

MERCOFRIO 2000 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

COMPARACION ENTRE SISTEMAS DE REFRIGERACION VENTAJAS, DESVENTAJAS, E IMPACTO AMBIENTAL

Ing. Roberto Ricardo Aguiló
Presidente CIAR de Argentina
Tres Arroyos 2421- (1416) Buenos Aires – Argentina
rraguilo@ciudad.com.ar

***Resumen.** El empleo de la refrigeración ha demostrado ser de fundamental importancia en la conservación de alimentos. Es, desde el punto de vista energético, uno de los métodos más económicos de conservación, por lo tanto no se puede prescindir de esta, pero si debemos tratar de proveerla de la mejor forma posible para reducir su impacto sobre el medio ambiente.*

Las consecuencias negativas que provocan los sistemas de refrigeración sobre el medio ambiente son la disminución en la capa de ozono estratosférica y la contribución al efecto invernadero, ya sea en forma directa por los refrigerantes presentes en la atmósfera, o en forma indirecta por la contaminación provocada por la generación de la energía consumida. La primera de estas consecuencias nos ha llevado a un cambio importante que es el reemplazo de los refrigerantes halogenados por otros que no dañen a la capa de ozono y a la búsqueda de otros sistemas que puedan enfriar sin usar productos químicos artificiales.

El proveer el mejor sistema de refrigeración tiene un impacto positivo sobre el costo de operación de la planta frigorífica, pero además tiene una gran importancia para reducir el efecto nocivo que tiene sobre el medio ambiente, el cual debe ser minimizado.

El presente trabajo tiene por objetivo comparar entre distintos sistemas de control de flujo y con distintos refrigerantes, incluido la alternativa de refrigerante secundario, para ver cuales son las ventajas y desventajas de cada uno, desde el punto de vista técnico, económico y de impacto ambiental. Cada aplicación requiere de una solución particular, ya que como veremos un método de alta eficiencia en la transferencia de calor como los sistemas de recirculado, no son aplicables para todas las situaciones.

INTRODUCCION

La refrigeración cumple un papel fundamental en la conservación de alimentos perecederos en el mundo actual y es uno de los métodos más económicos para conservarlos. Además el uso del frío desde las etapas de producción permite disminuir la cantidad de mercadería que se pierde por descomposición, a la vez que posibilitará que el producto tenga una calidad superior por las mejores condiciones de conservación.

Entre los productos perecederos, especialmente frutas y vegetales, de un 30% a un 50% se pierden en los depósitos, transporte y puntos de venta por no disponer de las condiciones adecuadas. Con solo reducir estas pérdidas a la mitad se podrían pagar los costos de instalación del equipamiento frigorífico.

Una demostración de que la refrigeración es un método económico para la conservación de productos perecederos es la comparación de los costos de energía de un alimento conservado en frío contra otro enlatado. El enlatado de un determinado alimento requiere entre 330 y 970 kWh/ton de energía considerando el proceso completo (incluyendo la fabricación de la lata), en cambio congelar un producto y conservarlo en cámaras durante tres meses requiere entre 85 y 120 kWh/ton. Considerando otro proceso como el enfriamiento de la carne podemos ver que el consumo energético es aun inferior ya que este se encuentra en el orden de 28 a 33 kWh/ton, y en el caso del pescado, utilizando hielo, este se encuentra entre 23 y 28 kWh/ton. Otro proceso con el que la podemos comparar es el secado con aire, que hecho en forma artificial requiere de 650 a 1000 kWh/ton.

No obstante todo lo dicho, aunque el consumo de energía es inferior con el uso de la refrigeración, que con otros métodos, este tiene un valor muy importante, y se deben buscar las mejores alternativas en el diseño de los sistemas para lograr un uso racional de esta y la elección del sistema de control de flujo del refrigerante y la elección de este son de gran importancia para lograr la máxima eficiencia.

