

AHORRO EN CIRCUITOS DE REFRIGERACIÓN

Autor:

Félix Sáenz del Castillo

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, terminando en una descripción de las acciones que se podrían implementar para ahorrar energía, reducir la producción de CO₂ y con ello, disminuir el efecto invernadero en el planeta y el cambio climático.

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

Con ello pretendemos aportar un grano de arena más, en la lucha que todos los países continúan realizando desde hace años y que últimamente se ha visto corroborada con la firma del protocolo de Kioto.

Indice:

- 1 Introducción
- 2 Sectores susceptibles de ser afectados en el ahorro de energía
- 3 Personas físicas o jurídicas involucradas en el ahorro
 - 3.1 Usuarios
 - 3.2 Fabricantes
 - 3.3 Propietarios
 - 3.4 Ingenierías
 - 3.5 Instaladores y montadores
 - 3.6 Empresas-personal de mantenimiento
 - 3.7 Administraciones públicas
- 4 Conceptos importantes de cara al ahorro energético
 - 4.1 Aporte mínimo de ganancias caloríficas externas
 - 4.2 Refrigerantes y compresores
 - 4.3 Diagrama de Mollier. Estudio de circuitos clásicos.
 - 4.3.1 Sistemas frigoríficos por expansión directa.
 - 4.3.2 Sistemas frigoríficos inundados con recirculación
- 5 Análisis teóricos que permitirán un ahorro energético
 - 5.1 Funcionamiento eficiente de una instalación frigorífica
 - 5.2 Agrupación de servicios por temperatura
 - 5.3 Subenfriamiento de líquido
 - 5.4 Disminuir la presión de condensación
 - 5.5 Aumentar la presión de evaporación
 - 5.6 Comprimir el vapor en varias etapas
 - 5.7 Reducir pérdidas por transporte frigorífico
 - 5.8 Reducir la pérdida de carga en aspiración
 - 5.9 Utilización del calor del condensador
 - 5.10 Eliminar saltos térmicos innecesarios
 - 5.11 Respeto de las condiciones de diseño
- 6 Gestión y control de la instalación
 - 6.1 Adecuación a la demanda
 - 6.2 Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor
 - 6.3 Utilización de compresores a su máxima eficiencia
- 7 Ahorro económico
- 8 Análisis por sectores
 - 8.1 Refrigeración doméstica y hostelería comercial
 - 8.2 Refrigeración comercial en tiendas de alimentación y supermercados con expansión directa
 - 8.3 Refrigeración industrial
 - 8.4 Enfriadoras de agua
 - 8.5 Aire acondicionado industrial
 - 8.6 Aire acondicionado doméstico

8.7 Aires acondicionado en transporte

9. Acciones posibles para reducir el consumo de CO₂

9.1 Políticas de incentivación

9.1.1 Reducción de ganancias térmicas externas

9.1.2 Refrigerantes y compresores

9.1.3 Sistema frigorífico, Booster, Indirecto

9.1.4. Agrupación por servicios

9.1.5 Subenfriamiento de líquido

9.1.6 Disminuir la presión de condensación

9.1.7 Aumentar la presión de evaporación

9.1.8 Reducir la pérdida de carga en aspiración

9.1.9 Utilización del calor del condensador

9.1.10 Adecuación a la demanda

9.1.11 Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor

9.1.12 Utilización de compresores a su máxima eficiencia

9.1.13 Vigilancia, Mantenimiento y Optimización

1 Introducción

¿Por qué ahorrar energía?

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

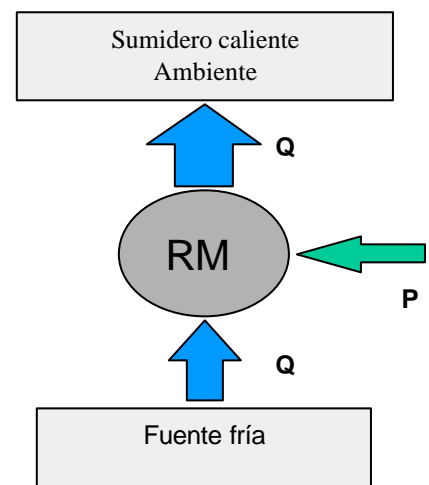
Todo esto provoca que cada día se dediquen mas esfuerzos para reducir el consumo de energía en todos los aspectos de la vida (lámparas de bajo consumo, coches con mejores rendimientos, cambios a horarios de verano, energía eólica, etc.) llegándose, incluso a potenciar de forma económica por ciertos gobiernos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

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

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

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

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



2 Sectores susceptibles de ser afectados en el ahorro de energía

Todos los sectores de la vida cotidiana que necesitan disminuir la temperatura con algún fin determinado, como puede ser la refrigeración de un ambiente (aire acondicionado) o un producto alimenticio (alimentación en el sentido más amplio de la palabra) pueden beneficiarse de alguno de los distintos conceptos de ahorro que a lo largo de estas líneas se intentarán exponer.

A continuación se detallan ligeramente los sectores en los cuales se aplica la refrigeración.

Dentro del sector del aire acondicionado, se puede diferenciar entre el aire acondicionado industrial con grandes volúmenes, el sector del transporte en todas sus versiones (coches, trenes, aviones, etc.) y el aire acondicionado de menor potencia utilizado en casas y edificios.

En el campo de la alimentación, cabe diferenciar distintos tipos de instalaciones en función de la potencia frigorífica necesitada, así existen grandes instalaciones como las utilizadas en grandes centros de almacenamiento y producción, transporte marítimo, transporte terrestre, almacenes de distribución, y también existen instalaciones más pequeñas y menos complejas como pueden ser las tiendas de alimentación de venta al público, los servicios de refrigeración en hostelería y la refrigeración doméstica.

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.

3 Personas físicas o jurídicas involucradas en el ahorro

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, por ejemplo este es el caso de la utilización del calor de condensación para obtener agua caliente sanitaria.

El ahorro afecta a todas las partes que de alguna forma intervienen en las instalaciones frigoríficas, estos son:

Usuarios. Utilizan el producto final con unas instrucciones muy sencillas

Propietarios. Deciden realizar instalaciones frigoríficas. Generan la inversión.

Fabricantes. Realizan productos en serie para distintas aplicaciones.

Ingenierías. Seleccionan y realizan un diseño inteligente de la instalación

Instaladores y montadores. Proceden a la ejecución de la obra.

Empresas-personal de mantenimiento. Deben conseguir un funcionamiento eficiente.

Administraciones públicas. Definen y hacen cumplir el marco legal.

No obstante, muchas veces, varias partes de las enumeradas pueden coincidir en la misma entidad, siendo bastante normal el caso de empresas que realizan funciones de asesoría y diseño a la vez que son las encargadas de realizar la instalación.

3.1.1 Usuarios

Hasta ahora los usuarios han utilizado los equipos producidos por los fabricantes siguiendo sus instrucciones, pero sin intervenir en la definición del equipo.

En la actualidad y según se va desarrollando la sociedad civil, creando asociaciones de consumidores o asociaciones ecologistas, estas aconsejan a los usuarios sobre productos de forma que tienen una capacidad “real” para influir en la compra del usuario.

También se dan casos en los cuales ciertas empresas llegan a acuerdos con ciertas asociaciones civiles para desarrollar productos que cumplen ciertas especificaciones, tal y como se da en Alemania y otros países centroeuropeos que utilizan hidrocarburos en refrigeración doméstica debido a presiones medioambientales lideradas por grupos ecologistas.

Existen otros tipos de usuarios como pueden ser grandes empresas que trabajan en el sector hostelero (helados, refrescos, etc.) con muchos equipos iguales repartidos en grandes áreas geográficas, donde el ahorro energético, solo se tiene en cuenta dependiendo de quien pague la factura eléctrica asociada al equipo. Sin embargo en este tipo de usuarios, ciertos aspectos medioambientales pueden ser utilizados para atraer a sectores del mercado hacia el producto o para no ser boicoteados por ciertas asociaciones civiles. En la actualidad hay empresas que están estudiando acuerdos con ciertas organizaciones ecologistas para no utilizar HFCs en los equipos de refrigeración comercial.

3.1.2 Propietarios

Es la parte que posibilita la existencia de la instalación frigorífica bien desde el punto de vista de refrigeración como del aire acondicionado. Sin ellos nada sería posible.

Los propietarios deben tener en cuenta que en cualquier sistema de refrigeración existen por un lado los costes que incluyen el valor de las inversiones realizadas en la instalación, y por otro los costes de funcionamiento de la instalación con un correcto mantenimiento y servicio.

Solamente están interesados en el ahorro económico de su instalación, y siempre que el ahorro energético implique un ahorro económico serán las personas más interesadas en conseguir ahorros energéticos en la instalación frigorífica, pero para ello necesitan una gran confianza en las personas que les asesoran y en las empresas involucradas en las acciones a tomar para conseguir nuevos ahorros.

