

AHORRO EN CIRCUITOS DE REFRIGERACIÓN

Autor:

Félix Sanz del Castillo

Danfoss

1 Introducción

¿Por qué ahorrar energía?

En los momentos actuales (principios del siglo XXI) nos encontramos, con un aumento constante del precio de la energía, con problemas medioambientales como es el calentamiento global causado por el efecto invernadero en el cual el CO_2 tiene una responsabilidad muy alta, y con legislaciones cada vez más restrictivas en cuanto a utilización no correcta de un bien escaso como es la energía. Debemos recordar que todos los países del mundo excepto Estados Unidos suscribieron en Julio del 2001 el protocolo de Kioto.

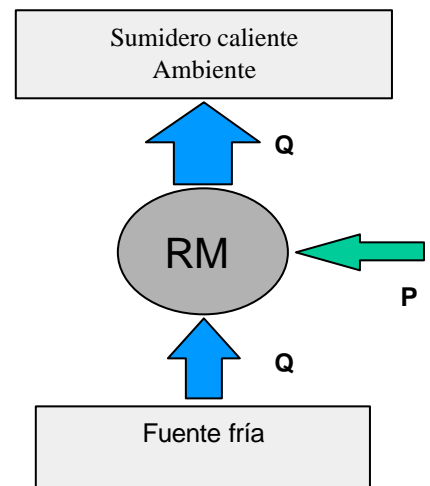
Todo esto provoca que cada día se dediquen mas esfuerzos para reducir el consumo de energía en todos los aspectos de la vida (lámparas de bajo consumo, coches con mejores rendimientos, cambios a horarios de verano, energía eólica, etc.) llegándose, incluso a potenciar de forma económica por ciertos gobiernos la utilización de sistemas con menor consumo de energía.

El presente estudio se refiere a instalaciones de refrigeración por compresión mecánica, otras tecnologías como la refrigeración por absorción, el efecto Peltier, u otros mecanismos, exceden los objetivos de este estudio.

En primer lugar se debe indicar que en un circuito frigorífico para producir frío, o lo que es lo mismo transportar calor de una fuente fría a un punto o sumidero de calor a mayor temperatura, es necesario consumir energía. Aquí dependiendo del tipo de motor y sistema de transporte o bombeo del material calor-transportador, el consumo de energía será mayor o menor.

Por otro lado teniendo en cuenta el diferente costo de la energía según su procedencia o el momento en el cual se consume, el coste económico de esta energía será diferente.

Se puede por tanto afirmar, que existen dos conceptos solapados como son el ahorro económico y el ahorro energético, los cuales, no siempre van unidos.



2 Conceptos importantes de cara al ahorro energético

En esta sección se intentará exponer los conceptos que nos permitirán ahorrar energía en los circuitos de refrigeración.

En algunos casos los conceptos serán aplicables a instalaciones nuevas y otras veces a plantas que actualmente están en funcionamiento.

2.1.1 Aporte mínimo de las ganancias caloríficas exteriores

La eliminación de pérdidas frigoríficas por paredes o tuberías hacia el exterior es de vital importancia en el ahorro energético de la instalación. Para reducir estas pérdidas se deben diseñar las paredes con el aislamiento térmico adecuado a las temperaturas del ambiente exterior.

Materiales empleados en la construcción

Color en las paredes y techos

Situación y orientación (norte)

Cerramientos y falsos techos

2.2 Refrigerantes y compresores

Refrigerantes

Los refrigerantes alternativos HCFCs a los utilizados hasta la década pasada CFCs tienen un menor ODP, pero solo se consideran como una solución interina. Además en la actualidad incluso los refrigerantes HFCs se ponen en duda en ciertos países ya que tienen un GWP relativamente alto. Por otro lado ciertos refrigerantes naturales sin ODP y ligero GWP pueden tener otros inconvenientes como toxicidad o inflamabilidad. Esto hace que la elección del refrigerante utilizado sea relativamente compleja implicando compromisos entre ventajas e inconvenientes.

Debido a lo indicado, hay que tener en cuenta los condicionantes legales que existen en cada país o región, de forma que habrá que cumplir con las exigencias medioambientales, las normas de seguridad, y las propiedades termodinámicas adecuadas, entre las cuales está incluida la eficiencia energética asociada a cada refrigerante.

Los factores medio-ambientales a tener en cuenta son, el poder de destrucción del ozono (ODP), el potencial de calentamiento global (GWP) y el efecto invernadero total (TEWI). Los factores de seguridad como la toxicidad y la inflamabilidad al igual que ciertas propiedades termodinámicas como la eficiencia volumétrica, las presiones (los valores de la presión de condensación que condicionan el diseño), y la temperatura del gas de descarga entre otras, también se deberá tener en cuenta a la hora de seleccionar un refrigerante.

Compresores

El diseño de los compresores se ve condicionado por el principio mecánico de compresión. Según éste existen compresores de pistones, rotativos, scroll (de caracola o espiral) y de tornillo.

Tanto las características del compresor, entre las que se encuentran las fugas durante la compresión, el volumen muerto, la pérdida de carga en aspiración y descarga, como el impacto de otros factores como puede ser la relación de compresión, la diferencia de presión ($P_{\text{pistón}} - P_{\text{aspiración}}$), el incremento en la temperatura de aspiración, son importantes ya que afectan a la eficiencia del proceso de compresión resultando distinto para cada refrigerante, tipo de compresor y aplicación específica (temperaturas de evaporación y condensación) de forma que dependiendo de todo esto, se recomendará utilizar un refrigerante u otro.

Además de todo lo indicado, todos los compresores deben optimizarse para la aplicación específica, y entre otros factores como los remarcados anteriormente, a la hora de definir el tipo de compresor también se deberá tener en cuenta el consumo del motor eléctrico y el rendimiento del motor mecánico.

Como norma general los compresores de pistón consumen más energía que los rotativos, scroll o de tornillo equivalentes.

Cuando en las instalaciones existen variaciones en las condiciones ambientales y en la carga térmica de la planta, existen varias posibilidades para reducir el consumo del compresor.

Los compresores alternativos al permitir una relación de compresión variable utilizando los principios de regulación de presiones de aspiración y descarga flotantes pueden obtener grandes ahorros.

Los rotativos, scroll y tornillos, y en cierta medida también los alternativos pueden regular la velocidad de rotación del motor eléctrico y en consecuencia del compresor para reducir o aumentar el volumen desplazado (capacidad del compresor) variando la frecuencia de alimentación del compresor.

2.3 Diagrama de Molier:

La representación del ciclo producido en un circuito en el diagrama P-H (en frío generalmente llamado diagrama de Molier) es de vital importancia para visualizar y comprender los distintos factores que permiten ahorrar energía.

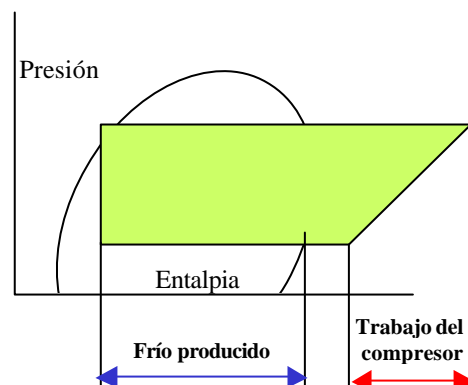
Este diagrama representa la entalpia del fluido refrigerante (el calor asociado) a distintas presiones tanto en fase líquida como en fase gaseosa.

