

TÍTULO: Ahorro de energía en circuitos de refrigeración

AUTOR/ES:

Félix Sanz del Castillo. *Director Técnico de Refrigeración y A/C en España y Portugal*
Ibón Vadillo Rodríguez. *Director Soporte Técnico en Refrigeración Industrial para Europa*

PONENTE/ES: Félix Sanz del Castillo

EMPRESA/ORGANISMO: ANEFRYC - Danfoss S.A.

Resumen

En este documento se tratan temas relacionados con el ahorro de energía en los circuitos de refrigeración. Se hace una enumeración de todos los sectores afectados, así como de conceptos importantes tanto desde el punto de vista teórico, como desde el lado práctico incluyendo la influencia del control y la gestión del circuito.

También se hace una cita de los métodos de ahorro económico, para posteriormente realizar un análisis particularizado por aplicaciones.

El objeto final es la descripción de las acciones que se podrían implementar para ahorrar energía, reducir la huella de CO₂ y con ello, disminuir el efecto invernadero en el planeta y por tanto el cambio climático.

Como consecuencia de la diversidad de tecnologías involucradas en las instalaciones de refrigeración se requiere resaltar una multitud de aspectos. Análisis en cuanto a la selección de refrigerantes, los circuitos frigoríficos según aplicación, la influencia del tipo de control de la instalación así como la monitorización, los principios básicos termodinámicos de ahorro de energía que pese a la sencillez de algunos tienen una incidencia directa muy significativa en la reducción del consumo.

Otras consideraciones están relacionadas con el correcto mantenimiento y ejecución de las instalaciones, los planteamientos iniciales y la adecuación de la instalación a la demanda con las diversas soluciones de parcialización de carga y su influencia.

De esta forma, en la línea de las políticas activas iniciadas desde hace años por la Unión Europea y organismos medioambientales, se pretende promover acciones para reducir el consumo y la huella de CO₂ en los circuitos de refrigeración tanto en la industria de la alimentación como en el sector del aire acondicionado.

Introducción

En los momentos actuales con un aumento constante del precio de la energía, con problemas medioambientales (calentamiento global) causados por el efecto invernadero en el cual el CO₂ tiene una elevada responsabilidad, y con legislaciones cada vez más restrictivas en cuanto a utilización no correcta de un bien escaso como es la energía, el uso eficiente de ésta es necesario.

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 a potenciar de forma económica mediante subvenciones por ciertos gobiernos o penalizaciones con sanciones ciertos sistemas de consumo de energía.

En primer lugar se debe indicar que en un circuito frigorífico para producir frío, transportar calor de una fuente fría a un punto o sumidero de calor a mayor temperatura, es necesario consumir energía, con un coste económico asociado. Se debe diferenciar entre ahorro económico y ahorro energético, los cuales, no siempre van unidos.

El ahorro en instalaciones frigoríficas trata de los métodos que las distintas tecnologías nos aportan para producir una cantidad de frío con el menor gasto posible. También trata de utilizar los residuos energéticos que se generan y que hay que eliminar como subproductos útiles, como por ejemplo con la utilización del calor de condensación para obtener agua caliente sanitaria.

Sectores susceptibles de ser afectados en el ahorro de energía

Todos los sectores de la vida cotidiana que necesitan disminuir la temperatura, para refrigeración de un ambiente (aire acondicionado) o de un producto alimenticio (alimentación), pueden beneficiarse de algún concepto de ahorro que a lo largo de estas líneas se expone. La gran variedad de instalaciones hace que los conceptos generales y/o específicos en cada forma de ahorro de energía puedan aplicarse de forma distinta. A veces en ciertas aplicaciones resulta identificar las formas de ahorro.

Usuarios, fabricantes, propietarios, ingenierías, instaladores, mantenedores, así como las administraciones públicas, personas físicas o jurídicas involucradas en el ahorro tienen su responsabilidad en el proceso.

Los usuarios, utilizan el producto final e intervienen indirectamente con su decisión de comprar un producto u otro, así como a través de asociaciones de consumidores o ecológicas en la definición del equipo.

En grandes usuarios como fabricantes de refrescos, helados, etc. con muchos equipos iguales repartidos en grandes áreas geográficas, el ahorro energético, solo se tiene en cuenta dependiendo de quien pague la factura eléctrica asociada al equipo. En la actualidad la imagen verde que atrae a un gran sector de la población esta potenciando acciones medioambientales positivas.

Los propietarios, deciden realizar instalaciones frigoríficas y generan la inversión. Sin ellos nada sería posible. Están interesados en el ahorro

económico de su instalación, y si el ahorro energético genera un ahorro económico estarán interesados en invertir para conseguir ahorros energéticos en la instalación frigorífica, siempre y cuando no tengan una inversión con mayor rentabilidad económica, como puede ser ampliar cuota de mercado.

La industria espera que la incentivación económica fomente el ahorro energético tanto desde la óptica de fomentar nuevas técnicas y tecnologías que aprovechen mejor la energía, sin embargo mientras no lleguen penalizaciones importantes por el despilfarro de energía de forma innecesaria, no se tomaran medidas reales. Para las empresas es mucho mas importante, incrementar su participación energética con el despilfarro, para que cuando llegue la legislación punitiva poder disponer de mas cuota eléctrica, para poder ahorrar y crecer con el ahorro conseguido. El ahorro energético por despilfarrar mucho se convierte en posibilidad de crecimiento futuro.

