

Influencia del binomio de la inyección electrónica y la variación de frecuencia en la presión flotante

Resumen:

En este documento, de los distintos temas relacionados con el ahorro de energía en los circuitos de refrigeración, se centra en el análisis de la expansión electrónica, la variación de frecuencia y la presión de evaporación y condensación flotantes.

En el análisis de los sistemas de expansión se realiza una comparación de la inyección termostática comparada con la inyección electrónica.

En la variación de frecuencia sólo se han tenido en cuenta los factores energéticos y de calidad en la conservación del producto y no las reducciones de ruido o reducción de tamaños que también llevan asociados.

Finalmente se concluye que debido a las ventajas que aportan, se prevé que en el futuro estos sistemas se instalarán cada vez más, y se incorporarán nuevos profesionales de otros campos industriales.

Índice:

- 1 Introducción**
- 2 Análisis teóricos que permiten un ahorro energético.**
- 3 Gestión con un funcionamiento eficiente de la instalación frigorífica**
 - Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor**
 - Evaporador**
 - Sistemas de expansión**
 - Válvulas termostáticas**
 - Acoplamiento de válvula termostática y evaporador**
 - Válvulas de expansión electrónica**
 - Acoplamiento de válvula de expansión electrónica y evaporador**
 - Adecuación a la demanda y utilización de equipos individuales a al 100%**
 - Variación de carga en compresores**
 - Utilización de los compresores en su máxima eficiencia**
 - Variadores de frecuencia**
 - Termostato modulante y evaporadores**
 - Condensadores**
- 4 Presiones flotantes**
 - Disminuir la presión de condensación**
 - Presión de condensación flotante**
 - Aumentar la presión de evaporación**
 - Presión de aspiración flotante**
- 5 Ajuste de las presiones en sistemas inteligentes**
- 6 Niveles de ahorro**
- 7 Conclusión**

Introducción

Dentro del campo del ahorro de energía, la introducción de conceptos novedosos en refrigeración como es la presión flotante, requiere ciertas aclaraciones y consideraciones, ya que si no es así, el resultado obtenido puede ser contraproducente, antieconómico y antienergético.

Para analizar esta cuestión, es necesario conocer el funcionamiento del sistema frigorífico y el acoplamiento de los equipos involucrados.

Como sistemas importantes que afectan a la gestión de los circuitos frigoríficos con presiones de aspiración y descarga flotantes, están los sistemas de inyección y los sistemas de control de compresores.

El objeto de este artículo es realizar una presentación simplificada pero completa y sencilla de los acoplamientos que pueden surgir y del potencial de ahorro energético en las instalaciones frigoríficas.

Análisis teóricos que permiten un ahorro energético.

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

Gestión con un funcionamiento eficiente de la instalación frigorífica

Agrupaciones de cámaras y servicios.

Subenfriamiento de líquido

Presiones flotantes

Disminuir la presión de condensación

Presión de condensación flotante

Aumentar la presión de evaporación

Presión de aspiración flotante

Respetar las condiciones de diseño

Comprimir el vapor en varias etapas

Reducir las pérdidas por transporte frigorífico

Reducir pérdidas de carga en aspiración

Utilizar el calor del condensador

Recuperación de calor para agua caliente sanitaria o calefacción

Desescarche por gas caliente

Eliminar saltos térmicos innecesarios

De todos los puntos indicados, en esta ponencia sólo se desarrollan los referentes a gestión con funcionamiento eficiente, y los que modifican la presión de condensación y de evaporación.

Gestión con un funcionamiento eficiente de la 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 dos puntos importantes como son:

1. Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor
2. Adecuación a la demanda y utilización de componentes individuales a su máxima eficiencia (100%)

Estos conceptos son los utilizados en los tres conceptos básicos que nos ocupan como son inyección electrónica, variación de velocidad y presiones flotantes.

Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor

Los evaporadores y los condensadores son los lugares del circuito frigorífico donde se intercambia calor, en el primero de los alimentos al refrigerante que se evapora y en el segundo del refrigerante que se condensa al medio externo (aire o agua).

La transmisión de calor se realiza por la superficie donde se evapora o condensa refrigerante cambiando de estado, luego lo que se necesita es que las superficies estén mojadas pero no inundadas para favorecer el intercambio térmico sin bloquear ni reducir la superficie de la tubería. Si en algún momento la tubería no tiene líquido, el calor intercambiado se reduce.