Desde el punto de vista de consumo de energía lo que realmente nos interesa es aumentar el COP de la instalación. Es decir que la relación entre el frío producido y el consumo de energía sea máxima.

$$\text{COP} = \text{Frío producido} / \text{Consumo compresor}$$

Para ello en el diagrama de Molier en el cual se ve el frío producido por el refrigerante y a la vez el trabajo o consumo de energía del compresor, se podrá mejorar el COP bien aumentando el frío producido, o bien disminuyendo el consumo del compresor.

Para aumentar el frío producido, se debe disminuir la entalpia del líquido que se evapora, mientras que para disminuir el consumo del compresor se debe



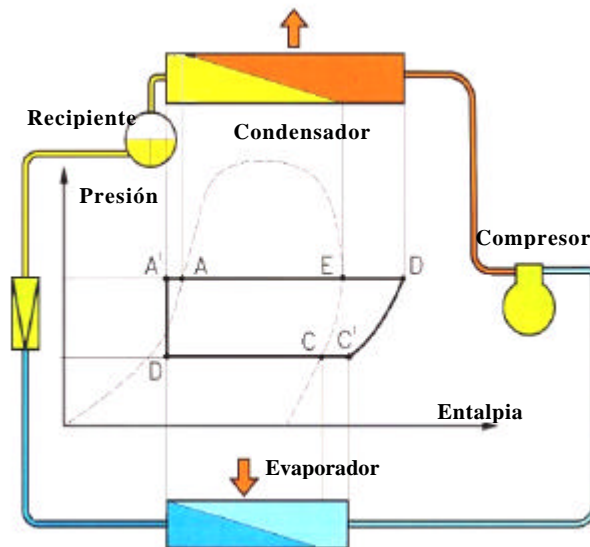
reducir la relación de compresión, mejorar los rendimientos de los motores eléctricos, modificar el proceso de compresión para que consuma menos energía, o utilizar compresores con menos pérdidas mecánicas.

2.3.1 Sistema frigorífico de expansión directa.

En la figura esta representado un circuito frigorífico junto con el diagrama de Mollier. Para visualizar adecuadamente todo el proceso de refrigeración y todo el circuito frigorífico, nos moveremos junto con el refrigerante a lo largo del circuito frigorífico y a la vez veremos en que punto del diagrama de Mollier nos encontramos.

Para dar una vuelta por el interior del circuito de refrigeración, podemos tomar como punto de partida la salida del compresor, e iremos caminando lenta o rápidamente a lo largo del circuito hasta volver al mismo punto.

En la salida del compresor, en la línea de descarga, el gas está comprimido a una presión alta. Además está caliente y tiene una gran velocidad llegando rápidamente al condensador. El condensador está en contacto con el aire por la parte exterior, y el gas que está en el interior tiene una temperatura y presión altas, con lo cual el fluido refrigerante caliente puede ceder calor al ambiente.



Consecuencia de esta cesión de calor el vapor se enfría y condensa.

El refrigerante se condensa a presión constante.

Según va avanzando por el condensador la proporción de vapor va disminuyendo y la velocidad también. Cuando todo el vapor está condensado, si todavía hay condensador útil, el líquido se enfría por debajo de su temperatura de condensación, entrando en la zona de líquido subenfriado.

Tras el condensador aparece un recipiente en el cual se acumula líquido. Este recipiente sirve para acumular el líquido cuando las necesidades y el caudal requerido disminuye.

Después el refrigerante pasa por un agujero muy estrecho que opone mucha resistencia a su paso. Es el sistema de expansión. En este punto debido a la resistencia que le oponen al pasar, el líquido pierde presión y se expande. En este proceso al disminuir la presión el fluido disminuye enormemente la temperatura, y es aquí donde está el gran secreto de la refrigeración. ¿Cómo es posible que el fluido esté ahora más frío que a la entrada? La respuesta es muy sencilla, pasa algo muy parecido a lo que sucede en las botijas. Parte del fluido se convierte en vapor y parte queda como líquido. Para evaporarse el fluido tiene que robar calor de algún sitio. Como no hay nada alrededor,

se lo quita a la parte que queda como líquido y se lo da a la parte que queda como vapor. El calor contenido por la mezcla es el mismo, pero distribuido de forma distinta.

La cantidad de líquido que entra en el evaporador puede controlarse de distintas formas. Se controla bien por la diferencia de presión, bien por la presión de evaporación o bien por el recalentamiento. El control por recalentamiento, si bien más caro, es el más adecuado ya que protege al compresor contra retornos de líquido.

Esta mezcla de vapor y líquido frío con la presión baja llega al evaporador donde se pone en contacto por la parte exterior con aire, agua, alimento, etc. Este producto que está más caliente, le cede calor y evapora el líquido refrigerante del evaporador.

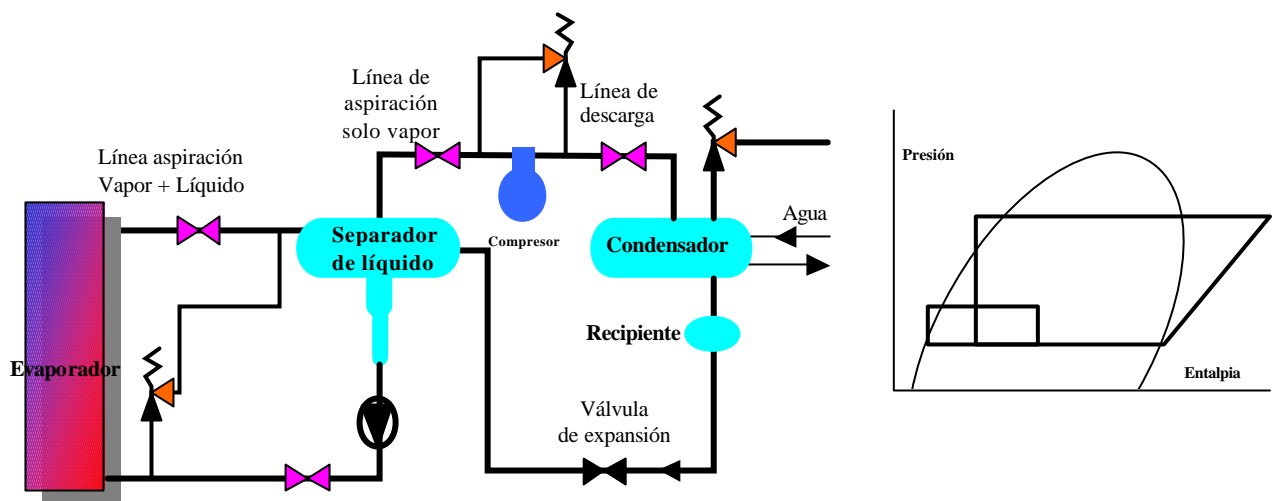
La velocidad en el evaporador va aumentando poco a poco y a la salida es muy grande, por lo cual puede suceder que arrastre líquido en forma de gotas o nieblas. Esto se debe de impedir, ya que si el refrigerante sale como líquido, no cumple su función de robar calor en el evaporador, y además, puede dañar alguna pieza en el compresor.

El vapor cuando llega al compresor, entra en una cámara grande y por una serie de conductos es aspirado por un pistón, comprimido, calentado y expulsado del compresor donde sale a la línea de descarga llegando al punto de partida inicial.