Los fabricantes, realizan productos en serie para distintas aplicaciones como pueden ser neveras, equipos de aire acondicionado, maquinaria para hostelería, enfriadoras de agua, etc. Están interesados en conseguir máquinas eficientes y con una vida útil larga.

Las administraciones públicas, definen y hacen cumplir el marco legal creando normas en las cuales se mueven todas las instalaciones frigoríficas tanto para refrigeración como para aire acondicionado, y vigilando su cumplimiento.

En la actualidad hay bastante regulado para aire acondicionado (RITE) de cara al ahorro energético, pero sin embargo para refrigeración, todavía no hay ninguna clasificación energética como en los electrodomésticos. Se ha demostrado que la utilización del etiquetado incrementa el nivel de calidad energética en los equipos. Dado que etiquetado energético A, B, C, etc. es una herramienta muy útil en este aspecto, debería extenderse también a la instalación comercial e industrial durante su vida útil. Se conseguirá con ello que todas las normas europeas desarrolladas basándose en el protocolo de Kioto se cumplan con más facilidad.

Las ingenierías, seleccionan y realizan un diseño de la instalación. Una buena concepción de la instalación frigorífica considerando *el aporte mínimo de calor exterior* (materiales empleados en la construcción, color en las paredes y techos, situación, orientación (norte), cerramientos y falsos techos), *reducción de pérdidas por transporte* frigorífico (situación de la sala de máquinas, agrupaciones de cámaras y servicios), *agrupaciones por temperaturas* de servicios, *utilización del calor residual* de condensadores para fines positivos (recuperación de calor, agua caliente sanitaria, calefacción de suelos, desescarche por gas caliente), *selección y diseño de la instalación para ahorrar energía*, (sistema de refrigeración, refrigerante utilizado, refrigeración directa, evaporadores secos e inundados, refrigeración indirecta, agua / glicoles / hielo fluido, compresores para el circuito frigorífico, circuitos independientes, multi-circuitos, centrales de compresores-Booster, economizadores, evaporadores, intercambiadores de placas, sistema de condensación, aire, agua, torre, evaporativo, gestión y control, desescarche, etc.).

Aunque esta relación parece larga, bien de forma explícita o implícita siempre se tienen en cuenta dichos conceptos. Las ingenierías establecen los criterios para que la instalación funcione con unos buenos índices de consumo energético, si esta fase del proceso de definición de la instalación fuese deficiente, después, el funcionamiento también lo sería.

Los instaladores y montadores, son quienes realizan la ejecución de la instalación frigorífica o de aire acondicionado. La correcta ejecución de la instalación es de vital importancia para que se puedan cumplir las condiciones indicadas en el diseño por la ingeniería, razón por la que adquiere una gran importancia la profesionalidad de los instaladores y montadores que realizan la planta.

Las empresas-personal de mantenimiento, deben conseguir un funcionamiento eficiente de la planta. Todos deben preparar la instalación para un funcionamiento eficiente, pero son los mantenedores los que ejecutarán la acción. Sin ningún tipo de duda, los responsables de mantenimiento son quienes pueden ahorrar energía en las instalaciones frigoríficas.

Las empresas o personal de mantenimiento, realizan un mantenimiento preventivo de los distintos elementos incluida su gestión y control. Cuidado especial deberá ponerse en ajustar la instalación a las condiciones instantáneas de carga teniendo en cuenta que la demanda es variable a lo largo del tiempo. Para ello se requieren ciertos ajustes temporales los cuales si bien se pueden hacer de forma automática a través de controladores adaptativos, no es lo normal, recayendo esta función en las personas que realizan el mantenimiento de la instalación.

Debe intentarse una optimización continua de la instalación para que el gasto económico o energético sea mínimo. Para poder realizar esta optimización, se requiere la utilización de las tecnologías como la electrónica y la informática, combinadas con los conocimientos de especialistas en refrigeración para reducir el gasto económico y energético de forma considerable.

En cualquier caso para tener un buen mantenimiento, se recomienda, implantar sistemas de vigilancia informatizados, con sistemas de gestión centralizada por ordenador local o remoto vía módem, telefonía móvil, redes locales, Internet, etc. duplicar los elementos críticos para permitir un funcionamiento de emergencia o manual de la instalación, llevar al día el libro de mantenimiento y de revisiones de la instalación con las anotaciones referentes a todos los valores importantes de la instalación.

Conceptos importantes de cara al ahorro energético

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

Aporte mínimo de las ganancias caloríficas exteriores

La eliminación de pérdidas frigoríficas por paredes o tuberías hacia el exterior con diseño de paredes con el aislamiento térmico adecuado a las temperaturas del ambiente exterior.

Es importante utilizar materiales con baja conductividad térmica la cual sea estable a lo largo del tiempo (evitar pérdidas por envejecimiento).

Las paredes y techos deben tener colores claros para evitar la acumulación de calor en la masa del aislante. La situación de los recintos refrigerados en lugares que por la orografía del terreno estén en lugares frescos, que eviten la radiación directa del sol, que estén orientados al norte, así como la creación de ambientes frescos (evitar efectos invernadero con corrientes de aire suaves) son factores que pueden reducir considerablemente las necesidades frigoríficas y por tanto energéticas.

Refrigerantes y compresores

En la actualidad los refrigerantes HFCs también están 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 o presiones elevadas.