También se debe considerar el hecho de inversiones con mayor eficiencia económica, ya que muchas veces desde la óptica empresarial, para realizar una inversión determinada es más interesante crear dos plantas con una baja eficiencia que una sola más eficiente energéticamente aunque se amortice en poco tiempo. En cualquier caso es quien debe asumir las inversiones necesarias para conseguir los niveles de ahorro deseados.

3.1.3 Fabricantes

Es una parte muy importante en la cadena de las instalaciones frigoríficas. Normalmente fabrican grandes series de productos como pueden ser neveras, equipos de aire acondicionado, maquinaria para hostelería, enfriadoras de agua, etc.

Ellos definen las características del producto, y en general están interesados en conseguir máquinas eficientes y con una vida útil larga. Sin embargo como esto suele ir en contradicción con el precio, no siempre se consigue, siendo el usuario o la administración, los únicos que en estos casos pueden romper la tendencia para fabricar equipos energéticamente más eficientes.

Los fabricantes están especializados en distintas aplicaciones, encontrando fabricantes de frío domestico (gama blanca), hostelería, aire acondicionado, etc.

Los productos realizados por fabricantes suelen ser equipos bien terminados en los cuales con una instrucciones muy sencillas, conteniendo consejos para ahorrar energía se puede manejar el equipo sin ninguna dificultad.

Debido a la legislación existente, muchos productos realizados por los fabricantes, como por ejemplo la gama blanca de refrigeradores domésticos, están sujetos una clasificación de eficiencia energética, de forma que la comparación entre productos similares es más fácil. Sería conveniente la extensión de estas clasificaciones a todos productos de refrigeración.

3.1.4 Ingenierías

Aunque la problemática planteada en el aire acondicionado y la refrigeración son distintas, el planteamiento general y global incluye a ambas y se debe considerar que de

cara a una buena concepción de la instalación frigorífica, las ingenierías deberían tener en cuenta ciertos criterios básicos entre los que se encuentran:

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Aporte mínimo de las ganancias caloríficas exteriores <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Materiales empleados en la construcción 1.2. Color en las paredes y techos 1.3. Situación 1.4. Orientación (norte) 1.5. Cerramientos y falsos techos 2. Reducción de pérdidas por transporte frigorífico <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Situación de la sala de máquinas 2.2. Agrupaciones de cámaras y servicios. 2.3. Agrupaciones por temperaturas de servicios 3. Utilización del calor residual de condensadores para fines positivos <ol style="list-style-type: none"> 3.1. Recuperación de calor <ul style="list-style-type: none"> Agua caliente sanitaria Calefacción de suelos 3.2. Desescarche por gas caliente 4. Selección y diseño de la instalación para ahorrar energía <ol style="list-style-type: none"> 4.1. Sistema de refrigeración | <ul style="list-style-type: none"> Refrigerante utilizado Refrigeración directa <ul style="list-style-type: none"> Evaporadores expansión Evaporadores inundados Refrigeración indirecta <ul style="list-style-type: none"> Agua / Glicoles / Flow ice 4.2. Compresores para el circuito frigorífico <ul style="list-style-type: none"> Circuitos independientes Multi-circuitos Centrales de compresores Centrales booster 4.3. Economizadores 4.4. Evaporadores 4.5. Intercambiadores de placas 4.6. Sistema de condensación <ul style="list-style-type: none"> Aire Agua mas torre Evaporativo 4.7. Gestión y control <ul style="list-style-type: none"> Control de los compresores Control de condensación Control de evaporadores Inyección Temperatura Desescarche |
|--|--|

Aunque estas relaciones parecen largas, bien de forma explícita o implícita siempre se tienen en cuenta dichos conceptos. En este es punto donde se establecen los criterios para que la instalación funcione con unos buenos índices de consumo energético.

Al igual que sin los propietarios o inversores, nada sería posible, si esta fase del proceso de definición de la instalación fuese deficiente, después, el funcionamiento también lo sería.

3.1.5 Instaladores y montadores

La ejecución de la instalación frigorífica o de aire acondicionado se realiza por medio de empresas especializadas en este tipo de plantas. La ejecución correcta de la instalación es de vital importancia para que se puedan cumplir las condiciones indicadas en el diseño.

Al igual que los materiales empleados en la construcción, como los materiales de obra civil, aislamientos de distintas calidades y espesores, las tuberías y elementos de gestión y control, también adquieren una gran importancia la profesionalidad de los instaladores y montadores que realizan la planta.

3.1.6 Empresas o personal de mantenimiento

Al igual que con todos los elementos mecánicos de cualquier instalación, en la industria de la refrigeración y del aire acondicionado, también es necesario un mantenimiento preventivo. Este debe cubrir las partes claves de la instalación como pueden ser los compresores, los evaporadores, los condensadores, las bombas, los ventiladores, los agitadores, conductos, compuertas de aire, economizadores, así como los distintos elementos de gestión y control.

Para que la instalación funcione correctamente, es necesario que haya sido ejecutada partiendo de un buen diseño, así como de una correcta ejecución de la instalación. Sin embargo si esta instalación bien concebida y ejecutada no se cuida, dejará de funcionar correctamente al cabo de un tiempo, por ello un buen mantenimiento siempre es necesario.

Además, toda instalación frigorífica o de aire acondicionado, se diseña para unas capacidades que suelen superar las demandas normales de la instalación, lo cual, a posteriori implica un ajuste de la instalación a las condiciones actuales de carga. Dicha demanda es variable a lo largo del tiempo, por lo cual se requieren ciertos ajustes temporales que cambien según la situación. Muchos de estos cambios se pueden hacer de forma automática a través de controladores adaptativos, pero no es lo normal, recayendo esta función en las personas que realizan el mantenimiento de la instalación.

Llegados a este punto incluso se puede hablar de optimización de la instalación para que el gasto económico sea mínimo (recordar que gasto económico no es lo mismo que gasto energético). Para poder realizar esta optimización, se requiere la utilización de las tecnologías que nos ofrece el mercado como la electrónica y la informática, las cuales combinadas con los conocimientos de especialistas en refrigeración y aire acondicionado pueden hacer que el gasto económico y energético se reduzca de forma considerable.

En cualquier caso para tener un buen mantenimiento, se recomienda:

1. Implantar sistemas de vigilancia informatizados
2. Duplicar elementos críticos. Cuando en alguna instalación existe un elemento crítico, con riesgo de falta de disponibilidad inmediata en el mercado, es recomendable una duplicidad de dicho elemento, o un diseño en paralelo que permita un funcionamiento de emergencia o manual de la instalación.
3. **Llevar al día el libro de mantenimiento y de revisiones de la instalación.**
Estarán incluidas las anotaciones referentes a todos los valores importantes de la instalación. La empresa que realiza la instalación debe definir los parámetros importantes a vigilar y cuidar durante el mantenimiento.

En la actualidad y debido al precio cada vez más bajo, se están imponiendo los sistemas de gestión centralizada por ordenador local o remoto vía módem, que vigilan la instalación con una gran profusión de detalles facilitando el mantenimiento de la planta.

En cualquier caso, siempre habrá que remarcar la importancia del mantenimiento de la planta para que los ajustes de la instalación sean los adecuados.

3.1.7 Administraciones públicas

Las administraciones públicas definen el marco legal en cuanto a creación de normas en las cuales se mueven todas las instalaciones frigoríficas tanto para refrigeración como para aire acondicionado, y posteriormente en cuanto al cumplimiento de dichas normas.

En la actualidad apenas hay nada legislado con relación al ahorro energético, pero debido a las normas europeas que se desarrollaran basándose en el protocolo de Kioto firmado por todos los países miembro antes o después aparecerán y deberán tenerse en cuenta.

La industria espera que se introduzcan conceptos que incentiven el ahorro energético tanto desde la óptica de fomentar nuevas técnicas y tecnologías que aprovechen mejor la energía, como desde la óptica de la penalización cuando se despilfarre energía de forma innecesaria.

4 Conceptos importantes de cara al ahorro energético

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

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

4.1.1 Aporte mínimo de las ganancias caloríficas exteriores

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

Materiales empleados en la construcción

Los materiales utilizados deben tener una baja conductividad térmica.

En el desarrollo de nuevos materiales debemos citar como característica importante la estabilidad de la conductividad térmica a lo largo del tiempo, ya que si bien ciertos materiales presentan unas propiedades muy buenas cuando se fabrican, luego sometidas al envejecimiento causado por ambientes húmedos y agresivos pierden dichas características incrementando los costes energéticos durante el funcionamiento diario.

Color en las paredes y techos

Las paredes deben tener colores claros para evitar la acumulación de calor en la masa del aislante, de esta forma el aire contenido en el recinto será quien transporte el frío al producto.

Situación y orientación (norte)

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, son factores que pueden reducir considerablemente las necesidades frigoríficas y por tanto energéticas. Así mismo la creación de ambientes frescos reducirá las necesidades de aire acondicionado.