Debido al deterioro que provocan los sistemas de refrigeración con refrigerantes del tipo CFC y también los HCFC, en menor medida, sobre la capa de ozono estratosférica, se firmó el Protocolo de Montreal, y sus sucesivas enmiendas, que fija el 1° de enero de 1996 como la fecha en que debe cesar la producción total de CFCs (R 11, R 12, R 502 entre otros) para los países desarrollados. Para los países cuyos consumos per capita sea inferior a los 300 g/año se otorga un plazo de gracia de 10 años.

También se debe tener en cuenta el impacto negativo provocado por la contribución al efecto invernadero, ya sea en forma directa por los refrigerantes presentes en la atmósfera, o en forma indirecta por la contaminación provocada por la generación de la energía consumida. El primer grupo a eliminar son los CFCs dado el mayor potencial destructor de ozono debido a su mayor estabilidad. En cuanto a sustancias que tienen un potencial de reducción de ozono (ODP) menor como es el caso de los HCFCs (R 22 por ejemplo) establece una reducción de la producción al 65% de la del año base para el 1 de enero de 2004. Además fija un calendario de restricciones crecientes hasta llegar a su prohibición para el año 2030.

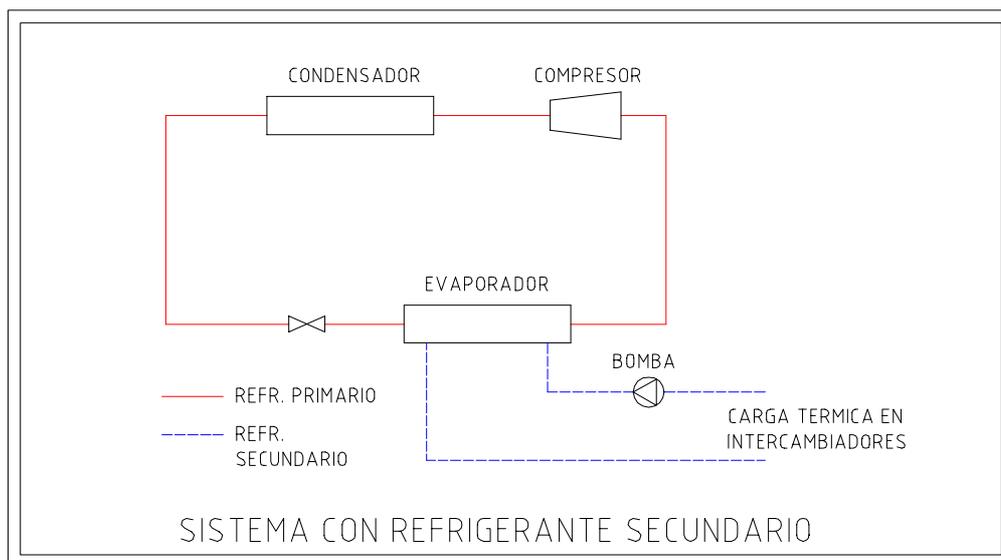
El Protocolo de Montreal fija limitaciones únicamente por el daño que las sustancias provocan a la capa de ozono, y no tiene en cuenta la contribución de cada una al efecto invernadero, por lo tanto los HFCs, por no causar ningún daño al ozono no tienen ninguna limitación, a pesar de si colaborar al efecto invernadero. A pesar del importante calentamiento directo que producen las moléculas de refrigerantes libres en la atmósfera, debemos considerar el impacto indirecto que tienen estos, de acuerdo al consumo de energía de los sistemas que lo utilizan. Por lo tanto cuando medimos cual será la contribución total al efecto invernadero, debemos tener en cuenta no solo el calentamiento que producirá en la atmósfera el gas cuando escapa del sistema, sino también el del CO₂ emitido en la generación de energía para alimentar al sistema que utilizaba el refrigerante durante su vida útil.

