficie esterna in meno rispetto al COMPETITOR, esprima la stessa potenza frigorifera (dati di catalogo), questo grazie alle superfici specializzate e una migliore logica progettuale. In realtà, i dati sperimentali dimostrano che la potenza frigorifera dell'apparecchio COMPETITOR è addirittura inferiore del 19%.

Infine, se consideriamo il rapporto tra la potenza frigorifera sperimentale e la potenza assorbita dai ventilatori nelle due configurazioni, otteniamo dei risultati sorprendenti:

- LU-VE: $12510/1340=9,34$ (+38%)
- COMPETITOR: $10130/1500=6,75$.

3. Prove in brinatura (con contributo sensibile e latente)

Le prove con formazione di brina sulla superficie alettata sono state condotte alle seguenti condizioni operative:

temperatura di cella = -10°C,

umidità relativa = 85%

temperatura evaporazione media = -20,5°C,

surriscaldamento = 5,0°C

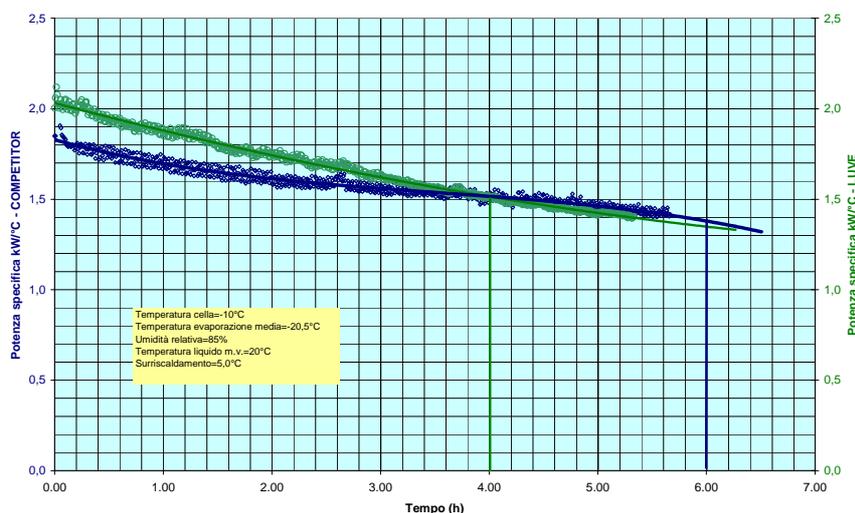
temperatura liquido a monte della valvola di laminazione = 20°C.

La metodologia di prova utilizzata è la seguente: inizialmente si sono trovate le condizioni stazionarie di funzionamento con bassi valori di umidità relativa, dopodiché è stato immesso vapore in camera calorimetria, in maniera uniforme, raggiungendo il valore di 85%. A questo punto, mantenendo costante la temperatura e umidità relativa in camera, si è registrato in continuo il decadimento della potenza frigorifera e della relativa temperatura di evaporazione.

Quando la potenza frigorifera si è ridotta del 25% rispetto al valore iniziale, l'impianto è stato fermato ed azionato lo sbrinamento elettrico; concluso quest'ultimo, il ciclo base di funzionamento dell'aero-evaporatore si è considerato concluso.

Di seguito si riporta il grafico ottenuto sperimentalmente della potenza frigorifera specifica in funzione del tempo (in verde evaporatore LU-VE, in blu evaporatore COMPETITOR).

La potenza specifica è definita come il rapporto tra la potenza frigorifera e il DT1 (in condizioni senza formazione di brina, tale rapporto si mantiene costante nel tempo).



Nelle condizioni iniziali sopra indicate, la differenza di potenza frigorifera è di circa il 14% (a vantaggio LU-VE); tale scostamento, durante il funzionamento in continuo, si annulla dopo circa 4 ore; punto in cui, l'apparecchio LU-VE ha raggiunto il 25% di decadimento delle prestazioni, e di conseguenza occorre azionare il sistema di sbrinamento elettrico. L'evaporatore COMPETITOR ha impiegato un tempo di 6 ore per raggiungere tale limite.