A la hora de seleccionar un refrigerante se deberán tener en cuenta, las condiciones legales que existen en cada país o región, los factores medioambientales como el poder de destrucción del ozono (ODP), el potencial de calentamiento global (GWP) y el efecto invernadero total (TEWI), 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. La elección del refrigerante utilizado es relativamente compleja implicando compromisos entre ventajas medioambientales e inconvenientes energéticos y de seguridad.

El diseño de los compresores se ve condicionado por el principio mecánico de compresión, de pistones, rotativos, scroll (de caracola o espiral), de tornillo, turbo-compresores, etc.

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, 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) afectan a la recomendación del tipo de compresor. Asociado a la aplicación, se incorporará el clima de la planta.

Como norma general los compresores de pistón consumen más energía que los rotativos, scroll o de tornillo equivalentes, pero esto no siempre es cierto. Hay que tener en cuenta la aplicación y el lugar donde se instala la planta.

En las instalaciones con variaciones en las condiciones ambientales y en la carga térmica de la planta, los compresores alternativos al permitir una relación de compresión variable (los demás actualmente no pueden) y utilizando los principios de regulación de presiones de aspiración y descarga flotantes, ofrecen muchas posibilidades para reducir el consumo del compresor.

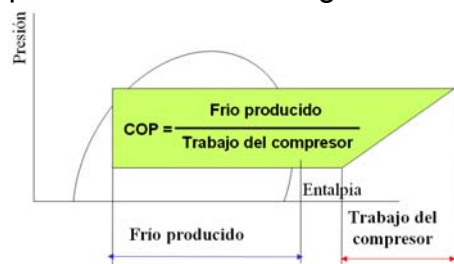
En la tabla siguiente se indican los tipos de compresores recomendados según la aplicación y el refrigerante, si bien, según se desarrolle la tecnología,

aparecerán compresores en aplicaciones donde actualmente no tienen una presencia significativa

Aplicación									
	Baja temperatura			Media temperatura			Aire acondicionado		
Fluido	<1 CV	≤10CV	>10CV	<2CV	≤20CV	>20CV	<3CV	≤30CV	>30CV
R134a	pistón	pistón	tornillo	pistón, rotativo	pistón	tornillo	Rotativo	scroll	tornillo
R290	pistón	pistón	tornillo	pistón	scroll	tornillo	Rotativo	scroll	tornillo
R404A; R507	pistón	pistón	tornillo	pistón, rotativo	pistón	tornillo	pistón	scroll	tornillo
R407C	pistón	pistón	tornillo	pistón	pistón	tornillo	Rotativo	scroll	tornillo
R410A	pistón	pistón	tornillo	pistón	pistón	tornillo	pistón	scroll	tornillo
R600	pistón, rotativo	rotativo	tornillo	rotativo	rotativo	tornillo	rotativo	scroll	tornillo
R717	rotativo	rotativo	tornillo	rotativo	rotativo	tornillo	rotativo	scroll	tornillo
R744	pistón	pistón	pistón	pistón	pistón	pistón	pistón	pistón	pistón

Diagrama de Molier

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



Desde el punto de vista de consumo de energía lo que realmente nos interesa es aumentar el COP de la instalación, aumentando el frío producido y reduciendo el consumo de energía del compresor.

Para aumentar el frío producido, se debe disminuir la entalpía 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.

Análisis teóricos que permiten un ahorro energético.

Funcionamiento eficiente de una instalación frigorífica

El objetivo permanente en una instalación frigorífica es asegurar un funcionamiento eficiente (COP máximo).

En el diseño de una instalación frigorífica hay que tener en cuenta que todo afecta a la "Gestión y control de la instalación". Se diseñara la instalación para permitir una continua "Adecuación a la demanda", una "Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor" y una "Utilización de compresores a su máxima eficiencia (100%)"

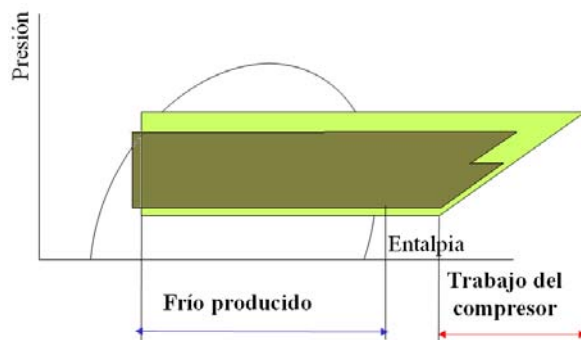
En instalaciones ya en funcionamiento, puede ser necesario introducir ciertas modificaciones para aplicar estos conceptos con facilidad.

Agrupaciones de cámaras y servicios.

Normalmente en las instalaciones frigoríficas suele haber servicios con distintas temperaturas de almacenamiento. La agrupación de dichos servicios a una central de compresores, aprovechándonos de la simultaneidad, permitirá que con una capacidad de compresores inferior, con instalación eléctrica más pequeña obtenga un considerable ahorro de energía.

Las agrupaciones de servicios por temperaturas mas habituales son entre -20 y -25°C , entre $+2$ y -8°C y entre 0 y $+8^{\circ}\text{C}$. De esta forma la eficiencia energética de la instalación será mucho mayor que si solo hubiese una central que evaporase a la temperatura más baja.