En el condensador, la formula que expresa el calor de transmisión es $Q = U A \Delta T$, y por tanto la cantidad de calor transmitido se puede ver reducida bien reduciendo el área de intercambio A , bien reduciendo el salto térmico ΔT o bien ambos.

Desde el punto de vista energético lo mas interesante es reducir el salto térmico (existen límites que se indicarán mas adelante).

En el evaporador el sistema es bastante mas complejo, ya que por principio no debe salir líquido del evaporador que pueda llegar al compresor y provocar daños. Es por ello por lo que dedicaremos un análisis especial al evaporador en si mismo y al acoplamiento con los sistemas de expansión.

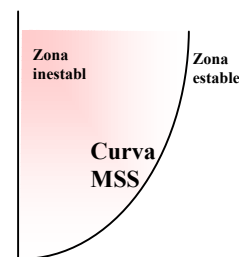
Evaporadores

Los evaporadores se utilizan siempre en función de las necesidades de la cámara o servicio en cuestión. Tienen un sistema de control individualizado, y en general están funcionando supuestamente al máximo rendimiento o están parados.

Cuando se dice que un evaporador está trabajando siempre al máximo rendimiento, se debe indicar que dependiendo del tipo de evaporador y del tipo de control de dicho evaporador esto puede ser o no ser cierto.

De hecho en evaporadores de expansión directa con válvula de expansión termostática, el funcionamiento al máximo rendimiento solo es posible en ciertas condiciones, las cuales solo se dan circunstancialmente durante el funcionamiento. Durante el resto del tiempo, el evaporador aunque esté funcionando, no estará totalmente inundado de líquido.

La curva característica del evaporador MSS (Mínima Señal eStable) separa las zonas del evaporador con arrastre de líquido en la zona izquierda de la curva de las zonas donde solo sale vapor a la derecha de la curva. La zona de vapor no aporta frío al evaporador, pero nos indica seguridad de cara al compresor. Lo ideal es estar próximo a la curva MSS por el lado de la derecha para estar seguros de no tener retornos de líquido y tener el evaporador lleno.



La curva MSS pone de manifiesto que para conseguir una inundación determinada, debemos tener distinto recalentamiento en función de la carga térmica que recibe el evaporador. Esto hace que el recalentamiento que debemos intentar mantener con la inyección es variable y función del nivel de carga térmica.

Sistemas de expansión

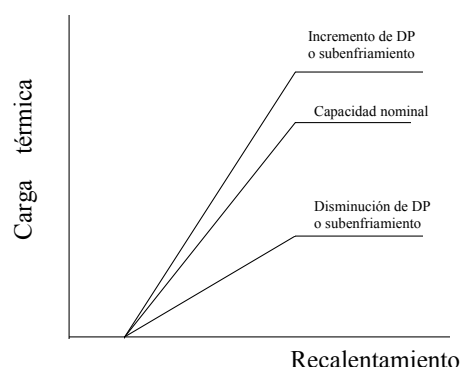
La experiencia de la inyección nos muestra que al inyectar líquido con un sistema de control automático, cuando el recalentamiento se encuentra en la zona de vapor a la derecha de la curva MSS, la señal del recalentamiento es estable, mientras que cuando está a la izquierda la señal es oscilante debido a la apertura y cierre de la válvula para intentar que no salga líquido (espuma) del evaporador.

Válvulas de expansión termostáticas

La válvula de expansión termostática tiene un orificio con un tamaño determinado por el cual debe pasar LÍQUIDO para inundar el evaporador. En función del grado de apertura podrá pasar mayor o menor caudal de líquido, pero además de la apertura, hay otros factores que influyen en el caudal de líquido o en la cantidad de frío asociada al líquido que pasa. Estos factores son la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la válvula de expansión y el subenfriamiento.

Un aumento en la diferencia de presiones, provoca un aumento en el caudal de fluido, y un mayor subenfriamiento genera una capacidad frigorífica mayor en el líquido que entra al evaporador. Luego tanto un incremento en la diferencia de presión como en el subenfriamiento aumentan la capacidad de la válvula de expansión.