2.3.2 Sistema de refrigeración inundado con recirculación.

La diferencia fundamental en los circuitos de refrigeración con sistemas inundados (bien por bomba o por gravedad) es el estado del evaporador que siempre está lleno de una mezcla de vapor y líquido cuando esta en funcionamiento. La mezcla de vapor y líquido no evaporado va a un depósito, donde por un lado por gravedad el líquido cae a la parte inferior donde se vuelve a coger y enviar de nuevo al evaporador, y por la parte superior el compresor aspira el vapor.

En la figura tenemos un ejemplo típico de recirculación por bomba en el cual están representados los componentes principales. Para comprender el ciclo en su totalidad, al



igual que en los sistemas de expansión directa, realizaremos un tour por el circuito frigorífico analizando los fenómenos que suceden en cada punto.

Comenzando en la descarga del compresor, antes de llegar al condensador nos encontramos con una serie de válvulas que tienen funciones de regulación o de seguridad. El vapor pasará a través de estas válvulas cuando sea necesario y se producirá una ligera pérdida de carga o presión en el fluido.

Llega al condensador, y en este caso el refrigerante se condensa con agua de un circuito de agua con una torre de enfriamiento (no incluida en la figura), de donde va al recipiente de líquido (a veces la parte inferior del condensador puede hacer las veces de recipiente).

Del recipiente de líquido tras pasar por el sistema de expansión donde entra fluido líquido y sale una mezcla de líquido y vapor llega a un separador de líquido separándose el líquido por la parte inferior, el cual se distribuirá por los distintos evaporadores de la instalación, y el vapor por la parte superior se conduce a la aspiración del compresor comprimiéndose para ir a la descarga.

El suministro de líquido al separador por medio de sistemas de expansión manual, eléctricos o electrónicos, se hace de forma que el nivel de líquido en el separador sea constante. La forma de realizar este control de nivel afecta de forma considerable en la estabilidad de la presión de aspiración.

El líquido acumulado en el separador de líquido, se distribuye bien por circulación natural o bien por medio de una bomba a los distintos evaporadores. Para que el suministro de líquido a la bomba sea adecuado, es necesario que haya una altura mínima de refrigerante en el separador.

En los evaporadores el líquido se vaporiza parcialmente saliendo una mezcla de vapor y líquido que llega al separador de líquido (normalmente antes del separador hay una válvula de regulación). Aquí la mezcla sale y el líquido cae para el fondo donde vuelve a circular por el evaporador, y el vapor se une al procedente de la expansión del líquido y va al compresor.

En estos sistemas el recalentamiento es prácticamente cero, ya que se toma el vapor del separador de líquido (coexistencia de dos fases), pero la presión en el evaporador suele ser ligeramente superior a la presión en el separador.

La representación de los distintos puntos del circuito frigorífico en el diagrama de Mollier es más compleja que en los sistemas de expansión directa. En la figura podemos ver como partiendo de la descarga del compresor, se realiza la condensación, y una vez condensado se produce la expansión antes del separador, donde la mezcla de vapor y líquido se separa en dos. El líquido aumenta su presión debido a la bomba, y tras pasar por el evaporador sale de éste con un título bajo (depende del número de recirculaciones) donde se vuelve a mezclar con el fluido procedente de la expansión. Se vuelve a separar el líquido y el vapor continuando el ciclo de bombeo y evaporación. Por otro lado el vapor se aspira por el compresor y se cierra el ciclo completo. Puede decirse que en estos circuitos tenemos dos ciclos, uno para el vapor y otro para el líquido.

3 Análisis teóricos que permiten un ahorro energético.

A continuación pueden verse distintos mecanismos mediante los cuales se puede mejorar la eficiencia de la instalación.

3.1 Funcionamiento eficiente de una instalación frigorífica

Uno de los objetivos permanentes en una instalación frigorífica es asegurar un funcionamiento eficiente de la instalación (COP máximo).

Antes de realizar una instalación frigorífica y teniendo en cuenta las características de la planta, su localización, la variabilidad en el ajuste de parámetros y las propias limitaciones intrínsecas, hay varios puntos a tener en cuenta para conseguir una mejora energética de la instalación. Estas acciones son las que afectan a la **“Gestión y control de la instalación”** la cual se manifiesta en tres puntos importantes como son:

- 1. Adecuación a la demanda**
- 2. Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor**
- 3. Utilización de compresores a su máxima eficiencia (100%)**

Cuando la instalación ya esta realizada se deben introducir ciertas modificaciones que permitan aplicar estos conceptos. Estos conceptos son tan importantes que serán tratados mas adelante con detalle en la sección de gestión y control de la instalación.

3.2 Agrupaciones de cámaras y servicios.

Normalmente en las instalaciones frigoríficas suele haber servicios con distintas temperaturas de almacenamiento. En estos casos también es bastante común la agrupación de dichos servicios a una central de compresores de forma que debido al coeficiente de simultaneidad con una capacidad de compresores inferior a la suma total de las cámaras de conservación, permite una instalación eléctrica más pequeña y un considerable ahorro de energía.

Normalmente existen agrupaciones para temperaturas de conservación negativas y para positivas, aunque desde el punto de vista energético sería conveniente diferenciar al menos en tres grupos, alta, media y baja temperatura, y si en algún caso se necesitan temperaturas muy bajas (túneles de congelación) se debería hacer otro grupo más.

3.3 Subenfriamiento de líquido

Fijándonos en el diagrama de Mollier, si el punto de salida del fluido en el sistema de expansión se desplaza hacia la izquierda, tendremos que la capacidad para robar calor del líquido aumenta, mientras el consumo realizado por el compresor no es consciente de esta modificación y dado que aspira el mismo volumen de vapor en las mismas condiciones que anteriormente, consume lo mismo. Esto se puede conseguir enfriando el líquido antes de entrar en la válvula de expansión.

3.4 Disminuir la presión de condensación

Disminuyendo la presión de condensación, se tiene que realizar menos esfuerzo para comprimir el vapor del refrigerante, mientras que por otro lado la producción frigorífica se mantiene constante. Al disminuir el trabajo de compresión, aumenta la eficiencia.

Presión de condensación flotante

La presión de condensación tiene una relación directa con las condiciones ambientales externas, es decir siempre tiene que haber una temperatura superior (unos 10°C) en el interior del condensador que en el exterior. Sin embargo la práctica habitual debido a limitaciones de las válvulas de expansión termostáticas, la temperatura-presión siempre es superior a 30°C (13 bar para R404A), lo cual supone un consumo alto del compresor cuando la temperatura ambiente es inferior a 20°C durante el invierno o durante la noche. La utilización de una presión de condensación flotante que cambie simultáneamente al cambiar la temperatura exterior, junto con la utilización de válvulas electrónicas permitiría considerables ahorros de energía en compresores alternativos.

3.5 Aumentar la presión de evaporación

Aumentando la presión de evaporación o realmente de aspiración, se tiene que realizar menos esfuerzo para comprimir el vapor del refrigerante, reduciendo a la vez la temperatura de descarga, mientras que por otro lado la producción frigorífica se mantiene constante. Al disminuir el trabajo de compresión, aumenta la eficiencia.

Hay que indicar que un ligero aumento de la presión de aspiración tiene unos efectos muy grandes en el ahorro energético, ya que el consumo de energía al depender de la relación de compresión P_c/P_e en el momento que aumenta ligeramente el denominador, la relación de compresión disminuye drásticamente. Aquí es donde se visualiza la menor influencia del efecto que tiene reducir la presión de condensación frente a un aumento igual de la presión de evaporación.