Subenfriamiento de líquido. Disminuir la presión de condensación y aumentar la presión de evaporación. Comprimir el vapor en varias etapas.



Desplazando el punto de salida del fluido en la salida del condensador hacia la izquierda, tendremos que la capacidad para robar calor del líquido aumenta, mientras el consumo realizado por el compresor es el mismo. Esto se puede conseguir enfriando el líquido antes de entrar en la válvula de expansión utilizando el frío acumulado en algún producto del entorno (aire, agua, refrigerante, etc.). Este enfriamiento adicional del líquido debe hacerse cuando el evaporador está preparado o ha sido calculado teniendo en cuenta este factor. No puede hacerse alegremente en plantas existentes.

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 aumenta ligeramente. Al disminuir el trabajo de compresión, y aumentar el frío producido aumenta la eficiencia.

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. En los sistemas inundados, realizando una inyección de líquido continua, la vaporización es constante y la presión más estable, de forma que el ajuste para la presión de aspiración puede ser ligeramente superior con el correspondiente ahorro.

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 grande. Si el proceso de compresión se realiza en dos partes, primero hasta una presión intermedia $P_i = \sqrt{P_o.P_c}$, donde se enfría el gas de descarga y se vuelve a comprimir hasta la presión de descarga el consumo total en dos etapas parciales, debido a la divergencia de las líneas politrópicas, menor que en una sola etapa.

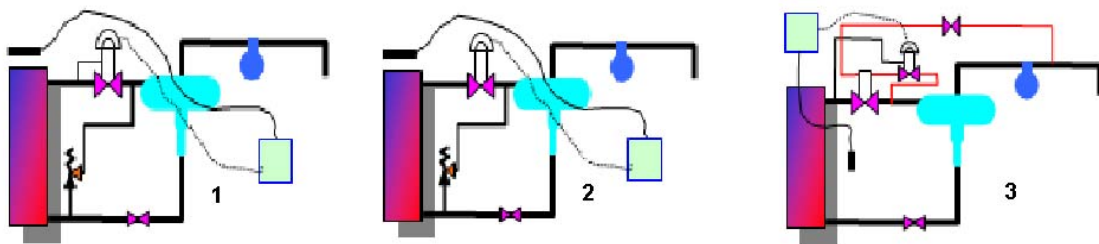
Reducir las pérdidas por transporte frigorífico

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 el transporte de fluido frigorígeno se traduce en una pérdida de carga en la aspiración penalizando considerablemente el gasto energético.

En las instalaciones de refrigeración secundaria con glicoles o flow-ice, aunque el frío se produce en una enfriadora compacta, el transporte se realiza bombeando el fluido secundario (glicol, flow-ice) y lógicamente el consumo será mayor cuando las distancias sean mayores. En este sentido debe citarse como una buena solución la utilización de CO₂ bombeado donde al bombear mucho menos caudal, el consumo de transporte se reduce considerablemente.

Reducir pérdidas de carga en aspiración

En los sistemas inundados, normalmente hay 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.



Reguladores de presión. Servo-accionada. Motorizada. Neumática.

En primer lugar, las válvulas mas utilizadas suelen ser servo-accionadas 1, 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. La regulación de la temperatura de evaporación y del producto es muy buena, pero penaliza el consumo en el compresor y la bomba.

En segundo lugar, las válvulas motorizadas 2, 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 eliminan parcialmente la protección del producto a enfriar. La regulación de la temperatura de evaporación o del producto no es tan buena como en las anteriores, pero no penaliza el consumo.

Y en tercer lugar, las válvulas neumáticas accionadas por gas de descarga y dependientes de la presión de evaporación 3, aunque de instalación compleja,

tienen la gran ventaja de no penalizar el consumo, y tener una regulación de la temperatura de evaporación o del producto muy buena.

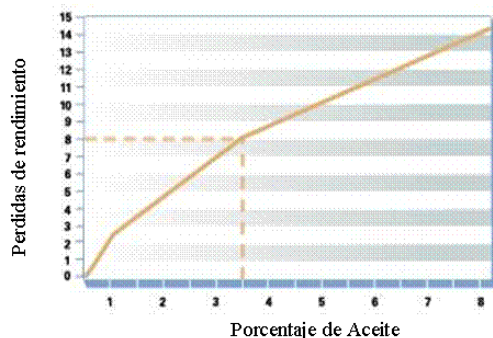
Utilizar el calor del condensador

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 naves para evitar la congelación, fundir el hielo acumulado en otros evaporadores, o ayudar a calentar el agua de calefacción. La utilización del calor del condensador de forma útil, requiere diseños especiales del circuito frigorífico en los cuales se suelen desviar una cantidad variable de los gases procedentes del compresor (o central de compresores), al lugar de utilización del calor. Posteriormente el líquido condensado retorna al condensador, recipiente o línea de líquido.

Eliminar saltos térmicos innecesarios

Cuando por cuestiones sanitarias como de instalación y mantenimiento del sistema, se utiliza refrigeración indirecta, al utilizar un líquido (agua, glicol, flow-ice, etc.) para transportar el frío desde el lugar de producción, en los intercambiadores de calor se produce una irreversibilidad energética, de forma que aumentan el consumo.

El empleo de aceite, es un inconveniente ya que el efecto aislante aumenta las pérdidas considerablemente, de forma que con un 3.5% de aceite circulando junto al refrigerante genera unas pérdidas de rendimiento del 8%, y un 5% de aceite las aumenta hasta más del 10%.



