

## **Compresores herméticos de baja potencia con variación de velocidad**

Autor: Félix Sanz del Castillo  
Director Técnico de Refrigeración  
Danfoss S.A.  
Avda Tenerife 22  
28700 San Sebastian de los Reyes  
Madrid

## **Compresores herméticos de baja potencia con variación de velocidad**

### **Resumen**

Teniendo en cuenta la situación en la cual 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 CO2 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, procede plantearse que se puede hacer en las aplicaciones domésticas o de refrigeración comercial como por ejemplo, los frigoríficos, los congeladores, las máquinas utilizadas en hostelería, wending, máquinas de helados, tapas frías, etc.

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

Es en este entorno donde surgen los conceptos que nos permitirán ahorrar energía en los compresores domésticos y comerciales, los cuales comienzan a utilizar la variación de velocidad.

Entre las mejoras introducidas en los compresores citamos las mejoras mecánicas, eléctricas y electrónicas.

Mejoras mecánicas.

Reducción de volumen muerto, la reducción de tolerancias y las aspiraciones semi-directas

Mejoras eléctricas.

Optimizaciones del motor para la aplicación, la utilización de condensadores eléctricos durante el funcionamiento, la incorporación de impedancias en el equipo eléctrico.

Mejoras electrónicas.

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 utilizado, **consigue niveles de ahorro de energía superiores al 30%.**

## Ahorrar energía

Teniendo en cuenta la situación en la cual nos encontramos (principios del siglo XXI) 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<sub>2</sub> 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; es normal 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.

Procede por tanto plantearse que puede hacerse en las aplicaciones domesticas o de refrigeración comercial como por ejemplo, las máquinas utilizadas en hostelería, wending, máquinas de helados, tapas frías, o incluso un frigorífico.

Aceptando que el diseño de los equipos está optimizado, se pueden tocar dos aspectos para obtener una mejora energética. Por un lado se pueden reducir las perdidas energéticas hacia el exterior mejorando las propiedades físicas o el espesor de los elementos aislantes, por otro lado mejorar el rendimiento eléctrico del motor del compresor.

En esta conferencia solamente se va a tratar de las posibles mejoras introducidas en los compresores herméticos utilizados en este tipo de aplicaciones.

## Clasificaciones energéticas en muebles frigoríficos

Todas las clasificaciones energéticas que se utilizan en la actualidad evolucionaran a posiciones mas exigentes desde el punto de vista energético y medioambiental. Consecuencia de ello, las concepciones actuales con etiquetados energéticos se irán desglosando en otras subdivisiones a las que todos los muebles se tendrán que adaptar.

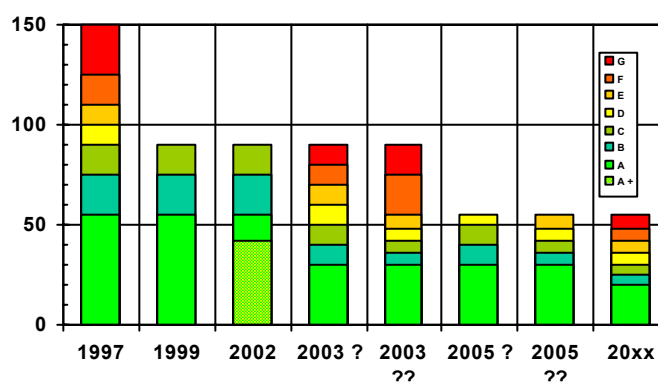


Fig 1. Evolución en la clasificación energética de muebles

Esto forzará que los muebles mejoren su eficiencia energética con componentes en desarrollo y con tecnologías utilizadas en otros campos de la

técnica que con estos condicionantes forzarán su aplicación en estas aplicaciones.

### **Necesidades del equipo**

En cualquier caso los equipos se deberán diseñar para cumplir con las demandas de los usuarios, y para ello deberán satisfacer las condiciones mas desfavorables con temperaturas ambientes altas y producto en la zona de almacenamiento calientes respetando las consideraciones medioambientales y energéticas existentes. De esto se deduce que el usuario no tiene una demanda especifica sobre el compresor, si bien es parte de la solución

### **Análisis de puntos a optimizar**

Tomando un refrigerador doméstico como punto de partida para el análisis, vemos que existen distintos puntos donde se pueden reducir o minimizar el consumo energético.

Dichos puntos son:

Optimización de la transferencia de calor en el evaporador

Aislamiento de paneles con vacío

Reducir las perdidas de calor durante el desescarche automático o por gas caliente con desescarches adaptativos.

Incrementar el espesor del aislamiento.

Mejorar la eficiencia de los compresores.

Utilizar sistemas con dos compresores.

Mejorar la transferencia de calor en el condensador.

Mejorar el sello de las puertas con doble junta.

Mejorar el ventilador del evaporador y del condensador (velocidad variable).

Utilizar válvula de expansión en la inyección de líquido.

Aumentar el espesor del aislamiento en la puerta.

Utilizar gas caliente para evitar las condensaciones en las puertas.