Presión de aspiración flotante

El frío producido en un evaporador siempre es consecuencia del salto térmico ΔT y el área de intercambio de calor A . También es conocido, que en todo circuito de refrigeración, la demanda energética no es constante, de forma que cuando esta es baja, en muchas instalaciones se puede conseguir evaporar más alto reduciendo el salto térmico y alargando el tiempo de refrigeración pero con menos compresores en marcha.

En sistemas centralizados con muchos evaporadores y una central de compresores, aunque hay que tener en cuenta la temperatura de todos los servicios para poder incrementar la presión de evaporación, se pueden conseguir ahorros importantes.

En estos casos al evaporar más alto con menos compresores en funcionamiento se conseguirá un ahorro considerable.

Hay que indicar que es mucho más importante desde la óptica del ahorro de energía tener una presión de evaporación alta que una condensación baja.

En la tabla de la figura vemos los valores de un compresor con R404A en ciertas condiciones de trabajo, para analizar la influencia que tienen las variaciones en la presión de aspiración y en la de descarga.

| Compresor (R404A) | COP = 1,74 (110%) | COP = 1,58 (100%) | COP = 1,75 (110%) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| T evaporación | -25 | -25 | -22 |
| T condensación | +30 | 35 | 35 |

Entre paréntesis vemos que se puede conseguir el mismo efecto bajando la presión de condensación 5°C, como aumentando la temperatura de evaporación 3°C. En consecuencia todo lo que permita tener presiones de evaporación más altas y de

condensación más bajas como es la regulación con referencias flotantes beneficiarán y reducirán el consumo de energía.

3.6 Comprimir el vapor en varias etapas

En un circuito frigorífico, dependiendo del refrigerante utilizado y de las presiones de aspiración y descarga, al comprimir el vapor siguiendo la línea politrópica correspondiente puede suceder que el consumo energético sea bastante grande (W_1). En estos casos se suele partir el proceso de compresión en dos partes, primero hasta una presión intermedia $P_i = \sqrt{P_o P_c}$ con un consumo W_2 , lugar donde se enfría el gas de descarga y se vuelve a comprimir hasta la presión de descarga con un consumo W_3 . La suma de los consumos parciales W_2 más W_3 es menor que W_1 .

3.7 Reducir las pérdidas por transporte frigorífico

La ubicación relativa de la sala de máquinas donde se produce la compresión del vapor respecto a las cámaras de conservación, es importante, ya que si se encuentran alejada de las cámaras, el transporte de fluido frigorígeno se traduce en una pérdida de carga en la aspiración, lo cual como ya se ha visto penaliza considerablemente el gasto energético.

3.8 Reducir pérdidas de carga en aspiración

La consecuencia inmediata será aumentar la presión de aspiración, y dada la importancia de este punto lo estudiaremos con algo mas de detalle.

Tanto en los sistemas inundados y como en los de expansión directa, puede haber una válvula colocada a la salida del evaporador que regula la presión de evaporación para proteger el producto que se está enfriando. Para ello se pueden realizar tres tipos de control en el evaporador.

En primer lugar, las válvulas mas utilizadas suelen ser servo-accionadas, lo cual significa que debe existir una pérdida de presión en la válvula para que pueda estar abierta por lo cual es necesario que exista una caída de presión debida al propio funcionamiento. Esta caída de presión hace que la presión de aspiración sea inferior a la presión de evaporación.

En segundo lugar, las válvulas motorizadas, en principio podrían resolver el problema indicado de la pérdida de carga, pero sin embargo debido a la respuesta relativamente lenta de la válvula, las variaciones de presión en la aspiración se transmitan rápidamente al evaporador sin actuar sobre la válvula y eliminando la protección del producto a enfriar.

Y en tercer lugar, las válvulas neumáticas accionadas por gas de descarga y dependientes de la presión de evaporación, aunque necesitan un montaje y ajuste especial en la instalación y puesta en marcha, tienen la gran ventaja de no penalizar el consumo, y tener una regulación de la temperatura de evaporación o del producto muy buena.

3.9 Utilizar el calor del condensador

Tiene por objeto aprovechar de forma útil el calor transportado de los distintos servicios al condensador de forma que se pueda obtener agua caliente sanitaria, calentar el suelo

de la nave para evitar la congelación, fundir el hielo acumulado en otros evaporadores, o ayudar a calentar el agua de calefacción. En definitiva utilizar una energía térmica para realizar una función útil en algún otro punto de la instalación.

El ahorro energético puede ser muy importante, ya que incluye exactamente, la energía eléctrica o el combustible que no se ha consumido para producir el agua caliente sanitaria, para fundir el hielo en los desescarches, o para calentar el agua de calefacción o de los suelos de cámaras.

3.10 Eliminar saltos térmicos innecesarios

En muchas instalaciones de refrigeración como de aire acondicionado, es normal utilizar un líquido (agua, glicol, flow-ice, etc.) para transportar el frío desde el lugar de producción en una enfriadora de líquido colocada normalmente en la sala de máquinas, en la azotea o en el sótano a las zonas de consumo en las oficinas o servicios de refrigeración.

En estos casos, se tienen dos intercambiadores de calor con la irreversibilidad correspondiente en cada uno de ellos, de forma que aumentan el consumo energético del conjunto cuando se compara con sistemas por intercambio directo, que solo presentan un intercambio de calor.

Como norma se puede afirmar que toda instalación con refrigeración indirecta consume mas energía que la misma instalación con intercambio directo, con lo cual todo lo que sea potenciar y permitir el desarrollo de sistemas de refrigeración con fluidos secundarios va en contra del ahorro energético y en consecuencia fomentan el efecto invernadero causado por el CO₂.

3.11 Respetar las condiciones de diseño

Otro concepto sencillo y casi obvio pero a menudo olvidado y muy importante es la utilización del sistema de refrigeración en las condiciones para las cuales ha sido diseñado. Las desviaciones por ajustes incorrectos o ligeras deficiencias en el mantenimiento, provocan consumos de energía desproporcionados.

Para respetar las condiciones de diseño, es muy importante tener en cuenta los ajustes que debe tener la planta así como eliminar todos los contaminantes internos que perjudiquen el correcto funcionamiento.

4 Gestión y control de la instalación

4.1 Adecuación a la demanda

En toda instalación frigorífica existe un cambio continuo de la demanda de refrigeración, lo cual indica que la producción frigorífica debe ser variable para satisfacer la demanda. En la realidad nos encontramos con el hecho de tener instalaciones diseñadas para una capacidad máxima determinada y luego en la practica las necesidades son variables e inferiores. El buen acoplamiento a condiciones de carga variable tan importante de cara al ahorro energético, es lo que se interpreta como “adecuación a la demanda”.

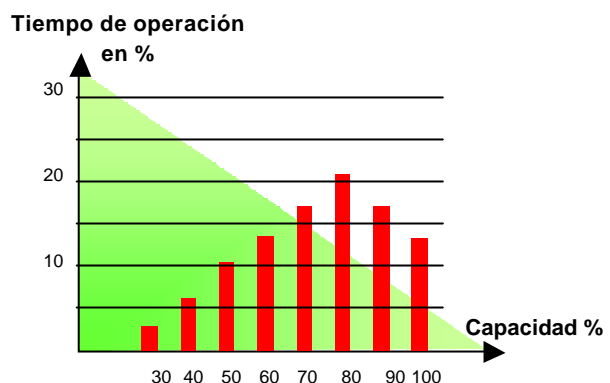
Por otro lado, es conocido que cuando se debe producir una cantidad de frío, producirla en un periodo de tiempo más corto implica siempre un mayor consumo energético, de lo cual se deduce que si nosotros producimos el frío de forma continua tal como se demanda, el consumo energético será menor que si se produce de forma discontinua a intervalos.