Cerramientos y falsos techos

La localización de las cámaras de conservación en el interior de otros locales hace que las pérdidas de frío vayan al ambiente exterior pasando por el local. Esto puede permitir minimizar las pérdidas energéticas si el ambiente próximo a las cámaras está correctamente tratado y evita tanto estancamientos de aire que pueden producir acumulación de calor por efecto invernadero como corrientes de aire a velocidades altas que incrementan las pérdidas por convección. Una circulación suave del aire alrededor de las cámaras permite una temperatura baja de la superficie de las cámaras con lo cual las pérdidas energéticas se reducen.

4.2 Refrigerantes y compresores

Refrigerantes

Los refrigerantes alternativos HCFCs a los utilizados hasta la década pasada CFCs tienen un menor ODP, pero solo se consideran como una solución interina. Además en la actualidad incluso los refrigerantes HFCs se ponen en duda en ciertos países ya que tienen un GWP relativamente alto. Por otro lado ciertos refrigerantes naturales sin ODP

y ligero GWP pueden tener otros inconvenientes como toxicidad o inflamabilidad. Esto hace que la elección del refrigerante utilizado sea relativamente compleja implicando compromisos entre ventajas e inconvenientes.

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

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

Compresores

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

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

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

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

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 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.

Tabla con recomendaciones para compresores con varios refrigerantes en distintas aplicaciones

	Aplicación								
	Baja temperatura			Media temperatura			Aire acondicionado		
Fluido	<1 CV	≤10CV	>10CV	<2CV	≤20CV	>20CV	<3CV	≤30CV	>30CV
R22, 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

4.3 Diagrama de Molier:

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

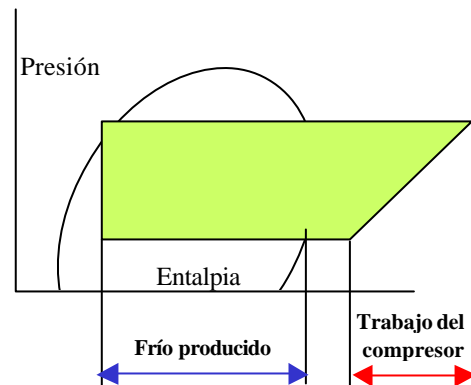
Este diagrama representa la entalpía del fluido refrigerante (el calor asociado) a distintas presiones tanto en fase líquida como en fase gaseosa.

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

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

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

Para aumentar el frío producido, se debe disminuir la 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.



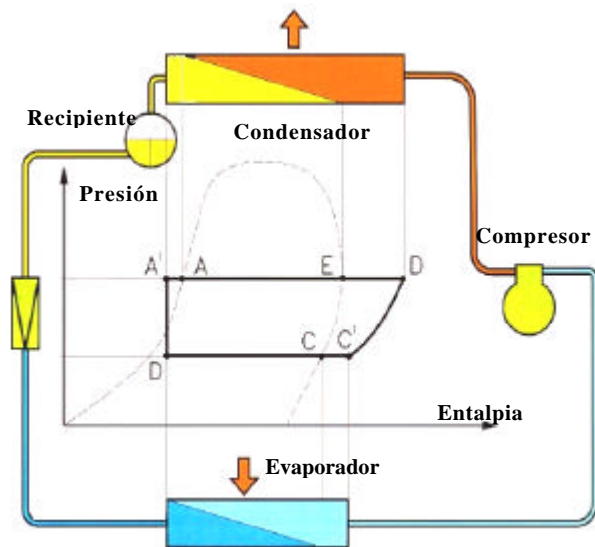
4.3.1 Sistema frigorífico de expansión directa.

En la figura esta representado un circuito frigorífico junto con el diagrama de Molier. Para visualizar adecuadamente todo el proceso de refrigeración y todo el circuito

frigorífico, nos moveremos junto con el refrigerante a lo largo del circuito frigorífico y a la vez veremos en que punto del diagrama de Mollier nos encontramos.

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

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



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

El refrigerante se condensa a presión constante.

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

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

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

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

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

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

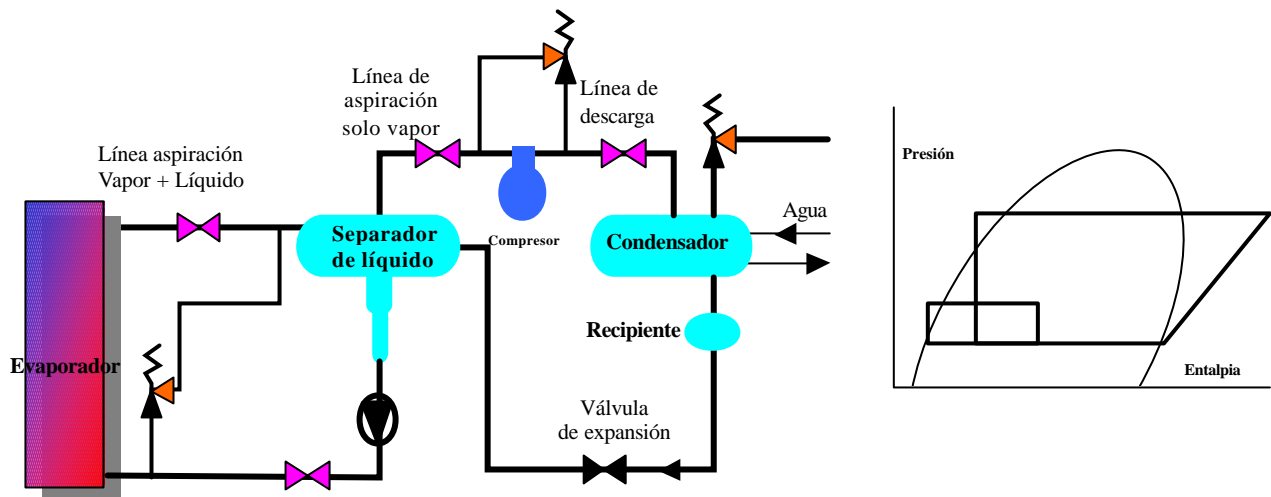
El vapor cuando llega al compresor, entra en una cámara grande y por una serie de conductos es aspirado por un pistón, comprimido, calentado y expulsado del compresor donde sale a la línea de descarga llegando al punto de partida inicial.

Este es el circuito más sencillo, y quizás cubre mas del 90% de las instalaciones de refrigeración y aire acondicionado, por lo cual un buen conocimiento de este circuito es muy importante.

4.3.2 Sistema de refrigeración inundado con recirculación.

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

5 Análisis teóricos que permiten un ahorro energético.

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

5.1 Funcionamiento eficiente de una instalación frigorífica

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

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

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

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

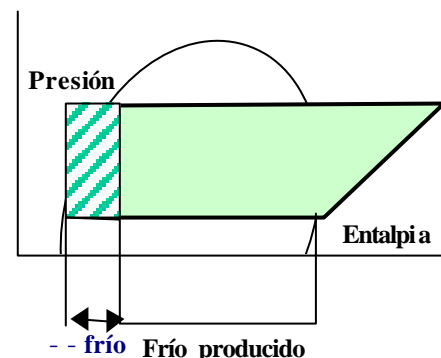
5.2 Agrupaciones de cámaras y servicios.

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

Sin embargo cuando la temperatura de los servicios difiere de forma considerable es necesario realizar agrupaciones de servicios por temperaturas de conservación. Por ejemplo los servicios que necesitan temperaturas entre -20 y -25°C estarán agrupados en una central de compresores, los de temperaturas entre $+2$ y -8°C estarán agrupados formando otro grupo diferente con su aspiración separada, y los que están entre 0 y $+8^{\circ}\text{C}$ también estarán agrupados entre sí. 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 (leer lo indicado sobre frío caro de calidad en la sección de adecuación a la demanda). Normalmente existen agrupaciones para temperaturas de conservación negativas y para positivas, aunque desde el punto de vista energético sería conveniente diferenciar al menos en tres grupos, alta, media y baja temperatura, y si en algún caso se necesitan temperaturas muy bajas (túneles de congelación) se debería hacer otro grupo más.

5.3 Subenfriamiento de líquido

Fijándonos en el diagrama de Mollier, si el punto de salida del fluido en el sistema de expansión se desplaza hacia la izquierda, tendremos que la capacidad para robar calor del líquido aumenta, mientras el consumo realizado por el compresor no es consciente de esta



Compresión del vapor en dos etapas

de los consumos parciales W_2 más W_3 es menor que W_1 . También se utiliza este proceso cuando la temperatura de descarga del compresor al seguir la línea politrópica, es tan alta que puede modificar las propiedades del aceite de lubricación con riesgo de producir daños en el compresor.

5.7 Reducir las pérdidas por transporte frigorífico

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

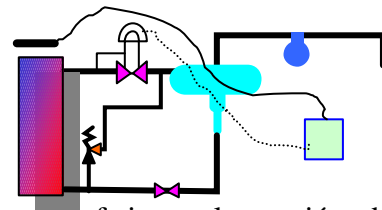
Debe comentarse que en la actualidad este concepto parece ignorarse y falsamente eliminado en las instalaciones de refrigeración secundaria con glicoles o flow-ice, ya que aunque el frío se produce en una enfriadora compacta, el transporte se realiza bombeando el fluido secundario (glicol, flow-ice) y lógicamente el consumo será mayor cuando las distancias sean mayores.

