



AEFYT



LA REVISTA OFICIAL DE LA INDUSTRIA DE REFRIGERACIÓN CON AMONÍACO ■ MAYO 2022

# CONDENSER

*Selects* UNA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS DE CONDENSER TRADUCIDOS AL ESPAÑOL

Es el Momento  
para Refrigeración  
de Baja Carga  
de **Amoníaco**







# FULL SPECTRUM GLOBAL SOLUTIONS



EVAPCO ofrece una gama completa de soluciones de condensadores para sus instalaciones. Desde totalmente evaporativos, hasta secos, junto con las soluciones híbridas y adiabáticas.

EVAPCO dispone de la solución de condensadores que minimiza sus costes operativos, reduce la huella de carbono y presupuesto.

**Estamos comprometidos con el suministro de soluciones que sean energéticamente eficientes y que ahorren agua.**

Para más información puede visitar: [www.evapco.eu](http://www.evapco.eu)



BY GARY SCHRIFT



# mensaje del

# PRESIDENTE

“**E**stamos encantados de compartir con ustedes una selección de nuestros artículos de la revista Condenser del IAR, traducidos al idioma español por nuestra Asociación Aliada en España: AEFYT. La visión del IAR es crear un mundo mejor a través del uso seguro y eficiente de refrigerantes naturales. Pensamos que estas ediciones son una forma efectiva

en que podemos lograr precisamente eso. Con la ayuda de nuestros aliados en España y en todo el mundo, estamos seguros de que los refrigerantes naturales como el amoníaco, el CO<sub>2</sub> y los hidrocarburos proporcionarán un futuro sostenible y próspero para todos. Esta selección de artículos ha sido agrupada por temas principales que reflejan un aspecto importante de la industria de

refrigeración con refrigerantes naturales. En IAR y AEFYT esperamos que este esfuerzo conjunto para comunicar las últimas noticias e información dentro de la industria brinde a nuestros miembros de habla hispana conocimientos nuevos, información útil y recursos para expandir el uso seguro y sostenible de los refrigerantes naturales. Si desea leer el artículo original de la revista Condenser en inglés, visite el sitio web del IAR en: [www.iar.org](http://www.iar.org). ¡Esperamos que los disfrute!”

*“We are delighted to share with you a selection of our IAR’s Condenser Magazine articles, translated to the Spanish language by our Allied Association in Spain: AEFYT. IAR’s vision is to create a better world through the safe and efficient use of natural refrigerants. We believe this is one way we can achieve just that. With the help of our partners in Spain and around the world, we are confident that natural refrigerants such as ammonia, CO<sub>2</sub> and hydrocarbons will provide a sustainable and prosperous future for all. This selection of articles has been grouped by main themes that reflect an important aspect of the natural refrigeration industry. We at IAR and AEFYT hope that this joint effort in communicating the latest news and information within the industry provides our Spanish speaking members with new insights, useful information and resources to expand the safe and sustainable use of natural refrigerants. If you would like to read the original Condenser Magazine article in English, visit the IAR website at: [www.iar.org](http://www.iar.org). Enjoy!”*



BY MANUEL LAMÚA



# mensaje del

# GERENTE

“**E**n AEFYT siempre se ha valorado positivamente las acciones desarrolladas por el IAR sobre la difusión de conocimiento relacionado con el uso del amoníaco como refrigerante. La revista Condenser del IAR es una publicación muy potente con contenidos teóricos, tecnológicos y promocionales muy interesantes. Al plantear al IAR que

una forma de colaboración podía ser la traducción de artículos agrupados temáticamente para una publicación conjunta, les pareció una idea estupenda ya que aumentaba la difusión del trabajo desarrollado previamente por IAR creando a la vez documentos temáticos en español sobre asuntos importantes en refrigeración industrial. Con la ayuda del IAR, queremos aportar nuestro granito

de arena facilitando la transmisión de conocimiento que permita la instalación segura de los sistemas frigoríficos, para que los refrigerantes naturales como el amoníaco, CO<sub>2</sub> e hidrocarburos, aporten soluciones sostenibles en un mundo donde el frío es cada día más necesario. Esperamos que la lectura de los artículos sea agradable y quede la misma se extraigan conocimientos útiles. Y nada más, visite nuestra web [www.aefyt.es](http://www.aefyt.es). Gracias.”

*“At AEFYT, we always have valued IAR’s work on expanding the knowledge for the safe use of ammonia as a refrigerant. The Condenser Magazine published by IAR is a powerful publication with very interesting theoretical, technical concepts, and promotional content. When we proposed collaborating in the translation of these articles for a joint publication to IAR, they agreed this would be a great idea, which will expand on the work previously done, while sharing common themed documents in the Spanish language on important issues in industrial refrigeration. With the help of IAR, AEFYT wants to contribute with a ‘grain of sand’ to facilitate this transmission of knowledge for the safe installation of refrigeration systems. In this way, natural refrigerants such as ammonia, CO<sub>2</sub> and hydrocarbons can provide sustainable solutions in a world where ‘cold’ is every day more necessary. We hope that you will find reading of these articles enjoyable, and that they provide you with useful knowledge. Feel free to visit our website [www.aefyt.es](http://www.aefyt.es). Thank you”*



# Es el Momento para Refrigeración de Baja Carga de Amoníaco

Entre los refrigerantes industriales, el amoníaco se ha erigido como claro ganador gracias a su inigualable combinación de eficiencia, rentabilidad y respeto al medio ambiente. Pero a pesar de más de un siglo de experiencia satisfactoria en refrigeración industrial con un histórico récord de seguridad, el amoníaco nunca ha sido bien aceptado como refrigerante para aplicaciones en el entorno urbano, sobre todo debido a su leve inflamabilidad, olor irritante y toxicidad.

Sin embargo, hay un factor que hace que el amoníaco sea particularmente adecuado para este tipo de aplicaciones, según Pega Hrnjak, profesor y codirector del Centro de Aire Acondicionado y Refrigeración de la Universidad de Illinois, en Urbana Champaign.

El amoníaco es uno de esos pocos refrigerantes cuyo vapor es más ligero que el aire. Esta característica proporciona al amoníaco una ventaja de seguridad, ya que el vapor refrigerante no puede aumentar su concentración en el aire libre. El vapor se diluye en la atmósfera si se descarga verticalmente hacia arriba con suficiente velocidad.

Además, en los intercambiadores de calor de microcanales, el amoníaco tiene la menor necesidad de carga en comparación con cualquier otro refrigerante utilizado actualmente. Esto significa menos refrigerante en el sistema y menos refrigerante que podría liberarse accidentalmente.

En la ponencia titulada "Enfriadoras de baja carga basados en intercambiadores de calor de microcanales: Oportunidad para extender el uso del amoníaco", presentada por primera vez en la conferencia anual de 2009 del Instituto Internacional de Refrigeración en Ohrid (Macedonia), Hrnjak analiza las opciones para ampliar el uso del amoníaco en zonas urbanas utilizando enfriadoras de baja carga, para aire acondicionado, refrigeración o la etapa de alta de un sistema en cascada.

El artículo completo, presentado en las siguientes páginas de Condenser, se centra en la reducción de la carga en los intercambiadores de calor, y especialmente en los condensadores de microcanales, junto con el uso de compresores herméticos.

# Enfriadoras de baja carga basados en intercambiadores de calor de microcanales: oportunidad para extender el uso del amoníaco

Pega Hrnjak, Profesor y Co-Director, Air Conditioning and Refrigeration Center University of Illinois, Urbana Champaign President, Creative Thermal Solutions  
Traducido por Javier Cano, INTARCON

## RESUMEN

Este artículo analiza las opciones para ampliar el uso del amoníaco en zonas densamente pobladas utilizando enfriadoras de baja carga para acondicionamiento de aire, refrigeración o la etapa de alta de un sistema en cascada. Se pone especial atención en la reducción de la carga en los intercambiadores de calor, especialmente en los condensadores de microcanales, junto con el uso de compresores herméticos de nuevo desarrollo.

## 1. DECLARACIONES BÁSICAS

No cabe duda que el amoníaco es un refrigerante muy eficaz, barato y natural. Más de un siglo de probado éxito en refrigeración industrial ha compensado la leve inflamabilidad, el mal o alarmanante olor y la leve toxicidad de este refrigerante. Sin embargo, el amoníaco nunca ha sido bien aceptado como refrigerante para aplicaciones en entornos urbanos, sobre todo por su olor, que podía causar pánico en personas no familiarizadas con él. Por otro lado, el amoníaco es también uno de los pocos refrigerantes cuyo vapor es más ligero que el aire. Esa característica posiciona al amoníaco como una ventaja segura porque el vapor refrigerante no puede aumentar su concentración en el aire libre, evitando así que se alcancen valores de concentración superiores al LII (límite inferior de inflamabilidad) cuando se prevén vías de escape ascendentes y sin obstáculos. Además, el amoníaco tiene la menor necesidad de carga de refrigerante en los intercambiadores de calor de microcanales en comparación con cualquier otro refrigerante utilizado en la actualidad. Esto supone una excelente oportunidad para el uso del amoníaco como refrigerante en zonas urbanas: plantas enfriadoras herméticas de muy baja carga ubicadas en cubierta con la posibilidad de descarga libre de refrigerante a la atmósfera.

Tales sistemas de amoníaco de baja carga, pequeños (comparados con los de tamaño industrial), y en particular las plantas enfriadoras de líquido o chillers, utilizados para la refrigeración (comercial, supermercados, o similar) o el

aire acondicionado, con un refrigerante secundario como parte de un circuito de distribución o como etapa de alta temperatura de un sistema en cascada, proporcionan un excelente potencial para la extensión del amoníaco en el mercado. De este modo, se pueden aprovechar al máximo las excelentes propiedades termodinámicas y termofísicas del fluido, haciendo posible que los sistemas cumplan con las restricciones locales gracias a la muy baja carga.

Estos sistemas son posibles e incluso realistas gracias a los recientes avances en los condensadores de microcanales refrigerados por aire, los aceites miscibles (incluso funcionarían soluciones no miscibles), los evaporadores de expansión directa de baja carga y, particularmente, los compresores herméticos. Los compresores herméticos son muy importantes porque hacen que el amoníaco se asimile a cualquier refrigerante convencional utilizado hoy en día en las plantas enfriadoras.

El uso de intercambiadores de calor de microcanales fabricados en aluminio allana el camino para otra importante mejora potencial: la selección de materiales. El amoníaco siempre ha sido incompatible con el cobre. Eso ha supuesto un inconveniente frente a los sistemas que podían utilizar este material más ligero, más fácil de trabajar y menos corrosivo que el acero. La completa utilización de aluminio presenta otro potencial, aún no realizado, para una mayor competitividad del amoníaco. Con el aumento del coste del cobre, incluso en sistemas con refrigerantes convencionales, el aluminio está abriendo nuevas aplicaciones. Esta oportunidad debería aprovecharse para el amoníaco, y no deberíamos sorprendernos teniendo en cuenta algunos trabajos anteriores que incluyen condensadores de microcanales para amoníaco en pequeños sistemas (Litch y Hrnjak [9], [16], Hrnjak [18], [19]), mientras que por otro lado se anunció un nuevo compresor semihermético para su uso con amoníaco en la conferencia de Purdue de 2008.

## 2. POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE CARGA

En comparación con otros refrigeran-

tes, el amoníaco ofrece una excelente posibilidad de reducción de carga. Un primer análisis (que se suele presentar en función del flujo másico) indica altas pérdidas de presión en los flujos de amoníaco en comparación con otros refrigerantes. Esto es una consecuencia de la mayor velocidad del vapor de amoníaco más ligero y, por tanto, una mayor caída de presión para el mismo flujo de masa. Sin embargo, el alto calor latente del amoníaco puede dar lugar a una reducción de casi diez veces los caudales másicos necesarios para una misma potencia frigorífica. Un aspecto a menudo olvidado es que la mayor resistencia a la transferencia de calor en los condensadores está en el lado del aire, lo que reduce la necesidad de superficie de intercambio del lado del refrigerante.

Expondremos como el resultado global es muy positivo para el amoníaco en comparación con otros fluidos, lo que demuestra que el amoníaco puede funcionar muy bien en los intercambiadores de calor de microcanales. Además, la baja densidad del vapor contribuye a aumentar la fracción vacía en los intercambiadores de calor en comparación con otros refrigerantes.

Independientemente de las simplificaciones, estos resultados muestran claramente grandes oportunidades para la reducción de la carga de amoníaco en los intercambiadores de calor de microcanales en comparación con algunos otros refrigerantes. Los refrigerantes de bajo potencial de carga más cercanos en este ejemplo son los hidrocarburos, pero su alta solubilidad en aceite puede suponer otro problema a resolver.

La relativamente menor relación entre el área del lado del aire y del refrigerante en estos condensadores, en comparación con algunos diseños convencionales refrigerados por aire, se compensa con un coeficiente de transferencia de calor del lado del aire significativamente mayor.

Generalmente, la forma más sencilla de reducir la carga en los intercambiadores de calor es reducir el volumen interno mediante la reducción del diámetro interno, pero eso, en principio, aumenta la pérdida de carga. En

Tabla 1 : Potencial de reducción de carga en distintos refrigerantes

Refrigerante	Dp [kPa]	M dot [g/s]	A[mm <sup>2</sup> ]	M [g]
R12	9.58	17.84	123.5	43.3
R22	15.17	13.78	65.7	25.7
R134a	11.07	14.08	92.3	29.6
R290	12.82	7.49	58.3	10.1
R600a	5.66	7.37	140.1	13.8
R717	17.49	2.09	22.6	2.1
R410A	23.8	14.32	42.3	21.6

Figura 1 : Carga de refrigerante en los tubos de un condensador de microcanales de 2 m de longitud que generan una caída de presión que provoca una reducción del 1% del COP a Te=0°C y Tc=40°C

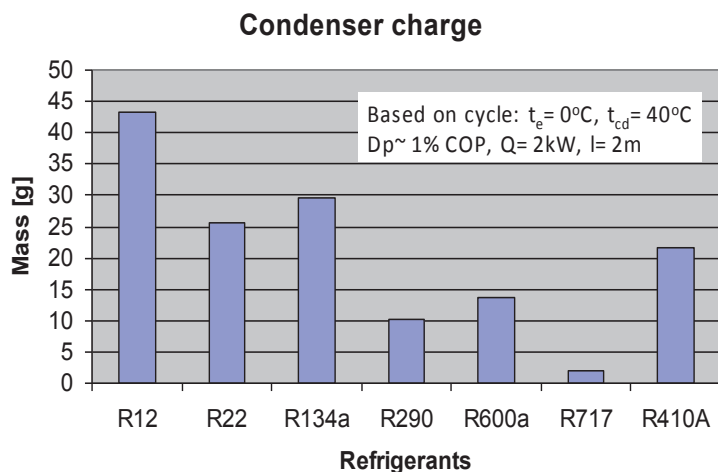
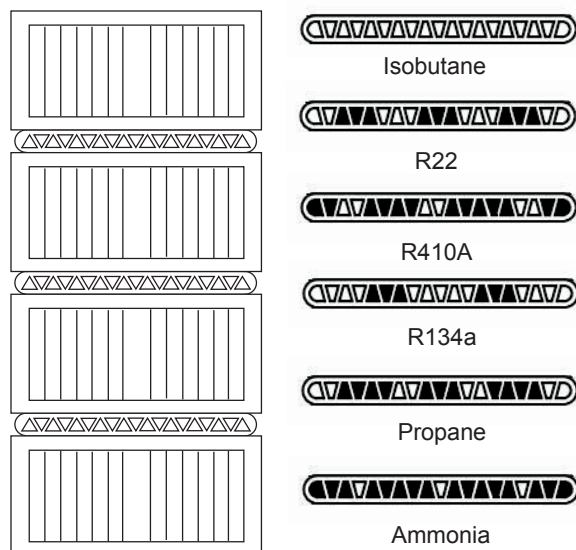


Figura 2: Lado del aire y del refrigerante en el mismo ejemplo



realidad hay opciones más efectivas para reducir la carga:

- Reducir el volumen interno, pero sin aumentar la pérdida de carga;
- Actuar sobre el flujo de masa para aumentar la fracción vacía;
- Introducir cambios en el tipo de intercambiador de calor.

La reducción del volumen interno sin un aumento de la caída de presión y de la resistencia a la transferencia de calor interna podría hacerse mediante la reducción del diámetro interno o el cambio de la forma (es decir, el aplanamiento de los tubos, que al final conducen a intercambiadores de calor de placas). Estas opciones modifican significativamente la relación superficie/volumen interna. El control de la caída de presión se realiza aumentando el número de pasos paralelos, con lo que se mantiene o incluso se reduce el flujo de masa. Este enfoque es muy eficaz, pero desgraciadamente da lugar otra serie de problemas: la distribución de la mezcla bifásica. Hay varias formas de mitigar los problemas de distribución, pero estas están fuera del alcance de este artículo.

Aumentar la fracción vacía requiere una comprensión detallada del tema. Aunque la fracción vacía ha sido estudiada en profundidad (véase Zivi [14], Butterworth [5], Newell [10], etc.), hasta donde sabemos no hay datos sobre el amoníaco en microcanales, salvo las publicaciones de Litch y Hrnjak [9] y Adams, Hrnjak y Newell [1]. Normalmente, un determinado fluido y título de vapor local, podría lograrse cierta reducción de la carga (aumento de la fracción vacía) aumentando el flujo de masa o de calor, afectando al régimen del flujo, tal y como se debate en [22].