La adecuación a la demanda también requiere producir el frío con la calidad suficiente para mantener las temperaturas de las cámaras determinadas, pero conviene remarcar que si bien el frío producido puede tener mucha calidad (temperatura muy baja), cuando esta no se requiere, no se debe producir, ya que producir frío de mucha calidad implica un mayor consumo energético.

Conviene aquí introducir el concepto de frío de calidad, el cual es obtenido a bajas temperaturas, diferenciándolo del frío de baja calidad obtenido a altas temperaturas. La forma más clara de interpretar este concepto es con un ejemplo. Por ejemplo una Kilocaloría de aire enfriado a $+10^{\circ}\text{C}$ puede enfriar una masa de aire por ejemplo de 15°C a 14°C o de 12°C a 11°C pero nunca podrá enfriarlo por debajo de 10°C . Otra Kilocaloría de aire enfriado a -30°C puede enfriar una masa de aire por ejemplo de 15°C a 14°C o de 12°C a 11°C , pero también puede enfriar la misma masa de aire de -20°C a -21°C , o de -27 a -28°C , cosa que la Kilocaloría de $+10^{\circ}\text{C}$ no puede. Es claro que la Kilocaloría a -30°C tiene más posibilidades que la de $+10^{\circ}\text{C}$, y por tanto es de más calidad. El inconveniente que presenta es que la energía consumida para producir la Kilocaloría a -30°C es mucho mayor que la producida a $+10^{\circ}\text{C}$. Luego al igual que en cualquier producto de consumo normal, podemos afirmar que en refrigeración el frío de calidad (baja temperatura) es mas caro que el frío con menos calidad (alta temperatura). En la practica frigorífica se debe producir el frío con la calidad mínima pero suficiente para enfriar los productos requeridos.

Esta consideración tiene implicaciones serias a la hora del diseño de la instalación en su fase de ingeniería ya que, implica una concepción de la planta que permita una gestión de forma flexible. Es decir la instalación debe diseñarse teniendo en cuenta las condiciones más desfavorables (máxima carga térmica), pero también debe de tener en cuenta las condiciones de funcionamiento normales, e incluso de carga térmica mínima. Afecta de forma directa en la selección de los compresores (tipo, tamaño, número, gestión o control), a los condensadores de aire y evaporativos, a las bombas de agua de condensación, al trazado de tuberías (velocidades mínimas, sifones para aceite), control y gestión de los evaporadores (termostato modulante), a las bombas de recirculación de refrigerante en sistemas inundados, etc.

En definitiva y sin ningún tipo de dudas puede afirmarse que afecta a todo el diseño de la instalación, y es aquí donde enlaza con la variación de velocidad como elemento de gestión y control en los distintos componentes con motores eléctricos que intervienen en los circuitos de refrigeración.



En estos casos teniendo en cuenta el perfil del tiempo de operación típico de una instalación frigorífica como muestra el gráfico de la figura, la variación de velocidad

además de una adecuación correcta a la demanda de la instalación nos va a proporcionar una serie de ventajas como son una reducción de ruido, una temperatura y presión mas estables, una reducción de la corriente de arranque y de la potencia reactiva, así como la utilización de economizadores a carga parcial lo cual repercute en una optimización del proceso con el consiguiente ahorro de energía, todo lo cual genera una serie de beneficios al usuario y que se plasmaran como un ahorro económico con una reducción de costes operación, un rápido retorno de la inversión realizada al tener una instalación mejor, unos vecinos tranquilos sin problemas de ruidos, un producto mejor conservado, unos equipos más duraderos y mas pequeños (compresores, motores, cableado) o mas capacidad en la planta, una reducción en la condiciones de funcionamiento en la limitación de arranques por hora, y un medio ambiente mas cuidado con menos CO2 producido lo cual permitirá campañas positivas de respeto del medio ambiente.

Variación de carga en compresores

Es de vital importancia en este punto, que la parcialización de los compresores, permita un funcionamiento adecuado de la instalación en cualquier condición de carga térmica, para lo cual debe haber tantos saltos de capacidad como sea posible, siendo lo ideal una variación continua de la capacidad .

Los compresores actuales presentan ciertas posibilidades de regulación de capacidad, según el tipo de compresor.

Los compresores de tornillo por medio del posicionamiento de la corredera permiten una variación continua de capacidad desde el 0% hasta el 100%, lo cual es muy bueno para ajustar la producción frigorífica a la demanda. Tienen sin embargo una gran limitación, la cual impide que aproximadamente por debajo del 60% de capacidad, debido a la baja eficiencia energética, no sea recomendable su utilización.

Pero la solución ideal es la utilización de un variador de velocidad del motor eléctrico que reduce el número de revoluciones del compresor y por tanto reduce el volumen desplazado y la potencia frigorífica del compresor y del sistema de refrigeración. Por otro lado en este caso se reduce el consumo de motor eléctrico de forma casi lineal a la reducción de capacidad. Las limitaciones están en el diseño de los compresores y en la gestión de la lubricación y enfriamiento de las partes móviles.

Los compresores de pistones, tienen posibilidades para regular varias etapas de capacidad controlando el número de pistones que trabajan simultáneamente. Existen compresores de pistones de una etapa o de varias etapas (2, 3, 4, 5, etc.). En estos compresores el rendimiento del compresor es optimo cuando están al 100% de capacidad.

Debido a las condiciones de los compresores y a las características de las plantas, con frecuencia existen varios compresores en una instalación. Estos compresores pueden ser de cualquier tipo e iguales o distintos entre sí.

Cuando los compresores son distintos entre sí, la combinación de los distintos compresores, produce un mejor acoplamiento a la capacidad demandada por la instalación. Es por esto por lo que en contra de la práctica habitual, **se recomienda utilizar compresores de distintos tamaños en una misma instalación.** La

combinación de compresores de tornillo y compresores de pistones produce unos rendimientos energéticos muy altos, y cuando uno de ellos es controlado por un variador de velocidad, entonces el acoplamiento es casi perfecto.

Utilización de compresores en su máxima eficiencia

Los compresores están diseñados para un desplazamiento volumétrico determinado consumiendo una energía eléctrica determinada. En el diseño de los compresores se impone la condición de minimizar el consumo cuando el compresor está funcionando completamente (100%).

Cuando por cualquier sistema de regulación de capacidad se fuerza al compresor a trabajar fuera de estas condiciones, el rendimiento energético es menor y como consecuencia se penaliza el consumo de energía.