Para minimizar este efecto, se deberán instalar separadores de aceite de alta eficiencia a la salida del compresor.

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.

Gestión y control de la instalación

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. 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”.

Se sabe que producir una cantidad de frío, en un periodo de tiempo más corto implica siempre un mayor consumo energético que producirlo en un tiempo mas largo. De lo cual se deduce que producir el frío de forma continua tal como se demanda, consumirá menos energía que si se produce a intervalos.

Esta consideración 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 normal, 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, al trazado de tuberías (velocidades mínimas, sifones para aceite), control y gestión de los evaporadores (termostato modulante, desescarche inteligente), etc. En definitiva afecta a todo el diseño de la instalación.

La parcialización de los compresores, permitirá un funcionamiento adecuado de la instalación en cualquier condición de carga térmica, con tantos saltos de capacidad como sea posible, siendo lo ideal una variación continua de la capacidad.

Los compresores de pistones, tienen posibilidades para regular varias etapas de capacidad controlando el número de pistones comprimiendo. En estos compresores el rendimiento del compresor es óptimo cuando están al 100% de capacidad.

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, pero aproximadamente por debajo del 60% de capacidad, debido a la baja eficiencia energética, no se recomienda su utilización.

Existen compresores que permiten una variación de la frecuencia para modificar el número de revoluciones del motor. Se cambia el desplazamiento volumétrico del compresor y la capacidad con un buen rendimiento energético. Esta solución es la mejor para ahorrar energía en el circuito frigorífico.

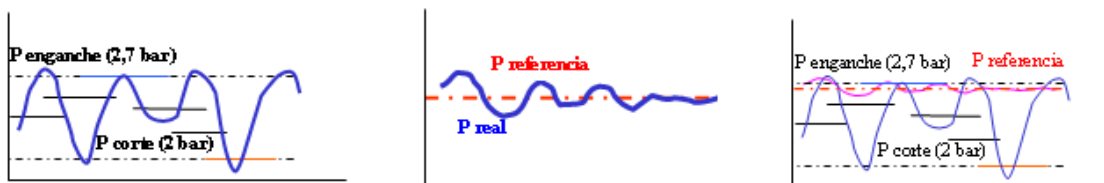
Con frecuencia existen varios compresores en paralelo (centrales) en una instalación. Estos compresores pueden ser de cualquier tipo e iguales o distintos entre sí, recomendándose que sean distintos entre sí, para un mejor acoplamiento a la capacidad demandada por la instalación.

La adecuación a la demanda requiere producir el frío con la calidad necesaria y suficiente para mantener las temperaturas de las cámaras y servicios. No se debe producir frío de calidad si no es necesario.

Conviene aquí aclarar 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°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°C no puede. Es claro que la Kilocaloría a -30°C tiene más posibilidades que la de +10°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°C. En la práctica frigorífica se debe producir el frío con la calidad mínima pero suficiente para enfriar los productos requeridos.

Esto nos indica que la temperatura de evaporación ha de ser 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 modernos algoritmos de control (PID, adaptativo, etc.). Sin embargo esto puede no ser cierto en tecnologías con compresores con relación de compresión fija como los compresores de caracola o scroll y los de tornillo.



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 limitando y encorchetando a la electrónica.

En la regulación electrónica es muy importante 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.

Otros conceptos importantes por los resultados que podrían mostrar de adecuación a la demanda son el termostato modulante, el termostato día noche, la presión de aspiración flotante = $f(T_a)$, la presión de condensación flotante, $P_c=f(T_a)$ y el desescarce inteligente.

Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor

Toda instalación frigorífica introduce como base del diseño unos datos de capacidad y potencia frigorífica máximos que normalmente sobrepasan las necesidades normales de refrigeración, máxime, cuando después de todos los cálculos de la instalación se introduce un margen de seguridad para posibles ampliaciones, imprevistos o posibles errores de cálculo.

Como la instalación frigorífica esté sobredimensionada, normalmente habrá una utilización parcial de la instalación, afectando a compresores, condensadores y evaporadores se produce intercambio de calor, bombas de circulación, et.

El condensador diseñado para una transmisión de calor 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 en condiciones de funcionamiento, 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. Sin embargo, enlazando con el concepto de presión de condensación flotante, teniendo en cuenta la fórmula que expresa el calor de transmisión $Q = U A \Delta T$, y que el consumo del compresor disminuye al disminuir la presión de condensación, se puede reducir la transmisión de calor disminuyendo el salto térmico ΔT manteniendo el área y el caudal de aire/agua constante de forma que disminuye la temperatura de condensación con un ahorro de energía.

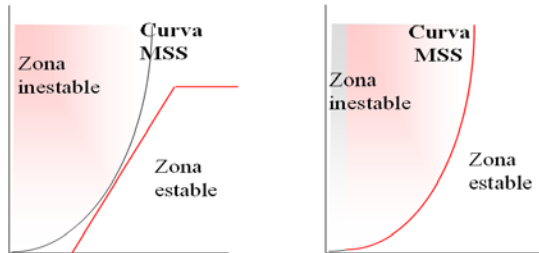
No se debe olvidar que reducir la presión de condensación de referencia, tiene un límite inferior, debido a la diferencia de presión mínima que debe mantenerse entre la zona de alta y la de baja presión para asegurar estabilidad en los compresores e inyección de líquido y además, debido a que el ahorro 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.