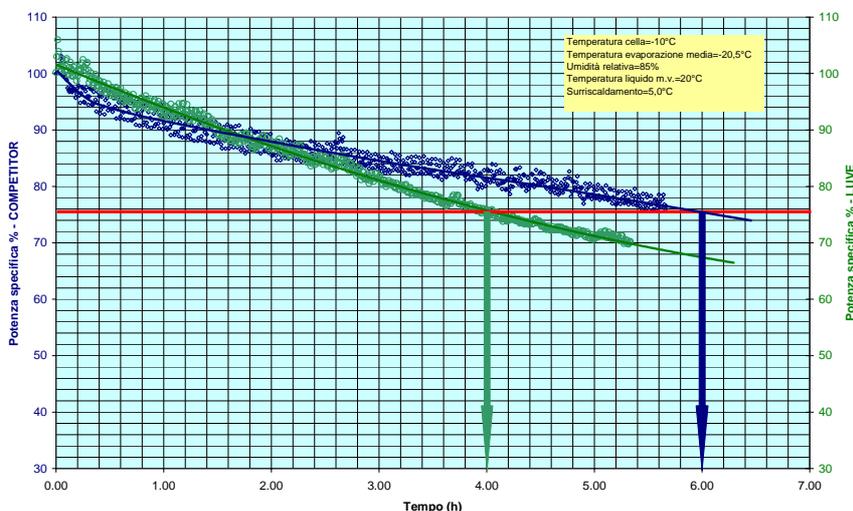
Nella pratica, questi tempi limite di funzionamento devono essere aumentati di un fattore di utilizzo (rapporto: ore funzionamento compressore/ore totali giorno), cioè un coefficiente che tiene conto del fatto che gli evaporatori non funzionano in continuo, ma vengono dimensionati con un certo margine di sicurezza, di conseguenza il gruppo frigorifero, raggiunta la temperatura di cella impostata, si ferma.

Per eguagliare l'energia frigorifera netta/utile asportata dalla cella frigorifera (es. su base giorno), dalle due macchine analizzate, occorre considerare un fattore di utilizzo 0,67 per COMPETITOR (valore normalmente utilizzato) e 0,63 per

LUVE, in quanto esprime una maggiore potenza frigorifera media (es. $F_u=0,67$: $24 \times 0,67=16$ h compressore On, 8 h compressore Off).

Di conseguenza, il “tempo reale di funzionamento per ciclo” è di $4/0,63=6,35$ ore per LU-VE e di $6/0,67=8,96$ ore per COMPETITOR.

Il grafico sotto riportato mostra in termini percentuali il decadimento di potenza frigorifera in funzione del tempo. Esso ci permette di definire il tempo limite di funzionamento dell’aero-evaporatore, prefissando un valore di decadimento delle prestazioni rispetto al dato iniziale (es. -25%: valore oltre il quale la valvola termostatica incomincia a rendere instabile l’impianto frigorifero). Si ottengono così i tempi sopra menzionati: 4 ore per LU-VE e 6 ore per COMPETITOR.



A questo punto, avendo ricavato sperimentalmente tutte le informazioni circa il comportamento durante la formazione di brina dei due aero-evaporatori, sia in termini di potenza frigorifera, assorbimenti elettrici dei ventilatori e i parametri dello sbrinamento (tempo e consumi), possiamo procedere al confronto economico ed energetico.

4. Conclusioni (confronto economico ed energetico)

Le elaborazioni delle informazioni ricavate sperimentalmente sono sinteticamente riportate nella tabella sottostante.

