

NUOVO GAS COOLER A CO₂ PER OPERAZIONI DRY&WET

S. Filippini (*), **G. Mariani (**)**, **L. Perrotta (***)**, **U. Merlo (****)**

LU-VE Group

(*) stefano.filippini@luvegroup.com; (**) giovanni.mariani@luvegroup.com;
(***) livio.perrotta@luvegroup.com; (****) umberto.merlo@luvegroup.com

1. INTRODUZIONE

Concettualmente, sono possibili due modalità di utilizzo dell'acqua per potenziare lo scambio termico di gas cooler e condensatori:

- a) La prima consiste nell'effettuare un raffreddamento adiabatico dell'aria a monte dello scambiatore aumentandone l'umidità relativa, così da ottenere un maggior salto termico fra fluido da raffreddare e aria; per ottenere elevate efficienze da questo processo, è necessario fare attraversare l'aria in una matrice (pacco adiabatico) costituita da un insieme di fogli, in genere di cellulosa, caratterizzati da pieghe con inclinazione differente, alla cui sommità viene iniettata acqua. Nel pacco si realizza un flusso incrociato che determina un intenso contatto tra aria e acqua, favorendo l'evaporazione di quest'ultima a spese del calore fornito dall'aria, che quindi diminuisce la sua temperatura. Un significativo vantaggio di questa soluzione è la possibilità di adottare acqua di rete, senza limiti di durata temporale, grazie al limitato costo del pacco evaporante e alla semplicità della sua soluzione.
- b) La seconda consiste nello spruzzare direttamente sulle superfici dello scambiatore l'acqua, opportunamente trattata, al duplice fine di evitare depositi ed effetti corrosivi. In questo caso, l'evaporazione dell'acqua sottrae calore alle pareti dello scambiatore, che a loro volta lo prelevano dal fluido da raffreddare. L'esperienza dimostra che, nel caso si utilizzi acqua demineralizzata (ad esempio proveniente da un sistema a osmosi inversa) non sussistono limiti di durata temporale, laddove con acqua addolcita è prudentiale limitare il periodo annuo di spruzzo.

In entrambi i casi, solo una frazione della portata d'acqua immessa partecipa al processo, mentre la rimanente parte può essere dispersa, oppure raccolta in un serbatoio e reimpressa nel processo. Nella versione qui proposta, si prevede una soluzione che recupera la sola acqua spruzzata e non evaporata (quindi acqua addolcita o demineralizzata), riutilizzandola nei pacchi adiabatici, a valle dei quali l'acqua viene dispersa. La soluzione innovativa illustrata in questo lavoro prevede l'utilizzo in sequenza dell'acqua per entrambi i processi sopra descritti: si spruzza acqua trattata sulla batteria di scambio termico e si reimmette l'acqua non evaporata sul pacco adiabatico. Questo abbinamento delle due pratiche in serie (l'aria attraversa prima il pacco adiabatico e successivamente la batteria di scambio, l'acqua viene prima spruzzata sulla batteria di scambio termico e successivamente iniettata sul pacco adiabatico) ha effetti positivi sia sulla potenza termica scambiata sia sul consumo di acqua.

2. CASO STUDIO

Si è considerato un impianto industriale a CO₂ operante in regime transcritico e subcritico. Dati di design: potenza di refrigerazione richiesta 250 kW, temperatura di evaporazione - 9 °C, potenza termico al recuperatore di calore (stagione invernale) 200 kW max.

Si è simulato un ciclo semplice con recuperatore di calore e valvola di flash gas. La pressione intermedia e di evaporazione sono fissate, la pressione di mandata è variabile a seconda della temperatura esterna e in accordo con le richieste di calore e di freddo del carico. Quando il sistema opera in regime transcritico, è calcolata iterativamente la pressione di mandata che massimizza il COP. Si è considerato un rack formato da compressori tutti uguali operanti a frequenza fissa. Il rendimento isoentropico del compressore è funzione del rapporto di pressione, la relazione è stata estrapolata dai dati dei costruttori. Durante la stagione invernale, quando la temperatura ambiente è minore di 16 °C, l'impianto deve fornire energia per il riscaldamento. La temperatura minima della CO₂ accettabile all'uscita del recuperatore è 40 °C. Nella stagione estiva il recuperatore è spento e viene escluso. La temperatura di uscita della CO₂ è ridotta il più possibile per massimizzare il rendimento del ciclo. In questo modo il titolo di vapore nel separatore viene ridotto ed aumenta la portata di refrigerante inviata all'evaporatore. Nella definizione del COP, sono considerati effetti utili la potenza dell'evaporatore (costante) e la potenza ricavata dal recuperatore di calore (variabile durante periodo di funzionamento).

Si è condotta una simulazione di funzionamento annuale per valutare le prestazioni e i costi operativi del ciclo. Si sono utilizzati i dati climatici di tre città europee come rappresentative di una zona fredda (Stockholm), zona temperata (Paris) e zona calda (Trapani).