5.8 Reducir pérdidas de carga en aspiración

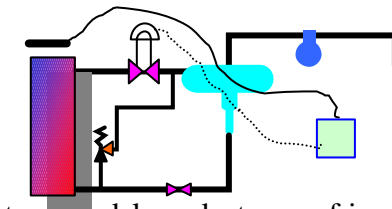
La consecuencia inmediata será aumentar la presión de aspiración, y dada la importancia de este punto lo estudiaremos con algo mas de detalle.

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.

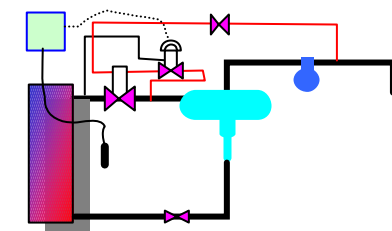
En primer lugar, las válvulas mas utilizadas suelen ser servo-accionadas, lo cual significa que debe existir una pérdida de presión en la válvula para que pueda estar abierta por lo cual es necesario que exista una caída de presión debida al propio funcionamiento. Esta caída de presión hace que la presión de aspiración sea ligeramente inferior a la presión de evaporación. Esto penaliza el consumo en el compresor y en los sistemas con bomba también penaliza el consumo de la bomba. Sin embargo desde el punto de vista de calidad del producto, hay que indicar que la regulación de la temperatura de evaporación o del producto es muy buena.



En segundo lugar, las válvulas motorizadas, en principio podrían resolver el problema indicado de la pérdida de carga, pero sin embargo debido a la respuesta relativamente lenta de la válvula, las variaciones de presión en la aspiración se transmitan rápidamente al evaporador sin actuar sobre la válvula y eliminando la protección del producto a enfriar. La regulación de la temperatura de evaporación o del producto no es tan buena como en las anteriores, mas no penaliza el consumo.



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



regulación de la temperatura de evaporación o del producto muy buena. En todo momento se debe evitar la condensación de líquido en la tubería piloto de gas caliente que abre la válvula de aspiración. Al igual que en el primer caso, ahora se tiene un control combinado con la temperatura y la presión, pero sin embargo la acción de apertura la realiza el gas de descarga y no el gas del evaporador.

5.9 Utilizar el calor del condensador

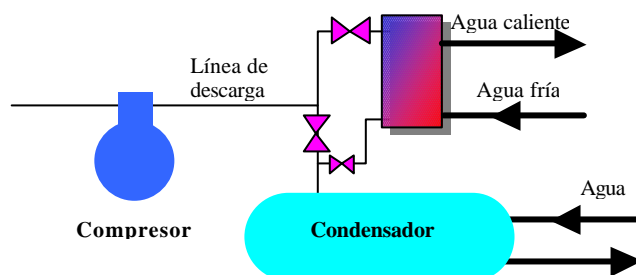
Tiene por objeto aprovechar de forma útil el calor transportado de los distintos servicios al condensador de forma que se pueda obtener agua caliente sanitaria, calentar el suelo de la nave para evitar la congelación, fundir el hielo acumulado en otros evaporadores, o ayudar a calentar el agua de calefacción. En definitiva utilizar una energía térmica para realizar una función útil en algún otro punto de la instalación.

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), bien a un depósito con agua fría que se calienta para cualquier fin, o bien a un evaporador donde se va a realizar el desescarche. Posteriormente el líquido condensado retorna al condensador, recipiente o línea de líquido.

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

Recuperación de calor para agua caliente sanitaria o calefacción.

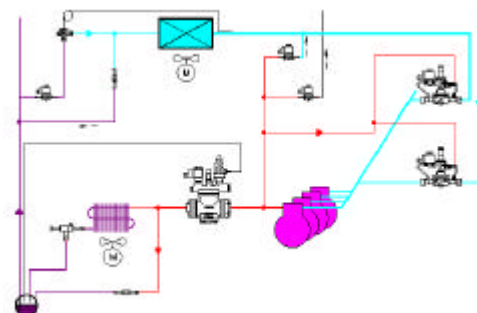
En muchas instalaciones, existe la necesidad de tener agua caliente sanitaria bien porque forma parte de los procesos de limpieza durante la fase de producción o almacenamiento, o bien para la higiene personal de las personas involucradas en la planta.



En plantas de refrigeración, donde hay oficinas, estas se pueden calefactar en invierno por medio de agua caliente precalentada en el condensador. En este caso y dado que el salto térmico del agua es menor, los radiadores deben tener mas superficie que cuando se utiliza una caldera.

Desescarche por gas caliente

La operación del desescarche es un proceso parásito de los circuitos frigoríficos con temperatura de evaporación inferior a 0°C. Debido a la humedad contenida en el aire y debido a la condensación de esta humedad en

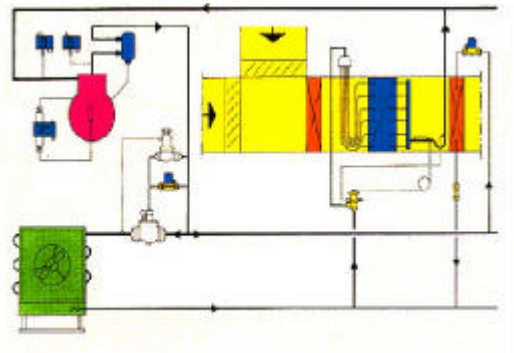


el evaporador y a su posterior congelación cuando la temperatura interior del evaporador está por debajo de los 0°C , se produce en el evaporador una acumulación de hielo. Periódicamente para evitar los problemas de transmisión y bloqueo que el hielo produce en el evaporador, este hielo se debe eliminar. Para eliminar el hielo, hay que calentar el evaporador hasta una temperatura positiva entre 4 y 8°C , para estar seguros que el hielo se ha fundido completamente. En muchas ocasiones este calor lo suministran resistencias eléctricas colocadas a tal efecto en el evaporador, en otras se utiliza agua a unos 20°C , u otra fuente de calor.

Dado que el condensador es una fuente de calor, se puede utilizar el gas caliente de la descarga del compresor para fundir el hielo que hay en el evaporador. Tal como muestra la figura con un esquema de desescarche por gas caliente, la instalación frigorífica requiere ciertos elementos de control adicionales y debe cumplir ciertos requisitos para que el sistema funcione correctamente, pero cuando se cumplen, se puede ahorrar todo el consumo de energía eléctrica que consumirían las resistencias eléctricas.

Procesos especiales

Existen procesos especiales de conservación de alimentos o climatización del aire, en los cuales se requiere deshumidificar inicialmente el aire, por lo que inicialmente se debe enfriar para extraer su humedad, y después aumentar su temperatura para reducir su humedad relativa y utilizarlo para absorber humedad del producto. Este es el caso de la figura tal como ocurre en los procesos de deshumidificación en aire acondicionado y en los procesos de secado de alimentos como los jamones.



5.10 Eliminar saltos térmicos innecesarios

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

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

Este tipo de instalaciones puede realizarse por cuestiones sanitarias donde se debe impedir la posible mezcla de refrigerante con alimentos o el aire ambiente, o también puede ser para simplificar la instalación y mantenimiento del sistema, ya con refrigeración indirecta incluso los calefactores pueden realizar las operaciones de instalación y mantenimiento.

Como norma se puede afirmar que toda instalación con refrigeración indirecta consume mas energía que la misma instalación con intercambio directo, con lo cual todo lo que

sea potenciar y permitir el desarrollo de sistemas de refrigeración con fluidos secundarios va en contra del ahorro energético y en consecuencia fomentan el efecto invernadero causado por el CO₂.

5.11 Respetar las condiciones de diseño

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

Ejemplo 1: Cuando en el diagrama de Mollier el punto que representa al líquido que entra en el sistema de expansión contiene alguna burbuja de vapor (bien por falta de gas, condensación insuficiente, aporte externo de calor en línea de líquido, desescarche incorrecto por gas caliente o pérdida de carga en tuberías) la eficiencia de la instalación cae a valores muy bajos. Por ejemplo muchos profesionales conocen que al realizar un desescarche por gas caliente en un servicio y retornar el líquido condensado a la línea de líquido, otros servicios que están refrigerando no funcionan correctamente.

Ejemplo 2: Cuando el punto que representa la salida de vapor del evaporador y entrada al compresor, tenemos retornos de líquido, independiente de los posibles daños al compresor, tenemos que el líquido se evapora en el cárter del compresor con lo cual no es frío útil provocando también una gran pérdida en la eficiencia de la planta.

Ejemplo 3: Cuando los ajustes de la presión de aspiración y de la presión de condensación se desvían de las condiciones óptimas, provocaran un aumento de consumo y una caída en la eficiencia.

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.