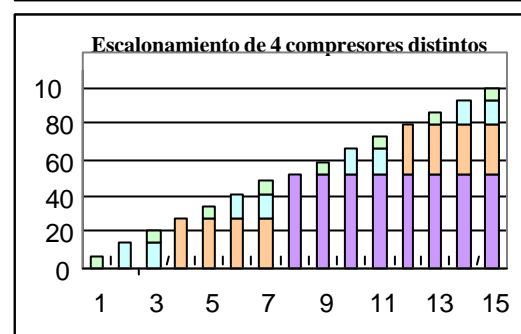
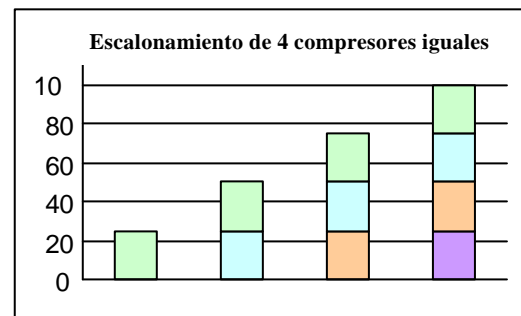
En los compresores de tornillo, esto llega a tener tanta importancia que se recomienda no utilizar compresores de tornillo por debajo del 50-60% de capacidad.

En una instalación frigorífica para que pueda mantener unas condiciones de presión de evaporación y de condensación de forma estable, es necesario que la capacidad demandada por la instalación sea exactamente la proporcionada por los compresores y condensadores. Como la variación de la carga térmica demandada por la instalación varía de forma continua, la proporcionada por los compresores debería de cambiar de la misma forma, sin embargo excepto cuando se utilizan variadores de velocidad en los compresores, debido a limitaciones técnicas esto no siempre es posible. Cuando la variación de producción frigorífica es discontinua a saltos, nos encontramos con problemas a la hora de mantener las presiones de evaporación y condensación en los valores requeridos. En cualquier caso, cuanto menores sean los saltos de capacidad en la producción frigorífica, más fácil resultará su ajuste a la capacidad frigorífica demandada.

A continuación en las figuras puede verse la diferencia que hay de utilizar compresores iguales entre sí a utilizar compresores de distinto tamaño siguiendo ciertas proporciones.

Por ejemplo, para realizar una instalación de 100 CV de potencia frigorífica, entre otras pueden plantearse las siguientes opciones:

- 2 Compresores distintos (33 y 67 CV) (3 saltos).
- 3 Compresores iguales de 33 CV (3 saltos).
- 3 Compresores distintos (14, 29 y 57 CV) (7 saltos).
- 4 Compresores iguales de 25 CV (4 saltos)
- 4 Compresores distintos (7-14-27-52 CV) (15 saltos)



Como puede verse utilizando 4 compresores iguales solamente se tienen 4 saltos de capacidad (25-50-75 y 100%) siendo difícil mantener una presión de evaporación con pocas oscilaciones, pero si en vez de 4 compresores iguales los seleccionan de distinto tamaño podemos conseguir hasta 15 saltos de capacidad (7-14-21-28-35-42-49-52-59-

66-73-79-86-93-100%), con los cuales es mucho más fácil mantener una presión dentro de unos límites estrechos.

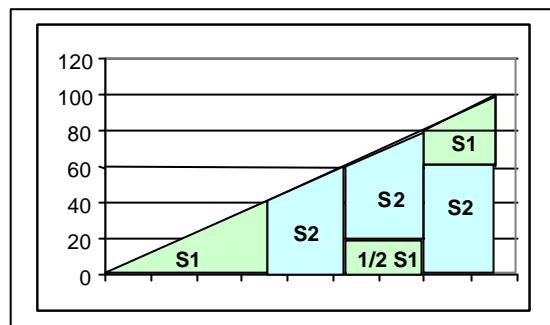
El mantener la presión de evaporación en unos límites estrechos, nos permite tener una presión de evaporación más alta, con lo cual mejora la eficiencia energética de la instalación.

Se recomienda por tanto utilizar compresores de distinto tamaño siguiendo una proporción de capacidad binaria (1-2-4-8, etc.)

En instalaciones con varios compresores de tornillo también es recomendable que sean de distinto tamaño y exista una gestión secuencial de los compresores de forma que haya un funcionamiento óptimo con solapes simultáneos de dos compresores.

Por ejemplo en una instalación con dos compresores de tornillo, uno con el 40% de capacidad y el otro con el 60% (40 + 60 CV), para que el funcionamiento sea eficiente, se divide el proceso en varias secuencias:

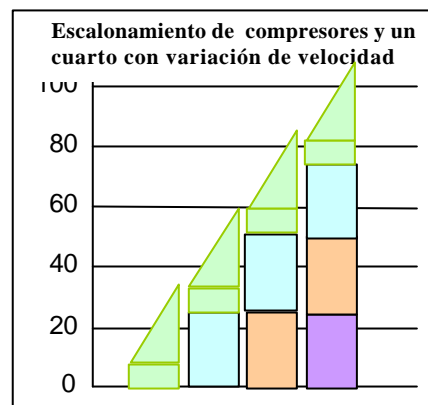
1. Arrancar el compresor pequeño hasta 40 CV.
2. Arrancar el grande entre el 40 y 60 CV parando el pequeño.
3. Poner el pequeño con 20CV y el grande entre 40-60 CV.
4. Poner el grande con 60CV y el pequeño al 20-40 CV.



Con esta secuencia el compresor grande nunca está trabajando por debajo del 50% de su capacidad, y el pequeño solo trabaja por debajo del 50% de capacidad cuando la demanda es muy pequeña e inferior al 20% del total.

Si en este ejemplo se hubiesen utilizado dos compresores de tornillo iguales (50+50CV), teniendo en cuenta que las plantas suelen tener un margen de seguridad del orden del 20-30 % de capacidad, tendríamos que en condiciones normales las necesidades están en los entornos de 60-80 CV de capacidad, por lo que habría un compresor al 100% con 50 CV y el otro al 20-60% con 10-30 CV de capacidad, teniendo en este caso el segundo compresor una eficiencia muy baja.

Finalmente y quizás esta sea la aplicación más interesante es la variación continua de capacidad utilizando varios compresores de pistón, scroll o tornillo en los cuales un compresor de tamaño reducido se acopla entre los saltos de capacidad de dos compresores por medio de un variador de frecuencia, el cual en función de la señal que recibe de un controlador pone al compresor a la capacidad que se necesita. Como los compresores normalmente solo permiten una variación de la frecuencia entre 25 y 75 Hz (esta variación depende de cada tipo o modelo de compresor) hay que tener en cuenta esta limitación para que el solape con las etapas de los demás compresores sea el correcto. Para ello el



compresor gobernado por el variador de velocidad deberá tener una potencia del 33 % superior al compresor más pequeño.

Además la variación de potencia presenta otra serie de ventajas adicionales a la adecuación a la demanda como son las siguientes:

- Mejor eficiencia del compresor
- Mejor eficiencia del motor eléctrico
- Protección eléctrica del motor
- Reducción de ruido
- Temperatura más estable
- Presión más estable
- Reducción de la corriente de arranque
- Reducción de la potencia reactiva
- Utilizar economizadores a carga parcial
- Optimización del proceso
- Ahorro de energía

Estas ventajas se traducen en una serie de beneficios para el propietario de la instalación como pueden ser:

- Ahorro económico
- Reducción costes operación
- Rápido retorno de la inversión
- Vecinos sin problemas
- Producto mejor conservado
- Equipos más duraderos
- Compresores sin límites en arranques por hora
- Equipos más pequeños (compresores, motores, cableado)
- Más capacidad
- Medio ambiente mas cuidado
- Menos CO2 producido

Sin embargo la utilización de la variación de utilidad requiere ciertas características de la instalación y de los compresores, por lo cual este tipo de instalaciones debe realizarse por personas con conocimientos de los nuevos problemas que se puede plantear.