In essa vengono indicati i valori di potenza frigorifera specifica all’inizio e alla fine del ciclo di brinatura, il passo delle alette, la superficie esterna, il flusso termico specifico iniziale riferito alla superficie esterna, la potenza iniziale assorbita dai ventilatori, la potenza assorbita dalle resistenze elettriche durante lo sbrinamento, il fattore di utilizzo definito in precedenza (cioè il fattore moltiplicativo delle ore totali (es. 24 ore giorno) per ottenere il tempo reale di funzionamento dell’evaporatore), il tempo di brinatura, il tempo di sbrinamento, il numero di cicli giornaliero, lo spessore di brina depositato sulle alette e collari (valore medio), il COP medio del ciclo, l’energia frigorifera utile/netta giornaliera (mantenuta costante nei due evaporatori modificando il fattore di utilizzo) e infine i costi di esercizio (totali e le percentuali relative al componente: compressore, ventilazione e sbrinamento).

| Tipo aero-evaporatore | Dati sperimentali | | | | | | | | | | | | | | Costo esercizio | | | |
|-----------------------|-------------------|--------|-------|---------|----------|---------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|----------|------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-----|
| | Potenza specifica | | Passo | Sup ext | Dry flux | Pass Ve | Pass Res | Futilizzo | Tempo | Tempo | n° cicli | Spessore | COP | En. Frigo utile | Costo esercizio | | | |
| | iniziale | finale | | | | | | | brinatura | sbrinamento | | | | | giorno | brina | medio | tot |
| | W/C | | mm | m2 | W/m2°C | W | W | min | min | | mm | | kWh/giorno | €/anno | % | % | % | |
| COMPETITOR | 1800 | 1380 | 7,0 | 87,8 | 21 | 1500 | 11200 | 0,63 | 360 | 30 | 2,54 | 1,1 | 1,85 | 204 | 10665 | 70 | 23 | 7 |
| LUVE F50HC 1806E7 | 2100 | 1510 | 7,5 | 55,1 | 38 | 1340 | 7840 | 0,67 | 240 | 27 | 3,52 | 1,2 | 1,87 | 204 | 9829 | 72 | 21 | 7 |

Condizioni di prova : Tcella=-10°C, T evaporazione media=-20,5°C, UR=85%, Tlmv=20°C, Dtsurr.=5°C

Come già spiegato in precedenza, dato che l’evaporatore LU-VE ha espresso una maggiore potenza frigorifera, per eseguire un corretto confronto, a pari energia frigorifera utile (204 kWh/giorno), si è ridotto il fattore di utilizzo da 0,67 a 0,63; in questo modo si è considerata una riduzione di ore di funzionamento del ciclo frigorifero del 6%.

Dal punto di vista dello sbrinamento elettrico, si può notare che, il valore di potenza elettrica relativo alle resistenze di sbrinamento applicate all’evaporatore LU-VE è inferiore del -30% rispetto al COMPETITOR (minore superficie alettata da sbrinare), mentre il tempo di sbrinamento si mantiene pressoché lo stesso (circa 30 minuti); di conseguenza, anche se l’evaporatore LU-VE deve eseguire il 39% in più di sbrinamenti ($3,52/2,54$), l’energia consumata è comunque inferiore dell’13%; ovvero:

$$\begin{aligned} \text{energia consumata per sbrinamento LU-VE} &= 7,84 \times (27/60) \times 3,52 = 12,4 \text{ kWh/giorno} \\ \text{energia consumata per sbrinamento COMPETITOR} &= 11,2 \times (30/60) \times 2,54 = 14,2 \text{ kWh/giorno (+14,5\%)} \end{aligned}$$

Resta comunque da considerare che i risparmi energetici eseguiti sullo sbrinamento elettrico sono da pesarsi su una percentuale del costo di esercizio totale del 7% (valore inferiore di 10 volte rispetto al contributo del compressore).

In termini di consumo di energia elettrica per la ventilazione, abbiamo la seguente situazione:

$$\begin{aligned} \text{energia immessa per ventilazione LU-VE} &= 1,34 \times 4 \times 3,52 = 18,9 \text{ kWh/giorno} \\ \text{energia immessa per ventilazione COMPETITOR} &= 1,50 \times 6 \times 2,54 = 22,9 \text{ kWh/giorno (+21,2\%)} \end{aligned}$$

I costi totali di esercizio, nelle ipotesi sopra menzionate (costo energia elettrica: 0,14 €/kWh), sono di **10665 €/anno** per l'aero-evaporatore COMPETITOR e di **9829 €/anno** per quello LU-VE.