Dado que en el condensador la transmisión de calor, es mayor cuando hay gotas de refrigerante condensado, se puede incrementar la capacidad de condensación, introduciendo líquido a la entrada del condensador por efecto Venturi o con una bomba de refrigerante.

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.

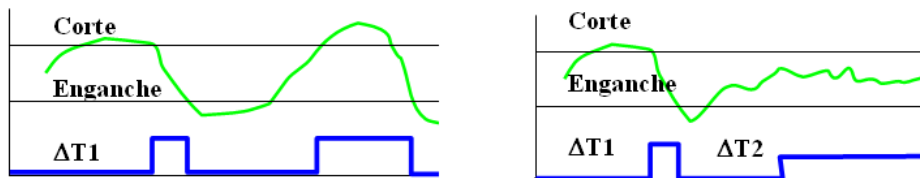
En evaporadores de expansión directa con válvula de expansión termostática, el funcionamiento al máximo rendimiento solo es posible en ciertas condiciones, las cuales solo se dan circunstancialmente durante el funcionamiento. Durante el resto del tiempo, el evaporador aunque esté funcionando, no estará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

de la Mínima Señal estable del recalentamiento (MSS) del evaporador y en consecuencia la inundación del evaporador no puede ser óptima.



El empleo de controladores electrónicos específicos que incorporan el conocimiento de la dinámica interna de los evaporadores (curva MSS) junto con válvulas de expansión electrónica, con algoritmos del control electrónico específicos que solo empresas muy especializadas tienen, permiten controlar un mayor nivel de inundación.

Analizando el funcionamiento del evaporador desde otro punto de vista, 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.



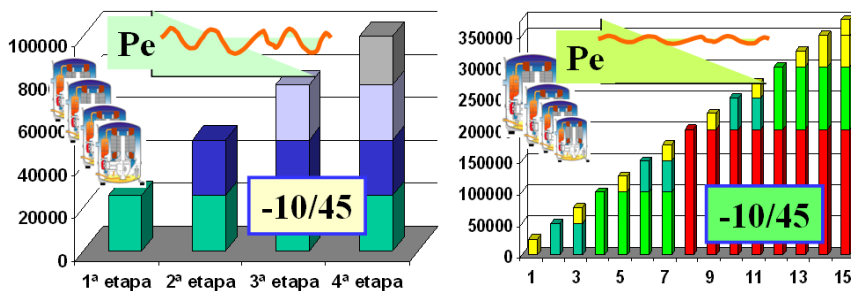
En este tipo de funcionamiento, cualquiera se podría preguntar, ¿no sería mejor trabajar con un salto térmico $\Delta T2$ menor y no parar nunca la producción de frío tal como se obtiene en la parte derecha? La respuesta desde la óptica de temperatura de los productos es afirmativa, pero sin embargo 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.

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.

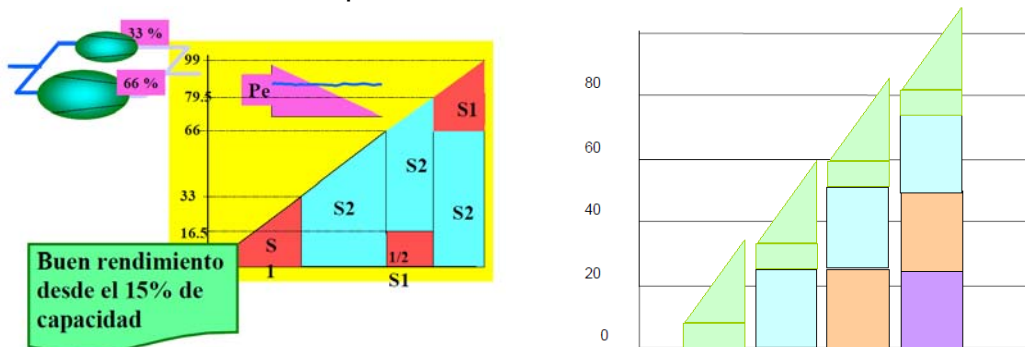
Sin embargo debido a limitaciones técnicas esto no siempre es posible. Cuando la variación de producción frigorífica es discontinua a saltos, nos encontramos con problemas a la hora de mantener las presiones de evaporación y condensación en los valores requeridos. En cualquier caso, cuanto menores sean los saltos de capacidad en la producción frigorífica, más fácil resultará su ajuste a la capacidad frigorífica demandada. Esto lleva a planteamientos diferentes a la hora del diseño.



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.

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

En instalaciones con varios compresores de tornillo también es recomendable que sean de distinto tamaño (33-66) y exista una gestión secuencial de los compresores de forma que haya un funcionamiento óptimo con solapes simultáneos de dos compresores.



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 tienen una frecuencia mínima de trabajo, hay que tener en cuenta esta limitación para que el solape de la variación de velocidad con las etapas de los demás compresores sea correcto. Para ello el compresor gobernado por el variador de velocidad deberá tener aproximadamente una potencia del 33 % superior al compresor más pequeño.