Adams, Hrnjak y Newell [1] arrojan algo de luz sobre la fracción vacía para el amoníaco en microcanales. Los principales hallazgos se muestran en las dos figuras siguientes (3 y 4) que presentan los datos de la fracción vacía en función del título de vapor para tres flujos másicos, junto con las predicciones de correlación de los modelos homogéneo y de Nino et al. [11].

El aumento del flujo másico suele traducirse en un aumento de la caída de presión, a menos que el diseño pase a tener múltiples canales paralelos y una longitud reducida. El flujo paralelo ofrece amplias posibilidades, pero el límite es un diseño de un solo paso.



Figura 3: Fracción vacía de amoníaco en un microcanales de 6 puertos

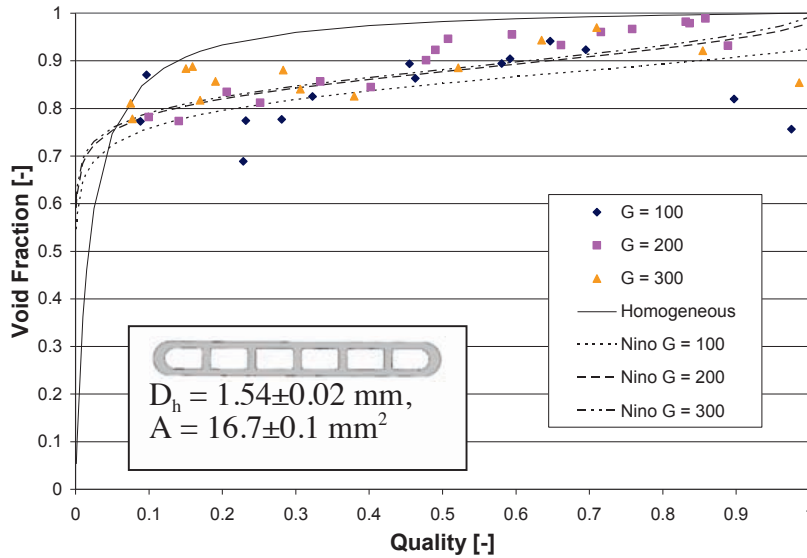
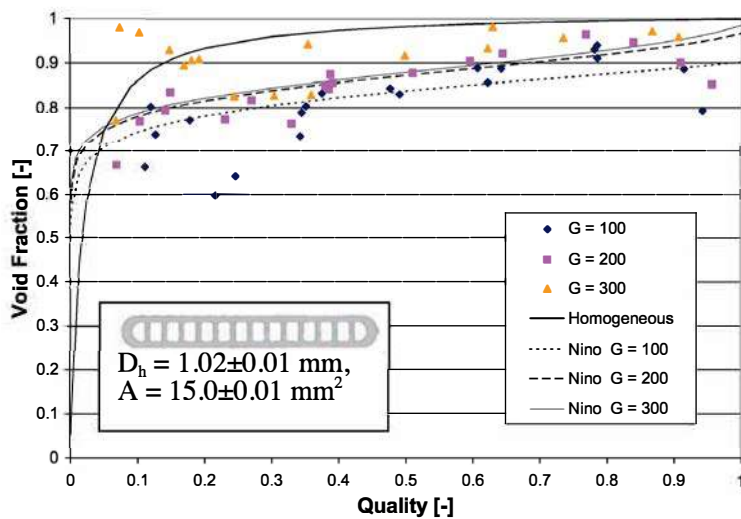


Figura 4: Fracción vacía de amoníaco en un microcanales de 14 puertos



Por otra parte, el flujo de calor, y en consecuencia el flujo másico, se ve afectado por la superficie de transferencia de calor. Normalmente, los intercambiadores de calor de aire se caracterizan por flujos de calor más pequeños. Aunque la menor transferencia de calor del lado del aire se compensa con aletas mejoradas, mientras que por su parte el agua mejora el flujo de calor y reduce la carga, se ha demostrado en varios casos que un condensador refrigerado por agua es, con mucho, más fácil y más efectivo en la reducción de carga que condensador refrigerado por aire.

### 3. ENFOQUE Y PROGRESO EN INTERCAMBIADORES Y SISTEMAS DE CALOR DE BAJA CARGA

La reducción del volumen interno suele aumentar la relación superficie-volumen y, por tanto, no afecta significativamente a la resistencia a la transferencia de calor (teniendo en cuenta que la transferencia de calor del lado del refrigerante casi nunca es el cuello de botella). Por lo tanto, reducir el diámetro hidráulico de manera que se minimicen los efectos de la caída de presión es un enfoque razonable. Una disposición en paralelo de los canales reduce la caída de presión, pero está limitada a un diseño de un solo paso. Llegado a este punto, el objetivo es el compromiso entre la caída de presión y la eficiencia.

Aumentar la fracción vacía mediante la manipulación del flujo de calor y masa ayuda en cierta medida. Las condiciones en las que se minimiza la retención de líquido suelen darse cuando las velocidades del líquido y del vapor son similares; esto ocurre sobre todo en los regímenes de flujo intermitente y de niebla. Los flujos másicos más elevados dan lugar a fracciones vacía ligeramente superiores. Los patrones de flujo en los microcanales también se ven afectados por la tensión superficial, ampliándose el rango en el que se observa el flujo intermitente, lo que resulta en fracciones vacía similares al flujo homogéneo en la mayor parte de la longitud del canal.

Los condensadores con eliminación intermedia de líquido ofrecen mejores características de transferencia de calor y menor retención de líquido, pero son más complejos. En el actual punto de desarrollo del intercambiador de calor, las menores cargas se han conseguido utilizando la solución de microcanales

Tabla 2: Inventario de refrigerante de los grandes intercambiadores de calor

Tipo de intercambiador	Carga específica [g/kW]
Carcasa y tubos	1000
Placas	500
Placas por gravedad	250

Tabla 3: Valores de carga específica de algunos evaporadores de amoníaco de spray

REF.	POTENCIA [KW]	CARGA DE NH3 [KG]	CARGA ESPECÍFICA [G/KW]
1	1408	159	113
2	2816	204	72
3	4189	227	54

## Enfriadoras de baja carga basados en intercambiadores de calor de microcanales: oportunidad para extender el uso del amoníaco

y se presentarán más adelante con más detalle. No obstante, la tecnología de microcanales no es la única forma de reducir la carga. Se han conseguido muy buenos resultados utilizando condensadores o evaporadores de placas (soldados, con juntas, con cassette, carcasa y placas soldadas, etc...) con agua, u otros fluidos, en el otro lado. La industria de la automoción ha desarrollado evaporadores de placas para enfriamiento de aire, pero su aplicación se limita todavía a la climatización móvil (aeronáutica, automóviles, vehículos todoterreno, etc.).

[9] presentaron los datos de algunos sistemas de amoníaco pequeños con cargas publicadas en la Tabla 4.

En el resumen de una década de reducción de carga, KTH, B. Palm [20] presentó un pequeño sistema de amoníaco (un montaje de laboratorio que simulaba una bomba de calor doméstica agua- agua) como parte del proyecto Sherhpa. Su mayor reto era hacer llegar el aceite al compresor en el sistema de expansión directa, por lo que utilizaron aceite miscible y un intercambiador de calor con canales estrechos. Se

la oportunidad de reducir aún más los costes. Esta situación genera las posibilidades de aplicación de los intercambiadores de calor de microcanales en áreas con volúmenes de producción tradicionalmente más bajos, siendo el amoníaco uno de ellos.

Litch y Hrnjak [9] presentaron datos de una planta enfriadora de amoníaco con un condensador de microcanales refrigerado por aire. El resultado fue la enfriadora de amoníaco condensada por aire con la carga específica más baja de la que se tiene constancia en la literatura.

Se evaluaron dos condensadores de aluminio: uno con un solo tubo en serpentín y el otro con una disposición de tubos en paralelo entre colectores, con 24 tubos en el primer paso y 14 en el segundo. Cada tubo tiene 19 puertos triangulares de igual dimensión con un diámetro hidráulico inferior a 1 mm.

Las aletas son multilamina. El condensador en serpentín consiste en un solo tubo que pasa 16 veces a través de las aletas. Hay cinco puertos cuadrados mejorados en el tubo. Para más detalles consulte Litch & Hrnjak [9].

Se tomaron mediciones del rendimiento global de la transferencia de calor y de la carga de refrigerante para cada condensador y para el sistema en su conjunto. El intercambiador de calor de microcanales con flujo paralelo obtuvo mejores resultados en todos los aspectos. En general, el rendimiento del condensador se cuantificó en términos de valores U para diferentes caudales de aire y condiciones de recalentamiento y subenfriamiento, y se presenta en la Figura 5.

Se tomaron mediciones de la carga de refrigerante del condensador en diferentes condiciones de funcionamiento.

Las mediciones de carga se comparan con los resultados calculados utilizando diferentes modelos de la fracción vacía. Todas las correlaciones de la fracción vacía arrojan una predicción similar de la carga total. La correlación de Newell (Newell et al. [1 0]) para el condensador en serpentín es la que tiene el menor error medio de 9.3 por ciento, con un máximo del 15,7 por ciento. Con las correlaciones de Butterworth [5] y Zivi [14], los errores medio y máximo son 10,1 / 22,8 por ciento y 12,3 / 24,9 por ciento, respectivamente. El ligero exceso de la predicción se explica por una sección subenfriada calculada que es mayor que la real, sobrestimando así la carga. Los datos de Adams, Hrnjak y Newell [1] se ajustan bien a la predicción. Estos

Tabla 4: Cargas específicas de refrigerante para algunas enfriadoras de amoníaco disponibles en el mercado

Sistema de planta enfriadora	Potencia Evaporador [kW]	Carga específica del sistema [g/kW]
<b>Refrigerado por aire:</b>		
Hrnjak & Litch (MC condenser)	13	18
Cecchinato & others	120	84
Refcomp VKA I 6- 1 4	16	125
York YSLC F4FO0UW	220	129
N.R. Koeling LK 25	25	159
<b>Refrigerado por agua:</b>		
Palm, KTH - Sherpa project	9	11
ILKA MAFA I 00.2-1 I K45	108	23
ABB (York) BX A	108	157 - 43
Gram (York) LC	38 - 228	228 - 37
Sabroe (York) PAC	57- 1074	172 - 36

Los evaporadores de spray también son conocidos por su baja carga. No hay que olvidar que en los intercambiadores de calor de microcanales una cantidad importante de líquido queda retenida en los cabezales.

Los valores típicos del inventario de refrigerante en grandes intercambiadores de calor industriales, según Pearson [13], se muestran en la Tabla 2.

Ayub en [1] a [3] informa sobre las bajas cargas en los evaporadores de pulverización y las recientes mejoras. Estos resultados se muestran en la Tabla 3

Pearson [13] informa de que el enfriador de "carga óptima" tenía una carga de 100g/kW. El valor óptimo tenía una carga adicional no especificada para fugas y funcionamiento. Litch y Hrnjak

utilizaron los mismos intercambiadores de calor de aluminio como condensador y evaporador. También se probaron los intercambiadores de calor de placas y funcionaron bien como condensadores, pero no como evaporadores debido a los problemas de retorno de aceite. El sistema con un compresor abierto tenía una potencia de 9kW con 100g de carga (sorprendentemente 11g/kW).

#### 4. EXPERIENCIAS CON INTERCAMBIADORES DE CALOR DE MICROCANALES

Los recientes avances en las tecnologías de fabricación de tubos de microcanales e intercambiadores de calor han dado lugar a la expansión de algunos importantes mercados de producción masiva y, en consecuencia, han abierto



Figura 5. Coeficientes globales de transferencia de calor para dos condensadores de microcanales para amoníaco.

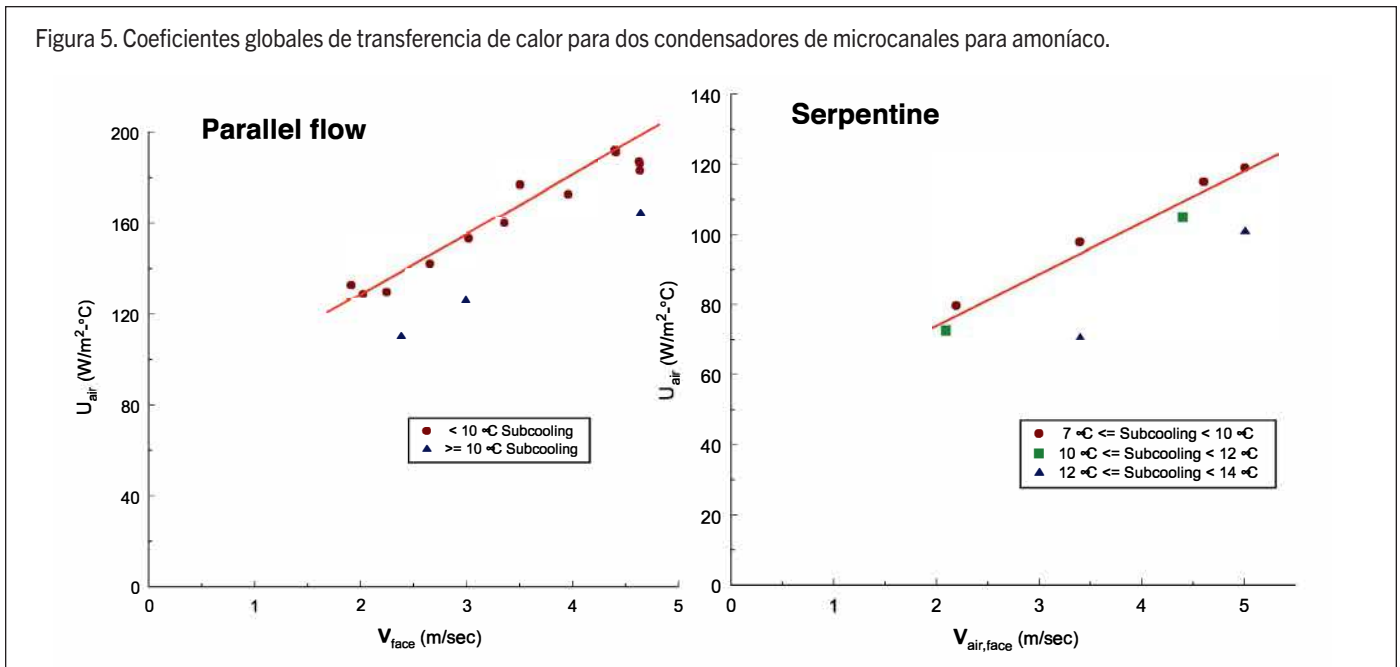
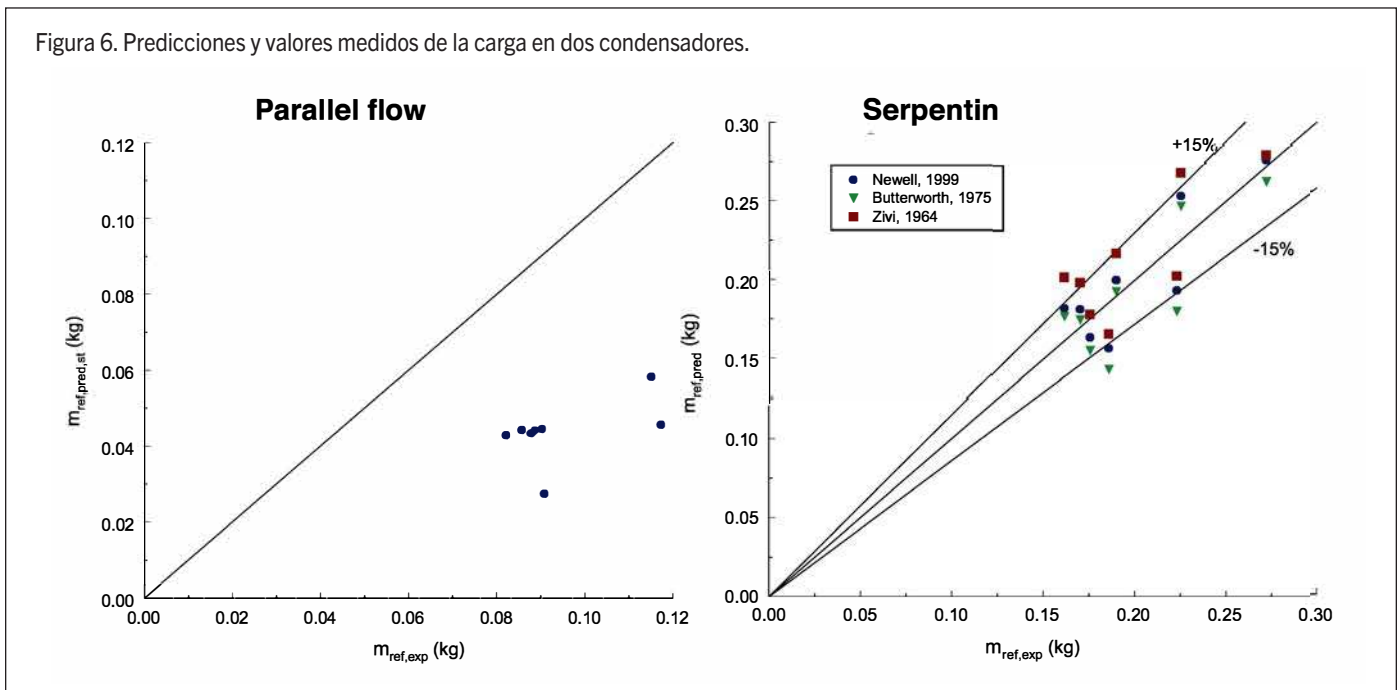


Figura 6. Predicciones y valores medidos de la carga en dos condensadores.



resultados se presentan en la figura 6.