In sintesi, i costi operativi dell'aero-evaporatore COMPETITOR sono superiori dell'**8,5%** rispetto a quello LU-VE; di cui, il 4,2% è imputabile ai maggiori assorbimenti elettrici dei ventilatori, l'0,8% al sistema di sbrinamento e il 3,5% al compressore.

Il risparmio economico è di **836 €/anno** (10665-9829); tale valore, permette all'utilizzatore di ri-acquistare un NUOVO apparecchio LU-VE dopo soli **26 mesi** di funzionamento (a fronte di una vita minima degli aero-evaporatori di 10 anni).

Nell'ipotesi di spendere inizialmente il 20% in più nell'acquisto del prodotto LU-VE (equivalente a 300€), significherebbe avere impegnato 300€ con una resa annua composta del 40% per 10 anni.

Nella tabella sottostante è stato riportato il calcolo del P.B.T. dell'aero-evaporatore LU-VE rispetto al COMPETITOR; ipotizzando uno sconto del prezzo di listino del 50%, si ottiene un valore del tempo di recupero di **4,3 mesi!**

| Tipo aero-evaporatore | Listino | | Delta | Delta | P.B.T |
|--------------------------|---------|--------|--------|--------|-------|
| | | Sconto | prezzo | Ce | |
| | | 50% | € | €/anno | mesi |
| COMPETITOR | 2990 | 1495 | | | |
| LUVE F50HC 1806E7 | 3590 | 1795 | 300 | -836 | 4,3 |

Analizzando i costi operativi, ipotizzando che le due macchine avessero la stessa potenza frigorifera iniziale (e non il 14% di differenza), si otterrebbero comunque risultati migliori utilizzando l'aero-evaporatore LU-VE. Ovvero, il nuovo costo di esercizio totale sarebbe di 10152 €/anno, rispetto ai 10665 €/anno dell'aero-evaporatore COMPETITOR (+5,0%).

Oltre a tutti i vantaggi tecnici ed economici ampiamente illustrati, si può ribadire ancora una volta che, la maggiore superficie esterna dell'aero-evaporatore COMPETITOR implica - a pari potenza frigorifera utile/netta - uno svantaggio sensibile sui costi operativi.

Altri plus dell'aero-evaporatore LU-VE vs. COMPETITOR:

- o Bacinella già montata sulla macchina (e non a corredo come COMPETITOR)
- o Miglior rifinitura superfici carenatura
- o Minori costi impianto elettrico (linee, accessori, ecc.) per sbrinamento e ventilatori
- o Miglior cablaggi elettrici
- o Scarico bacinella e contro-bacinella coassiali (COMPETITOR: scarico contro-bacinella centrale e bacinella posteriore. Maggiore percorso acqua di sbrinamento tra i due scarichi – Pericolo di ghiaccio in bacinella!!)

5. Nomenclatura

TS' = temperatura ingresso aria evaporatore

UR = umidità relativa percentuale

Te = temperatura di evaporazione all'uscita dell'aero-evaporatore

DT1 = TS' - Te

P.B.T. = Tempo di recupero dell'investimento (non attualizzato)

COP = Coefficiente di prestazione ciclo frigorifero

Sup. Ext. = superficie alette + collari ("toccata" dal flusso dell'aria)

Dry flux = flusso termico specifico (potenza sensibile / superficie esterna / DT1)

6. Bibliografia

- o EUROVENT: Rating Standard for DIRECT EXPANSION FORCED CONVECTION UNIT
- o Norma Europea: EN 328
- o Giovanni Lozza, Umberto Merlo - An experimental investigation of heat transfer and friction losses of interrupted and wavy fins for fin-and-tube heat exchangers. International Journal of Refrigeration 24 (2001)
- o Refrigeration ASHRAE Handbook, 2008
- o Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing Inc, 1983.
- o Umberto Merlo - Analisi delle conseguenze tecnico ed economiche derivanti dall'impiego di aero-evaporatori e aero-condensatori aventi prestazioni inferiori a quelle nominali, 2008
- o Umberto Merlo – Le prestazioni della nuova serie di aero-evaporatori industriali CHS-LHS durante la formazione di brina, 2005