SISTEMAS DE REFRIGERACION

Al comenzar el desarrollo del proyecto de un sistema de refrigeración las primeras decisiones a adoptar son la elección del refrigerante y el método de control de flujo de este. Las restricciones impuestas por el Protocolo de Montreal hacen que se tengan en cuenta nuevas opciones en el momento de decidir que refrigerante utilizar. Una alternativa muy poco

utilizada anteriormente era la de sistemas con refrigerante secundario, pero ahora toma más importancia porque permite el uso de refrigerantes tradicionales como el amoniaco en instalaciones donde antes era posible utilizarlo. Entonces la primer alternativa sería decidir entre usar un sistema directo de enfriamiento o uno con refrigerante secundario.

Las instalaciones con refrigerante secundario son aquellas en las cuales se realiza el ciclo frigorífico con un refrigerante en un circuito normal, y en el evaporador se enfría otro fluido, llamado refrigerante secundario, que es el que se envía a los intercambiadores situados en los lugares donde se encuentra la carga térmica. Estos sistemas requieren del uso de una bomba para mover al refrigerante secundario entre los intercambiadores donde se enfría el aire o producto, y el evaporador donde el fluido secundario cede su calor al refrigerante tradicional.



La gran ventaja que presenta este método es que el refrigerante primario se mantiene confinado en una sala de máquinas, siendo mucho más sencillo mantener el sistema libre de fugas e inclusive el equipo frigorífico puede ser traído como una unidad compacta montada en fábrica. Al no haber largos tendidos de cañerías la carga de refrigerante es sensiblemente menor que en las instalaciones tradicionales. Asimismo permite utilizar fluidos, que por tener cierto margen de riesgo, no se podrían enviar a zonas ocupadas por público.

Entre los inconvenientes que presentan los sistemas con refrigerante secundario, el primero de ellos es que necesitamos un proceso de intercambio de calor más, ya que en el evaporador enfriamos el fluido secundario, y luego este es el que enfría el aire en el intercambiador del equipo. Por lo tanto para conservar la misma temperatura en una cámara o heladera, que en los sistemas de un único refrigerante debemos disminuir en al menos 3°C la temperatura de ebullición del refrigerante, (por ejemplo en un sistema de media temperatura debemos bajarla de un valor standard de -10°C a -13°C), lo que implicará un aumento de potencia en los compresores del orden del 9%, en el caso de utilizar R 22

Otro punto en contra a considerar es la energía necesaria para la bomba que debe hacer circular el refrigerante secundario, y en esto influye en forma muy marcada la temperatura de operación del sistema (cuanto más baja sea esta, el líquido aumenta su densidad, y la potencia requerida es mayor). Por lo tanto la selección del fluido es de gran importancia para tratar de minimizar este impacto negativo.

Las características principales que debe cumplir un refrigerante secundario son gran capacidad de transporte de calor con un pequeño cambio de temperatura y un reducido flujo, reducida viscosidad para tener una pequeña potencia de bombeo, alto coeficiente de conductividad para evitar el uso de grandes intercambiadores de calor, y además ser no tóxico, no inflamable, ambientalmente aceptable, y no causar problemas de corrosión.

El agua es un excelente refrigerante secundario cuando temperaturas de operación no inferiores a 3°C son suficientes, pero cuando la aplicación requiere temperaturas inferiores a 0°C la selección se complica y se hace especialmente difícil para las aplicaciones de congelamiento (temperaturas en el rango de -20°C a -30°C).

Los refrigerantes secundarios se pueden clasificar en fluidos de fase única, que son aquellos que presentan un calentamiento sensible cuando se produce el intercambio de calor, y los fluidos con cambio de fase, que son los que aprovechan el calor latente de la vaporización o de la fusión.

Hay varias alternativas posibles en fluidos de fase única :