En las válvulas de expansión termostática, esto se

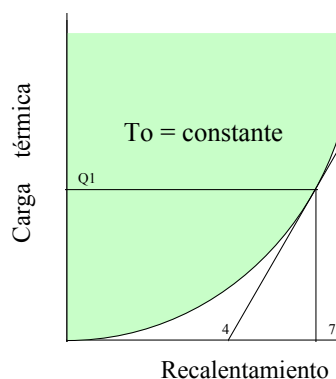


traduce en una curva característica con una pendiente mayor de la nominal (mas inclinada).

Acoplamiento válvula de expansión termostatica y evaporador

Teniendo en cuenta que el evaporador presenta la curva MSS que indica el recalentamiento mínimo del evaporador en función de la carga térmica para que no rebose líquido y que la válvula termostática sigue una recta indicando que inyecta una cantidad de líquido (carga térmica a evaporar) en función del recalentamiento, cuando se representan las dos líneas (curva MSS y recta de la termostatica) juntas, lo ideal es que sean tangentes y que la carga termica de la planta sea siempre la indicada por el punto de tangencia.

En la figura de la derecha cuando el calor aportado es Q_1 , se tiene que el evaporador necesita una zona de seguridad para que no salga líquido medido por un recalentamiento de 7°C , por otro lado la válvula de expansión cuando recibe la señal de 7°C de recalentamiento, abre para permitir el paso de una cantidad de líquido que al evaporarse produce un frío de Q_1 kW. Como la recta de la válvula de expansión es tangente o está a la derecha de la curva MSS del evaporador, tenemos que el evaporador tiene una zona al final sin líquido, por lo cual no puede salirse del evaporador. En este caso la regulación es estable.



Cuando la curva MSS se desplaza hacia la derecha, bien por una bajada brusca de presión, acumulación de hielo, ventiladores rotos, etc, el sistema entrara en un estado inestable con oscilaciones en la apertura de la válvula.

Cuando la pendiente de la recta cambia como consecuencia de un cambio brusco de la presión de condensación o por la aparición de burbujas en la línea de liquido, podemos entrar de nuevo en un estado inestable o bien no inundar completamente el evaporador de líquido.

Válvulas de expansión electrónicas

En las válvulas de expansión termostáticas la inyección es proporcional al recalentamiento siguiendo una línea recta de trabajo. Esta recta no se puede acoplar a la curva MSS del evaporador, por lo cual hay que recurrir a tecnologías especiales para poder mejorar la forma de inyección en el evaporador. Para esto es necesario el empleo de la electrónica, nuevas válvulas de expansión, y reguladores electrónicos.

El empleo de estos nuevos productos junto con el conocimiento de la dinámica interna de los evaporadores (curva MSS) permiten el control de los evaporadores con un mayor nivel de inundación.

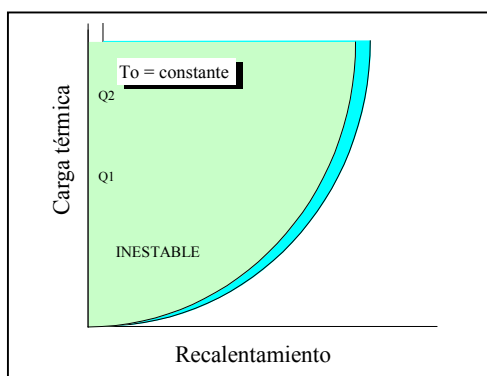
Como por un lado del evaporador no debe salir líquido que pueda romper el compresor, y por otro lado debe estar siempre lleno para obtener el máximo de superficie de intercambio, se deduce que debemos analizar el recalentamiento a la salida del

evaporador. Este estudio se realiza por medio de un análisis de estabilidad de forma que se pueda determinar si el recalentamiento se puede reducir a valores más pequeños. De esta forma consigue adaptarse a la forma de la curva MSS en cualquier condición de carga.

Aunque la idea es sencilla y normalmente hay muchos sistemas de control utilizando estos conceptos, el problema que se plantea en la inyección, es que las ecuaciones y sistemas que gobiernan la evaporación y la transmisión de calor no son lineales y no pueden utilizar los mismos algoritmos de control en condiciones de carga muy distintas. Esto hace que haya que definir muchos parámetros adaptativos en los algoritmos de control.