Tabella 1. Dati delle tre località assunti per il calcolo

<i>Location</i>	<i>T_{a design}, °C</i>	<i>HR, %</i>	<i>Cost of electricity, €/kWh</i>	<i>Cost of water, €/m³</i>	<i>Working pressure, bar</i>	<i>n° of fans</i>
Stockholm	26	39	0.07	0.83	86	8
Paris	32	32	0.10	1.54	89	10
Trapani	36	28	0.15	0.95	91	12

Sono state confrontate quattro soluzioni tecnologiche di gas cooler:

1. **DRY** Modello funzionante "a secco", unità "V-shape" da 8 a 12 ventilatori a seconda della località (tecnologia tradizionale).
2. **SPRAY** Modello simile al precedente, ma equipaggiato con un sistema spray per bagnare la superficie di scambio termico (tecnologia spray attuale).
3. **AP** Modello simile a DRY, ma equipaggiato con un pannello adiabatico mantenuto umido da un flusso d'acqua.
4. **EMERITUS** Modello simile ai precedenti, ma con entrambi i sistemi spray e pannello adiabatico, la portata d'acqua utilizzata sul pannello è pari alla frazione non evaporata sulla batteria di scambio termico.

Con le soluzioni ad umido il COP aumenta del 60% (fig. 2); ciò permette, a pari potenza di refrigerazione, di ridurre la taglia del compressore e di compensare l'extra costo del gas cooler. I costi operativi annuali includono la potenza assorbita dai compressori e tutti i costi del gas cooler: potenza assorbita dai ventilatori, acqua usata dal sistema spray, costi di manutenzione. I costi di energia elettrica ed acqua sono assunti come indicato in tabella 1.

3. RISULTATI

Per ogni località sono presentati i risultati delle simulazioni annuali. Per primo viene presentato il dettaglio della zona temperata utilizzata come riferimento.

La fig. 1 mostra la temperatura di uscita della CO₂ in funzione della temperatura ambiente. Quando il gas cooler opera a secco, fino a 17 °C, la temperatura di uscita è la medesima per tutti i modelli, 3 K al di sopra della temperatura ambiente di bulbo secco. Il valore minimo della temperatura di uscita è pari alla temperatura di saturazione corrispondente alla pressione del ricevitore (sempre costante). Il modello DRY mantiene questo approccio per tutto l'anno. Il modello spray, superati i 24 °C, mantiene un differenza di temperatura di 4 K (3 K per la configurazione EMERITUS) con la temperatura di bulbo umido; questo permette di operare con temperatura di uscita della CO₂ inferiore ed aumentare il rendimento del ciclo. I modelli AP ed EMERITUS funzionano in modo analogo, in aggiunta l'attivazione del pannello adiabatico, a partire da 17 °C, permette una riduzione della temperatura di uscita.