Por un lado el compresor debe estar diseñado para que pueda ser utilizado con variadores de frecuencia, para lo cual en el diseño se tienen en cuenta los siguientes factores.

- Pocas partes en movimiento.
- Compresión constante y estable.
- Compresores con par motor constante.
- Partes en movimiento equilibradas.
- Bajas y limitadas caídas de presión.
- Sistema de lubricación adecuado.
- Refrigeración del motor eléctrico controlada (+3-7%).

También se debe considerar que las frecuencias máximas y mínimas a las cuales puede trabajar el compresor vienen limitadas mas que por las características eléctricas del

motor, por las características frigoríficas del compresor. Entre dichas características se encuentran:

- Velocidad de rotación máxima y mínima (r.p.m.)
- Vibraciones, Ruido
- Arrastre de aceite en tuberías
- Lubricación de partes móviles
- Refrigeración motor eléctrico (+3-7%)

Una vez conocido que tenemos que tener ciertas precauciones desde el punto de vista del motor eléctrico y del compresor, no podemos olvidar todas las consideraciones que debemos tener en la selección del variador de velocidad (frecuencia).

Variadores de frecuencia.

Un variador de frecuencia es un dispositivo electrónico, que toma la tensión de alimentación de la red eléctrica, la rectifica y luego la vuelve a transformar en corriente alterna de la frecuencia y tensión que en cada momento se necesita para que la velocidad de rotación del motor eléctrico y del compresor varíen según las necesidades de la instalación que le marca un controlador interno o externo basándose en la presión o temperatura de referencia ajustada.

La selección de los variadores de frecuencia ha de realizarse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- ¿Adapta automáticamente el convertidor de frecuencia la tensión de salida al par demandado (carga actual)?
- ¿Compensa automáticamente el convertidor de frecuencia la dependencia con el deslizamiento eléctrico del motor?
- ¿Puede gobernar la intensidad de arranque, arranque suave?
- ¿Genera el motor del compresor calor extra debido a la forma de la onda cuadrada (wave shape) en la intensidad del motor?
- Tensión de alimentación
- ¿Cual es el nivel o clasificación eléctrica del equipo (clasificación IP)?
- Precauciones que se deben tomar contra ruidos electromagnéticos. Filtros EMC
- ¿Tiene filtros para reducir las distorsiones de los armónicos en la tensión?
- ¿Tiene filtro RFI incorporado?
- ¿Tiene indicación de fallo?. ¿Se puede personalizar la indicación de fallo?
- ¿Cuáles son las funciones de monitorización disponibles?
- ¿Tiene características especiales para aplicaciones específicas como pueden ser precalentamiento del motor, protección rotor bloqueado, protección contra rotación inversa, monitorización del nivel de aceite, controlador con PID del proceso incorporado, contadores horarios, soporte para comunicación con distintos protocolos?

Una vez seleccionado el variador de velocidad correspondiente, los parámetros importantes de cara a un ajuste correcto para las aplicaciones de refrigeración en compresores, ventiladores o bombas son:

- Potencia
- Tensión
- Frecuencia (nominal, especiales y límites)

- Intensidad (nominal y límites)
- Velocidad nominal
- Resistencia del estator
- Reactancia del estator
- Alto par de arranque
- Parada rápida
- Tiempos
 - Aceleración
 - Deceleración parada
 - Deceleración especial (jogging)
 - Funcionamiento con la intensidad máxima
- Relés retardados para acciones especiales
- Rearmes configurables automático /manual

También debemos tener en cuenta que desde el momento que se instala un variador de frecuencia en una instalación frigorífica pueden aparecer problemas nuevos asociados a los siguientes grupos:

- Problemas de ruidos electromagnéticos EMC (filtros)
- Ruidos de alta frecuencia de los interruptores de potencia
- Más pérdidas en motores por curva no-sinusoidal
- Pérdidas en el suministro de potencia
- Lubricación y retorno a baja velocidad
- Mayor circulación de aceite a alta velocidad en el sistema
- Mayor complejidad en el sistema

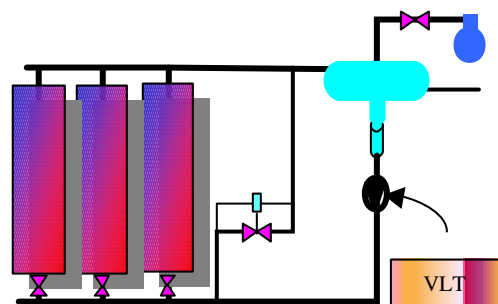
Debido a la existencia de estos nuevos problemas se recomienda la utilización de equipos complementarios y auxiliares como pueden ser:

- Sistema de control de capacidad complementario
- Separador de aceite
- Sistema de bombeo de aceite
- Ensamblajes mecánicos y eléctricos
- Sistema enfriamiento y control de temperatura de aceite
- Economizadores
- Filtros EMC
- Amortiguadores de vibraciones
- Válvulas de retención en descarga

Evaporadores inundados

En evaporadores inundados con recirculación de líquido, el evaporador está siempre con líquido, el cual sale del evaporador y retorna al separador de líquido, de donde vuelve a retornar al evaporador.

En estos casos el sistema de funcionamiento normal es utilizar una bomba para un caudal prácticamente fijo, donde se produce un bypass del caudal que no es necesario por medio de una válvula que mantiene la diferencia de presión entre la entrada y salida de los evaporadores.



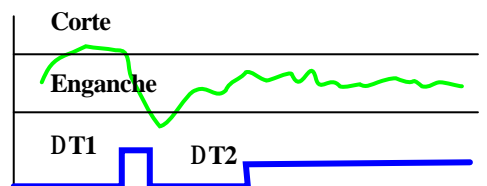
En este caso hay un caudal de refrigerante que esta circulando por el evaporador y por la línea de bypass sin evaporarse, y en consecuencia no produce frío y consume una energía innecesaria en las bombas de circulación. Se podría utilizar un variador de velocidad que mantuviese la diferencia de presión en los evaporadores pero sin bombear el caudal innecesario con el correspondiente ahorro energético

Termostato modulante

El termostato modulante es un concepto nuevo en refrigeración, siendo una función de control introducida en los reguladores electrónicos que gobiernan las válvulas de expansión, la cual tiene como objeto producir el frío justo al ritmo que se necesita. Esto obliga a la utilización parcial del evaporador, por lo que son necesario válvulas de expansión electrónicas y reguladores con complejos algoritmos de control para la inyección. El resultado obtenido con este tipo de control que requiere el funcionamiento de al menos un compresor de forma continua, es la obtención de temperaturas en cámaras con una gran precisión (incluso $\pm 0,1$ °C) con una humedad relativa alta y constante.

Cuando la temperatura del recinto esté en los valores de régimen, esta función permitirá evaporar a una temperatura ligeramente superior con el consiguiente ahorro de energía.

Este tipo de función coincide con el analisis del funcionamiento del evaporador desde un punto de vista particular, en el cual se ve que el evaporador funciona durante un tiempo refrigerando la cámara o servicio. Durante este tiempo el salto térmico en el evaporador tiene un $\Delta T1$ determinado. Al conseguir cierta temperatura en el servicio, se corta el suministro de líquido al evaporador, y se deja de producir frío. Después cuando la temperatura aumenta a otro valor, se vuelve a inyectar líquido al evaporador volviendo a comenzar el ciclo de refrigeración. En este tipo de funcionamiento, cualquiera se podría preguntar, ¿no sería mejor trabajar con un salto térmico $\Delta T2$ menor y no parar nunca la producción de frío tal como se obtiene en la figura inferior?.