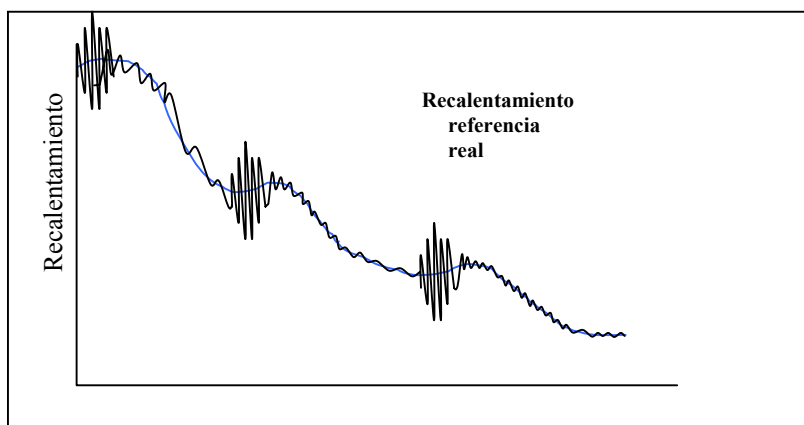
Acoplamiento válvula de expansión electrónica y evaporador

Tal y como hemos visto y debido a que la curva del evaporador solo puede coincidir con la recta de la válvula de expansión termostática en el punto de tangencia, resulta que cuando las condiciones de carga son distintas de las indicadas en este punto el evaporador no está totalmente inundado, y en consecuencia solo se utiliza parcialmente. Además al cambiar las condiciones en el entorno de la válvula y del evaporador cambia la curva MSS del evaporador y la recta de la VET, con lo cual el punto de equilibrio de expansión óptimo se desplaza a otro punto con el consiguiente desaprovechamiento del evaporador.



Para superar estas limitaciones, es necesario que la línea de trabajo de la válvula de expansión se acople a la línea de funcionamiento del evaporador (curva MSS). Se deberá tener en cuenta que la línea del evaporador (curva MSS) que depende de la temperatura de evaporación y de las condiciones de carga, no es fija, y es diferente para cada evaporador.

El regulador electrónico recibe señales de los sensores de presión y temperatura y gobierna la válvula de expansión electrónica, con los algoritmos de control introducidos en él, es quien en base a un análisis de estabilidad, determina el recalentamiento que debe tener el evaporador en cada instante. Después intenta mantener este valor controlando la apertura de la válvula. De esta forma consigue adaptarse a la forma de la curva MSS en cualquier condición de carga.



Además al tener en cuenta la gran cantidad de evaporadores que existen, se plantea otro problema adicional, que es la necesidad práctica de adaptación del sistema de expansión a cualquier válvula de expansión y a cualquier evaporador. En este punto hay que indicar que el software disponible en la actualidad es diferente según sea la aplicación y el tipo o tamaño de la válvula, debiéndose indicar en que aplicación se está trabajando y que válvula se está utilizando.

En definitiva se puede indicar que para que un evaporador por expansión directa, este funcionando siempre al máximo rendimiento, será necesario que el sistema de control utilice válvulas controladas electrónicamente, en las cuales por medio de algoritmos de control PID que tienen en cuenta la curva de estabilidad del evaporador MSS se consiga una inyección óptima en cualquier condición de carga.

Adecuación a la demanda y utilización de equipos individuales al 100%

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 práctica 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.

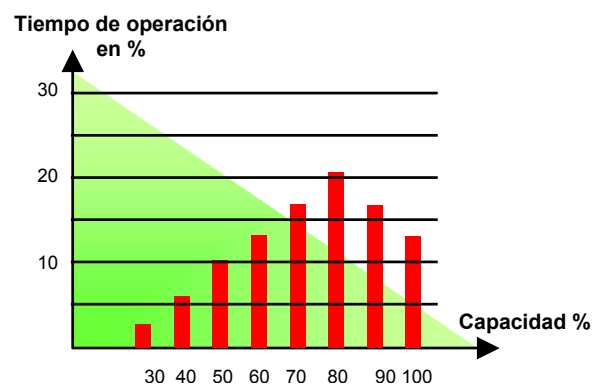
Conviene aquí introducir el concepto de frío de calidad, el cual es obtenido a bajas temperaturas, diferenciándolo del frío de baja calidad obtenido a altas temperaturas. La

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.