Ajustes adecuados a las características de la planta

Todo circuito de refrigeración, se diseña para conseguir enfriar un producto (aire, alimento) en las condiciones ambientales más desfavorables. Sin embargo estas condiciones solo se dan cierto número de días al año, lo normal es tener unas condiciones más suaves para las cuales se ajusta la instalación de forma que la eficiencia sea óptima en dichas condiciones. Este ajuste debe realizarse inicialmente por el instalador que ejecuta la obra, y en muchos casos con posterioridad el mantenedor afina el ajuste. Todos estos ajustes deben quedar registrados bien en el libro de mantenimiento, bien en las hojas de ajustes de los equipos, o mejor, en ambos lugares.

Sin embargo suele ser muy normal descuidar ciertos aspectos por parte de los mantenedores. A modo de ejemplo se puede citar que suelen disminuir la temperatura de evaporación de los circuitos de refrigeración produciendo un frío de más calidad del necesario penalizando el consumo de energía. **El cambio de esta costumbre ahorraría mucha energía.**

Eliminación de los contaminantes de los sistemas frigoríficos

Los contaminantes de un circuito frigorífico pueden tener distintas naturalezas y distintos orígenes. Entre los más normales podemos comentar los gases incondensables, la humedad, las partículas sólidas, las ceras, los ácidos producidos en el interior. Las consecuencias de unos contaminantes u otros si bien todos afectarán al correcto funcionamiento de la instalación van a ser distintas afectando tanto a la vida de los distintos componentes de la instalación como a la eficiencia de la misma.

Efecto de los gases incondensables.

Los incondensables en el interior de un circuito frigorífico suelen proceder de la entrada de aire exterior por alguna fuga del refrigerante o por operaciones de carga incorrectas. Tiende a acumularse en el lado de descarga provocando un aumento de la presión de condensación, lo cual se traduce en un mayor consumo del compresor. Se detecta midiendo con un manómetro y un termómetro en una zona con líquido y vapor en el condensador. Si la presión de condensación es mayor que la que corresponde a la temperatura de saturación, es debido a la existencia de incondensables. Se deben de purgar.

Efectos de la humedad

La humedad puede actuar de distintas formas según el tipo de refrigerante utilizado y la aplicación.

Por formación de hielo puede provocar bloqueos en los puntos del sistema con temperaturas inferiores a 0°C donde hay orificios pequeños como puede ser en filtros de aspiración, sistemas de expansión (capilares), reguladoras servoaccionadas, etc. afectando a la eficiencia de la instalación.

Por variación en la presión de evaporación, provoca un descenso en la presión de evaporación para conseguir la temperatura deseada (efecto similar a los incondensables en el condensador) reduciendo enormemente la eficiencia de la instalación. Esta situación se da de forma especial en instalaciones inundadas o de expansión directa con amoníaco (véase tabla de influencia en el análisis para refrigeración industrial).

Otros efectos de la humedad van a ser las reacciones químicas y electroquímicas que puede provocar entre componentes del circuito. No afectan a la eficiencia, pero pueden acortar la vida del compresor. Pueden provocar el cobreado del compresor (disolución electroquímica del cobre de las tuberías y deposición en las paredes y piezas de hierro del compresor), y la formación de ácidos por reacción con los aceites y con el refrigerante, lo cual realimenta el problema anterior.

Las partículas sólidas y ceras incrementan la pérdida de carga en filtros y pueden llegar a obstruir orificios en ciertos componentes por lo cual perjudican la eficiencia y el correcto funcionamiento de la planta.

6 Gestión y control de la instalación

6.1 Adecuación a la demanda

En toda instalación frigorífica existe un cambio continuo de la demanda de refrigeración, lo cual indica que la producción frigorífica debe ser variable para satisfacer la demanda. En la realidad nos encontramos con el hecho de tener instalaciones diseñadas para una capacidad máxima determinada y luego en la 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.

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, al trazado de tuberías (velocidades mínimas, sifones para aceite), control y gestión de los evaporadores (termostato modulante, desescarche inteligente), etc. En definitiva y sin ningún tipo de dudas puede afirmarse que afecta a todo el diseño de la instalación.

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 (véase la sección sobre utilización de compresores en su máxima eficiencia).

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.

Existen ciertos compresores de tornillo, cuyo motor eléctrico tiene dos velocidades, y otros en los cuales el motor eléctrico y las partes mecánicas permiten una variación de la frecuencia para modificar el número de revoluciones del motor. En ambos casos cambia el desplazamiento volumétrico del compresor y la capacidad con un buen rendimiento energético. También existen compresores de caracola (scroll) verticales y

horizontales que permiten la utilización de variadores de frecuencia adecuando en cada momento las demanda de la instalación a la oferta del compresor. Estas soluciones son muy buenas para el circuito frigorífico.

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

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

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

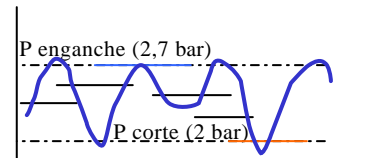
La adecuación a la demanda también requiere producir el frío con la calidad suficiente para mantener las temperaturas de las cámaras determinadas, pero conviene remarcar que si bien el frío producido puede tener mucha calidad (temperatura muy baja), cuando esta no se requiere, no se debe producir, ya 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 sencilla consideración 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 algoritmos de control con funciones PID.

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

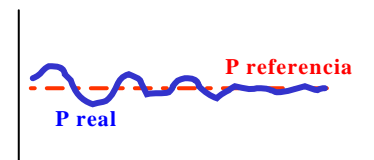
En la regulación con zona muerta, la banda de regulación puede ser mas estrecha, ya que la banda de regulación mínima coincide con el diferencial del presostato de zona muerta utilizado. La zona de regulación puede oscilar entre 0,2 y 1 bar. En la zona muerta los compresores ni arrancan ni paran, y solo cuando la presión se sale de los valores ajustados se conectarán o desconectarán los compresores según unas temporizaciones externas.



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

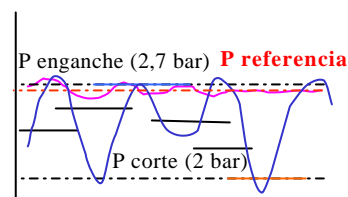


Regulación PID

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.**

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

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



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

Otros conceptos importantes y en ciertos casos revolucionarios por los resultados que podrían mostrar de adecuación a la demanda son los que se citan a continuación:

Termostato modulante

Termostato día noche

Presión de aspiración flotante = $f(T_a)$

Presión de condensación flotante, $P_c=f(T_a)$
Desescarche inteligente.

Termostato modulante

Afecta al control de los evaporadores colocados en cámaras o muebles. El termostato modulante es un concepto nuevo en refrigeración, siendo una función de control introducida en los reguladores electrónicos que gobiernan las válvulas de expansión, la cual tiene como objeto producir el frío justo al ritmo que se necesita. Esto obliga a la utilización parcial del evaporador, por lo que son necesario válvulas de expansión electrónicas y reguladores con complejos algoritmos de control para la inyección. El resultado obtenido con este tipo de control que requiere el funcionamiento de al menos un compresor de forma continua, es la obtención de temperaturas en cámaras con una gran precisión (incluso $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) con una humedad relativa alta y constante. Cuando la temperatura del recinto esté en los valores de régimen, esta función permitirá evaporar a una temperatura ligeramente superior con el consiguiente ahorro de energía.

Termostato día noche

Esta función consiste en permutar a un valor de temperatura distinto durante la noche para ahorrar con alguna de las dos siguientes formas:

Aumentar la temperatura sin que afecte al producto para reducir las pérdidas de frío durante la noche en los distintos servicios (ahorro energético)

Bajar la temperatura para acumular frío en el producto ya que por la noche el precio de la energía es más bajo (ahorro económico)

Presión de aspiración flotante

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

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

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

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

Presión de condensación flotante

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

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

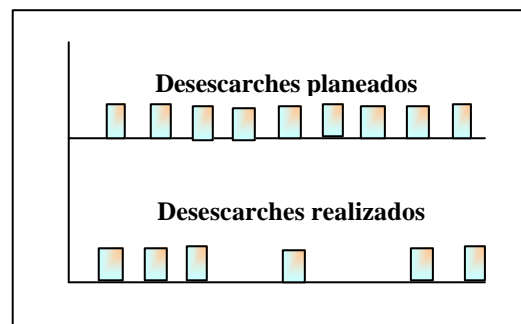
Entre paréntesis vemos que se puede conseguir el mismo efecto bajando la presión de condensación 5°C, como aumentando la temperatura de evaporación 3°C. En consecuencia todo lo que permita tener presiones de evaporación más altas y de condensación más bajas como es la regulación con referencias flotantes beneficiarán y reducirán el consumo de energía.

Adecuación al proceso de la planta

La adecuación al sistema de producción y de refrigeración por medio de programas semanales con presiones de evaporación distintas en función de las distintas demandas frigoríficas a cada hora del día, permitirá un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles en la instalación.