- Soluciones de agua y propilén glicol : es una mezcla que se comporta bien cuando es utilizada en media temperatura (hasta -15°C), pero tiene viscosidad muy alta en bajas temperaturas. No es tóxico ni inflamable, pero presenta ciertos riesgos de polución ambiental.
- Soluciones de agua y etilén glicol : presenta mejores propiedades que la anterior, pero tiene el inconveniente de su alta toxicidad con riesgos de polución ambiental
- Soluciones de agua con alcohol etílico y metílico : tienen bajo punto de ebullición y presentan riesgos de inflamabilidad. Son tóxicos.
- Soluciones de cloruro de calcio y de cloruro de sodio : tienen una muy buena capacidad calorífica pero son muy corrosivos en presencia de oxígeno.
- Soluciones no acuosas : estos fluidos comparativamente una peor capacidad de transporte y de transferencia de calor que las soluciones acuosas. Entre ellas encontramos distintos productos entre los que podemos mencionar (entre paréntesis se especifica la temperatura de congelamiento) :
 - Hidrofluoroéter (- 43°C)
 - Terpene de aceites cítricos (- 97°C)
 - Polidimetilsiloxan (- 100°C)
 - Mezclas de hidrocarburos (- 70°C)
 - Mezclas de dietilbenceno (- 73°C)

Una característica importante en los fluidos que absorben calor por calentamiento sensible es su punto de congelamiento, ya que este se debe encontrar alrededor de 5°C por debajo de la más baja temperatura de operación.

En cambio hay fluidos que aprovechan el cambio de estado para mejorar el proceso de intercambio de calor. Entre estos tenemos :

- CO₂ : el uso de dióxido de carbono en la industria de la refrigeración data de mas de un siglo atrás, pero se dejó de utilizar a causa de su baja temperatura crítica (31°C) y alta presión crítica (74 bar). Es una alternativa válida en bajas temperaturas, y su uso se ha difundido en algunas instalaciones de supermercados en forma experimental, con buenos resultados.

- Ice slurry o hielo binario : es una solución de pequeños cristales de hielo en un líquido, que cambian del estado sólido al líquido cuando absorben calor incrementando la capacidad de transporte de calor del fluido. Además se encuentra perfectamente adaptado para un proceso de acumulación térmica. Hay distintos tipos de tecnologías para elaborarlo, siendo la más común la de formarlo en un evaporador especial enfriado con un ciclo de refrigeración tradicional.

-

Una característica muy importante a revisar es la viscosidad, porque esta influencia fuertemente el tipo de flujo que ocurrirá en el intercambiador de calor. Una viscosidad elevada generalmente hace imposible mantener un flujo turbulento (para incrementar el intercambio térmico) con una potencia de bombeo razonable. A medida que la viscosidad se incrementa aumenta la caída de presión por rozamiento, requiriéndose una mayor potencia de bombeo

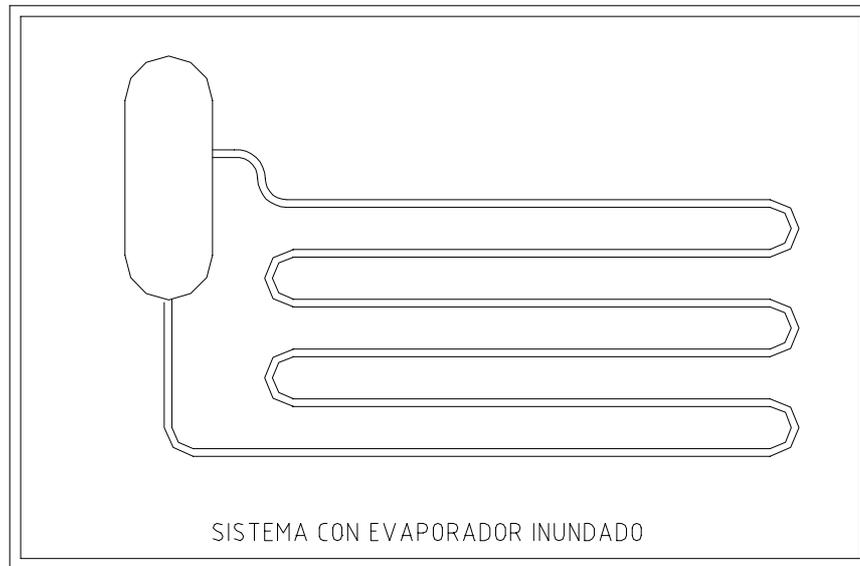
Una característica fundamental en la operación de los sistemas refrigerantes es el tipo de método de control de flujo del líquido a los evaporadores. Encontramos tres métodos distintos para regular el flujo de refrigerante:

- expansión directa con una válvula controlada por el sobrecalentamiento del gas,
- de evaporador inundado,
- de recirculación de líquido.