La respuesta desde la óptica de temperatura de los productos es afirmativa, pero sin embargo aparecen condicionantes desde un punto de vista tecnológico siendo necesario que siempre haya algún compresor en funcionamiento, y que la presión de aspiración de referencia cambie en función de la temperatura de la cámara, del exterior o del ambiente en el cual se encuentran los evaporadores, así como la utilización de válvulas electrónicas e incluso de variadores de frecuencia en los ventiladores del evaporador.

Condensadores

El condensador esta diseñado para una transmisión de calor máxima cuando todos los compresores están en funcionamiento, la temperatura exterior es próxima a la máxima anual y el salto térmico en el evaporador tiene un ΔT determinado, cuando está en condiciones de funcionamiento normal, donde la temperatura exterior es baja y el número de compresores en funcionamiento es por ejemplo el 50%, resulta que sobra condensador.

La forma normal de control del condensador ha sido y sigue siendo tratar de mantener la presión de condensación constante bien reduciendo el área de intercambio térmico en el

evaporador, o bien reduciendo el caudal de aire (siempre son interesantes los ventiladores de dos velocidades o con variador de velocidad) o de agua en circulación para refrigerar el gas de condensación.

Este concepto de mantener la presión de condensación constante, se ha desarrollado tanto que es bastante normal encontrar centrales de compresores con mas etapas de condensación que de aspiración. Es decir, comparativamente se dedican demasiados recursos a la regulación de la presión de condensación cuando se hace poco por la presión de aspiración.

Los factores que permiten la reducción de la presión de condensación son dos, tener una temperatura exterior baja, y tener una demanda frigorífica menor del 100%.

No se debe olvidar que reducir la presión de condensación de referencia, tiene un limite* inferior debido a que el ahorro de energía del compresor se puede ver penalizado con el mayor consumo de energía de los ventiladores de condensación, de forma que hay que encontrar el punto óptimo, en el cual, el consumo en función de la presión de condensación es mínimo. Además se debe recordar que este punto no es fijo, sino que va a depender de las condiciones externas de temperatura y humedad.

En definitiva se debe relacionar la presión de condensación de referencia con la temperatura ambiente y con la carga actual de la instalación (número instantáneo de compresores en funcionamiento).

* Indicar que la limitación de la presión de condensación para asegurar una buena inyección de líquido en el evaporador es un problema que ha sido superado con éxito por las válvulas electrónicas por modulación de impulsos.

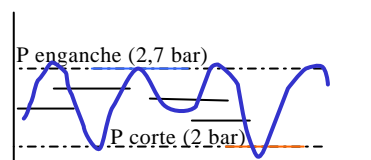
Este concepto de presión de referencia flotante se puede combinar con la utilización de variadores de frecuencia en los ventiladores y/o bombas de circulación de agua con lo cual se consigue mantener la presión de condensación siempre en el punto óptimo.

Como ajustar las presiones en sistemas inteligentes

Para conseguir que la temperatura de evaporación sea siempre lo mas alta que nos permita el servicio más desfavorable, se deben eliminar las influencias negativas que en este punto introduce la gestión de los compresores, utilizando controladores que permiten mantener la presión constante y fija en el valor más alto posible por medio de algoritmos de control con funciones PID.

En la regulación con simples presostatos, debido a que el diferencial mecánico debe ser superior a 0,4 bar, al acoplar varios compresores en paralelo, se necesita una desviación en la presión de evaporación superior a 5 °C, lo cual supone una gran penalización económica (evaporando a -15°C(2,7 bar) con R404A se consume un 20% más de energía que evaporando a -10 °C(3,4 bar)). Esto es inevitable con presostatos, ya que por muy bien que se realice el ajuste, existirá una banda sobre la cual oscila la presión.

En la regulación con zona muerta, la banda de regulación puede ser mas estrecha, ya que la banda de regulación mínima coincide con el diferencial del presostato de zona muerta utilizado. La zona de



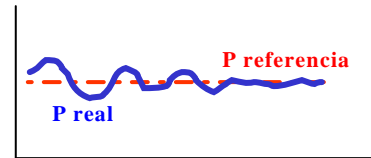
Oscilaciones de presión en control con presostatos

regulación puede oscilar entre 0,2 y 1 bar. En la zona muerta los compresores ni arrancan ni paran, y solo cuando la presión se sale de los valores ajustados se conectarán o desconectarán los compresores según unas temporizaciones externas.

En la regulación con controladores electrónicos que introducen funciones PID en el algoritmo de control se puede mantener una presión que no se ajuste a una banda de regulación, sino que se aproximan a una referencia fija.

Sin embargo, aunque los sistemas electrónicos permiten obtener presiones de evaporación iguales a las presiones de referencia en cada momento, las limitaciones de la planta como puede ser un número

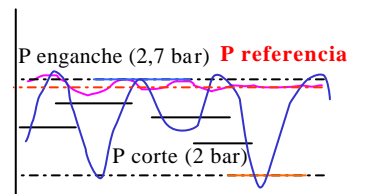
reducido de etapas en el control de compresores, bs arranques por hora permitidos o los tiempos de funcionamiento o pausa mínimos de los compresores impide en muchas ocasiones obtener la presión de referencia. Como consecuencia **se debe diseñar la central de compresores teniendo en cuenta las posibilidades que la electrónica nos ofrece, no como en el pasado limitando y encorchetando a la electrónica.**



Regulación PID

Una consideración importante a tener en cuenta en la regulación electrónica es el ajuste del valor de referencia o zonas y tiempos de entrada y salida de compresores, ya que la experiencia demuestra que unos ajustes incorrectos pueden perjudicar considerablemente el consumo de energía.

Para realizar estos ajustes se debe partir de los ajustes iniciales con presostatos, preguntando al mecánico cual es el valor de ajuste del presostato del ultimo compresor en arrancar cuando los demás compresores ya están en funcionamiento (presostato con presión mas alta ajustada), e introducir este valor como valor de referencia en los sistemas inteligentes con algoritmos PI o PID.



Diferencia de oscilaciones de presión en control con presostatos o sistemas PID

Para las presiones de condensación se procede de la misma manera, pero en con la diferencia de ajustar la referencia al valor mas bajo posible.

5 Ahorro económico

Aunque no tiene relación con el ahorro de energía a continuación se indican distintas formas para poder obtener un ahorro económico en una instalación frigorífica.

Vigilancia de la planta

En primer lugar y debido al valor económico que tiene el producto almacenado en una cámara frigorífica, el mantener una vigilancia constante de la cámara con un buen sistema de información a distancia, evita muchas pérdidas de productos con el consiguiente ahorro económico.

Evitar o limitar el consumo en horas punta

Dado que el precio de la energía depende de la hora del día a la cual se consume, es importante limitar el consumo de energía en los horarios punta para que dicha utilización no penalice el consumo. Para tal fin se pueden utilizar señales procedentes de

un máxímetro, el cual indicará los momentos en los que se pueden producir penalizaciones por consumo eléctrico.

Acumulación de frío (hielo)

En instalaciones en las cuales existe la posibilidad de acumulación de frío por almacenamiento de hielo, es muy interesante debido a la producción de hielo en los periodos valle de la tarifa eléctrica y la utilización de esta reserva frigorífica en los periodos punta de la tarifa eléctrica.