En estos casos teniendo en cuenta el perfil del tiempo de operación típico de una instalación frigorífica como muestra el gráfico de la figura, las tecnologías de la variación de velocidad permiten una adecuación correcta a la demanda de la instalación, y además, una temperatura y presión mas estables, una reducción de la corriente de arranque y de la potencia reactiva lo cual repercute en una optimización del proceso con el consiguiente ahorro de energía, generando una serie de beneficios al usuario que se plasman 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 ya que se reduce el nivel sonoro, 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 CO_2 producido lo cual permitirá campañas positivas de respeto al medio ambiente.



Por ello vamos a estudiar en detalle el control de equipos donde pueden ir colocados los variadores de frecuencia.

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 óptimo 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

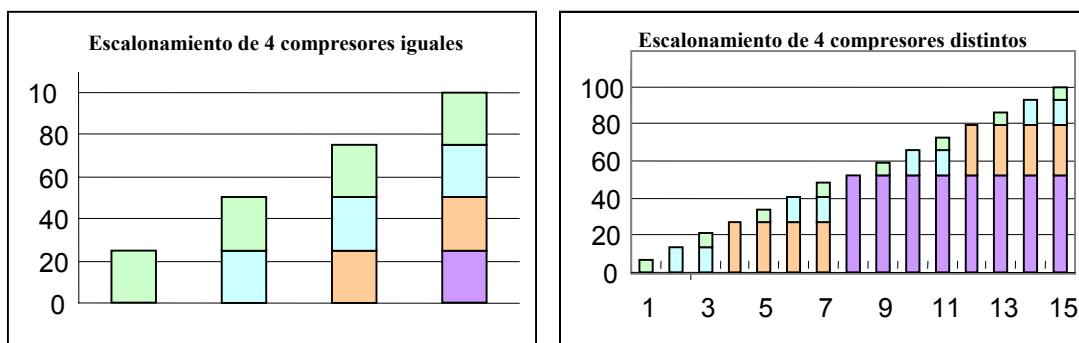
Los compresores están diseñados para un desplazamiento volumétrico determinado consumiendo una energía eléctrica determinada. En el diseño de los compresores se impone la condición de minimizar el consumo cuando el compresor está funcionando completamente (100%).

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



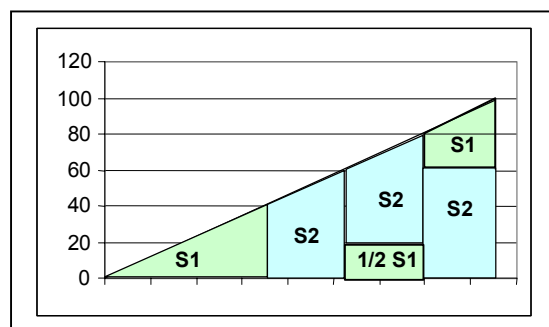
proporciones.

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.

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

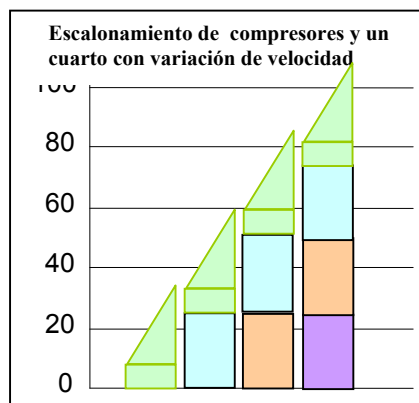
En instalaciones con varios compresores de tornillo también es recomendable que sean de distinto tamaño y exista una gestión secuencial de los compresores de forma que haya un funcionamiento óptimo con solapes simultáneos de dos compresores.

Con esta secuencia el compresor grande nunca esta 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.

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:

1. Mejor eficiencia del compresor
2. Mejor eficiencia del motor eléctrico
3. Protección eléctrica del motor
4. Reducción de ruido
5. Temperatura más estable
6. Presión más estable
7. Reduce la intensidad de arranque
8. Reduce la potencia reactiva
9. Optimización del proceso
10. Ahorro de energía

Estas ventajas se traducen en una serie de beneficios para el propietario de la instalación tanot desde el punto de vista de inversión, mantenimiento y calidad del producto.