Evidentemente, las predicciones para un condensador en serpentin son mucho más precisas que para el microcanales cuando se utiliza la misma correlación y los mismos datos experimentales. Esto se explica por una importante imprecisión de la predicción de la carga en los colectores (véase la figura 7). Otra conclusión de la figura 7 (condensador en serpentin) es que el subenfriamiento del líquido contribuye en gran medida a la carga total. El reparto de la carga estimado en las distintas zonas del condensador, para

el caso de cálculo de mayor subenfriamiento de líquido, es del 0,5% en la zona de recalentamiento, del 29,2% en la zona de cambio de fase y del 70,3% en la zona de subenfriamiento. Para el caso de cálculo con el menor subenfriamiento líquido, el reparto es del 0,5 por ciento, del 60,1 por ciento y del 39,4 por ciento en el subenfriamiento. Aunque la zona de subenfriamiento es sólo el 26 por ciento de la longitud total del tubo, esta contiene el 70 por ciento de la carga total. Por lo tanto, es interesante reducir el subenfriamiento no sólo para aumen-

tar la transferencia de calor, sino para reducir la carga de refrigerante.

A partir de los datos experimentales obtenidos, el condensador de microcanales en flujo paralelo parece superar al condensador en serpentin. El coeficiente global de transferencia de calor para una velocidad frontal dada es entre un 60 y un 80% mayor que en el condensador en serpentin; y la carga es un 53% menor por término medio. El condensador de microcanales tiene un volumen menor para aproximadamente la misma superficie frontal. Además, tiene menos

Figura 7. Distribución de la carga en dos condensadores de microcanales

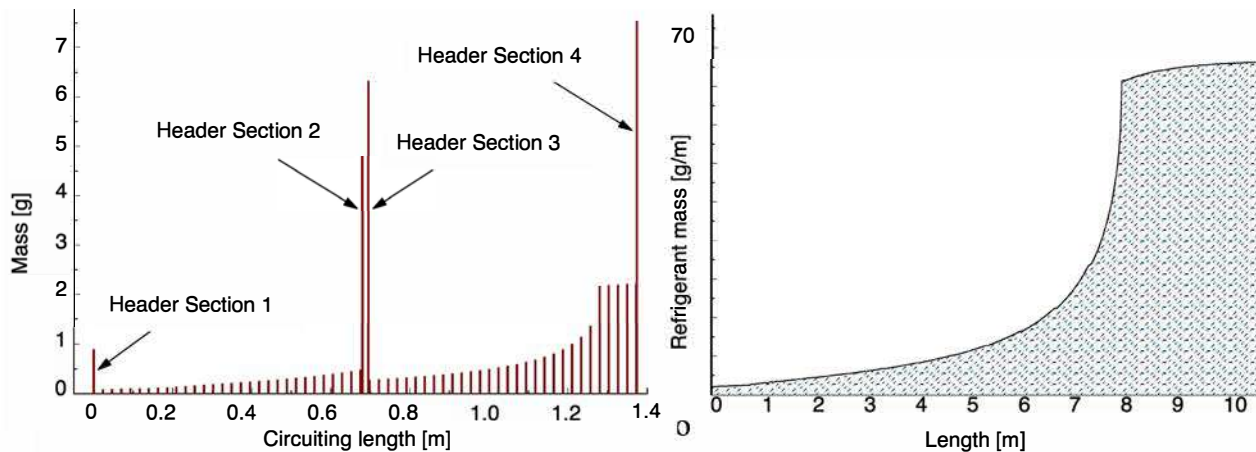


Figura 8. Nuevo compresor: sección transversal y foto.

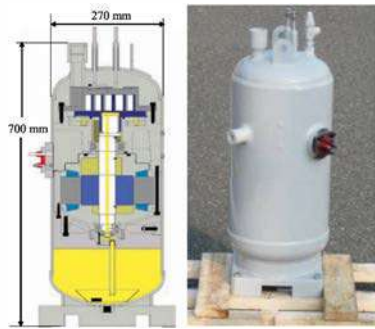


Figura 9. Nuevas enfriadoras con scroll hermético de amoníaco y condensadores convencionales.



Figura 10. Unidad condensadora con microcanales tal y como se utilizó en el CTS durante los estudios del evaporador de NH3.



carga y una mejor transferencia de calor que el condensador en serpentin y los típicos condensadores.

### 5. NUEVOS DESARROLLOS EN COMPRESORES E INTERCAMBIADORES DE CALOR DE MICROCANAL COMO CONDENSADORES EN SISTEMAS PEQUEÑOS

Probablemente, el desarrollo reciente más importante es el nuevo compresor hermético que se utiliza tanto en refrigeración como en bomba de calor. Está diseñado específicamente para su uso con amoníaco. La capacidad nominal en refrigeración (a  $-5^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ ) es de 45 kW, mientras que en bomba de calor es de 47 kW.

El motor es del tipo 1PM con bobinado de aluminio. Hay dos modelos: uno para baja y otro para alta temperatura. El peso de la versión hermética es de unos 100 kg. Este compresor está equipado con una bomba de aceite. La carga de amoníaco de la unidad es de 6 kg (véase la Tabla 4

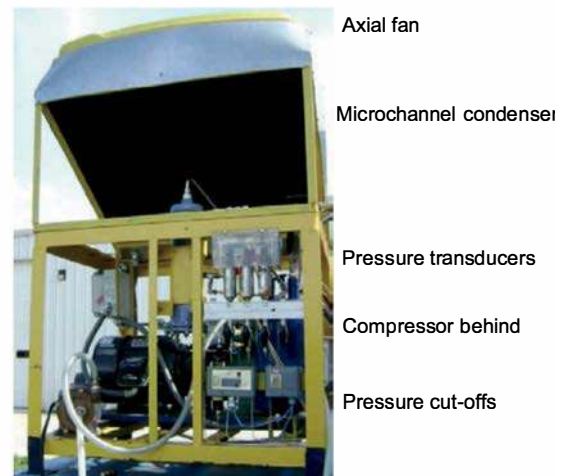
y las Figuras 8 y 9 siguientes).

El desarrollo de condensadores de microcanales para amoníaco ha pasado del Centro de Aire Acondicionado y Refrigeración de la Universidad de Illinois a Creative Thermal Solutions (CTS), una empresa de alta tecnología especializada en la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de refrigeración y aire acondicionado.

La figura 10 muestra una foto de una unidad de condensación con un intercambiador de calor de microcanales utilizada en una instalación experimental para la evaluación de evaporadores de amoníaco, mientras que la figura 11 muestra una unidad de la figura 9, CTS instrumentado para la implementación de condensadores de microcanales.

Los condensadores de microcanales

Figura 11. Enfriador de NH3 de Mycom con prototipo de compresor hermético, instrumentado por el CTS.





mostraron un rendimiento mejorado con un 87 por ciento de área frontal del condensador de tubos y aletas, con sólo un 19 por ciento de volumen interno, un 7 por ciento de peso y un 27 por ciento de carga de refrigerante. Estos resultados fueron presentados por M. Tomooka en una ponencia en la pasada reunión del IAR en Orlando, FL "Application of Micro-channel heat exchangers to compact ammonia systems".

Otro buen ejemplo es el presentado por Cecchinato y otros [23], que describen las principales características del prototipo recién diseñado, entre las que se encuentran:

- Capacidad de refrigeración e 120 kW;
- Compresor de tornillo abierto con variador de frecuencia con un caudal volumétrico nominal igual a 118 m<sup>3</sup>/h;
- Temperaturas de evaporación y condensación de 2°C y 50°C respectivamente;
- La temperatura del refrigerante secundario (agua) a la salida del evaporador se fijó en 7°C y a la entrada del evaporador en 12°C;
- Evaporador de placas con 52 placas con alto ángulo de corrugación con dimensiones totales de 618 x 191 mm.

La planta enfriadora utiliza intercambiadores de calor de bajo volumen interno y evaporador de expansión directa que resulta en una carga de 10.0 kg de amoníaco. Los resultados experimentales mostraron un COP de 5.0 a 2.7 a temperaturas ambiente de 10 a 40°C. Los autores estimaron un potencial de reducción de la carga del 20% si se utilizara un condensador de microcanales.

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el caso de una enfriadora de amoníaco pequeña, de baja carga y refrigerada por aire, que utiliza condensadores de microcanales y un compresor hermético con aceite miscible. Los condensadores de microcanales refrigerados por aire, junto con los evaporadores de expansión directa de placas o similares, constituyen la base de la baja carga.

Además, las dimensiones totales de la enfriadora pudieron reducirse porque las dimensiones de un diseño de microcanales son reducidas. Además de ser compactos, los intercambiadores de

calor de microcanales están fabricados en aluminio de bajo peso. Gracias a la tecnología desarrollada en la industria del automóvil, estos intercambiadores son relativamente económicos.

Si se extendiera el uso del aluminio más allá del condensador microcanales, sería posible reducir aún más el peso y el coste, haciendo que las enfriadoras sean competitivas en coste con los sistemas convencionales.

El compresor hermético con aceite miscible proporciona un entorno de bajo nivel de fugas y bajo mantenimiento y en todos los aspectos es similar a las enfriadoras convencionales.

Dado que el amoníaco es uno de los pocos refrigerantes cuyo vapor es más ligero que el aire, la ubicación de la enfriadora debe ser en cubierta.

Suponiendo un escape de refrigerante al aire libre, incluso en el peor de los casos de una fuga catastrófica, el vapor del refrigerante no puede aumentar su concentración más allá de los valores del LII (límite inferior de inflamabilidad) o de concentraciones tóxicas. Esto representa una gran mejora de la seguridad y sitúa al amoníaco por debajo de los umbrales de las normativas.

Todas estas características suponen una excelente oportunidad para el uso del amoníaco como refrigerante en entornos urbanos: planta enfriadora hermética de muy baja carga ubicada en cubierta con evacuación de refrigerante al aire libre.

## 7. REFERENCIAS

1. Adorns, D., P. Hrnjok, and T. Newell, 2003, Pressure Drop and Void Fraction in MC Using Carbon Dioxide, Ammonia, and R245FA as Refrigerants, ACRC Report TR221
2. Ayub, Z. H., 2004, Industrial Refrigeration and Ammonia Enhanced Heat Transfer, Proc. of the ASME-ZSIS International Thermal Science Seminar II (CD-ROM), Slovenia, pp. 13-23.
3. Ayub, Z. Chyu, M.C., 1996, Application of Passive Enhancement to a 400 Ton PG/NH<sub>3</sub> Spray Evap., Process Enhanced and Multi-Phase Heat Transfer, New York, pp. 333-338.
4. Ayub, Z.H., 2008, Personal communication-Spray chiller designed, fabricated and installed at a food plant in Gastonia, North Carolina, 1995.
5. Butterworth, D. 1975. A Comparison of Some Void-Fraction Relationships for CoCurrent Gas-Liquid Flow " International/ Journal of Multiphase Flow, 1: 845-850.
6. Heun, M., Dunn, W. 1995. Performance and Optimization of Microchannel Condensers. ACRC TR8 I, University of Illinois.
7. Hoehne, M., P. Hrnjok, 2004, Charge

Minimization in Systems and Components using Hydrocarbons as a Refrigerant, ACRC TR224, University of Illinois

8. Hughmark, GA Holdup in Gas-Liquid Flow, Chemical Engineering Progress. 58(4): 62-65
9. Litch A, P. Hrnjok 1999. "Condensation of Ammonia in Microchannel Heat Exchangers" ACRC Report CR22
10. Newell, T. et al. 1999. An Investigation of Void Fraction in the Stratified/ Annular Flow Regions in Smooth, Horizontal Tubes International Journal of Multiphase Flow.
11. Nino V, P. Hrnjok, T. Newell, 2002, Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels ACRC TR202, University of Illinois
12. Nino V, P. Hrnjok, T. Newell, 2002, Analysis of Void Fraction in Microchannels Purdue University Conference, West Lafayette, IN
13. Pearson, A 2003, Low charge ammonia plants: Why bother? Technical paper#5, pp 153-176, IAR Ammonia Refrigeration Conference, Albuquerque, NM March 16-19
14. Zivi, S.M. 1964. Estimation of Steady-State Steam Void-Fraction by Means of the Principle of Minimum Entropy Production ASME Journal of Heat Transfer 86: 247-252.
15. Traeger, K. and P. Hrnjok, 2005, Charge Minimization in Microchannel Systems, ACRC TR25 I, University of Illinois
16. litch, A, P Hrnjak, 2000, Low Charge Air Cooled Ammonia Chiller with Aluminum Microchannel Condenser, Proceedings of the 1/R Gustav Lorenzen Conference on Natural Refrigerants, Purdue University, West Lafayette, IN, 543-55 I,
17. Hrnjak, P. A litch, 200 I. Charge Reduction in Ammonia Chiller Using Air-Cooled Condensers with Aluminum Microchannel Tubes, Proceedings of International Institute of Ammonia Refrigeration Conference long Beach, CA, 235-267
18. Hrnjak, P. 2002, "Microchannel Heat Exchangers as a Design Option for Charge Minimization on NH<sub>3</sub> and HC Systems," Proceedings of 1/R Conference Zero Leakage-Minimal Charge, Stockholm, 111-118,
19. Hrnjak, P., 2005. Charge Minimization in Ammonia Refrigeration Systems, Proceedings of the International Institute of Refrigeration Conference on Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, Macedonia
20. Palm, B. 2009. Summarizing A Decade of Experience on Charge Reduction for Small HC, Ammonia and HFC Systems, 1st IIR Workshop on Refrigerant Charge Reduction, Paris
21. Oku, T., N. Ishii, K. Anami, C.W. Knisely, A Matsui, H.Soto and N. Yoshirio, 2008, Optimal Performance Development of High-Pressure Type Ammonia Scroll Compressors for Maximum Efficiency, Proceedings of the Purdue Refrigeration Conference, paper 1425
22. Hrnjok, P. 20 I 0, Developments in charge reduction and microchannel technology-mass flux as a way to affect void fraction, 2nd IIR Workshop on Refrig. Charge Reduction, KTH, Stockholm
23. Cecchinato, L. 2010, Design and Experimental Analysis of a Water

# Evaporadores de baja sobrealimentación

Jeff Welch, Corporación de Ingeniería de Welch

Traducido por Juan Carlos Rodríguez, Clauger Refrigeración Iberia, S.A.

Los evaporadores con serpentín aleteado y tubos con superficies internas mejoradas permiten un rendimiento óptimo con una tasa de recirculación mínima. Reducir la tasa de recirculación requiere una menor potencia de bombeo y una tubería de distribución de líquido hacia los evaporadores menor. Además, se requiere menos potencia del compresor para una misma capacidad frigorífica, ya que se reduce la caída de presión de la línea de aspiración húmeda. Esta menor potencia absorbida por el compresor da como resultado un ahorro sustancial de energía eléctrica durante la vida útil de la instalación. La utilización de tubos de alto rendimiento permite que los evaporadores funcionen correctamente, tanto en alimentación por la parte superior (top feed) como por la parte inferior (bottom feed), requiriendo en este último caso una carga de refrigerante muy reducida en su funcionamiento a plena capacidad o a cargas parciales.

Los evaporadores de aire forzado, de tubos y aletas se han utilizado para enfriar el aire durante más de 75 años. En la década de 1960, varios escritos ya documentaban las ventajas sobre la mejora de rendimiento al sobrealimentar los evaporadores con alimentación por bombeo de amoníaco, desde entonces, los evaporadores con alimentación por bombeo han sido desde entonces la opción más popular en los sistemas industriales de refrigeración con amoníaco.

Debido al alto calor latente del amoníaco, la cantidad de líquido que se encuentra en la entrada del evaporador es muy pequeña, a menudo inferior al 2% de la sección transversal del tubo. Para que la transferencia de calor sea eficiente y se consiga un rendimiento óptimo, se considera el bombeo de un exceso de refrigerante. Este exceso de líquido se distribuye alrededor del perímetro interior del tubo asegurando que una película de amoníaco líquido cubra el interior, para absorber una mayor cantidad de calor. Si no se dispone de este exceso de líquido, una mayor parte del área interior del tubo quedaría seca,

disminuyendo así el rendimiento del evaporador.

Los evaporadores de tubos y aletas están normalmente configurados por varios tubos en altura de una longitud establecida para definir el área frontal del evaporador. Por lo general, se tienen entre 6 y 12 filas de tubos en la dirección del flujo de aire. Es tarea del técnico que diseña el evaporador determinar cuáles de estos tubos están en serie y cuáles en paralelo en relación con el flujo de amoníaco, definiendo de esta forma los circuitos. Para esto, deben considerarse dos factores contrapuestos en la definición de la solución. Un circuito más largo tiene más superficie, por lo que absorberá más calor y vaporizará más amoníaco, creando una mayor velocidad dentro del tubo. El vapor a mayor velocidad es más turbulento, lo que distribuye mejor el amoníaco líquido sobre el perímetro interior de la pared del tubo. Un circuito más corto tiene menos superficie y no absorbe tanto calor ni vaporiza tanto amoníaco, lo que resulta en menos turbulencia y amoníaco líquido que se deposita a lo largo de la parte inferior del tubo. Esto deja seca la zona superior del perímetro del tubo interior, por lo que se reduce la tasa de transferencia de calor producida por la ebullición, y se reduce en gran medida el rendimiento del evaporador.