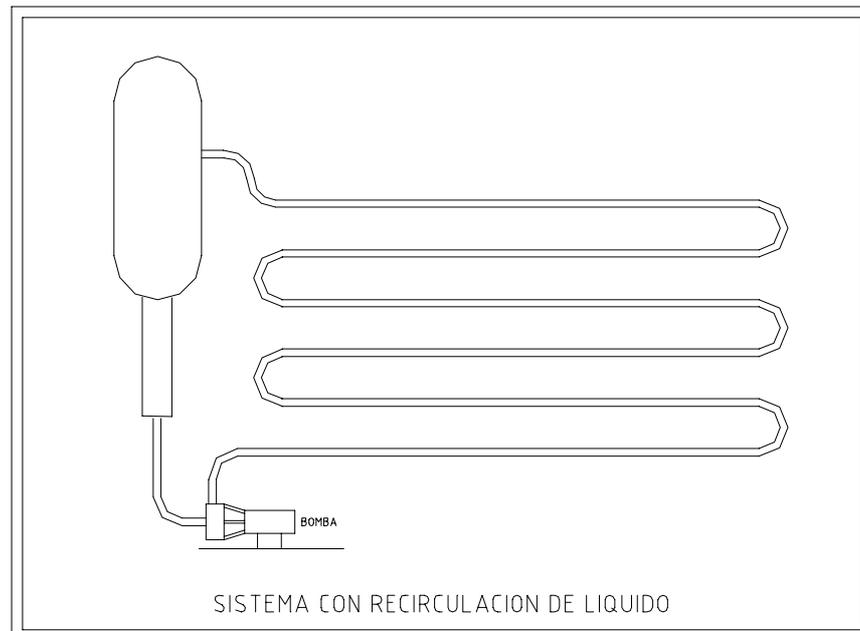
En la refrigeración comercial comúnmente se utiliza el primer tipo de los aquí mencionados, mientras que los otros dos son aplicados principalmente en la refrigeración industrial.

En los evaporadores de expansión directa la válvula regula el paso del refrigerante para lograr que a la salida del evaporador llegue únicamente vapor saturado. Como esto es muy difícil de lograr, lo que se hace es restringir el paso del fluido un poco más de lo necesario para que salga sobrecalentado y así evitar que en alguna fluctuación de la carga pueda salir líquido hacia el compresor.

En los evaporadores inundados se utiliza un tanque que actúa como acumulador y separador de líquido desde donde se alimenta el serpentín por la diferencia de densidades. A este tanque llega el refrigerante líquido y de allí previa separación de vapores producidos en la expansión se dirige al evaporador. Del evaporador retorna vapor húmedo que después de dejar la fracción de líquido en el separador, es aspirado como vapor saturado por el compresor. Toda la superficie interior del caño se encuentra alternativamente en contacto con líquido y vapor mejorando el coeficiente de transmisión de calor con respecto al de expansión directa.



En el caso de los evaporadores con recirculación de líquido también llamado de circulación forzada el refrigerante líquido es impulsado por una bomba para enviar una cantidad mayor al evaporador, es decir se caracterizan por enviar al evaporador un flujo másico de líquido refrigerante superior al flujo de vapor que se produce en dicho evaporador, por eso también reciben el nombre de sistemas sobrealimentados. El esquema de la instalación sería similar al caso anterior con la diferencia de que debemos colocar la bomba de recirculado a la salida de líquido del tanque.



Se define como tasa de recirculación n a:

$$n = \frac{q_{mlb}}{q_{mle}}$$

donde:

- q_{mlb} : caudal másico de líquido bombeado al evaporador
- q_{mle} : caudal másico de líquido evaporado

En el siguiente cuadro se pueden observar valores típicos de la tasa de recirculación según el tipo de refrigerante empleado:

Refrigerante	n
R 12 - R 502	2
R 22	3
R 717 alim.superior	6 a 7
R 717 alim.inferior	2 a 4

Los métodos de bombeo del refrigerante pueden ser por bombeo mecánico o por bombeo por gas de descarga de los compresores.