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 esta tecnología.

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%)

Tampoco se pueden 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 electrica, la rectifica y luego la vuelve a transformar en corriente alterna de la frecuencia y tensión que en cada momento se necesita parra que la velocidad de rotación del motor electrico 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, se debe realizar un ajuste correcto para las aplicaciones de refrigeración en compresores, ventiladores o bombas, así como tener en cuenta que al instalar un variador de frecuencia en una instalación frigorífica pueden aparecer dificultades nuevas asociadas a 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

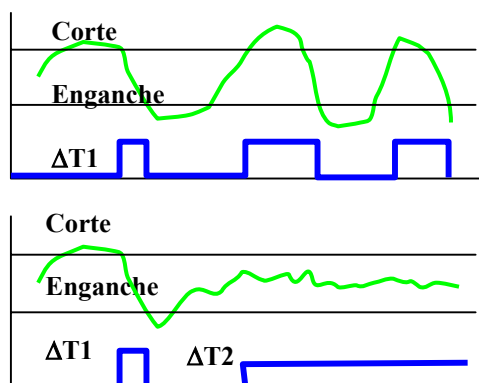
potencia, lubricación y retorno a baja velocidad, mayor circulación de aceite a alta velocidad en el sistema, mayor complejidad en el sistema.

Por lo cual, se recomienda la utilización de equipos complementarios y auxiliares como pueden ser los sistema de control de capacidad complementario, los separador de aceite, los sistemas de bombeo de aceite, los ensamblajes mecánicos y eléctricos, los sistemas de enfriamiento y control de temperatura de aceite, los economizadores, los filtros EMC, los amortiguadores de vibraciones y las válvulas de retención en descarga.

Termostato modulante y evaporadores

El termostato modulante es 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 $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) con una humedad relativa alta y constante.

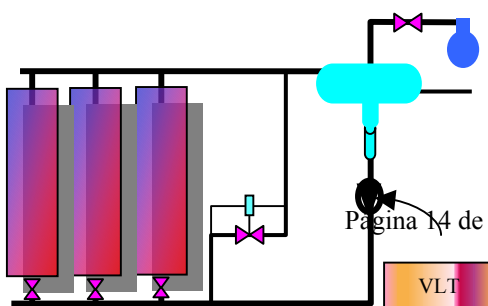
Este tipo de función coincide con el análisis del funcionamiento del evaporador ya que en condiciones normales, éste funciona durante un tiempo refrigerando la cámara o servicio. Durante este tiempo el salto térmico en el evaporador tiene un $\Delta T1$ determinado. Al conseguir cierta temperatura en 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 con la posibilidad de incorporar también variadores de frecuencia en los ventiladores del evaporador.

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.

En evaporadores inundados con recirculación de líquido, el evaporador esta 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 la línea de bypass sin de forma innecesaria consumiendo energía 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.

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 (parando ventiladores , con ventiladores de dos velocidades o con un variador de velocidad) o de agua en circulación para refrigerar el gas de condensación.

Presiones flotantes

El evaporar más alto con menos compresores en funcionamiento consiguiendo la misma potencia frigorífica, consigue un ahorro considerable de energía.

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.

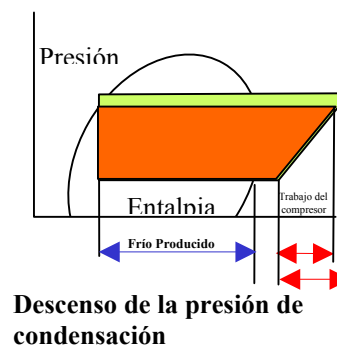
Compresor (R404A)	COP = 1,74 (110%)	COP = 1,58 (100%)	COP = 1,75 (110%)
T evaporación	-25	-25	-22
T condensación	+30	35	35

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.

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.

No se debe olvidar que reducir la presión de condensación de referencia, tiene un límite 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.