Desescarche inteligente

La eliminación del hielo en los evaporadores se realiza de forma periódica por medio de relojes y termostatos, sin embargo en ciertas ocasiones no hay acumulación excesiva de hielo, por lo cual no es necesario el desescarche. Con la utilización de programas de desescarche inteligentes que determinan cuando un desescarche no es necesario, solo se realizarán los desescarches imprescindibles, de forma que se adecuan a la demanda de la instalación ahorrando energía y mejorando a la vez la temperatura del servicio. El ahorro real es el consumo de electricidad no consumido por las resistencias de desescarche.



6.2 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.

Esto hace que en la práctica la instalación frigorífica esté sobredimensionada. Esto durante el funcionamiento normal, se traduce en una utilización parcial de la instalación.

Dicha utilización parcial de la instalación suele afectar a todos los elementos importantes del circuito frigorífico como son compresores, condensadores, evaporadores y en algún caso bombas de circulación. De estos elementos, aquellos en los cuales se produce intercambio de calor a través de una superficie son los condensadores y los evaporadores.

Condensadores

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

La forma normal de control del condensador ha sido y sigue siendo tratar de mantener la presión de condensación constante bien reduciendo el área de intercambio térmico en el evaporador, o bien reduciendo el caudal de aire (siempre son interesantes los ventiladores de dos velocidades o con variador de velocidad) o de agua en circulación para refrigerar el gas de condensación.

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

El argumento de mantener la presión de condensación constante para mantener una inyección constante tiene sentido cuando las oscilaciones en la P_c son muy grandes, pero no cuando la oscilación es del orden de dos bar, ya que en este caso la variación de la capacidad en la válvula de expansión no es crítica.

Sin embargo, enlazando con el concepto de presión de condensación flotante y teniendo en cuenta la formula 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 constante de forma que disminuye la temperatura en el interior del condensador y en consecuencia la presión de condensación. Esto tiene una traducción como ahorro de energía en el funcionamiento del compresor.

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

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

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

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

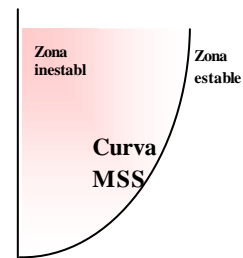
Evaporadores

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 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 no tener el evaporador vacío.



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.

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.

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.

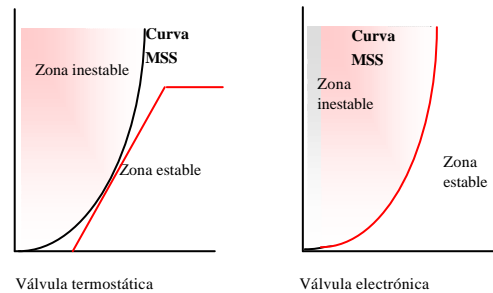
El empleo de estos nuevos productos junto con el conocimiento de la dinámica interna de los evaporadores (curva MSS) permiten el control de los evaporadores con un mayor nivel de inundación.

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.

Esta es la idea desarrollada por algún fabricante en sus reguladores electrónicos, en los cuales el propio regulador con los algoritmos de control introducidos en él, es quien basado en un análisis de estabilidad, determina el recalentamiento que debe tener el evaporador en cada instante, y 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.

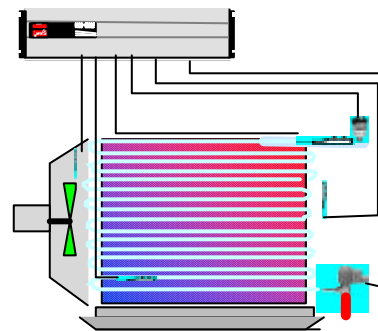
Aunque la idea es sencilla y normalmente hay muchos sistemas de control utilizando estos conceptos, el problema que se plantea en la inyección, es que las ecuaciones y sistemas que gobiernan la evaporación y la transmisión de calor no son lineales y no pueden utilizar los mismos algoritmos de control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

En la figura puede verse las diferencias en el acoplamiento de una válvula termostática y una electrónica con el evaporador. Al ajustarse con la electrónica por medio de una curva, permite una mayor inundación aprovechando toda la superficie del evaporador.



Recalentamiento en evaporadores

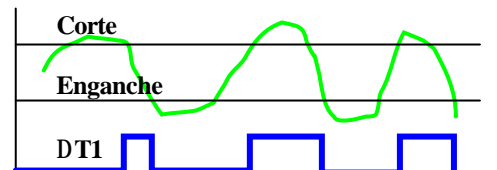
Los sistemas de expansión electrónica están formados por un conjunto de sensores de presión y/o temperatura, un controlador electrónico que analiza la información que recibe de los sensores procesándola y estableciendo las ordenes que transmite a una válvula que regula el flujo de líquido al evaporador.



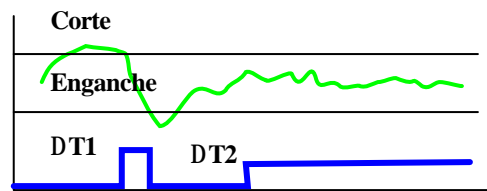
La señal de presión se mide con un transmisor de presión o de temperatura, y las de temperatura con una sonda de temperatura. Estas señales se envían al regulador, el cual las analiza e integra en su sistema de control, dando las ordenes correspondientes al elemento actuador en la válvula de expansión.

Podemos concluir 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 consigue una inyección óptima en cualquier condición de carga. La tecnología para este tipo de control es compleja, y requiere un know-how específico que solo empresas muy especializadas tienen.

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



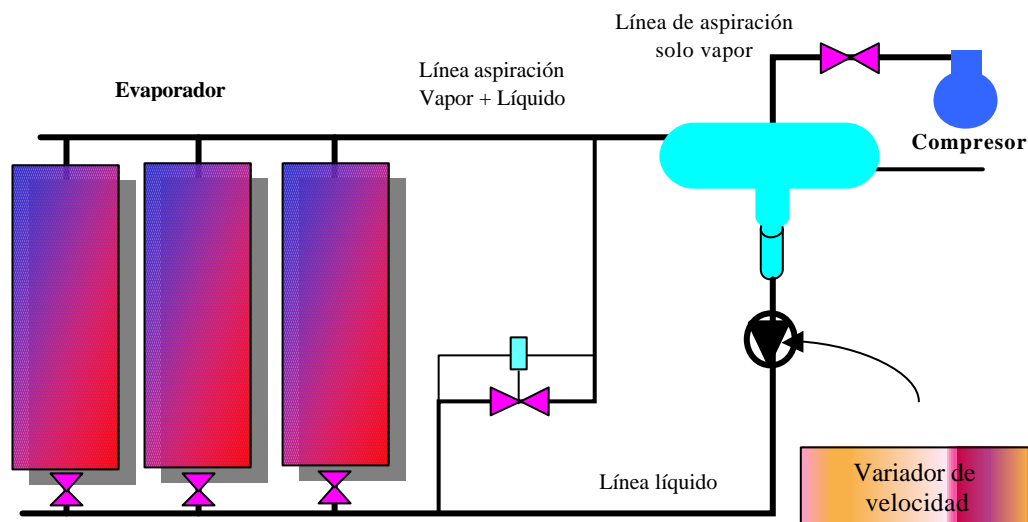
evaporador, y se deja de producir frío. Después cuando la temperatura aumenta a otro valor, se vuelve a inyectar líquido al evaporador volviendo a comenzar el ciclo de refrigeración. En este tipo de funcionamiento, cualquiera se podría preguntar, ¿no sería mejor trabajar con un salto térmico ΔT_2 menor 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 (ver también presión de evaporación flotante y termostato modulante).

En evaporadores inundados con recirculación de líquido, la situación es diferente, ya que 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 el evaporador y por la línea de bypass sin evaporarse, y en consecuencia no produce frío y consume una energía innecesaria en las bombas de circulación. Se podría utilizar un variador de velocidad que mantuviese la diferencia de presión en los evaporadores pero sin bombear el caudal innecesario con el correspondiente ahorro energético.

6.3 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.

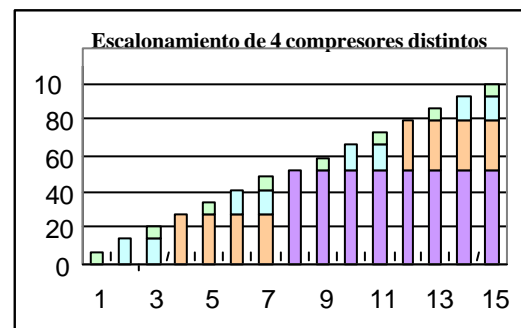
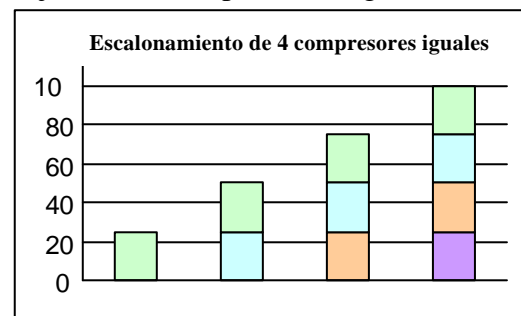
En los compresores de tornillo, esto llega a tener tanta importancia que se recomienda no utilizar compresores de tornillo por debajo del 50-60% de capacidad.