Las ventajas de los sistemas de recirculado son:

1. La superficie del evaporador tiene un uso más efectivo, ya que las superficies internas del tubo se mantienen totalmente húmedas.
2. El refrigerante que retorna al compresor esta prácticamente en condiciones de saturación, por lo tanto no se tiene casi riesgos de golpe de liquido, y además se mantiene limitada la temperatura de descarga.
3. La alimentación a los evaporadores no es afectada por las condiciones del ambiente. La bomba del sistema de recirculación opera a presión constante, lo que permite el uso de controles simples.
4. La recuperación del aceite se realiza en el tanque separador, ya que no queda en el evaporador porque es arrastrado por el líquido.
5. A causa de las condiciones ideales de entrada de gas al compresor, estos presentan menos averías, y duran más.

Entre las desventajas que presentan podemos mencionar:

1. Las tuberías tienen que tener un mayor diámetro para poder contener el refrigerante a circular.
2. La carga de refrigerante suele ser mayor.
3. Las tuberías de alimentación operan a baja presión, por lo tanto se las deben aislar térmicamente.
4. El costo de instalación generalmente es mayor, especialmente en sistemas pequeños.
5. El costo adicional del equipo de bombeo, y el costo operativo y de mantenimiento de este.

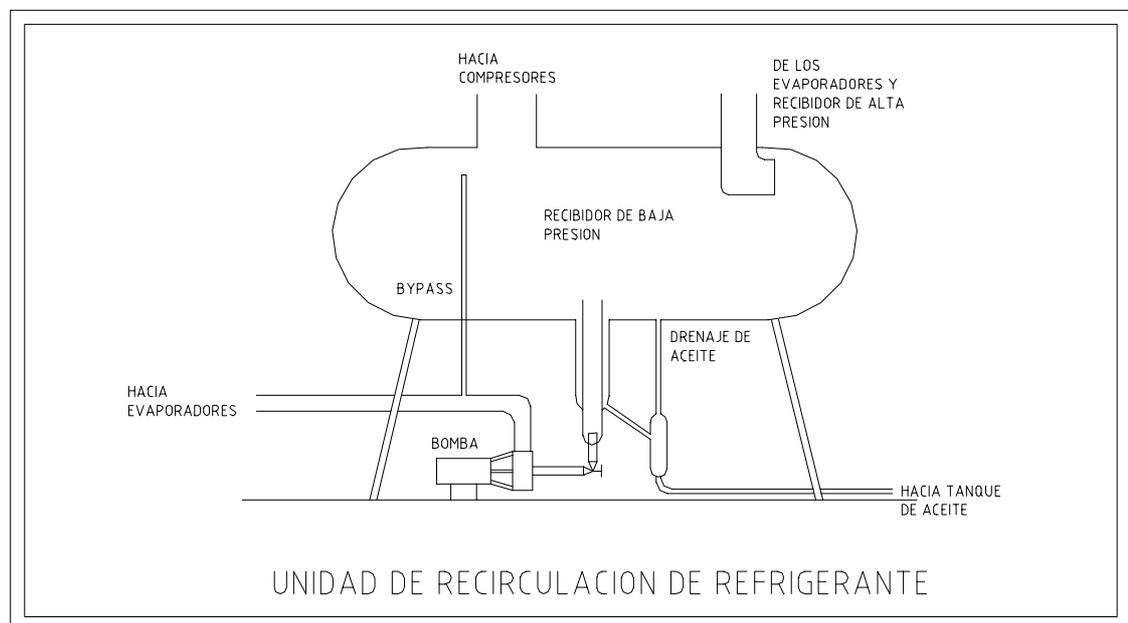
Normalmente, los sistemas sobrealimentados trabajan con bombeo mecánico. Los sistemas de gas caliente recirculado ya no se utilizan debido a problemas en las válvulas de control los que son más comunes que los de las bombas. El bombeo mecánico tiene varias ventajas con respecto al bombeo de gas caliente, y la más importante es el menor uso de energía, de alrededor de un 10% usando bombas mecánicas.