Sin embargo, otro factor de diseño a considerar en la definición de la velocidad y turbulencia es la caída de presión. Si la presión de aspiración saturada en la salida del circuito es de  $-32^{\circ}\text{C}$ , una caída de presión de 0,05 bar dará como resultado una temperatura de evaporación de  $-31^{\circ}\text{C}$  en la entrada del evaporador. Esto supone una pérdida del 11% en la diferencia de temperatura media logarítmica para una temperatura del aire de  $-26^{\circ}\text{C}$ . Hay que tener en cuenta que el incremento en la diferencia de temperatura incrementa la transferencia de calor.

Dos factores, la velocidad y el caudal másico, incrementan la caída de presión dentro del circuito. La caída de presión es aproximadamente proporcional a la velocidad al

cuadrado. Por lo tanto, considerando las penalizaciones de temperatura descritas anteriormente, la caída de presión dentro del circuito debe ser lo suficientemente grande para establecer un flujo turbulento, pero no en exceso. Los fabricantes de evaporadores consiguen una velocidad más baja con menos caída de presión ajustando la longitud del circuito o limitando la cantidad de exceso de líquido, lo que se conoce como sobrealimentación o tasa de recirculación. La tasa de recirculación se define como el caudal másico total en el circuito o evaporador en relación con el caudal másico evaporado. Como ejemplo, el triple de la tasa de evaporación que entra al evaporador se expresa como una tasa de recirculación de 3:1.

Los diseños actuales de evaporadores requieren habitualmente tasas de recirculación de 4:1 o 3:1 a temperaturas de evaporación altas ( $5^{\circ}\text{C}$  a  $-18^{\circ}\text{C}$ ) y 3:1 o 2,5:1 a temperaturas más bajas ( $-28^{\circ}\text{C}$  a  $-45^{\circ}\text{C}$ ). La relación presión/temperatura del amoníaco a bajas temperaturas desaconseja caídas de presión altas dentro del circuito debido al gran efecto sobre la temperatura de evaporación.

Además de humedecer el perímetro interior del tubo, se debe considerar la conductividad térmica del material del tubo y la aleta. Durante muchos años, los evaporadores de amoníaco se construyeron con acero al carbono que se galvanizaba en caliente después del ensamblaje, o se fabricaban con tubos de aluminio expandidos en aletas de aluminio. En ambos casos las aletas y los tubos tienen la misma conductividad térmica. La transferencia de calor ocurre igualmente a lo largo del perímetro del tubo y desde la aleta que lo rodea. El acero al carbono tiene una conductividad térmica de  $36\text{ W/m K}$  y la del aluminio es de  $204\text{ W/m K}$ .

## EVOLUCIÓN DEL DISEÑO

En la última década, los tubos de acero inoxidable expandidos en aletas de aluminio se han convertido en los materiales preferidos para los evaporadores. La aleta de alta conductividad transfiere calor al tubo de manera muy eficiente y uniforme alrededor del



# La solución que estabas esperando ammolite

Tecnología de amoníaco de baja carga



## Chillers y centrales de expansión directa



Seguridad

Sistema compacto de muy baja carga de amoníaco. Sin consumo de agua, libre de riesgo



Plug & Play

Equipos precargados y probados en fábrica, de rápida instalación y reducido mantenimiento



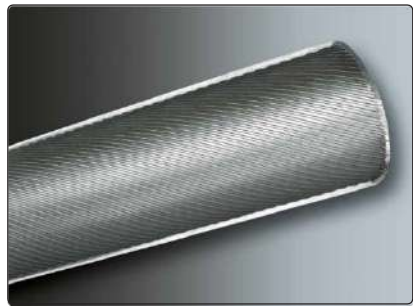
Mejor opción

La solución más ecológica, y de más alta eficiencia energética



**Fig. 1**

**Tubo mejorado internamente**  
Cortesía de Evapco, Inc.).

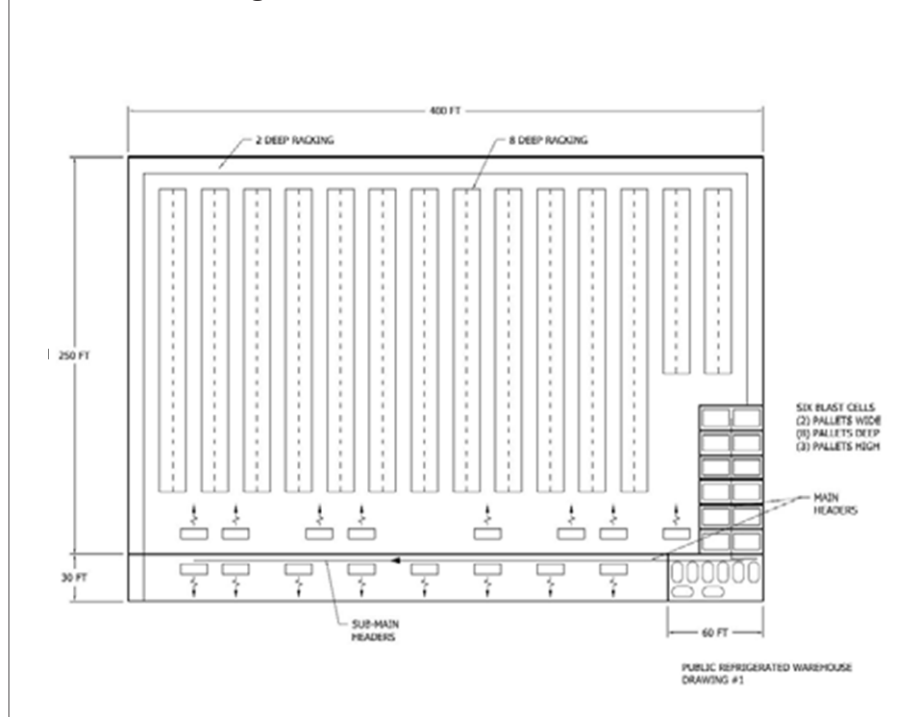


perímetro del tubo. El camino térmico con la menor resistencia de intercambio con el refrigerante es directamente la pared del tubo. En consecuencia, la humectación de los tubos afecta directamente el rendimiento térmico. Una novedad reciente en las aplicaciones de amoníaco recirculado es la mejora de la superficie interna de los tubos del evaporador de acero inoxidable, como se muestra en la Figura 1.

Esta mejora permite que el amoníaco líquido se deposite en las hendiduras de la superficie interna y circule a través de ranuras helicoidales alrededor de la periferia interna del tubo. Esta circulación ocurre a una velocidad significativamente más baja que en un tubo liso y minimiza las diferencias de rendimiento entre un evaporador alimentado por la parte superior y otro alimentado por la parte inferior. La mejora de la humectación logra un mayor rendimiento del equipo a tasas de sobrealimentación más bajas. Pruebas de laboratorio han demostrado que la tasa de sobrealimentación óptima para un tubo con ranurado interno de 5/8" de diámetro es 1,2:1 y para un tubo con ranurado interno de 1" de diámetro es 1,8:1. Estos valores son significativamente más bajos que los habitualmente utilizados por los fabricantes indicados anteriormente.

Como prueba de estos resultados de laboratorio, el Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (AHRI), que publica la norma ANSI/AHRI 420-2008, certifica el rendimiento de estos conjuntos de evaporadores con tubos mejorados internamente de acero inoxidable. Esta norma se utiliza como base para certificar el rendimiento de las uni-

**Fig. 2** Almacén frigorífico



dades de refrigeración de circulación forzada y de expansión directa utilizadas en refrigeración. Las certificaciones realizadas por AHRI están sujetas a pruebas independientes según la sección 5.3 de la norma:

**Tolerancias.** Para cumplir con esta norma, cualquier unidad de producción representativa seleccionada al azar, cuando se pruebe en las condiciones de clasificación estándar, deberá tener un efecto de enfriamiento total bruto no inferior al 95 % de su clasificación estándar publicada y no excederá el 105 % de su potencia nominal.

La certificación independiente de AHRI asegura a los consumidores que estas bajas tasas de recirculación son adecuadas y no comprometerán el rendimiento del equipo.

La mayoría de los evaporadores de amoníaco recirculado utilizan un orificio al principio de cada circuito para distribuir la cantidad suficiente de amoníaco con la presión establecida en el colector de líquido. El diseño de evaporadores de amoníaco con una tasa de recirculación de 1,2:1 requiere el uso de orificios más pequeños. La popularidad de los compresores de tornillo con separadores de aceite coalescentes de alta eficiencia y tem-

peraturas de descarga más bajas ha dado como resultado sistemas mucho más limpios. Por lo tanto, cuando se instalan evaporadores en nuevos sistemas, el uso de orificios más pequeños no supone un problema. Sin embargo, cuando los serpentines de baja tasa de recirculación se instalan en sistemas existentes más antiguos con un historial de arrastre de aceite o problemas de carbonización, se debe considerar una alternativa a los orificios pequeños. En este escenario, una alternativa sería diseñar los serpentines de sustitución en función de una tasa de recirculación más alta (es decir, 2:1) o, preferiblemente, utilizar un distribuidor de refrigerante líquido con un solo orificio más grande y tubos de distribución individuales. Este diseño funciona bien al proporcionar un flujo uniforme a cada circuito, maximizando la capacidad según lo verificado en pruebas de laboratorio.

## VENTAJAS

Para ilustrar los beneficios de la utilización de tasas de recirculación más bajas, vamos a comparar los evaporadores de baja sobrealimentación con unidades convencionales para una instalación de un almacén frigorífico genérico, con un muelle de expedición, cámara de congelados y seis



# Evaporadores de baja sobrealimentación

Tabla 1 Comparativa en la selección de evaporadores

Servicio	MUELLE		CONGELADOS		CELDA CONGELACIÓN		
Temperatura Evaporación (TE), °C	-1		-28		-43		
(ET), °F	30		-20		-45		
Temp. aire de retorno (TA), °C	7		-23		-37		
(RA), °F	45		-10		-35		
Diferencia de temperatura (DT) (TA-TE)	8		5		6		
(TD) (RA-ET)	15		10		10		
Tasa de sobrealimentación XX:1	1.2	3	1.2	3	1.8	2.5	1.2
Tipo de evaporador							
Tipo de alimentación	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior
Material del tubo	SS - ES	SS	SS - ES	CS	SS - ES	CS	SS - ES
Material de la aleta	Al	Al	Al	GLV	Al	GLV	Al
Potencia frigorífica kW	35,9	36,5	123,4	123,8	118,5	118,3	117,2
tons	10,2	10,4	35,1	35,2	33,7	33,6	33,3
Btu/hr-TD	8.160	8.300	42.120	42.240	40.440	40.370	39.996
Área facial m <sup>2</sup>	1,3	1,4	6,5	6,1	8,5	8,4	6,5
ft <sup>2</sup>	14	14,9	70	66	92,13	90	70
Tubos en profundidad	10	8	8	10	8	8	10
Diámetro del tubo, pulg.	5/8	3/4	5/8	3/4	1	3/4	5/8
Separación aletas mm	6,35	6,35	6,35	6,35	12,7	12,7	12,7
Aletas por pulgada	4	4	4	4	1,5/3	1,5/3	1,5/3
Superficie m <sup>2</sup>	222	153	890	910	882	702	772
ft <sup>2</sup>	2.392	1.650	9.587	9.795	9.497	7.552	8.316
Caudal de aire m <sup>3</sup> /h	14.144	14.645	101.098	98.372	124.388	135.580	102.495
cfm	8.325	8.620	59.504	57.900	73.212	79.800	60.326
Presión estática mmca	0	0	0	0	13	13	13
Inch WC	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5
Velocidad facial m/s	3,02	2,94	4,32	4,46	4,04	4,51	4,38
pies/min	595	579	850	877	795	887	862
No Ventiladores/Diámetro No / mm.	2 / 560	2 / 560	5 / 760	3 / 910	3 / 1060	3 / 1060	5/860
No / inch	2 / 22	2 / 22	5 / 30	3 / 36	3 / 42	3 / 42	5/34
RPM	1.160	1.140	1.160	1.160	1.750	1.750	1.160
Potencia unit. nominal kW	1	6,7	4	6,7	13,4	10	6,7
HP	0,75	0,5	3	5	10	7,5	5
Volumen interno lts	49,2	56,6	193	294	458	326	241
ft <sup>3</sup>	1,74	2	6,82	10,4	16,17	11,5	8,52
Carga kg **	6,8	12	42,9	65,7	137,4	74,5	52,6
Lb **	15,1	26,4	94,6	144,8	303,0	164,3	115,9
Peso neto kg	446	390	1.542	-	2.192	-	1.607
lb	983	860	3.400	-	4.833	-	3.543
Peso bruto kg	532	-	1.890	4.037	2.486	4.173	1.935
lb	1.175	-	4.168	8.900	5.481	9.200	4.267
Caudal de amoníaco m <sup>3</sup> /h	0,19	0,49	0,58	1,46	0,68	0,90	0,52
GPM	0,84	2,14	2,56	6,42	3,49	4,84	2,30
Cantidad	8	8	8	8	12	12	12
Totales							
Capacidad kW	287	292	988	990	1.422	1.420	1.405
tons	81,6	83	280,8	281,6	404,4	403,7	399,6
Caudal de aire m <sup>3</sup> /h	113.154	117.163	808.782	786.981	1.492.654	1.626.971	1.229.933
CFM	66.600	68.960	476.032	463.200	878.544	957.600	723.912
kW	16	10,7	161	161	483	362	402

celdas de congelación según el plano de planta en la Figura 2. Pueden consultarse las Tablas 1-3 para comparar la selección de evaporadores, válvulas y tuberías.

## LÍNEAS DE LÍQUIDO

Los evaporadores con sobrealimentación más baja requieren un índice de flujo volumétrico más bajo, lo que lleva a la selección de una bomba más pequeña, que requiere menos potencia absorbida (consultar la Tabla 1). En este caso, al no disponer de una bomba de menor capacidad, la potencia de bombeo es la misma. Cualquier líquido que no sea utilizado por los evaporadores todavía tiene una presión elevada y consume energía, vaya hacia los evaporadores o no.

La tasa de sobrealimentación más baja puede resultar en una reducción del tamaño del colector de líquido. En otro caso, la velocidad del líquido será menor, lo que resultará en una reducción del momento del fluido y menores movimiento de la tubería cuando se cierran las válvulas solenoide de los evaporadores, lo que lleva a una situación más segura (reducción de golpes de ariete).

## LÍNEAS DE GAS CALIENTE

No existen diferencias significativas entre las tuberías y válvulas de gas caliente necesarias, ya que el tamaño de estas es proporcional a la superficie y masa del equipo. Para serpentines alimentados por la parte inferior, el tamaño del orificio funciona como un dispositivo de distribución a través del cual debe fluir el amoníaco condensado. Los tamaños más pequeños pueden requerir presiones de gas caliente ligeramente más altas para expulsar por completo el condensado antes de que pueda acumularse en los circuitos. Los serpentines con alimentación superior requerirán una derivación para permitir que fluya una cantidad suficiente de gas caliente a través de los orificios o del distribuidor.

## LÍNEAS DE ASPIRACIÓN

Todos los sistemas de amoníaco recirculado tendrán alguna caída de presión desde el evaporador hasta el compresor. Minimizar esta caída de presión dará como resultado un sistema de refrigeración más eficiente.

Para una carga determinada, los

## Evaporadores de baja sobrealimentación

caudales de la aspiración seca desde el separador de bombeo hasta el compresor son los mismos y se tendrá la misma caída de presión independientemente del tipo de evaporador. Se asignó una caída de presión de 0,05 bar a las líneas de aspiración seca desde el separador de bombeo hasta los compresores en cada uno de los tres niveles de temperatura. Este artículo se centra en las tuberías y válvulas de la línea de aspiración húmeda desde los evaporadores hasta el separador. Los tamaños de tubería y válvula se han seleccionado para los evaporadores de mayor sobrealimentación y luego se han recalculado a las tasas de sobrealimentación más bajas. La caída de presión total a través de las tuberías y los conjuntos de válvulas de aspiración se han determinado utilizando un programa de selección de válvulas que puede descargarse de Internet.

Este programa tiene en cuenta la tasa de sobrealimentación en los cálculos de caída de presión de las tuberías y las válvulas. Para este estudio, las presiones de funcionamiento del evaporador se mantuvieron constantes en 3,1 barg (-1°C), 0,25 barg (-28°C) y -0,61 barg (-43°C) para todos los tipos de evaporador. La Tabla 4 proporciona el resumen y la comparación de las caídas de presión de la línea de aspiración húmeda desde los evaporadores hasta el separador.