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.

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

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

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



Como puede verse utilizando 4 compresores iguales solamente se tienen 4 saltos de capacidad (25-50-75 y 100%) siendo difícil mantener una presión de evaporación con pocas oscilaciones, pero si en vez de 4 compresores iguales los seleccionan de distinto tamaño podemos conseguir hasta 15 saltos de capacidad (7-14-21-28-35-42-49-52-59-66-73-79-86-93-100%), con los cuales es mucho más fácil mantener una presión dentro de unos límites estrechos.

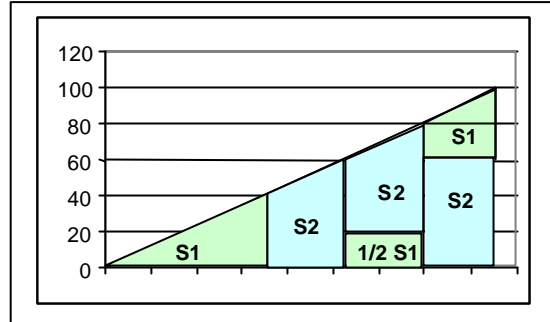
El mantener la presión de evaporación en unos límites estrechos, nos permite tener una presión de evaporación más alta, con lo cual mejora la eficiencia energética de la instalación.

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

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

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

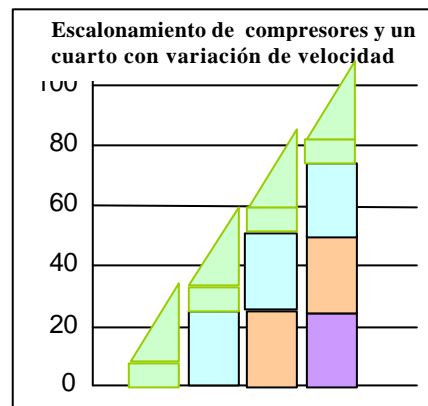
1. Arrancar el compresor pequeño hasta 40 CV.
2. Arrancar el grande entre el 40 y 60 CV parando el pequeño.
3. Poner el pequeño con 20CV y el grande entre 40-60 CV.
4. Poner el grande con 60CV y el pequeño al 20-40 CV.



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

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

Finalmente y quizás esta sea la aplicación más interesante es la variación continua de capacidad utilizando varios compresores de pistón, scroll o tornillo en los cuales un compresor de tamaño reducido se acopla entre los saltos de capacidad de dos compresores por medio de un variador de frecuencia, el cual en función de la señal que recibe de un controlador pone al compresor a la capacidad que se necesita. Como los compresores normalmente solo permiten una variación de la frecuencia entre 25 y 75 Hz (esta variación depende de cada tipo o modelo de compresor) hay que tener en cuenta esta limitación para que el solape con las etapas de los demás compresores sea el correcto. Para ello el compresor gobernado por el variador de velocidad deberá tener una potencia del 33 % superior al compresor más pequeño.



En aire acondicionado los sistemas INVERTER con el volumen de refrigerante en circulación variable, utilizan la tecnología de los compresores scroll combinada con la variación de frecuencia, y normalmente tienen los compresores optimizados incluso por debajo del 50% de capacidad (en el entorno de los 30Hz de frecuencia).

También es posible y recomendable la combinación de compresores de pistón y tornillos, de forma que al combinar sus propiedades pueda alcanzarse una regulación continua y económica de la capacidad de los compresores.

7 Ahorro económico

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

Vigilancia de la planta

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

Evitar o limitar el consumo en horas punta

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

Acumulación de frío (hielo)

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

8 Análisis por sectores

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

La clasificación siguiente nos permitirá ver de forma adecuada los distintos casos que se pueden encontrar.

8.1 Refrigeración domestica y hostelería comercial.

Aquí se incluyen los refrigeradores domésticos, las máquinas utilizadas en hostelería, wending, máquinas de helados, tapas frías, etc.

Los aspectos de mejora energética afectados son dos, reducir las perdidas energéticas hacia el exterior mejorando las propiedades físicas o el espesor de los elementos aislantes, y mejorar el rendimiento eléctrico del motor del compresor.

La evolución de los compresores cuya potencia suele ser inferior a 1 C.V. ha sido la de ir aumentando la eficiencia energética ó COP mejorando los diseños mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Entre las mejoras mecánicas se encuentra la reducción de volumen muerto, la reducción de tolerancias y las aspiraciones semi-directas.

Entre las mejoras eléctricas están las optimizaciones del motor para la aplicación, la utilización de condensadores eléctricos durante el funcionamiento, la incorporación de impedancias en el equipo eléctrico.

Ultimamente las mejoras electrónicas introducen la utilización de la variación de velocidad en el motor del compresor.

La utilización del variador de velocidad ha implicado el desarrollo de motores eléctricos especiales y tarjetas electrónicas que modifiquen las condiciones de trabajo del compresor para modificar el número de revoluciones de éste.

El principio de funcionamiento que describimos a continuación es muy sencillo, y **consigue niveles de ahorro de energía superiores al 30%.**

Basado en el principio de regulación adaptativa denominado AEO (Optimización de Energía Adaptativo), el controlador electrónico de la unidad gestiona las revoluciones del motor por medio de un algoritmo de control. La estrategia principal es que el compresor trabaje al mínimo de revoluciones posible ya que en estas condiciones el COP es mayor.

En el primer arranque, cuando se enchufa el equipo, dado que el termostato pide refrigeración, comienza con una velocidad inicial de 3.000 rpm.

En los ciclos siguientes, el algoritmo interno disminuye los ciclos en función del número de arranques por hora que ha tenido. Así reduce las revoluciones si es necesario hasta un mínimo de 2.000 rpm debido a las características del compresor.

Para incrementar la capacidad, el algoritmo de control considera que si se produce un periodo de funcionamiento de mas de una hora de duración, se aumentan las revoluciones, y además, si se produce un periodo de mas de 75 minutos de marcha, entonces cada 15 minutos aumenta las revoluciones con un ritmo más acelerado hasta el

extremo de alcanzar 4.000 rpm. Esta variación entre 2000 y 4000 rpm. permite regular entre el 50% y el 100% de capacidad.

El ahorro de energía cuando disminuyen las revoluciones procede de evaporar mas alto y condensar mas bajo, con lo cual el consumo del compresor se reduce.

Otros aspectos que permiten el ahorro de energía son la mejora de los sistemas de aislamiento que evitan las pérdidas del frío, y la ubicación de los muebles en lugares ventilados y frescos. No empotrar los muebles ni eliminar las corrientes necesarias para el condensador. No bloquear los evaporadores de hielo.

En estos sistemas de refrigeración donde normalmente el sistema de expansión es un capilar, están diseñados para unas condiciones ambientales determinadas. Cuando están trabajando fuera de estas condiciones, trabajan con peores eficiencias. En algunos casos hay un suministro excesivo de líquido que el evaporador no puede evaporar retornando al compresor, donde se evapora en el cárter refrigerando al motor eléctrico. Este enfriamiento del motor aunque no es necesario es bueno para el motor pero no para la eficiencia, ya que se esta produciendo frío donde no se necesita, por lo cual no es frío útil. Este caso se da especialmente en las máquinas con banco de hielo para enfriar líquidos.

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

En este tipo de instalaciones intervienen los mantenedores (profesionales de la refrigeración) y los usuarios.

Se deben colocar los productos en los distintos servicios, tal como indican los manuales sin bloquear las corrientes de aire en circulación. Los evaporadores deberán desescarcharse las veces que sea necesario para evitar la acumulación de hielo en las baterías. Las puertas de cámaras y muebles deberán estar cerradas para evitar pérdidas de frío y entrada de aire caliente y húmedo al servicio.

Suele ser conveniente poner sistemas de vigilancia para controlar las temperaturas y las aperturas de puertas ya que evitan pérdidas innecesarias. Esto se hace casi obligatorio cuando el usuario es un empleado, y no esta especialmente interesado en la eficiencia y buen rendimiento de la instalación.

El tipo de instalación es variado encontrándonos sistemas de refrigeración con centrales de compresores, sistemas con unidades condensadoras, multicircuitos, y últimamente sistemas de refrigeración indirectos.

El sistema más interesante desde el punto de vista de ahorro energético es el sistema de refrigeración con central de compresores, en los cuales utilizando el coeficiente de simultaneidad permite diseñar instalaciones más pequeñas con mayor eficiencia.

En las centrales de compresores, 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. Debe remarcarse que la utilización de los conceptos de presión de evaporación flotante en función de la temperatura ambiente en el entorno de los servicios, presión de condensación flotante, inyección electrónica y programas horarios día / noche permiten niveles de ahorro muy alto.

En las unidades condensadoras, se pueden aplicar los conceptos explicados en las secciones de adecuación a la demanda y máxima utilización de la superficie de intercambio. La utilización de los conceptos de presión de condensación flotante, inyección electrónica, acoplamiento de la capacidad del compresor con un variador de velocidad, y programas horarios día / noche permiten grandes niveles de ahorro.