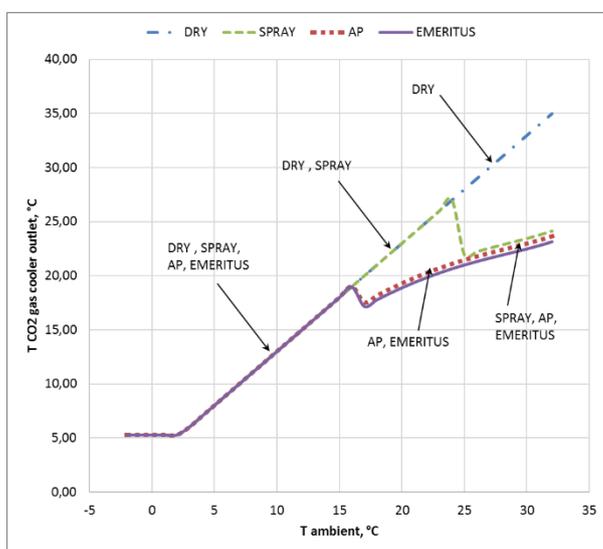


Figura 1. Temp. di uscita della CO₂ vs. temp. ambiente

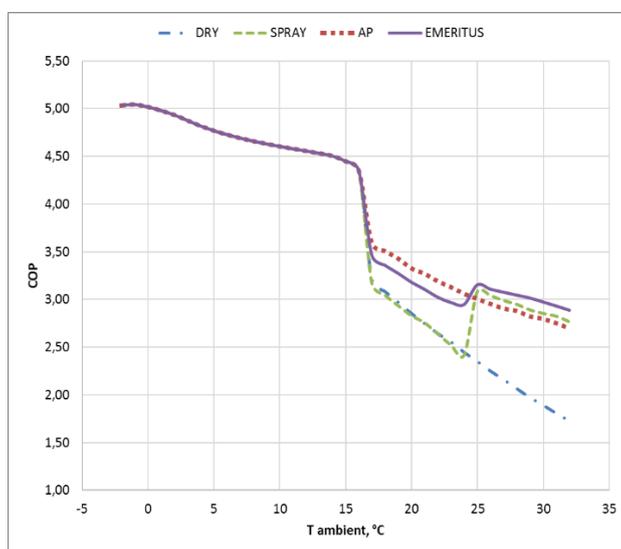


Figura 2. COP vs temperatura ambiente

La figura 2 mostra il COP del ciclo. Durante la stagione invernale ($T_{amb} < 17$ °C), le prestazioni diminuiscono all'aumentare della temperatura ambiente. Il calo di rendimento a 17 °C è dovuto all'assenza del recupero di calore come effetto utile. Le unità funzionanti a umido permettono di operare a pressione di mandata inferiore e pertanto consentono rendimenti maggiori; il modello EMERITUS, in questo esempio, opera sempre in condizione subcritica. Interessante è notare che la massima potenza elettrica necessaria con le soluzioni a umido è circa la metà di quella richiesta dalla soluzione a secco; questo è un vantaggio in termini di costi di installazione e impianto.

In tabella 2 sono riassunti i costi relativi annui, il riferimento è il costo totale della soluzione DRY. L'energia elettrica del compressore è la componente maggiore del costo totale, oltre il 90%. L'energia assorbita dai ventilatori del gas cooler è limitata per tutte le soluzioni. Il costo dell'acqua, massimo per la soluzione EMERITUS, è circa il 3.8% del totale. I costi di operating and maintenance sono trascurabili. In confronto alla soluzione DRY, EMERITUS e AP mostrano un risparmio sui costi operativi annui del 5% e 3%, in questo caso la configurazione SPRAY non migliora le prestazioni annuali.

Tabella 2. Costi operativi annuali, Paris

	<i>compressor</i>	<i>fans</i>	<i>water</i>	<i>O&M (*)</i>	<i>total</i>	<i>saving, €/year</i>
DRY	98.6%	1.39%	0.00%	0.05%	100.0%	-
SPRAY	97.4%	1.37%	0.97%	0.34%	100.1%	-98
AP	91.6%	1.43%	3.57%	0.27%	96.9%	3162
EMERITUS	89.3%	1.39%	3.88%	0.49%	95.1%	5033

La stessa analisi è stata fatta per la zona calda e la zona fredda. Le considerazioni generali sono le medesime della zona temperata.

Nella zona fredda tutte le configurazioni mostrano risultati simili. Le soluzioni a umido non portano vantaggi significativi e probabilmente è consigliabile utilizzare il modello a secco.

Tabella 3. Costi operativi annuali, Stockholm

	<i>compressor</i>	<i>fans</i>	<i>water</i>	<i>O&M (*)</i>	<i>total</i>
DRY	99.0%	0.96%	0.00%	0.07%	100.0%
SPRAY	98.2%	0.96%	0.66%	0.50%	100.3%
AP	96.7%	0.98%	1.18%	0.40%	99.2%
EMERITUS	96.4%	0.96%	1.39%	0.71%	99.4%

Nella zona calda le configurazioni a umido mostrano i maggiori vantaggi. La soluzione EMERITUS permette un risparmio del 9% dei costi operativi. Il costo dell'acqua è compensato largamente dal risparmio sul compressore. Il beneficio portato dai sistemi spray è un risparmio annuo di circa 50 € per kW di potenza frigorifera.

Tabella 4. Costi operativi annuali, Trapani

	<i>compressor</i>	<i>fans</i>	<i>water</i>	<i>O&M (*)</i>	<i>total</i>	<i>saving, €/year</i>
DRY	97.5%	2.52%	0.00%	0.03%	100.0%	-
SPRAY	95.4%	2.48%	0.40%	0.21%	98.5%	2467
AP	88.2%	2.61%	2.66%	0.17%	93.6%	10581
EMERITUS	85.6%	2.51%	2.78%	0.30%	91.2%	14685

(*): O&M: operation and maintenance

CONCLUSIONI

L'analisi mostra il potenziale dei sistemi ad acqua "chill booster" in gas cooler ad aria fin-and-tube. Mentre l'uso di sistemi spray sulla batteria di scambio o l'uso di pannelli evaporativi sono applicazioni ben note, l'uso sinergico di entrambi i sistemi (chiamato EMERITUS) è una nuova tecnologia. I risultati mostrano che l'uso di tecnologie avanzate è benefico per ridurre i costi operativi totali dell'impianto. L'impiego di gas cooler con sistemi a umido permette di rendere la CO2 efficiente anche in ambienti caldi.

Nel caso studio sono state analizzate tre zone climatiche: fredda, temperata e calda; sono stati mostrati risparmi sui costi operativi del 5% a Paris e del 9% a Trapani.

L'implementazione di questa soluzione, inoltre, permette di ridurre significativamente la taglia del compressore e la potenza elettrica installata.