**Fig 2. Frigorífico**

Todo ello aportará una reducción del consumo total de energía en estos equipos con la consiguiente reducción en la contaminación por el el CO2 producido en la generación de la energía eléctrica en centrales térmicas.

### **Evolución de la eficiencia en los compresores herméticos.**

En la siguiente figura se ve la tendencia que muestra el COP de distintos desarrollos de compresores en los últimos 15 años. Puede verse que en 1988 un compresor consumiendo un vatio de potencia eléctrica, transportaba bastante menos energía frigorífica que en la actualidad. Puede verse que la mejora ha sido considerable y que se puede llegar a reducir la demanda energética incluso mas de un 50%.

También es interesante la comparación del COP teórico para la aplicación determinada con el real a lo largo de los años. Puede verse una aproximación en la última década, y probablemente en los próximos 15 años las diferencias entre el COP teórico y el real sean muy pequeñas.

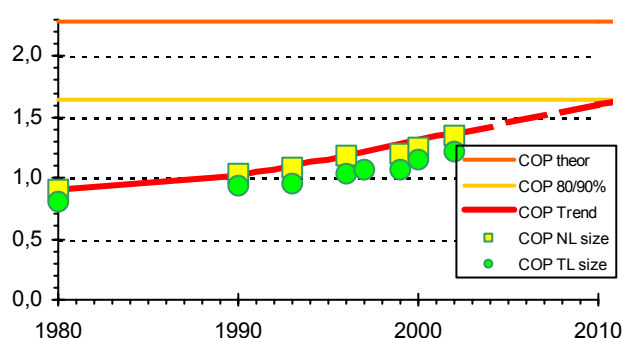


Fig.3 Evolución del COP

## Optimización en compresores

Una vez centrados en el compresor, los distintos puntos a optimizar desde el punto de vista mecánico y eléctrico son:

Reducir del volumen muerto en el diseño del pistón del compresor.

Reducir la fricción en las partes móviles.

Reducir la viscosidad del aceite.

Optimizar las válvulas de aspiración y descarga.

Optimizar el flujo de refrigerante en los conductos de aspiración.

Optimizar el motor eléctrico con bobinados de mayor eficiencia y calidad.

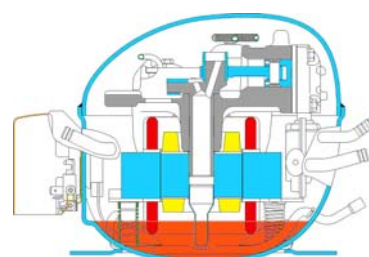


Fig 4. Compresor hermético

## Selección del motor del compresor

Al diseñar un compresor, se tienen en cuenta todos los factores que le pueden afectar como van a ser:

Nivel de eficiencia o COP que incluirá al compresor entre los modelos optimizados energéticamente o no.

La carga térmica máxima de la aplicación dentro de la aplicación, la cual define las condiciones de trabajo.

Las variaciones de carga así como la posibilidad de arranque con bajo par según el rango de tensión adecuado, la temperatura ambiente máxima y el propio refrigerante.

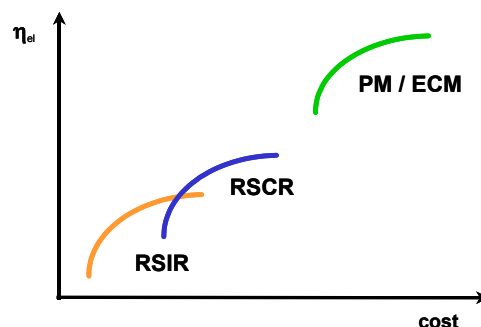


Fig 5. Tipos de motores

La aplicación donde esta inmerso el compresor, define las condiciones de trabajo del refrigerante, es decir la temperatura de evaporación y la temperatura de condensación. Dichos factores pueden verse en la siguiente tabla:

Valores aprox.	Alimentos frescos Normal	Alimentos frescos Alta eficiencia	Refrigerador Normal	Refrigerador Congelador Combi	Congelador
Capacidad en W	60 - 80	35 - 60	60 - 100	70 -200	80 - 200
T evaporación °C	-15 / -25	-5 / -15	-25 / -35	-30	-30 / -35
T condensación °C	45 - 50	40 - 45	45 - 50	40 - 45	40 - 45

En la actualidad el compresor se optimiza para trabajar a  $-25/55\text{ }^{\circ}\text{C}$  en Europa o a  $-23,3/54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-10/130\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) en Estados Unidos.

La elección del tipo de motor eléctrico, viene definida por la resistencia del motor, el nivel de optimización y por la tecnología utilizada en su fabricación.

Todos estos puntos junto el nivel sonoro y el volumen ocupado no permiten mostrar en un plano de seis ejes, la comparación entre los compresores universales (hexágono regular) donde las distintas mejoras que se incluyen en el compresor (alejamiento del cero) provoca una pérdida en otras propiedades (acercamiento al cero). Por ejemplo el hexágono mas irregular, al reducir el consumo energético y hacerlo polivalente para muchas aplicaciones, incrementa mucho el precio.