Ahorro económico

Aunque no tiene relación con el ahorro de energía, ya que es el objetivo de los propietarios se debe recordar que se puede ahorrar dinero **vigilando la planta**, pues debido al valor económico que tiene el producto almacenado en una cámara frigorífica, su constante vigilancia con un buen sistema de información a distancia, evita muchas pérdidas de productos; **evitando o limitando el consumo en horas punta** para que el precio de la energía no penalice el consumo; **acumulando frío** en instalaciones por acumulación de frío por almacenamiento de hielo, o eutécticos de baja temperatura para refrigeración así como de alta temperatura para aire acondicionado, acoplados a los periodos valle de la tarifa eléctrica y la utilización de esta reserva frigorífica en los periodos punta de la tarifa eléctrica.

Análisis por sectores

Para poder analizar adecuadamente el ahorro en circuitos de refrigeración, conviene separar las instalaciones por aplicaciones y potencia frigorífica.

Refrigeración doméstica y hostelería comercial.

Aquí se incluyen los refrigeradores domésticos, las máquinas utilizadas en hostelería, wending, máquinas de helados, tapas frías, etc. con equipos inferiores a una potencia eléctrica de 1 C.V.

Los aspectos de mejora energética afectados son dos, reducir las pérdidas energéticas hacia el exterior mejorando las propiedades físicas o el espesor de los elementos aislantes, y mejorar el rendimiento del motor del compresor mejorando los diseños mecánicos (reducción de volumen muerto, la reducción de tolerancias y las aspiraciones semi-directas), eléctricos (optimizaciones del motor para la aplicación, la utilización de condensadores eléctricos durante el funcionamiento, y la incorporación de impedancias en el equipo eléctrico) y electrónicos (variación de velocidad en el motor del compresor y algoritmos adaptativos de gestión).

Se pueden alcanzar niveles de ahorro de energía superiores al 30%.

Refrigeración comercial en tiendas de alimentación y supermercados con expansión directa

En este sector, lo más importante es cumplir las normas que dictan la buena práctica frigorífica, como colocar los productos en los distintos servicios, tal como indican los manuales sin bloquear las corrientes de aire en circulación, evitar la acumulación de hielo en las baterías, cerrar las puertas de cámaras y muebles, educar al usuario, etc.

Es muy importante que toda instalación quede perfectamente documentada con planos, esquemas, condiciones de diseño y ajustes realizados.

El sistema más interesante desde el punto de vista de ahorro energético es el sistema de refrigeración con central de compresores, donde todos los conceptos explicados en las secciones de adecuación a la demanda, máxima utilización de la superficie de intercambio y compresores al 100 son aplicables.

Los sistemas con unidades condensadoras y multi-circuitos deberían ser sustituidos por centrales

En los sistemas de refrigeración indirecta, el ahorro solo afecta al intercambio térmico que se produce en el circuito frigorífico que normalmente es una enfriadora de líquido.

La clave del ahorro en refrigeración comercial fundamentalmente está en la inyección electrónica y las presiones de evaporación y condensación flotantes. La acción combinada de estos efectos puede conseguir ahorros energéticos superiores al 40%.

Refrigeración industrial

En refrigeración industrial, las instalaciones (superiores a unos 100 C.V. ó amoniaco como refrigerante), tanto con expansión directa como los sistemas inundados, pueden aplicar todos los criterios citados para instalaciones comerciales.

Los sistemas inundados, además de que todos los conceptos anteriores son utilizables, en este tipo de instalaciones debemos de incluir otros puntos de ahorro adicionales como son, la utilización de válvulas solenoides o reguladoras de presión en líneas de aspiración sin pérdida de carga en su apertura, la utilización de un variador de velocidad en la bomba de circulación de fluido y el suministro continuo de líquido expansionado al separador.

El tratamiento de la humedad en el amoniaco debe realizarse de forma correcta, ya que en instalaciones de amoniaco la humedad es muy mala y penaliza mucho el consumo.

Presión de saturación bar	Temperatura de saturación con:				
	NH3	100%	90%	80%	70%
	H2O	0%	10%	20%	30%
0,3		NA	NA	NA	-47,15
0,4		NA	-48,82	-46,48	-42,1
0,5		-46,52	-44,93	-42,41	-38
1		-33,59	-31,71	-28,96	-24,07
2		-18,85	-16,7	-13,62	-7,71
3		-9,23	-6,69	-3,13	-2,51
4		-1,88	-0,79	4,45	10,32

En la tabla podemos ver como una cantidad de agua modifica la presión de ebullición en el amoniaco, viéndose que evaporando a 1 bar con amoniaco puro conseguimos $-33,59$ °C, pero con un 10% de humedad solo consigue –

31,71 °C, es decir se pierden casi dos grados, lo cual teniendo en cuenta la regla del 4-5% de consumo por grado perdido, supone entorno a un 10% de pérdida energética.

Aire acondicionado domestico

En el aire acondicionado doméstico, el crecimiento tan espectacular en los últimos años está convirtiendo los equipos de aire acondicionado en electrodomésticos complementarios a los utilizados de forma habitual en todos los hogares. Esto ha creado un desarrollo caótico de multitud de máquinas sencillas con una eficiencia energética deficiente. La gran competencia ha desarrollado equipos cada vez más baratos en los cuales la calidad de los componentes como los compresores ha disminuido. Los sistemas Inverter (variación de velocidad) junto a la expansión electrónica son los sistemas que permitirán ahorrar energía en el aire acondicionado.

La utilización de sistemas centralizados con evaporadores individualizados por locales junto con la parcialización de carga también ahorraría mucha energía, pero la cultura individualista mediterránea dificulta los sistemas domésticos centralizados.