Los compresores de tornillo con enfriamiento por termosifón se han seleccionado utilizando el programa de selección de uno de los principales fabricantes de compresores. Cada compresor se ha considerado para las diferentes temperaturas de evaporación de diseño (-1°C, -28°C y -43°C) y una temperatura de condensación promedio anual de 29°C. En cada caso, la caída de presión total de la línea de aspiración se ha considerado en el programa de selección y se ha obtenido la relación kWabs/kWfrig. Los ahorros en kWabs/kWfrig de los evaporadores de baja sobrealimentación se representan en la Tabla 5. Este ahorro se multiplica por el total de la potencia por nivel de aspiración y se totaliza para 6.000 horas de funcionamiento por año, considerando los tiempos con cámaras en régimen y la rotación de las celdas de congelación. Los ahorros debido a un menor cau-

Tabla 1 Comparativa de selección de evaporadores (continuación)

HP	12	8	120	120	360	270	300
Volumen interno lts	394	453	1.545	2.355	5.493	3.907	2.895
ft <sup>3</sup>	13,92	16	54,56	83,2	194,04	138	102,24
Caudal de amoniaco m3/h	1,52	3,92	4,64	11,7	8,2	10,8	6,2
GPM	6,7	17,1	20,5	51,3	41,9	58,1	27,6

Tabla 1 Comparativa de selección de evaporadores (continuación)

Servicio	MUELLE		CONGELADOS		CELDA CONGELACIÓN		
Potencia de la bomba kW hidráulico a 2 barg	0,087	0,222	0,266	0,669	0,546	0,757	0,360
BHP a 30 psi	0,118	0,299	0,358	0,898	0,733	1,016	0,483
Eficiencia de la bomba, %	60	60	60	60	60	60	60
Eficiencia del motor, %	90	90	90	90	90	90	90
kW	0,163	0,413	0,495	1,241	1,012	1,403	0,667
h/año	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760
kWh/año	1.425	3.621	4.335	10.867	8.866	12.293	5.846
Ahorro kWh/año	2.196		6.533		3.427		6.447
					1"		5/8"
Ahorro anual total kWh					12.155		15.176
Coste electricidad €/kWh					0.10		0.10
Ahorro potencial en bombeo					1.215 €		1.517 €

### eviaturas en tablas:

- TE Temperatura de evaporación saturada para el amoniaco a la salida del evaporador.
- TA Temperatura del aire de retorno del aire que entra al evaporador.
- DT Diferencia de temperatura entre el aire de retorno y la evaporación saturada
- SS Acero inoxidable.
- IE Mejorado internamente.
- Al Aluminio.
- CS Acero al carbono.
- GLV Acero galvanizado.

Tabla 2 Comparación de paneles de válvulas de aspiración

Servicio	MUELLE		CONGELADOS		CELDA CONGELACIÓN		
Temperatura Evaporación (TE), °C	-1		-28		-43		
(ET), °F	30		-20		-45		
Temp. aire de retorno (TA), °C	7		-23		-37		
(RA), °F	45		-10		-35		
Diferencia de temperatura (DT) (TA-TE)	8		5		6		
(TD) (RA-ET)	15		10		10		
Tasa de sobrealimentación XX:1	1.2	3	1.2	3	1.8	2.5	1.2
Tipo de evaporador							
Tipo de alimentación	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior
Material del tubo	SS - ES	SS	SS - ES	CS	SS - ES	CS	SS - ES
Material de la aleta	Al	Al	Al	GLV	Al	GLV	Al
Líquido							
Modelo ICF	ICF-20-6-3RA						
Vueltas abiertas	1/4	1/2	1	1 3/4	3/4	1 1/4	3/4
Pérdida presión bar	1,29	1,20	1,09	0,62	1,09	1,45	1,09
psi	18,7	17,37	15,87	15,09	15,82	15,21	15,82
Aspiración							
Válvula de cierre	SVA 2".	SVA 2"	SVA 4"	SVA 4"	SVA 4"	SVA 4"	SVA 4"
Válvula de solenoide	ICLX 32-NS40	ICLX 40-NS50	ICLX 100	ICLX 100	ICLX 100	ICLX 100	ICLX 100
Válvula de cierre	SVA 2".	SVA 2"	SVA 4"	SVA 4"	SVA 4"	SVA 4"	SVA 4"



Tabla 3 Comparativa de tuberías del evaporador

Servicio	MUELLE		CONGELADOR		CELDAS CONGELACIÓN		
Temperatura Evaporación (TE), °C	-1		-28		-43		
(ET), °F	30		-20		-45		
Temp. aire de retorno (TA), °C	7		-23		-37		
(RA), °F	45		-10		-35		
Diferencia de temperatura (DT) (TA-TE)	8		5		6		
(TD) (RA-ET)	15		10		10		
Tasa de sobrealimentación XX:1	1.2	3	1.2	3	1.8	2.5	1.2
Tipo de evaporador							
Tipo de alimentación	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior
Material del tubo	SS - ES	SS	SS - ES	CS	SS - ES	CS	SS - ES
Material de la aleta	Al	Al	Al	GLV.	Al	GLV	Al
Líquido							
Conexión del equipo		¾"		1 ¼"		1 ¼"	
Tamaño de la tubería	¾"	¾"	1"	1"	¾"	¾"	¾"
DP bar/100 mts	0,02	0,12	0,05	0,28	0,33	0,62	0,15
psi/100 ft	0,09	0,5	0,22	1,21	1,45	2,71	0,67
Velocidad m/s	0,19	0,48	0,35	0,87	0,79	1,08	0,52
ft/s	0,63	1,58	1,14	2,85	2,58	3,59	1,72
Aspiración							
Conexión del equipo		2"		4"		5"	
Tamaño de la tubería	2"	2"	4"	4"	4"	4"	4"
DP bar/100 mts	0,03	0,05	0,02	0,04	0,04	0,06	0,03
psi/100 ft	0,11	0,23	0,09	0,19	0,20	0,26	0,15
Velocidad m/s	4,5	4,57	10,15	10,18	18,40	18,44	18,35
ft/s	14,8	15	33,3	33,4	60,4	60,5	60,2
Colectores principales							
	82 toneladas -1°C		280 toneladas -28°C		404 toneladas -43°C		
Líquido							
Tamaño de la tubería	1"	1 ¼"	2"	2"	2"	2"	2"
DP bar/100 mts	0,29	0,38	0,07	0,41	0,29	0,55	0,13
psi/100 ft	1,25	1,67	0,31	1,8	1,27	2,4	0,58
Velocidad m/s	0,92	1,29	0,68	1,69	1,39	1,92	0,92
ft/s	3,02	4,23	2,23	5,56	4,55	6,31	3,03
Aspiración							
Tamaño de la tubería	4"	4"	8"	8"	10"	10"	10"
DP bar/100 mts	0,04	0,08	0,03	0,06	0,05	0,06	0,04
psi/100 ft	0,17	0,36	0,14	0,28	0,21	0,26	0,16
Velocidad m/s	8,35	8,44	20,66	20,73	35,75	35,76	35,66
ft/s	27,4	27,7	67,8	68	117,3	117,4	11,0

dal másico en las líneas de aspiración húmeda son significativos, siendo aproximadamente 247.500 kWh/año y 338.000 kWh/año si se utilizan evaporadores con tuberías de 5/8".

**VOLUMENES DE FLUCTUACIÓN**

La carga de refrigerante en un evaporador depende del volumen interno, la capacidad del circuito y el método de alimentación.

Para capacidades térmicas iguales, un serpentín diseñado con tubos más pequeños tendrá menos volumen interno que un serpentín fabricado con tubos más grandes. Esto se puede observar en la Tabla 1, que ilustra la carga de las serpentines de tubo de ¾" en relación con los tubos mejorados internamente de 5/8". Además, un serpentín con tubos de 1" tiene un volumen interno mayor que el serpentín de tubo de ¾".

Todos los circuitos del serpentín deben ser diseñados para drenar libremente y permitir que el condensado de gas caliente salga del serpentín y no se acumule y cubra el tubo durante el desescarche. Si el circuito se alimenta por la parte superior, el exceso de líquido se drena inicialmente por gravedad hasta que la velocidad del vapor dentro del tubo es suficiente para barrer cualquier exceso de líquido a través del circuito. Este método de alimentación minimiza cualquier acumulación de líquido (carga residual o "ballast charge"). Los circuitos alimentados por la parte inferior acumularán exceso de líquido en la parte inferior del circuito hasta que la velocidad del vapor sea suficiente para empujar este líquido acumulado hacia arriba a través del circuito. Debería ser obvio que la carga residual en un serpentín alimentado por la parte inferior aumenta en gran medida la carga operativa en relación con un serpentín alimentado por la parte superior, especialmente a carga parcial donde las velocidades del vapor son más bajas. Las pruebas de laboratorio han determinado una relación de carga de refrigerante para serpentines de alimentación superior a serpentines de alimentación inferior. A una temperatura de evaporación de -4°C (25°F), esta relación es de 1,0, a -18°C (0°F) de 0,70 y a -28°C (-20°F) baja a 0,63.

En la Tabla 6 se destaca la diferencia de carga que se produce en los evaporadores de alimentación superior o inferior. Se muestran la carga de líquido con DT de diseño y la carga de líquido a carga parcial con DT= 1,7°C (3°F). Esta situación podría ocurrir hacia el final de un ciclo de congelación rápida o cuando el sistema de control no tiene un control de solenoide de alimentación o una zona neutra ancha. En la tabla se observan dos puntos de interés para el diseñador y usuario de la instalación. En primer lugar, para un usuario, se puede considerar una correlación directa entre el aumento de la seguridad de la planta y una carga de amoníaco reducida. Los evaporadores de tubo pequeño de alimentación superior son una excelente opción para reducir la carga general. En este ejemplo genérico de un almacén frigorífico, la reducción de la carga es superior a 815 kg.

Tabla 3 Comparativa de tuberías del evaporador (cont.)

Servicio	MUELLE		CONGELADOS		CELDA CONGELACIÓN		
Colectores secundarios							
	41 toneladas -1°C		140 toneladas -28°C		202 toneladas -43°C		
Líquido							
Tamaño de la tubería	¾"	1"	1 ½"	1 ½"	1 ½"	1 ½"	1 ½"
DP bar/100 mts	0,28	0,44	0,07	0,40	0,29	0,54	0,13
psi/100 ft	1,22	1,93	0,30	1,75	1,24	2,33	0,57
Velocidad m/s	0,77	1,15	0,56	1,41	1,16	1,61	0,77
ft/s	2,51	3,77	1,85	4,63	3,8	5,27	2,53
Aspiración							
Tamaño de la tubería	3"	3"	6"	6"	8"	8"	8"
DP bar/100 mts	0,04	0,09	0,03	0,07	0,04	0,05	0,03
psi/100 ft	0,18	0,39	0,15	0,30	0,18	0,23	0,13
Velocidad m/s	7,19	7,25	17,83	17,90	28,19	28,19	28,10
ft/s	23,6	23,8	58,5	58,7	92,5	92,5	92,2

**eviaturas en tablas:**

- TE Temperatura de evaporación saturada para el amoníaco a la salida del evaporador.
- TA Temperatura del aire de retorno del aire que entra al evaporador.
- DT Diferencia de temperatura entre el aire de retorno y la evaporación saturada
- SS Acero inoxidable.
- IE Mejorada internamente.
- Al Aluminio.
- CS Acero al carbono.
- GLV Acero galvanizado.

Tabla 4 Comparativa de caída de presión en aspiración húmeda

Servicio	MUELLE		CONGELADOS		CELDA CONGELACIÓN		
Temperatura Evaporación (TE), °C	-1		-28		-43		
(ET), °F	30		-20		-45		
Temp. aire de retorno (TA), °C	7		-23		-37		
(RA), °F	45		-10		-35		
Diferencia de temperatura (DT) (TA-TE)	8		5		6		
(TD) (RA-ET)	15		10		10		
Tasa de sobrealimentación XX:1	1.2	3	1.2	3	1.8	2.5	1.2
Tipo de evaporador							
Tipo de alimentación	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Infe rior	Infe rior	Inferi or
Material del tubo	SS - ES	SS	SS - ES	CS	SS - ES	CS	SS - ES
Material de la aleta	Al	Al	Al	GLV	Al	GLV	Al
Tubería de derivación							
Aspiración							
Conexión equipo	2		4		5		
Tamaño de la tubería.	2"	2"	4"	4"	4"	4"	4"
DP bar/100 mts	0,03	0,05	0,02	0,04	0,05	0,06	0,03
psi/100 ft	0,11	0,23	0,09	0,19	0,2	0,26	0,15

El segundo elemento a tener en cuenta es la necesidad de volumen de fluctuación de los separadores. Cuando un evaporador opera a carga parcial, a un DT bajo, la cantidad de

líquido residual aumenta porque hay un volumen de vapor significativamente menor para desplazar el líquido y hay una menor velocidad para barrerlo de los tubos. Esta fluctuación

de carga desde el 100 % de la carga de diseño hasta una condición de carga parcial debe tenerse en cuenta en el diseño del separador de aspiración. Para que el sistema funcione sin problemas, el volumen interno del separador de aspiración debe ser lo suficientemente grande como para acomodar este líquido residual a medida que sale de los evaporadores cuando aumenta la carga. Al mismo tiempo, debe quedar suficiente espacio de separación de vapor en el recipiente para evitar el arrastre de líquido a los compresores.

En el diseño de separadores, este volumen se conoce como volumen de fluctuación. Observando el separador de congelación rápida del almacén frigorífico, esta reducción en el volumen de fluctuación puede superar los 1.100 lts, lo que permitirá un diámetro y/o longitud de recipiente más pequeños.

Una tasa de sobrealimentación más baja supone menos líquido en los colectores de aspiración húmeda bajo una carga estable cuando la velocidad del vapor es suficiente para arrastrar el líquido a través de la tubería. Sin embargo, la acumulación de volumen de líquido durante una carga parcial depende de la pendiente de la tubería. Por este motivo, en este artículo no se han cuantificado los picos de volumen debidos a las tuberías.

**RESUMEN**

El uso de evaporadores de baja sobrealimentación reduce la caída de presión en la tubería de aspiración húmeda. Esta reducción en la caída de presión reducirá significativamente el trabajo requerido por el compresor durante la vida útil de la instalación, lo que generará ahorros de electricidad y menores costos generales. Además, los tubos mejorados internamente permiten el uso de evaporadores alimentados por la parte superior con una reducción significativa de la carga operativa y una disminución del volumen de fluctuación.

**REFERENCIAS**

American National Standards Institute (ANSI) / Air Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI). (2008). "Standard for Performance Rating of Forced-Circulation Free-Delivery Unit Coolers for Circulation." Standard 420.



Tabla 4 Comparativa de caída de presión en aspiración húmeda (cont.)

psi	0,04	0,08	0,04	0,08	0,13	0,17	0,10
DP Válvulas Aspiración bar	0,006	0,014	0,008	0,018	0,021	0,027	0,014
psi	0,09	0,2	0,12	0,26	0,3	0,39	0,20
DP Válvulas + tubería bar	0,009	0,020	0,011	0,024	0,030	0,039	0,021
psi	0,13	0,28	0,16	0,34	0,43	0,56	0,30
Colectores principales							
	82 toneladas -1°C	280 toneladas -28°C	404 toneladas -43°C				
Aspiración							
Tamaño de la tubería.	4"	4"	8"	8"	10"	10"	10"
DP bar/100 mts	0,04	0,08	0,03	0,06	0,05	0,06	0,04
psi/100 ft	0,17	0,36	0,14	0,28	0,21	0,26	0,16
mts lineales	60	60	60	60	20	20	20
Lequiv. Accesorios (ft)	12,6	12,6	17,1	21	24	24	24
DP Tubería bar	0,025	0,054	0,021	0,043	0,013	0,016	0,01
psi	0,36	0,77	0,30	0,62	0,19	0,23	0,14
DP Válvulas Aspiración bar	0,003	0,006	0,006	0,013	0,017	0,022	0,012
psi	0,04	0,08	0,08	0,18	0,24	0,32	0,17
DP Válvulas + tubería bar	0,4	0,85	0,38	0,8	0,43	0,55	0,31
psi	0,40	0,85	0,38	0,80	0,43	0,55	0,31

<b>Servicio</b>	<b>MUELLE</b>	<b>CONGELADOS</b>		<b>CELDAS CONGELACIÓN</b>			
Colectores principales							
	41 toneladas -1°C	140 toneladas -28°C	202 toneladas -43°C				
Aspiración							
Tamaño de la tubería	3"	3"	6"	6"	8"	8"	8"
DP bar/100 mts	0,04	0,09	0,03	0,07	0,04	0,05	0,03
psi/100 ft	0,18	0,39	0,15	0,3	0,18	0,23	0,13
mts lineales	55	55	55	55	9	9	9
Lequiv. accesorios (ft)	6,8	6,8	11,4	11,4	14	14	14
DP Tubería bar	0,024	0,051	0,02	0,04	0,006	0,007	0,004
psi	0,34	0,73	0,29	0,57	0,08	0,10	0,06
Aspiración húmeda							
DP Tubería + válvulas	0,061	0,13	0,058	0,12	0,066	0,085	0,047
psi	0,87	1,85	0,83	1,72	0,94	1,21	0,67
Ahorro bar	0,069		0,062		0,019		0,038
psi	0,98		0,89		0,27		0,54

## Evaporadores de baja sobrealimentación

Tabla 5 Comparación de potencia del compresor

Servicio	MUELLE		CONGELADOR		CELDAS CONGELACIÓN		
Temperatura Evaporación (TE), °C	-1		-28		-43		
(ET), °F	30		-20		-45		
Temp. aire de retorno (TA), °C	7		-23		-37		
(RA), °F	45		-10		-35		
Diferencia de temperatura (DT) (TA-TE)	8		5		6		
(TD) (RA-ET)	15		10		10		
Tasa de sobrealimentación XX:1	1.2	3	1.2	3	1.8	2.5	1.2
Tipo de evaporador							
Tipo de alimentación	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior
Material del tubo	SS - ES	SS	SS - ES	CS	SS - ES	CS	SS - ES
Material de la aleta	Al	Al	Al	GLV	Al	GLV	Al
Potencia frigorífica kW	35,90	36,50	123,40	123,80	118,50	118,30	117,20
Btu/hr-TD	122.400	124.500	421.200	422.400	404.400	403.704	399.960
Cantidad	8	8	8	8	12	12	12
Presión en Evaporador barabs	4,179	4,179	1,281	1,281	0,623	0,623	0,623
psi	59,7	59,7	18,3	18,3	8,9	8,9	8,9
DP aspiración húmeda bar	0,061	0,13	0,058	0,12	0,066	0,085	0,047
psia	0,87	1,85	0,83	1,72	0,94	1,21	0,67
DP aspiración seca bar	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
psi	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
DPTotal aspiración bar	0,131	0,2	0,128	0,19	0,136	0,155	0,117
psi	1,87	2,85	1,83	2,72	1,94	2,21	1,67
Configuración de compresor	Simple salto		Simple salto con ECO		Doble etapa		
Tons	583,5	572,5	280,0	264,3	238,7	227,5	246,3
BHP	455,8	456,1	536,5	527,2	481,1	476,5	484,1
kW	340,0	340,3	400,2	393,3	358,9	355,5	361,1
kW/tonelada	0,58	0,59	1,43	1,49	1,50	1,56	1,47
kW/ton, 29°C Cond.*	0,012		0,059		0,059		0,10
Carga del evaporador, Tons	81,6		280,8		404,4		404,4
Ahorro del compresor, kW	0,95		16,47		23,83		38,92
Tiempo de operación, h/año	6,000		6,000		6,000		6,000
Ahorro de kWh/año	5,673		98,829		143,006		233,532
					1"		5/8"
Ahorro anual total de kWh					247,508		338,034
Electo. Costo €/kWh					0.10		0.10
<b>Ahorro anual de energía del compresor</b>					<b>24.751 €</b>		<b>33.803 €</b>

**Abreviaturas en tablas:**

- TE Temperatura de evaporación saturada para el amoníaco a la salida del evaporador.
- TA Temperatura del aire de retorno del aire que entra al evaporador.
- DT Diferencia de temperatura entre el aire de retorno y la evaporación saturada
- SS Acero inoxidable.
- IE Mejorada internamente.
- Al Aluminio.
- CS Acero al carbono.
- GLV Acero galvanizado.