En multicircuitos el nivel de ahorro es menos predecible debido a la indefinición en la presión de condensación de los distintos circuitos. En general el ahorro será similar al de unidades condensadoras.

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. Todos los conceptos aplicados a centrales también son aplicables en esta aplicación. El gran inconveniente que presentan es la penalización energética debida al transporte del líquido a través de la instalación, el cual siempre es una penalización energética independientemente del sistema de circulación empleado.

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%.

8.3 Refrigeración industrial

Se considera refrigeración industrial, las instalaciones en las cuales o bien la potencia instalada es grande (superior a unos 100 C.V.), o bien se utiliza amoníaco como refrigerante.

Tanto los sistemas de refrigeración industrial con expansión directa como los inundados, pueden aplicar todos los criterios citados para instalaciones comerciales. En estos casos como la potencia instalada es superior, el ahorro también es mayor que en los sistemas 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 reguladoras de presión de evaporación 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.

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

El tratamiento de la humedad en el amoniaco debe realizarse de forma correcta. De todos es conocida la gran afinidad del amoniaco hacia el agua, así como que el agua contenida en el amoniaco no forma hielo bloqueando los orificios pequeños de sistemas de expansión o válvulas servoaccionadas, existiendo la creencia de no asociar perjuicios al agua contenida en la instalación. Sin embargo favorece la aparición de fenómenos de cavitación que pueden dañar ciertos componentes, y además, lo que es más importante modifica la presión de evaporación forzando a evaporar a presiones mas bajas que la correspondiente según la curva del amoniaco puro.

Es por esto por lo que decimos que en instalaciones de amoniaco la humedad es muy mala y que penaliza mucho el consumo.

En la tabla podemos ver como una cantidad de agua modifica la presión de ebullición en el amoniaco, en la cual vemos que evaporando a 1 bar conseguimos $-33,59^{\circ}\text{C}$ con amoniaco puro, pero cuando tiene un 10% de humedad solo consigue $-31,71^{\circ}\text{C}$, es decir se pierden casi dos grados, lo cual teniendo en cuenta la regla que dice que un grado de reducción de temperatura supone un 5% de perdida en consumo, supone alrededor de un 10% de pérdida de rendimiento.

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	-42,10
0,5		-46,52	-44,93	-42,41	-38,00
1		-33,59	-31,71	-28,96	-24,07
2		-18,85	-16,70	-13,62	-7,71
3		-9,23	-6,69	-3,13	-2,51
4		-1,88	-0,79	4,45	10,32

De esto se deduce que todo sistema utilizado para evitar la entrada de humedad en sistemas de amoniaco, así como para eliminarla son muy interesantes desde la óptica del ahorro energético.

En un estudio realizado en 175 plantas de los países escandinavos, se detectó contaminación de agua en instalaciones, de forma que 25 contenían mas de un 3% de humedad, 37 mas del 2% y 77 mas del 1%. También se encontró alguna planta con un 26%, 24% y 18,5% de agua.

Para eliminar el agua de una instalación de amoniaco, se utilizan rectificadores de agua por ebullición, en los cuales el amoniaco se evapora dejando el agua en el depósito. Este proceso se repite durante muchas veces, y al final los residuos del agua se evacuan. El residuo evacuado contiene un 30-40% de amoniaco dependiendo de la presión y temperatura cuando se retira el agua. En el boletín técnico nº 108 del IIAR (Instituto Internacional de Refrigeración) puede encontrarse información complementaria.

8.4 Enfriadoras de agua

Todos los conceptos utilizados en instalaciones comerciales, también se pueden aplicar en las enfriadoras de agua, resultando los más interesantes la expansión electrónica y la

gestión de compresores con controladores electrónicos inteligentes con presión de condensación flotante. La combinación de estos dos conceptos puede suponer un ahorro mayor del 25% del consumo de la instalación.

8.5 Aire acondicionado industrial

Normalmente el aire acondicionado industrial (recordar que los sistemas evaporativos no se contemplan en este estudio) parte de grandes enfriadoras de agua las cuales distribuyen el frío a través de fan coils. En consecuencia se tratarán los mismos criterios que a las enfriadoras de agua.

8.6 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.

La utilización de sistema centralizados con evaporadores individualizados por locales junto con la parcialización de carga en los compresores bien por escalonamiento de etapas o por los sistemas inverter junto a la expansión electrónica son los sistemas que permitirán ahorrar energía en el aire acondicionado.

8.7 Aire acondicionado en 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. En algunos casos como puede ser el transporte por carretera, la variación de velocidad podría hacerse por sistemas mecánicos utilizando la tecnología de automoción.

9 Acciones posibles para reducir el consumo de CO₂

Dado que en un futuro próximo, existirán limitaciones reales en la producción de CO₂, como resumen de todo lo anterior consideramos que por parte de los organismos públicos se deberían considerar los siguientes aspectos.

- 1º Políticas de incentivación real de los sistemas que reducen la producción de CO₂
- 2º Políticas punitivas de los sistemas de despilfarro energético
- 3º Coherencia legislativa, de inspección, control y de política punitiva entre las distintas comunidades autónomas

Normalmente todo el mundo está de acuerdo en los tres enunciados anteriores, los conflictos, surgirán cuando se intente definir los distintos conceptos y los distintos límites sobre que debe estar incluido en el punto uno o en el punto dos.

Como idea general debería tomarse como punto de partida inicial aquello que la practica 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 la producción de CO₂.

9.1 Políticas de incentivación

A continuación se indican algunos de los conceptos susceptibles de incentivación positiva.

9.1.1 Reducción de ganancias térmicas externas

Se debe incentivar sobre la base del coeficiente global de transmisión de calor del servicio, mueble o planta, el cual debería recogerse en el proyecto, en el libro verde o en las especificaciones técnicas del producto.

9.1.2 Refrigerantes y compresores

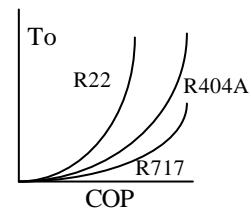
Se debe incentivar otorgando una calificación energética y medioambiental similar a la existente en frigoríficos (ecológico y eficiente).

9.1.3 Sistema frigorífico, Booster, Indirecto

Se debe incentivar en función del COP 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 debe elaborar una tabla como patrón de referencia del COP en función del refrigerante y tipo de aplicación (temperatura de evaporación).



9.1.4 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 frente a los sistemas individualizados o a los multicircuitos.

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.

9.1.5 Subenfriamiento de líquido

En los sistemas de expansión directa, el líquido debe de estar a una temperatura que al expansionarse el fluido resultante tenga un título entre 0,3 y 0,4. En sistemas inundados, todo el subenfriamiento repercutirá en una mejora de la eficiencia del ciclo.

9.1.6 Disminuir la presión de condensación

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

9.1.7 Aumentar la presión de evaporación

Al igual que la presión de condensación, se debe incentivar la utilización de controladores electrónicos inteligentes incluyendo el principio de presión de aspiración flotante.

También se debe incentivar la utilización de centrales de compresores con más escalonamientos de capacidad o con más compresores.

9.1.8 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.

9.1.9 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.

9.1.10 Adecuación a la demanda

Se debe incentivar la utilización de todos los sistemas de adecuación a la demanda posible, con el correspondiente seguimiento de los sistemas de mantenimiento.

Variación de carga en compresores y condensadores

Se debe incentivar la utilización de controladores electrónicos inteligentes, la utilización de centrales con mas etapas o compresores y la utilización de variadores de velocidad en compresores y condensadores.

En sistemas inundados se debe incentivar la inyección modulante de líquido al separador de líquido con reguladores inteligentes.

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 incentivará cuando este activada en sistemas de desescarche eléctrico.

9.1.11 Utilización de la máxima superficie de transmisión de calor**Inyección Electrónica en evaporadores**

En sistemas de expansión seca, se debe incentivar la utilización de controladores electrónicos inteligentes en los sistemas de expansión y control de inundación de los evaporadores.

En sistemas inundados con recirculación por bomba, se debe incentivar la utilización de variadores de velocidad en bombas.

9.1.12 Utilización de compresores en su máxima eficiencia

Se debe incentivar la utilización de compresores con variación de velocidad tanto en compresores herméticos como semiherméticos o abiertos.

Se debe incentivar la utilización de centrales de compresores de distinto tamaño, de forma que con la gestión adecuada mantienen a los compresores trabajando en su máxima eficiencia energética, incluso con variación de velocidad en un compresor.

Se debe incentivar la utilización de controladores electrónicos que permiten la gestión inteligente de estas centrales de compresores.

9.1.13 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.

En cada proyecto, se debe elaborar un manual de mantenimiento general en el cual se incluyan todos los conceptos de ahorro energético posibles con los registros de valores necesarios, las acciones correctoras, las notificaciones periódicas, los registros periódicos de industria, etc.

Se debe elaborar un documento 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.

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.