En un sistema que use bombas mecánicas, circula líquido, desde un recipiente de baja presión, a través de los evaporadores. Este receptáculo actúa como separador para la mezcla de vapor

y líquido que retorna desde los evaporadores. El nivel de refrigerante es usualmente mantenido por un dispositivo de medición que permite que el refrigerante ingrese, proveniente del recipiente de alta presión. El vapor es dirigido hacia los compresores.

A fin de prevenir la cavitación en la bomba, es muy importante asegurar un nivel mínimo de refrigerante y un correcto diseño del colector de líquido. Este debe ser extendido internamente dentro del tanque de modo de actuar evitando la entrada de aceite, para prevenir que este así como la suciedad se dirija a la bomba. Generalmente el colector tiene una trampa secundaria por debajo de la toma de las bombas (normalmente hay dos por cada recipiente de baja presión; uno operando y otro en stand-by.).

Las válvulas del recipiente de baja presión a la bomba debieran ser seleccionadas para tener una mínima caída de presión. La velocidad del líquido a la bomba no debiera exceder 1m/s. La presión y los requerimientos de flujo varían con el tipo de bomba y diseño.



Los reguladores de control de flujo deben ser usados para regular el flujo de sobrealimentación al interior de los evaporadores. Para prevenir una subalimentación y una excesiva sobrealimentación de refrigerante, los dispositivos de medición regulan la alimentación de líquido de cada evaporador. Las válvulas de expansión manuales controlan continuamente la alimentación de refrigerante en los valores proyectados. Otros dispositivos comúnmente usados son de regulación automática, válvulas de calibración regulada, orificios, y distribuidores.

Resulta una pérdida de tiempo ajustar las válvulas de expansión manuales para alcanzar condiciones de flujo ideales. Sin embargo, han sido usadas con bastante éxito en muchas instalaciones. Un factor a considerar es que las válvulas estándar de expansión manuales están proyectadas para regular flujos producidos por las relativas diferencias de elevada presión entre presión de condensación y de evaporación. En sistemas sobrealimentados, no existen grandes diferencias, de modo que válvulas con orificios más grandes pueden requerirse para armonizar con la combinación de una cantidad creciente de refrigerante y relativamente

pequeñas diferencias de presión. El uso de orificios más grandes puede ocasionar una disminución de la controlabilidad, a medida que el tamaño de los orificios aumenta.

Debido a que el refrigerante en las líneas de líquido está sobre la presión de saturación, aquellas no debieran contener gas. Sin embargo, una evaporación de líquido puede ocurrir si se produce un excesivo aumento de calor por el refrigerante y/o se produzca una alta caída de presión en las líneas de alimentación.

Los orificios debieran ser cuidadosamente diseñados y seleccionados; ya que una vez instalados no pueden ser ajustados. Los mismos son generalmente usados sólo para alimentación superior y horizontal de evaporadores multicircuitos. Materiales extraños y glóbulos de aceite congelado pueden ocasionar una restricción de flujo; a ese respecto, se recomienda un orificio mínimo de 2,5 mm. Con amoníaco, la proporción de circulación pueda que deba ser incrementada más allá de tal necesidad para el tamaño mínimo de orificio, debido al reducido volumen de líquido que circula normalmente. Podrían requerirse bombas y líneas de alimentación y retorno mayores del mínimo. Esto no se aplica a halocarbonos debido al mayor volumen de líquido circulado como resultado de las características del fluido.

Referencias

- /1/ Aguiló, Roberto R. - Impacto de la refrigeración en el medio ambiente. Proceedings del Congreso Argentino del Frío CAF'98, Agosto de 1998.
- /2/ ASHRAE - Fundamentals Handbook, 1998
- /3// ASHRAE – Refrigeration Handbook, 1997
- /4/ Melinder, Ake - Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, IIR, 1997