Tabla 6 Comparativa de la carga del evaporador y el volumen de fluctuación

Servicio	MUELLE			CONGELADOS			CELDAS CONGELACIÓN				
Temperatura saturada del evaporador (TE), °C	-1			-28			-43				
Temperatura del retorno de aire (RA), °C	45			-10			-35				
Diferencia de temperatura (TD) [RA-ET]	15			10			10				
Tasa de sobrealim. ,XX:1	1.2	1.2	3	1.2	1.2	3	1.8	1.8	2.5	1.2	1.2
Tipo evaporador	Baja sobre alim.	Baja sobre alim.	Conven-cional	Baja sobre alim.	Baja sobre alim.	Conven-cional	Baja sobre alim.	Baja sobre alim.	Conven-cional	Baja sobre alim.	Baja sobre alim.
Tipo de alimentación	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Inferior
Tasa de sobrealimenta-ción, XX:1	1,2	1,2	3	1,2	1,2	3	1,8	1,8	2,5	1,2	1,2
Material del tubo	SS - ES	SS - ES	SS	SS - ES	SS - ES	CS	SS - ES	SS - ES	CS	SS - ES	SS - ES
Material de la aleta	Al	Al	Al	Al	Al	GLV	Al	Al	GLV	Al	Al
Capacidad, toneladas	10,2	10,2	10,4	35,1	35,1	35,2	33,7	33,7	33,6	33,3	33,3
Área facial, m <sup>2</sup>	1,3	1,3	1,4	6,5	6,5	6,1	8,5	8,5	8,4	6,5	6,5
filas profundas	10	10	8	8	8	10	8	8	8	10	10
Diámetro del tubo	5/8	5/8	3/4	5/8	5/8	3/4	1	1	3/4	5/8	5/8
Volumen interno, lts	49	49	57	193	193	294	458	458	326	241	241
Carga operative kg**	6,85	6,85	11,97	27,03	42,9	65,67	86,57	137,41	74,51	33,11	52,56
lb**	15,1	15,1	26,4	59,6	94,6	144,8	190,9	303,0	164,3	73	115,9
Densidad del liquido kg/m <sup>3</sup>	639,36	639,36	639,36	675,2	675,2	675,2	692,8	692,8	692,8	692,8	692,8
lb/ft <sup>3</sup>	39,96	39,96	39,96	42,2	42,2	42,2	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3
Carga lts	10,76	10,76	18,69	39,93	63,44	97,14	124,89	198,24	107,62	47,86	75,9
ft <sup>3</sup>	0,38	0,38	0,66	1,41	2,24	3,43	4,41	7,00	3,80	1,69	2,68
% Liq. vol.	0.22	0.22	0.33	0.21	0.33	0.33	0.27	0.43	0.33	0.20	0.31
Servicio	MUELLE			CONGELADOS			CELDAS CONGELACIÓN				
Carga DT = 1,7°C DT = 3°F kg	13,97	13,97	N / A	47,84	75,94	N / A	122,93	195,13	N / A	57,59	88,28
lb	30,80	30,80	N / A	105,49	167,45	N / A	271,08	430,28	N / A	127,00	194,67
Vol. fluctuación kg	7,12	7,12	14,51	20,81	33,03	79,63	36,36	57,72	90,34	24,49	35,73
lb	15,70	15,70	32,0	45,89	72,84	175,6	80,18	127,27	199,2	54,00	78,79



## Evaporadores de baja sobrealimentación

Tabla 6 Comparativa de la carga del evaporador y el volumen de fluctuación (continuación)

ft <sup>3</sup> **	0,39	0,39	0,8	1,09	1,73	4,16	1,85	2,94	4,6	1,25	1,82
Cantidad	8	8	8	8	8	8	12	12	12	12	12
Totales											
Vol. interno lts	394	394	453	1.546	1.546	2.355	5.493	5.493	3.908	3.893	3.893
ft <sup>3</sup>	13,9	13,9	16,0	54,6	54,6	83,2	194,0	194,0	138,0	102,2	102,2
Vol. total fluctuación lts	87,79	87,79	181,25	246,38	390,82	943,06	628,7	999,7	1.563,26	424,8	617,38
ft <sup>3</sup>	3,1	3,1	6,4	8,7	13,8	33,3	22,2	35,3	55,2	15,0	21,8
<b>Reducción total Vol. fluctuación lts</b>	<b>93</b>	<b>93</b>	<b>-</b>	<b>697</b>	<b>552</b>		<b>934</b>	<b>564</b>		<b>1.136</b>	<b>33,4</b>
ft <sup>3</sup>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>-</b>	<b>24,6</b>	<b>19,5</b>		<b>33,0</b>	<b>19,9</b>		<b>40,2</b>	<b>33,4</b>
Carga total kgs	54,8	54,8	95,7	216	343	525	1.039	1.649	894	443	631
lbs	120,8	120,8	211,0	476,8	756,8	1.158,6	2.290,8	3.636,2	1.971,9	876,0	1.390,5
<b>Reducción de carga total kgs</b>	<b>40,9</b>	<b>40,9</b>	<b>-</b>	<b>309</b>	<b>1.822</b>	<b>-</b>	<b>145</b>	<b>755</b>	<b>-</b>	<b>487</b>	<b>264</b>

**eviaturas en tablas:**

- TE Temperatura de evaporación saturada para el amoníaco a la salida del evaporador.
- TA Temperatura del aire de retorno del aire que entra al evaporador.
- DT Diferencia de temperatura entre el aire de retorno y la evaporación saturada
- SS Acero inoxidable.
- IE Mejorado internamente.
- Al Aluminio.
- CS Acero al carbono.
- GLV Acero galvanizado.

## CUADROS ELÉCTRICOS EN SERIE Y PROYECTOS ESPECIALES

### CONTROL COLD



Cuadros eléctricos de protección y control para instalaciones con unidad condensadora y evaporador, solo unidad o solo evaporador. Seleccione su opción en:

[controlcold.automatiza.es](http://controlcold.automatiza.es)

### CONTROL VENT



Cuadros de protección y control para sistema de ventilación forzada según reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas R.D. 552/2019

### PROYECTOS ESPECIALES



Soluciones en automatización para instalaciones frigoríficas industriales o especiales. Fluidos secundarios, NH3, CO2, etc...

### TRANSFORMACIÓN DIGITAL



Asesoría, diseño e implementación para transformación digital, tanto de procesos internos de la empresa como en procesos industriales. (Industria 4.0).

# Diseño y Experiencia Operativa de Grandes Sistemas de Amoníaco con Baja Carga de Refrigerante

Por el Dr. Andy Pearson, CEng, Star Refrigeration  
Traducido por Javier Atencia, TEWIS

**E**l amoníaco se ha utilizado como refrigerante desde 1859, cuando los hermanos Carre desarrollaron el proceso de absorción en Francia. Se usó por primera vez en los Estados Unidos durante la Guerra Civil en 1863, cuando se pasaron en contrabando a través de los bloqueos de la Unión vía México cuatro máquinas de hielo por absorción que fueron instaladas en los estados del sur; la primera fue una máquina de 200 (440 lb) kg por día construida en Augusta, Georgia.

Casi una década después, David Boyle, nacido en Johnstone, Escocia, instaló el primer compresor de refrigeración de amoníaco del mundo en Jefferson, Texas. Esto fue anterior a Carl von Linde, quien en ese momento reconoció el potencial de los sistemas de compresión de vapor, pero estaba experimentando con éter metílico. Carl cambió al amoníaco en 1876, aplicando el rigor científico al diseño del compresor y al sistema, alcanzando nuevos niveles de éxito con su nuevo diseño que, posteriormente, fue licenciado a Augsburg (Alemania), Sulzer (Suiza), Carels (Bélgica), Morton & Burton (Gran Bretaña) y Fred Wolf (USA). Durante los siguientes diez años, muchos más fabricantes de compresores de amoníaco iniciaron su actividad en ambos lados del Atlántico, incluidos De La Vergne, Frick, Vilter y York en USA y Sterne en Gran Bretaña.

La refrigeración con amoníaco se convirtió rápidamente en la técnica preferida para el enfriamiento de salmueras y la fabricación de hielo para la elaboración de cerveza, el envasado de carne, los almacenes logísticos y las pistas de patinaje sobre hielo.

Desde estos primeros comienzos ha habido muchos desarrollos en refrigeración; algunos de ellos debilitando la posición dominante del amoníaco y otros reforzándola. Si bien en los inicios se tenía una tecnología en común, las industrias en Europa y Estados Unidos tomaron caminos distintos, por lo que no sorprende encontrar que, ciento cincuenta años después de Carres y su primer sistema de absorción, existen diferencias considerables en las tecnologías, actitudes y legis-

lación. En Europa, entre 1950 y 1980, el amoníaco en refrigeración industrial fue reemplazado casi por completo por los CFC y los HCFC. Últimamente, estos sistemas tendían a ser grandes sistemas de R-22 bombeados, pequeños racks de R-502 que usaban expansión directa o el sistema de "baja presión de recipiente" sin bombas. El amoníaco solo se retuvo en plantas muy antiguas, o donde había una fuerte tradición de su uso respaldada por una experiencia local adecuada como, por ejemplo, en las cervecerías. La mayoría de las cámaras frigoríficas, fábricas de alimentos y todas las pistas de hielo construidas en el período de 1970 a 1990 en el Reino Unido utilizaron halocarbonos (principalmente R-22). Los Chillers de agua para el aire acondicionado de los edificios se basaban casi exclusivamente en halocarbonos; principalmente en enfriadores centrífugos de R-12 para grandes capacidades y enfriadores R-12 o R-22 con múltiples compresores alternativos semiherméticos en los tamaños más pequeños. En otras partes de Europa, el alcance del cambio varió. Europa central retuvo más plantas de amoníaco, pero Francia, por ejemplo, promulgó requisitos mucho más estrictos. Estos dictan que cualquier sistema que contenga más de 150 kg de amoníaco debe cumplir con las normas sobre la ubicación de la planta en relación con los edificios vecinos y debe estar sujeto al registro de la autoridad local y la supervisión técnica. Dado que los sistemas pequeños, con menos de 150 kg de carga, son los más adecuados para el R-22, la industria de la refrigeración con amoníaco en Francia se vio bastante restringida.

En Estados Unidos, el mercado de aire acondicionado estaba más avanzado y usaba distintos enfriadores centrífugos de R-11, así como de R-12. El sector industrial fue tratado como un nicho dentro de un mercado mucho más grande y optó por seguir usando amoníaco de una forma muy tradicional. Tratándose de grandes sistemas instalados in-situ que comprenden dos o más regímenes de temperatura, con amoníaco contenido en grandes separadores y bombeado a las cámaras

de congelados, cámaras frigoríficas y otros procesos. Se estima que existen alrededor de 2.000 instalaciones en los Estados Unidos de América con una carga de amoníaco superior a 10.000 lb (4.546 kg), que es el umbral para el registro de la instalación en la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA). La más grande de estas plantas contiene más de 400.000 lb (más de 180.000 kg) de refrigerante.

## LAS CONSECUENCIAS DE LA ELIMINACIÓN DE CFC

La divergencia de los mercados europeo y estadounidense de refrigeración y aire acondicionado tuvo un profundo efecto en sus respectivas respuestas a los informes iniciales sobre el agotamiento de la capa de ozono. En los EE.UU. desde 1977 se promulgó una legislación que limitaba el uso de los CFC en aerosoles, concretamente los considerados como "sistemas de pérdida total", sin embargo, no se tomaron medidas contra el aire acondicionado y, en particular, el aire acondicionado de los automóviles. En ese momento, el aire acondicionado del automóvil era también un sistema de pérdida total, ya que no se intentaba recuperar el refrigerante durante el servicio del vehículo. Por el contrario, en Europa, y en particular en el norte de Europa, los aerosoles no fueron el objetivo hasta mucho más tarde, pero el mercado de la refrigeración y el aire acondicionado estuvo estrictamente controlado en una etapa mucho más temprana. Cuando el Protocolo de Montreal fue ratificado por primera vez en 1986, la Comunidad Europea lideró la campaña para imponer controles más exigentes. El protocolo originalmente buscaba reducir la producción de CFC al 50 % en base a los niveles de 1986, pero la UE propuso límites más rigurosos con la eliminación completa en el tiempo (phase-out long) mucho antes de que esta fuese la postura acordada mundialmente.

Por lo tanto, estaba claro que la industria de la refrigeración comercial e industrial en Europa, que había llegado a depender del R-12 y el R-502, necesitaría encontrar alternativas. Los HFCs como el R-134a llenaron el vacío en el mercado comercial y durante mucho



tiempo se promocionó el R-22 como "parte de la solución, no del problema". Sin embargo, eventualmente quedó claro que, debido a una mayor preocupación por el calentamiento global, los días del R-22 también estaban contados, y que además esta situación, más temprano que tarde, llegaría a Europa.

Los HFCs eran, fundamentalmente, inadecuados para ser utilizados en los sistemas industriales de grandes capacidades. Eran relativamente caros, por lo que por primera vez en la historia de la refrigeración la carga de refrigerante en una planta industrial representó una proporción significativa de la inversión total. Los HFCs requerían el uso de nuevos lubricantes, ninguno de los cuales era realmente adecuado para su uso en este tipo de sistemas. De alguna manera, también parecía ser más propensos a las fugas que sus predecesores. En poco tiempo, el amoníaco fue "redescubierto" en Europa, y adoptado con entusiasmo por el mercado industrial. Por otro lado, los usuarios finales no estaban familiarizados con el amoníaco y los técnicos de servicio estaban más acostumbrados a las plantas de halocarbono "totalmente automáticas", con purgadores de aire y sistemas de retorno de aceite automáticos. Esto hizo que no fuese posible volver a los sistemas tradicionales de amoníaco que todavía se estaban instalando en los EE. UU. y, por lo tanto, los contratistas europeos desarrollaron nuevas técnicas.

Estos desarrollos incluyeron el uso del amoníaco en enfriadores compactos con evaporadores de baja carga y la adaptación del sistema de baja presión de recipiente utilizados en los sistemas con CFCs para hacerlo apto en sistemas con amoníaco.

#### **LA INFLUENCIA DEL TIPO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR EN LA CARGA DEL SISTEMA ENFRIADOR**

Los enfriadores tradicionales de agua glicolada utilizan un evaporador de carcasa y tubos. Para la operación de expansión seca, el refrigerante está dentro de los tubos, pero la mayoría de los enfriadores de amoníaco funcionan "inundados", con el agua o el glicol en los tubos y el amoníaco líquido en el lado de la carcasa. Hay diferentes ventajas en esta solución dando como resultado una gran carga de amoníaco en relación con la

capacidad de enfriamiento. Cuando se utilizan condensadores evaporativos o enfriados por aire, estos también contienen una cantidad significativa de refrigerante líquido, por lo que un enfriador de estilo tradicional, con evaporador de carcasa y tubo inundado y condensador por aire, puede contener hasta 1 kg/kW (7,7 lb/TR). Si se controla el nivel de líquido en el evaporador inundado mediante un "sistema de flotador" y además se instala un recipiente de alta presión, la carga específica podría aumentar hasta 1,5 kg/kW (11,6 lb/TR). Varios tipos alternativos de intercambiadores de calor pueden reducir estas cifras. El más común es un intercambiador de calor de placas, compuesto por placas de láminas corrugadas delgadas, generalmente de acero inoxidable, que se comprimen entre placas extremas de acero grueso en un bastidor soporte. Estos intercambiadores se desarrollaron originalmente para el intercambio de calor líquido/líquido en industrias de procesos, pero requirieron de una adaptación mínima para su uso como evaporadores o condensadores. Las unidades más pequeñas pueden soldarse con níquel o incluso con cobre electro-estañado para usar con amoníaco, pero por encima de los 100 kW (30TR) de capacidad, es necesaria la configuración de la placa y bastidor. En un sistema alimentado por gravedad estándar, las placas y el tubo ascendente de aspiración húmeda están casi llenos de amoníaco líquido, con burbujas de gas saliendo a través de él. En el peor de los casos, la carga específica de un intercambiador de calor de placas alimentado por gravedad no será mucho menor que la de uno de carcasa y tubos, aunque el volumen interno del conjunto de placas sea relativamente pequeño. Sin embargo, si las placas funcionan con una línea de aspiración seca o casi seca, es probable que la carga específica se reduzca a alrededor de 0,5 kg/kW (3,9 lb/TR) con un condensador directo (enfriado por aire o evaporativo).