Presión de condensación flotante

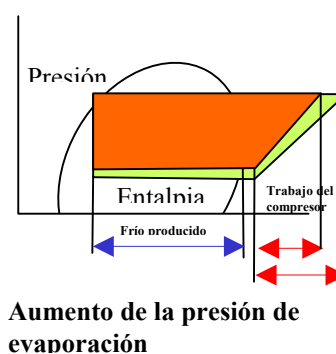
La presión de condensación tiene una relación directa con las condiciones ambientales externas, es decir siempre tiene que haber una temperatura superior (unos 10°C) en el interior del condensador que en el exterior. Sin embargo la práctica habitual debido a limitaciones de las válvulas de expansión termostáticas (en las electrónicas de pulsos les afecta de forma mínima), a la construcción mecánica de los compresores y a los sistemas de lubricación, 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 en función de la temperatura exterior, la demanda frigorífica de la instalación y un programa de trabajo diario, junto con la utilización de válvulas electrónicas y variadores de velocidad, permitirá considerables ahorros de energía en compresores alternativos.

Aumentar la presión de evaporación

Aumentando la presión 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. Es aquí 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.

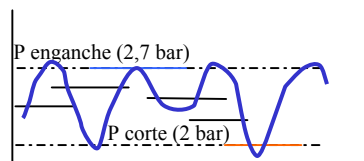
En cámaras grandes con varios compresores, se puede hacer que la presión de aspiración sea flotante haciéndola depender bien de la temperatura de la cámara, de la temperatura exterior, de la humedad relativa o de ajustes externos.

En sistemas centralizados con muchos evaporadores y una central de compresores, se puede hacer que la presión de aspiración sea flotante teniendo en cuenta la temperatura de todos los servicios, de forma que con un inferencia se puede incrementar la presión de evaporación sin perjudicar la calidad del producto consiguiendo ahorros importantes.

Ajuste de las presiones en sistemas inteligentes

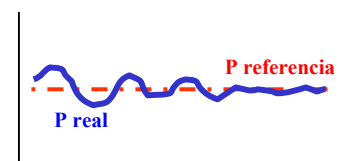
Para conseguir que la temperatura de evaporación sea siempre lo mas alta que nos permita el servicio más desfavorable, se deben eliminar las influencias negativas que en este punto introduce la gestión de los compresores, utilizando controladores que permiten mantener la presión constante y fija en el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



Oscilaciones de presión en control con presostatos

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, los 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.

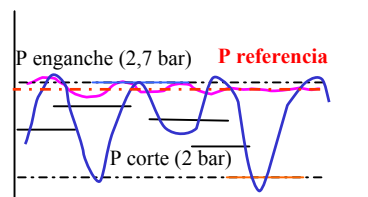


Regulación

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 perjudican 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.

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.



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

Es claro que mantener tanto la presión de evaporación como la de descarga en unos límites estrechos, nos permite tener una presión de evaporación más alta, y una presión de condensación mas con la mejora en la eficiencia energética de la instalación.

Ademas la constancia en las presiones obtenida con los variadores de frecuencia elimina las oscilaciones de presión de evaporación que introducen inestabilidad en los sistemas controlados por válvulas de expansión termostatica (las electrónicas de pulsos no se ven afectadas) y las oscilaciones de la presión de condensación que pueden provocar burbujas de vapor en la línea de líquido con el correspondiente problema posterior de inyección.

Niveles de ahorro

Los sistemas de expansión electrónica ahorran del orden del 15%.

Los compresores gobernados por variadores de velocidad ahorran entre un 15 – 20%.

Los sistemas de gestión de compresores y condensadores con presión de aspiración y condensación flotante ahorran hasta un 25% cuando se combinan con la inyección electrónica.

En definitiva, si se utilizan los tres conceptos de forma adecuada se pueden conseguir ahorros superiores al 50% del total de la instalación.

La variación de frecuencia aunque consigue unos buenos niveles de ahorro, sin la combinación con las presiones flotantes y la expansión electrónica se queda en unos niveles menos espectaculares.

Conclusión

1. Se prevé un aumento de este tipo de sistemas debido a la tendencia actual de no permitir incrementar la producción de CO2 en los países de la comunidad europea y a los ahorros conseguidos que pueden superar el 40% ó 50% del consumo energético.
2. Surgirá una incorporación de nuevos perfiles profesionales dado que las nuevas tecnologías necesitan ser asimiladas por los técnicos de refrigeración.