Transporte

En el transporte aunque existen diferencias entre los distintos medios de locomoción como puede ser el transporte en carretera, en tren, en barco o en avión, en general tanto los conceptos de parcialización de carga con variación de velocidad, así como la inyección electrónica se pueden utilizar.

La utilización de compresores eléctricos en lugar de los abiertos con transmisión por poleas utilizados en automoción, ahorraría combustible, ya que la generación eléctrica para cargar la batería eléctrica está más optimizada que la transmisión por poleas. Esto en camiones es muy importante, ya que un camión debe tener el motor parado cuando no está en movimiento, y las pausas de espera en ellos son elevadas.

Acciones posibles para reducir las emisiones de CO₂

Dado que ya existen limitaciones en la emisión de CO₂, como resumen de todo lo anterior consideramos que por parte de los organismos públicos se deberían considerar los siguientes aspectos.

1. Coherencia legislativa, de inspección, de control y punitiva entre las distintas comunidades autónomas.
2. Elaborar un mapa centralizado de todas las instalaciones de refrigeración existentes (imitación del sistema sanitario) así como de los profesionales asociados.
3. Establecer una clasificación energética (A-B-C-D) para todo tipo de instalación de refrigeración.
4. Políticas de incentivación real de los sistemas que reducen las emisiones de CO₂.
5. Políticas punitivas de los sistemas de despilfarro energético evitando el chantaje empresarial sobre el cierre.

Como idea general debería tomarse como punto de partida inicial aquello que la práctica frigorífica considera una instalación normal tanto en servicios de

refrigeración y congelación como en aire acondicionado, y a partir de estos estados mejorar los sistemas para ahorrar energía y reducir las emisiones de CO₂.

Se debe elaborar un documento o programa en el cual se indique como son las instalaciones normales, con los parámetros susceptibles de reglamentación y mejora, el cual deberá particularizarse para cada proyecto, y debe ir incluido en el manual de mantenimiento.

Políticas de incentiviación

A continuación se indican algunos de los conceptos susceptibles de incentiviación positiva. Lógicamente, toda acción y mejora deberá estar perfectamente documentada.

Reducción de ganancias térmicas externas

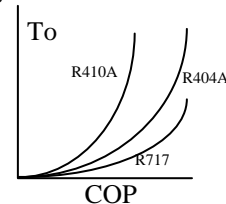
Se debe incentivar sobre la base del coeficiente global de transmisión de calor del servicio, mueble o planta.

Mejorar la eficiencia del sistema frigorífico.

Se debe incentivar en función del COP estacional y global de la planta según proyecto.

Se debe incentivar una mejora del COP de la planta con un seguimiento del mantenimiento con registro de parámetros como son las presiones de condensación y aspiración, temperatura de aspiración, las horas de funcionamiento de cada compresor y el consumo de energía de la instalación.

Se deben elaborar tablas como patrones de referencia del COP en función del refrigerante, tipo de aplicación y ubicación (temperatura de evaporación y temperatura ambiente).



Agrupación por servicios

Se debe reglamentar las agrupaciones mínimas a realizar en función de la temperatura del servicio (espacio acondicionado) como pueden ser aire acondicionado, trabajo con productos alimenticios, conservación de productos frescos, conservación de congelados, túneles de congelación, etc.

Se debe incentivar la utilización de sistemas centralizados o bien penalizar los sistemas individualizados y los multi-circuitos,

También se deben definir saltos térmicos máximos teniendo en cuenta la temperatura equivalente a la presión de aspiración y la temperatura del servicio (no producir frío de mucha calidad cuando no se necesita). Los saltos térmicos se deben definir independientemente para condensación y evaporación dependiendo del tipo de aplicación.

Aumentar la presión de aspiración y disminuir la presión de condensación

Se debe incentivar la utilización de controladores electrónicos inteligentes incluyendo el principio de presión de aspiración flotante, así como de condensación flotante.

También se debe incentivar la utilización de centrales de compresores con más escalonamientos de capacidad, con más compresores y con variación de velocidad en compresores y condensadores

Reducir la pérdida de carga en aspiración

Se debe incentivar la utilización de válvulas neumáticas con gas de alta presión o válvulas motorizadas en la línea de aspiración.

Utilización del calor del condensador

Se debe incentivar cualquier aplicación que utilice adecuadamente el calor latente de condensación para una función útil evitando tirar este calor al ambiente exterior.

Termostato modulante

Se debe incentivar la utilización del concepto de termostato modulante siempre que baya unido a un control de presión de aspiración flotante o a un servicio de mantenimiento eficaz.

Desescarche inteligente

Se debe incentivar el uso en sistemas de desescarche eléctrico.

Inyección electrónica

Se debe incentivar en evaporadores de expansión seca, y en sistemas inundados.

Variadores de velocidad

Se debe incentivar en compresores, ventiladores del condensador y del evaporador así como en las bombas en los sistemas inundados con recirculación por bomba.

Vigilancia, Mantenimiento y Optimización

Se debe incentivar la utilización de sistemas de monitorización electrónicos e informáticos que permitan la modificación de ajustes que ahorren energía, y que al evitar pérdidas de productos reducen las pérdidas energéticas asociadas al producto estropeado.

De esta forma se puede realizar una política positiva para reducir el consumo de CO₂ en los circuitos de refrigeración tanto la industria alimentaria como para el aire acondicionado.