Si se utiliza un condensador de placas junto con una torre de enfriamiento o un enfriador de aire, la carga específica de amoníaco se puede reducir fácilmente a 0,1 kg/kW (0,8 lb/TR). Enfriadores de este tipo se utilizan en grandes instalaciones; hasta 10 MW (2.850 TR) para la refrigeración de minas en Sudáfrica; y se han aplicado

a grandes proyectos de refrigeración en edificios públicos como la Terminal 5 de Heathrow y el aeropuerto Gardermoen de Oslo.

Hay varias formas en las que se puede lograr el funcionamiento "casi seco" del evaporador de placas, incluido el uso de una válvula de expansión termostática o electrónica para controlar el recalentamiento en la aspiración o el uso de un recipiente separador de aspiración con control de "nivel alto". Hay varios tipos de soluciones en el mercado que utilizan control de recalentamiento, pero siempre existe el riesgo de un arrastre de líquido al compresor si no se instala un separador de aspiración, especialmente en condiciones de carga que varían rápidamente. El sistema con un recipiente de baja presión tiene una "carga precisa" y el exceso de carga no puede llegar al compresor. Este sistema ofrece la eficiencia y fiabilidad de un sistema inundado por gravedad, teniendo en cuenta que el recipiente se puede colocar en cualquier lugar en relación con el evaporador, lo que ofrece una mayor flexibilidad en el diseño de enfriadores compactos.

El intercambiador de calor de carcasa y placas es una variante del intercambiador de calor de placas, adecuado para aplicaciones con alta presión en el lado secundario. Este comprende un conjunto de placas corrugadas circulares, soldadas con láser en las costuras y compactadas en una carcasa de acero. Ofrece una disposición muy compacta, pero a diferencia del intercambiador de placas y bastidor, no es tan fácil de desmontar para su limpieza. Si se requiere un evaporador de baja carga, donde la limpieza del lado secundario es esencial, se debería considerar un enfriador por espray (Spray Chiller). Este es un conjunto de carcasa y tubos, con una bomba que alimenta líquido a un tubo rociador situado encima del haz de tubos. La carcasa casi no contiene líquido, pero las superficies de los tubos están completamente humedecidas, lo que brinda un funcionamiento eficiente en una amplia gama de capacidades. Por lo que no hay prácticamente riesgo de arrastre de líquido bajo ninguna circunstancia.

Se han desarrollado intercambiadores de calor de "microcanales" extruidos o fabricados para aplicaciones de refrigeración, particularmente como evaporadores para sistemas de dióxido de carbono y condensadores para enfriadores R-134a. Hasta la

fecha, estos nuevos intercambiadores de calor no se han aplicado a enfriadores de amoníaco, pero la perspectiva es muy atractiva, ya que debería ser posible lograr la relación de carga específica de un enfriador de placa/placa, sin la penalización de un circuito de condensación por agua en el lado del enfriador. Una posible dificultad en el uso de condensadores de microcanales con amoníaco sería el comportamiento del aceite inmisible en el condensador, donde los conductos de refrigerante suelen tener menos de 1 mm de diámetro. Otra preocupación es la resistencia a la corrosión de estos intercambiadores de calor totalmente de aluminio, ya que la expectativa de vida útil de los equipos de amoníaco es generalmente más larga que la de los enfriadores comerciales.

En aplicaciones de enfriadores de aire, como refrigeración y congelados, un desarrollo reciente ha sido una modificación del diseño para mejorar la humectación de la superficie interna del tubo. Este efecto es importante para los evaporadores de expansión directa y los de los sistemas con recipientes de baja presión, y se vuelve cada vez más importante a medida que se reduce la temperatura de funcionamiento. En aplicaciones de enfriamiento no hay dificultad para establecer un flujo anular u ondulado en los tubos del enfriador, pero en cámaras frigoríficas y congeladores rápidos o en espiral, donde el caudal másico es bajo en comparación con el caudal volumétrico, el régimen de flujo casi siempre está estratificado y, por lo general, solo se humedece el 10-20% de la superficie del tubo. Junto con el uso de tubos de aluminio, esta disposición puede ofrecer una mejora significativa en la eficiencia del sistema, del orden del 10%, al tiempo que reduce la cantidad de amoníaco líquido retenido en el evaporador durante la operación. No se utiliza el control del recalentamiento a través de válvulas de expansión termostáticas para los enfriadores de aire de amoníaco debido al riesgo de fugas en la válvula y porque la operación prolongada con amoníaco puede causar erosión del asiento de la válvula (trefilado), lo que provoca un funcionamiento errático y poco fiable. También se pueden causar problemas en un sistema grande si varios enfriadores DX realizan el desescarche al mismo tiempo, particularmente con grandes

volúmenes de líquido que regresan por la aspiración supuestamente "seca" al final del desescarche. El uso de enfriadores de aluminio mejorados junto con el sistema recipiente de baja presión elimina estos problemas.

### ENFRIADORES DE CARGA MÍNIMA FRENTE A CARGA ÓPTIMA

A principios de la década de 1990, cuando la industria de la refrigeración en Europa buscaba aplicar el amoníaco en las enfriadoras de agua para dar servicio a los edificios, hubo una oleada de desarrollos de los denominados enfriadores de "carga mínima". El objetivo era animar a los operadores que antes no estaban familiarizados con el amoníaco a utilizarlo en grandes sistemas de refrigeración donde las alternativas de fluorocarbonados eran inaceptables. La mayoría de estos diseños utilizaron intercambiadores de calor de placas como evaporador y condensador, pero todos los demás componentes del sistema también se analizaron y modificaron cuando fue posible para reducir la carga de la unidad. Una configuración típica usaba una alimentación por gravedad para el evaporador, pero con el nivel controlado en la caída en lugar del separador. El líquido a alta presión del condensador se expandió a través de un eyector hacia la entrada del intercambiador de placas. La sobrealimentación de las placas se conectó al puerto lateral del eyector, creando una ligera aspiración que fue suficiente para superar la pérdida de presión a través del intercambiador e inducir el flujo desde el separador de vuelta a la entrada del intercambiador de placas. No había un recipiente de alta presión en la unidad; un recipiente en el lado de baja fue suficiente para realizar la carga total de la unidad. Con esta disposición fue posible realizar una carga específica tan baja como 0.025kg/kW (0.216/TR), resultando una carga de solo 25kg (5516) en una unidad de 1.000kW (285 TR). Sin embargo, este tipo de unidad atrajo algunas críticas por varias razones. Si hubiera alguna fuga de amoníaco, por leve que fuera, el rendimiento de la unidad se vería afectado negativamente. Esto podría causar que la eficiencia se viese afectada o requeriría de la atención inmediata de un técnico para rastrear y reparar la fuga. Como no había un recipiente de alta pre-

sión, si la válvula de expansión estaba controlada por un flotador en el lado de baja presión del sistema, cualquier exceso de carga en la planta tendería a regresar al condensador de tipo placas. Esto sería hacer que la unidad funcionase de manera ineficiente con una alta presión de descarga. La idea de una unidad en la que la eficiencia dependiera tan estrictamente de lograr y mantener exactamente la carga correcta no encontró el favor de los operadores de las plantas. En su lugar se desarrolló el concepto de "carga óptima". Se reconoció que no era sensato hacer que la carga de amoníaco fuera tan baja como fuera posible si esto tenía efectos adversos sobre en la fiabilidad o la eficiencia. La "carga óptima" debería ser lo más baja posible sin correr el riesgo de una gran ineficiencia si se perdía una pequeña cantidad de refrigerante. El sistema de recipiente de baja presión descrito anteriormente logró este objetivo. En funcionamiento normal, hay una ligera sobrealimentación del placas, normalmente del 3 al 5% en una enfriadora de agua. Este se recoge en el recipiente de baja presión, donde se evapora subenfriando la alimentación líquida desde el condensador. Si la unidad está con baja carga, el flujo a través de las placas se evapora hasta secarse y no hay líquido sobrealimentado disponible para el subenfriamiento. Esto da una señal clara y fácil de registrar de que la unidad tiene poca carga, pero no tiene un efecto significativo en la eficiencia hasta que se haya perdido una mayor cantidad de refrigerante. Si el sistema está sobrecargado, el exceso se ubicará en el recipiente de baja presión y no tendrá ningún efecto sobre la eficiencia o la fiabilidad a menos que la sobrecarga sea tan excesiva que el recipiente se llene y el líquido regrese al compresor. En la práctica, esto requiere tanto refrigerante adicional que es muy poco probable que suceda. Los sistemas de carga óptima se han vuelto muy comunes, y una carga específica de referencia de 0,1 kg/kW (0,816/TR) parece aceptarse generalmente como un objetivo sensato. Se instaló un gran sistema con evaporadores de placas y condensadores para Roche Pharmaceuticals en Welwyn Garden City en Inglaterra. Con tres enfriadores de agua, cada uno de 2.500 kW (720 TR), se requirieron 238 kg (524 lb)

de amoníaco en la puesta en marcha. Se estipuló en la especificación que la carga sería inferior a 250 kg (550 lb) por enfriador. El uso de depósitos de baja presión e intercambiadores de calor de placas ahora se ha extendido a una gama estándar de conjuntos de enfriadores de agua con dos compresores de tornillo compactos y capacidades en el rango de 200kW a 800kW. Estos enfriadores condensados por aire están diseñados para su ubicación en exteriores, con el panel de control, los compresores, el sistema de aceite, el recipiente y el evaporador incorporados dentro del cuerpo del condensador que consta de dos serpentines verticales y una cubierta con los ventiladores.

### **CARGA ÓPTIMA EN CÁMARAS FRIGORÍFICAS Y CONGELADORES**

El recipiente de baja presión, desarrollado originalmente para proporcionar unidades compactas que usan R-502 para cámaras frigoríficas, ahora también se usa para plantas de amoníaco. Inicialmente se pensó que el calor latente muy alto del amoníaco lo hacía inadecuado para este tipo de sistema. No obstante, el diseño cuidadoso de algunos componentes clave y la atención a los detalles en la instalación han demostrado que estos sistemas se pueden diseñar para que sean rentables en términos de capital inicial y retorno de inversión. Este tipo de sistemas de amoníaco se ha construido en el Reino Unido desde 1988, y durante un período de veinte años se han introducido algunos refinamientos de diseño significativos. El alto calor latente significa que el número de recirculaciones en un sistema con recipiente de baja presión de amoníaco es menor que en un sistema R-502 equivalente. Como resultado, es más difícil asegurar una distribución uniforme tanto entre los evaporadores como entre los tubos individuales de cada evaporador. A pesar de ello, si se utilizan distribuidores especiales, se pone especial cuidado en el diseño de los circuitos y se utilizan enfriadores de aluminio mejorados, se pueden obtener muy buenos resultados.

La baja carga de refrigerante en el sistema con recipiente de baja presión es el resultado de una combinación de varios factores. El recipiente solo contiene gas en funcionamiento normal, siempre que la planta esté correctamente cargada. La línea de líquido desde el condensador hasta la sala de

máquinas está llena de líquido, pero generalmente es corta y, como todas las líneas de líquido de amoníaco, tiene un diámetro pequeño. Las válvulas de expansión están montadas en el conjunto del recipiente, que generalmente se encuentra en la sala de planta del compresor, por lo que la línea de líquido del conjunto a los evaporadores contiene una mezcla de “flash gas” y líquido en forma de espuma. Los enfriadores suelen contener una cantidad menor de líquido que en un sistema de circulación por bombeo, y la línea de aspiración húmeda, si la planta se carga correctamente, transportará alrededor del 10 % de líquido en masa (alrededor del 1 % en volumen). No hay un recipiente de alta presión en la salida del condensador y la carga del sistema se puede mantener en el recipiente de baja presión para su mantenimiento. Se proporciona un circuito de glicol auxiliar en el condensador evaporativo con el fin de tener un método simple, pero efectivo, de enfriamiento del aceite, y la purga de aire automática se logra con un pequeño contenedor de líquido en la salida del condensador que funciona como cámara de control del flotador de alta presión. El aceite regresa automáticamente desde el recipiente de baja presión al compresor.

El resultado de estas medidas se ilustra mejor con referencia a una instalación típica. El caso de estudio es un centro de distribución compuesto construido en 2001. El centro proporciona instalaciones de distribución de productos refrigerados y congelados a supermercados en el sureste de Inglaterra y consta de cuatro cámaras de temperatura controlada. El mayor de estos mide 123 m (410 pies) en su punto más ancho y 120 m (400 pies) de largo, y se mantiene a +2 °C (36 °F). Hay dos cámaras de refrigeración más pequeñas, una a -1°C (30°F) y otra a +10°C (50°F). Ambos tienen 65 m (215 pies) de ancho y 45 m (158 pies) y 75 m (258 pies) de largo respectivamente. Todos los techos de enfriamiento están a 7 m (23 pies) y el servicio de enfriamiento total es de 2600 kW (750TR). La cámara frigorífica mide 110 m (365 pies) de largo y 80 m (264 pies) de ancho y tiene un techo de 11 m (36 pies). Se mantiene a -25°C (-13°F) y tiene una potencia calculada de 1150kW (330TR).

La cámara frigorífica cuenta con tres

sistemas de recipiente de baja presión, cada uno con un compresor Howden WRVi 255 y un condensador evaporativo dimensionados para cumplir con un tercio de la capacidad de la planta. La carga de amoníaco en cada uno de estos sistemas es de 300 kg (660 lb), lo que supone una carga de menos de una tonelada para el almacenamiento frigorífico total, que tiene un volumen de poco menos de 100.000 m<sup>3</sup> (3,5 millones de pies cúbicos). Las cámaras de refrigeración son alimentadas con un sistema de glicol enfriado, nuevamente con tres conjuntos independientes. Cada conjunto tiene un recipiente de baja presión y un intercambiador de calor de placas, conectado a dos compresores Howden WRV204 y un condensador evaporativo. La carga de cada enfriador de glicol es de 250 kg (550 lb). Por lo tanto, la carga máxima en cualquier sección individual de este gran centro de distribución es de 300 kg (660 lb) y el inventario total de amoníaco de la planta es de 1650 kg (3600 lb).

Se estima que el sistema de amoníaco bombeado equivalente que estaría compuesto por compresores de baja presión y de alta presión en un sistema booster, un conjunto de bomba de la zona de baja presión, un interenfriador, condensadores evaporativos y un recipiente de alta presión contendría alrededor de 14 000 kg (31 000 lb) debido a las largas líneas de líquido, la gran cantidad de evaporadores y tamaño del separador de aspiración y el interenfriador.

En el mercado de los Estados Unidos, el sistema de la planta central estaría sujeto a todos los requisitos para el análisis de peligros y la gestión de riesgos según las reglamentaciones de OSHA, que tienen un umbral inferior de 4545 kg (10 000 lb). El sistema de carga baja, sin embargo, estaría dentro de los límites por un factor de tres, incluso cuando se considera la carga total de todos los sistemas en el sitio.

### **OPCIONES PARA SISTEMAS INDUSTRIALES MÁS GRANDES**

No todas las instalaciones son adecuadas para el sistema de recipiente de baja presión de amoníaco directo descrito anteriormente. Donde hay una gran cantidad de cámaras, donde se espera que la distribución de líquido sea difícil o simplemente donde hay demasiados evaporadores para adaptarse al recipiente de baja presión se prefiere



un enfoque de planta central. Todavía es posible lograr una carga baja usando amoníaco junto con otro fluido.

Tradicionalmente, para la planta de enfriamiento, esto sería etilenglicol o propilenglicol y, más recientemente, en Europa, para las plantas de baja temperatura se han introducido otras soluciones salinas como el formiato de potasio y el acetato de potasio. Sin embargo, se ha reconocido que se pueden obtener beneficios adicionales usando dióxido de carbono junto con amoníaco. En los sistemas de refrigeración, el dióxido de carbono se utiliza como "refrigerante secundario volátil", se bombea a alta presión a la carga de calor, se evapora y se devuelve al condensador a una temperatura nominalmente estable. Para aplicaciones de temperatura más baja, particularmente en plantas de congelación, el dióxido de carbono del evaporador se comprime a una presión alta adecuada antes de regresar al condensador.

Esta técnica se ha utilizado durante los últimos años en cámaras frigoríficas, almacenes de distribución, plantas de congelación de placas, plantas de congelación rápida, túneles de congelación y congeladores en espiral.

En el Reino Unido se han completado cuatro centros de distribución similares en tamaño y estilo a la planta descrita anteriormente. En comparación con el caso de estudio anterior, la carga de refrigerante de amoníaco se reduce aproximadamente un 40 %.

Cada sistema constaba de un sistema central de dióxido de carbono bombeado, que alimentaba refrigerante a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $23\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) a las áreas de refrigeración y a  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-24\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) a la cámara frigorífica de baja temperatura. El dióxido de carbono se condensa en cascada con dos sistemas de amoníaco independientes para brindar resiliencia en caso de una falla importante en el sistema de amoníaco. Cada sistema de amoníaco tiene una carga aproximada de 500 kg (1100 lb), lo que da un contenido total de amoníaco de 1 tonelada (2200 lb).

Se han instalado sistemas similares para la congelación en túneles y en placas. La carga específica de amoníaco en todos los casos es aproximadamente de  $0,3\text{ kg/kW}$  ( $2,4\text{ lb/TR}$ ), pero esto podría reducirse significativamente utilizando condensadores de amoníaco de carcasa y placas y torres de enfriamiento para la disipación de calor, que probablemente ofrezcan la misma carga específica que

los enfriadores de agua de placas de  $0,1\text{ kg/kW}$  ( $0,77\text{ lb/TR}$ ). Sobre esta base, la capacidad máxima de refrigeración de un sistema que cae por debajo del umbral OSHA de los Estados Unidos de 10 000 lb (4546 kg) sería de 128 000 TR (36 MW). El umbral francés de 150 kg permitiría la instalación de un sistema de 500 kW (150 TR) sin restricciones gubernamentales sobre la ubicación, y de 5 MW (1500 TR) sin la aplicación de controles más estrictos para los sistemas de amoníaco.

### POSIBILIDADES FUTURAS

Es poco probable que las regulaciones actuales que rigen el uso de amoníaco en plantas de refrigeración industrial se relajen en un futuro cercano. Las posibles excepciones se encuentran en Francia e Italia, donde las regulaciones podrían alinearse más con el resto de Europa para beneficiarse de la eficiencia superior posible con los sistemas industriales de amoníaco; pero incluso este pequeño paso es improbable. Es mucho más plausible que los requisitos para los sistemas de seguridad, la protección personal y la documentación asociada se vuelvan más estrictos. Un ejemplo de este tipo de legislación es la reciente introducción en EE.UU. de las leyes de "Seguridad Nacional" que exige a los usuarios finales que protejan sus instalaciones contra actividades delictivas o terroristas. Al mismo tiempo, los estándares de construcción serán más internacionales. Esto ya sucedió en Europa, donde la norma EN 378, "Sistemas de refrigeración y bombas de calor: requisitos ambientales y de seguridad", reemplazó a los antiguos estándares nacionales, como la norma BS4434. Es posible que la norma internacional ISO 5149 reemplace en un futuro cercano a la EN378 y la ASHRAE 15. También existe la posibilidad de la introducción de requisitos de códigos de construcción más rigurosos asociados con el uso de amoníaco. En este caso, el argumento a favor de los sistemas de amoníaco de baja carga se vuelve muy simple. Si es posible evitar gran parte de la dificultad y el gasto de diseñar y operar sistemas con cargas de gran tonelaje, entonces el mercado de EE. UU. probablemente seguirá a los europeos por la ruta de carga baja, ya sea con sistemas de recipiente a baja presión sin bombas, o con sistema de cascada

de dióxido de carbono/amoníaco. Es importante señalar que el mismo éxito de estos nuevos sistemas podría ser el detonante que inicie movimientos legislativos contra las grandes cargas de amoníaco. En una nota más positiva, el mercado en Gran Bretaña ha adoptado el concepto de carga baja porque es intrínsecamente más simple, más fácil y, por lo tanto, más seguro y porque, cuando se usa adecuadamente, no tiene por qué ser más costoso de instalar o de operar. No existe un requisito legal para medidas específicas de gestión de riesgos, análisis de consecuencias fuera del sitio o gestión de seguridad de procesos en Gran Bretaña, siempre que la carga sea inferior a 30 toneladas (66 000 libras), por lo que la preferencia por los sistemas de carga baja en Gran Bretaña y, hasta cierto punto, en el resto de Europa, parece estar impulsado por consideraciones económicas y de facilidad de uso, no por restricciones legales.

### CONCLUSIÓN

Es posible lograr reducciones significativas en la carga de amoníaco en enfriadores y sistemas industriales mediante la adopción de una variedad de estrategias. Estos no conllevan ninguna penalización significativa en el costo de capital, aunque imponen algunas restricciones en las formas en que se puede configurar el sistema.

La experiencia en la ingeniería de estos sistemas en el Reino Unido durante los últimos años demuestra claramente que las reducciones de carga pueden lograrse siempre que exista la voluntad de aceptar las restricciones y modificar las actitudes tradicionales hacia el diseño del sistema. La eficiencia energética de estos sistemas no es peor, sobre el papel, que los sistemas tradicionales de circulación por bombeo y, en la práctica, el uso de desescarche por inversión de ciclo elimina gran parte de la penalización energética adicional inherente a los grandes sistemas de circulación por bombeo, lo que permite que estos sistemas alcancen excelentes cifras de consumo de energía.


### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los directores de Star Refrigeration por permitirnos publicar este documento, y a los colegas y clientes que colaboraron en la recopilación de información sobre las instalaciones. iiar


# Tewis

a member of **DAIKIN** group

**Equipos industriales NH<sub>3</sub> personalizados  
de gran potencia, fiabilidad y eficiencia  
para cubrir las necesidades más exigentes**




Procesos industriales  
Plataformas logísticas  
Salas de manipulación  
Túneles de congelado  
Almacenes frigoríficos  
Almacenes de congelados



Centrales con compresores  
conectados en paralelo,  
incrementando la eficiencia  
a cargas parciales.

Intercambiador de calor  
optimizado para uso en  
refrigeración industrial.



Solución modular  
que permite adaptarse al  
crecimiento de la empresa  
sin sobreinversiones iniciales.

Posibilidad de carrozado  
insonorizado para uso  
industrial o exterior.

Diseños compactos que  
reducen costes de instalación  
y facilita el mantenimiento.





# Los sistemas de baja carga pueden ser la respuesta

Por John Ansbro, GEA FES  
Traducido por Félix Sanz, AEFYT

Las empresas buscan proporcionar ingresos a sus accionistas como “resultado final”. Las instalaciones seguras son más rentables que las inseguras. Cuando ocurren accidentes como fugas de amoníaco, a veces las personas resultan heridas e incluso mueren; y normalmente, al menos en los almacenes, también se destruyen grandes cantidades de producto. Cuando se producen fugas de amoníaco, el negocio se ve gravemente afectado; el servicio a los clientes es imposible. El coste de gestionar un accidente grave, incluso con la protección que brindan las leyes y los seguros de compensación laboral, sigue siendo extremadamente alto. Además, el proceso es muy doloroso para los gerentes involucrados. Muchos clientes de instalaciones que contienen amoníaco entienden que una fuga importante de amoníaco afectará negativamente y verán como asegurarse de que dichas plantas estén bien diseñadas y sean seguras.

En el año 2010, el IAR realizó una encuesta de 12 preguntas sobre las emisiones de amoníaco con 700 encuestados del IAR, RETA e IARW. Casi el 80% de los encuestados informaron que su instalación tenía más de 10,000 libras de amoníaco (4535.92 kg), por lo que requerían PSM. Los almacenes frigoríficos (33 %), los productores de alimentos congelados (16 %) y las lecherías (8 %) fueron los que más respondieron.

A la pregunta de, ¿dónde ocurrieron la mayoría de las emisiones de amoníaco?, de las 471 respuestas, el 23 % informó bridas y juntas, el 20 % válvulas manuales o de control, el 12 % bombas, el 9 % válvulas de alivio de presión, el 9 % compresores y el 8 % recipientes de aceite.

## ¿DÓNDE OCURRIERON LA MAYORÍA DE LAS EMISIONES DE AMONIACO?

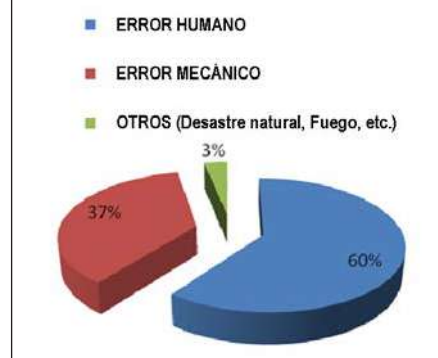
Obviamente, las válvulas y juntas fueron las mayores fuentes de fugas. El error humano representó el 60 % de los resultados, el error mecánico el 37 % y el 3 % otros. Obviamente, las empresas siempre pueden hacer un mejor trabajo al capacitar a las personas, pero las personas cometen errores.

Diseñar un sistema que minimice la superficie de contacto entre el amoníaco y las personas es probablemente la mejor manera de reducir las emisiones de

## ¿DÓNDE OCURRIERON LA MAYORÍA DE LAS EMISIONES DE AMONIACO?

	RESPUESTA	PORCENTAGE
Bridas/ Juntas	110	23
Válvulas manuales / control	96	20
Bombas	58	12
Válvulas de alivio de presión	43	9
Compresores	41	9
Recipientes de aceite	40	8
Tuberías	35	7
Procesos de carga	21	5
Evaporadores	19	4
Visores de líquido	7	1
Tanques de almacenamiento / recipientes	_1_	--
	<b>471</b>	

LAS CAUSAS MAS FRECUENTES DE LOS FALLOS, PREGUNTA #7, PUEDEN CATEGORIZARSE DE LA SIGUIENTE FORMA:



amoníaco y las consecuencias adversas asociadas con ellas.

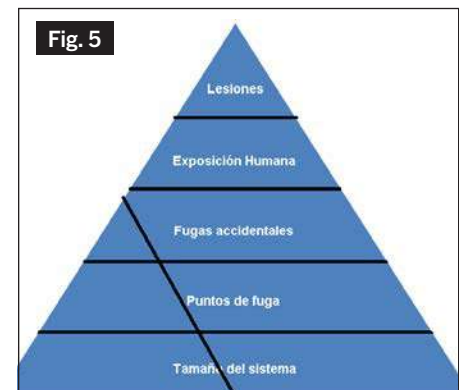
Un 37% de las fugas con liberación de amoníaco accidentales fueron fallos mecánicos, que podrían minimizarse mediante programas de mantenimiento preventivo más agresivos. Los fallos mecánicos nunca se pueden eliminar por completo, pero un sistema de refrigeración bien mantenido no solo funcionará de manera más eficiente, es decir, consumirá menos energía, sino que también dará como resultado menos emisiones de amoníaco. Los sellos mecánicos y la corrosión dominaron los fallos mecánicos, por lo que estos son dos puntos en los que se debe enfocar el mantenimiento.

Los sistemas de amoníaco tienen un historial sorprendentemente bueno; durante el período anterior de 5 años, más de 2/3 de los encuestados dijeron

que no habían experimentado ninguna liberación de amoníaco. En aquellos casos en los que ocurrió un escape, casi el 20 % informó que sus instalaciones fueron evacuadas. Obviamente, esas incidencias fueron bastante costosas tanto en términos monetarios directos como en servicio al cliente.

¿Cómo se puede reducir el riesgo de fugas? La Figura 5, cortesía del General Mills, es una pirámide de riesgo para las emisiones de amoníaco. La reducción de la carga de amoníaco afecta a todos los problemas de la pirámide - exposición humana, fuga accidental, puntos de fuga y tamaño del sistema.

Reducir la carga de amoníaco y confinar esa carga a espacios en los que generalmente no se permiten la estancia de personas es la forma más obvia y efectiva de reducir las lesiones y el alto coste financiero de las emisiones de amoníaco.





## SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL

### SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DE EXPANSIÓN DIRECTA DE AMONIACO.

La gran mayoría de los sistemas de refrigeración con amoníaco del país utilizan condensadores evaporativos con evaporadores cargados con amoníaco en los espacios ocupados. Estos sistemas ciertamente producen un nivel muy alto de eficiencia térmica, lo que resulta en los costes de energía más bajos.

### SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN INDIRECTOS CON AMONIACO

Los sistemas indirectos de amoníaco han vuelto a ganar popularidad porque el tamaño de la carga se puede reducir drásticamente mediante el uso de una torre de enfriamiento para la disipación de calor o condensación y refrigerantes secundarios, como salmuera o glicol, en lugar de evaporadores que contienen amoníaco. Recientemente, se utilizan baterías de CO2 en las cuales el CO2 actúa como un fluido secundario volátil o "salmuera que se evapora". Las baterías contienen CO2 pero no amoníaco.

Un excelente ejemplo de un sistema indirecto grande típico es un sistema de aire acondicionado comercial, en el que la condensación se lleva a cabo con agua enfriada de una torre de enfriamiento y el frío se distribuye a los espacios ocupados con un circuito de agua enfriada. Obviamente, en caso de temperaturas bajo cero, el agua enfriada debe ser reemplazada por un fluido que no se congele a las temperaturas requeridas. Pero el concepto es sencillo; los sistemas de aire acondicionado tienen cargas muy bajas y mantienen la carga de forma que no pueda alcanzar a las personas.

La tecnología de intercambiadores de calor ha mejorado considerablemente, brindando a los diseñadores la capacidad de enfriar un fluido con amoníaco o enfriar el amoníaco con otro fluido como el agua, de manera mucho más eficiente y rentable que en el pasado. Los intercambiadores de calor de placas soldadas, junto con las torres de enfriamiento, compiten efectivamente con los condensadores evaporativos. Los intercambiadores de placas con elevados acercamientos de temperatura (3 °F o 4 °F/ 1,68 o 2,25

°C) para que la pérdida de eficiencia del sistema pueda minimizarse, ahora, son económicamente accesibles.

### SISTEMAS DE AMONIACO DE CARGA BAJA

Los sistemas indirectos que utilizan intercambiadores de calor modernos dan como resultado cargas de refrigerante tan bajas como 0,13 kg/kW (1 libra de amoníaco por tonelada de refrigeración), y además, este amoníaco se encuentra en la sala del compresor y no en los espacios ocupados. La eficiencia térmica de los sistemas de amoníaco de baja carga es algo menor que la de un sistema de refrigeración de amoníaco directo, pero el mantenimiento tiende a ser más simple y menos frecuente.

### PARADIGMA DE RECHAZO DE CALOR

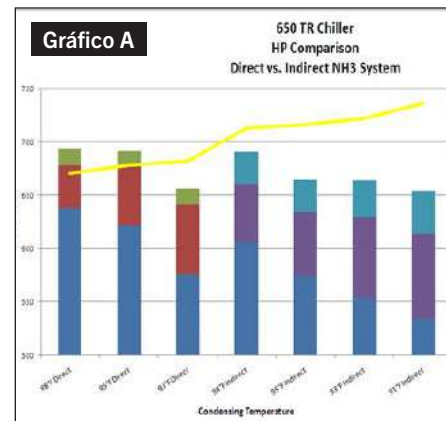
Los avances en el diseño de torres de enfriamiento, junto con un intercambiador de calor moderno, permitirán un acercamiento de 13 °F / 7,28 °C entre la temperatura de bulbo húmedo (78 °F / 25,56°C) y la temperatura de condensación de amoníaco (91 °F / 50,96°C). Esta diferencia de temperatura se compone de un acercamiento de 4 °F / 2,24 °C entre el agua de salida de la torre de enfriamiento (82 °F / 45,92°C) y la temperatura de bulbo húmedo del aire (78 °F / 25,56°C), un acercamiento de 3 °F / 1,68 °C entre la temperatura del agua de salida del condensador enfriado por agua ( 88°F / 49,28 °C) y la temperatura de condensación del amoníaco (91°F / 50,96 °C). Esto también se puede establecer como una diferencia de 4 °F / 2,24 °C entre la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente y la salida del agua de la torre de enfriamiento, un aumento de 6 °F / 3,36 °C para el agua en el condensador enfriado por agua y un acercamiento de 3 °F / 1,68 °C a través del intercambiador de calor.

El gráfico A, a continuación, compara un sistema de amoníaco directo e indirecto a unas 650 toneladas. Con referencia a la tabla, un sistema condensando a 95° F, con un condensador evaporativo (Sistema Directo), costará alrededor de un 20% menos con un condensador que un Sistema Indirecto, es decir, una torre de enfriamiento más intercambiador de calor, pero el enfriamiento la torre más el intercambiador de calor consumirá un 3% menos de caballos de fuerza. Con una prima de coste del 30 %, el sistema

indirecto puede reducirse hasta un 5 % menos de caballos de fuerza que un sistema directo a 95 °F de condensación.

### CONCLUSIÓN DE LA ENCUESTA IIAF

El sesenta por ciento de los escapes se debieron a fallos humanos. Una mejora en la formación y entrenamiento puede reducir la tasa de fallos, pero probablemente no de manera significativa. Los sistemas mecánicos, aunque estén bien mantenidos, tendrán fugas. Se produce corrosión, el desgaste mecánico, la vibración, etc. afectan negativamente al equipo, etc. En la medida en que la carga de amoníaco pueda reducirse y ubicarse lejos de las personas, la seguridad del sistema mejorará sustancial-



mente. Existen varios sistemas indirectos alternativos, con una eficiencia térmica razonable, reducido mantenimiento, costes y habilidades que también mejoran la seguridad. Estos sistemas merecen prácticamente la consideración de todos los diseñadores.

### NOTA DEL EDITOR:

Los sistemas de refrigeración de amoníaco de carga reducida reducirán la oportunidad de la liberación accidental de amoníaco, como sugiere el autor. Sin embargo, la reducción de la carga de amoníaco solo se puede lograr en el 3 al 5 por ciento de todos los sistemas de refrigeración porque esa es la cantidad de sistemas nuevos. La mayor mejora en seguridad y eficiencia operativa del sistema es a través de una mejor capacitación. Esto significa que todas las instalaciones pueden mejorar su rendimiento operativo. Y, como afirma el autor, "las instalaciones seguras son más rentables que las inseguras".

# Refrigerantes Naturales, por un mundo más sostenible



Y tú,  
¿a qué estás esperando?