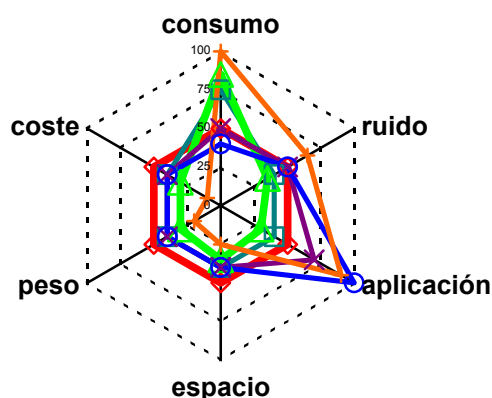


Fig 6. Criterios de selección en compresores

## Evolución Compresores herméticos

Tal como se ha visto, la evolución de los compresores herméticos 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.

Últimamente 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 modifican las condiciones de trabajo del compresor para modificar el número de revoluciones de éste.

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

## ¿Cómo se obtiene el ahorro de energía?

En toda instalación frigorífica, cuando se consigue acoplar la demanda frigorífica de la instalación a la oferta realizada por un sistema de compresión flexible, se consigue un ahorro de energía muy importante, debido a que en estas condiciones se puede obtener el frío con la calidad suficiente para la aplicación reduciendo el consumo de energía al mínimo.

Aunque son varios los conceptos involucrados, la mayoría de ellos tienden a afectar a la presión de aspiración y a la de condensación, de forma que los conceptos de presión de evaporación, aspiración flotante y parcialización de compresores y condensadores resumen los conceptos energéticos involucrados.

En un circuito de refrigeración doméstica, el diseño se suele hacer en base a las demandas máximas de los muebles. Esto indica que en condiciones de funcionamiento normal, los equipos están sobredimensionados, y consecuencia de ello todos los equipos están funcionando un tiempo y otro tiempo parados. Con el sistema de variación de velocidad, al disminuir el número de revoluciones del motor eléctrico, se consigue disminuir el volumen desplazado por el compresor y la potencia frigorífica asociada, de igual manera al aumentar el número de revoluciones se incrementa la capacidad asociada.

Como el compresor se diseña para satisfacer las demandas máximas de capacidad, resulta que cuando las revoluciones del compresor disminuyen, el condensador queda sobredimensionado y reduce la presión de condensación. Simultáneamente el evaporador también queda sobredimensionado, con lo cual reduce el salto térmico con el aire a enfriar aumentando la presión de evaporación. Entre el evaporador y el condensador, el sistema de expansión (normalmente un capilar, ver nota al final de la ponencia) introduce menos refrigerante por la disminución de la caída de presión, lo cual es coherente con la reducción de potencia del equipo permitiendo un funcionamiento mas estable.

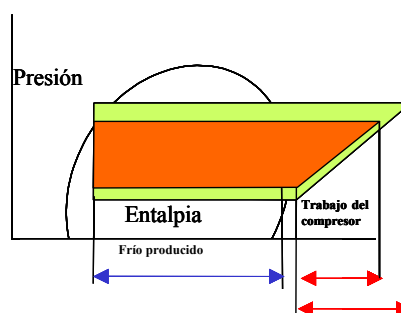


Fig 7. Aumento de la presión de evaporación  
Reducción de la presión de condensación

Consecuencia de todo ello se deduce que el ahorro de energía cuando disminuyen las revoluciones procede de evaporar mas alto y condensar mas bajo. El COP del circuito es mejor cuanto menos revoluciones tiene el compresor. Se debe recordar que por cada grado que aumenta la temperatura de evaporación, el COP mejora entre un 3-4%, y que por cada grado que disminuye la presión de condensación, el COP también mejora un 1,3-2%.

## Termostatos para compresores con variación de velocidad

Los compresores con variación de velocidad permiten la utilización de tres tipos de termostatos diferentes como son un termostato mecánico, un termostato con una señal de corriente continua de 5 a 15V o un termostato electrónico con una señal de frecuencia de 5 a 15V.

a) Termostato mecánico convencional (señal todo / nada)

El compresor funciona según el principio de control adaptativo AEO (ver mas adelante).

Los termostatos con resistencias activas integradas, no se pueden utilizar, ya que siempre existiría una corriente en la salida con lo cual se interpretaría que el termostato estaría siempre activado.

b) Termostato con una señal de corriente continua de 5 a 15V

Funciona exactamente igual que el termostato mecánico con una señal todo / nada aplicando el principio de regulación adaptativa AEO (ver mas adelante).

c) Termostato electrónico con una señal de frecuencia de 5 a 15V

Se conecta una señal cuadrada a la unidad de control del compresor con un pulso mínimo de 200us.

El funcionamiento del compresor con este tipo de termostato es el siguiente:

Si el equipo recibe una señal de frecuencia superior a 100 Hz, el equipo trabaja siguiendo un control de referencia externo.

La velocidad del compresor se controla según la frecuencia aplicada multiplicada por 10, donde tal como se puede ver en la figura una frecuencia de 230 Hz significa una velocidad de rotación de 2.300 rpm.

Si la frecuencia es superior a 400 Hz, trabajará a la velocidad máxima.

Si después de una señal de frecuencia se suministra una señal de corriente continua constante, la velocidad se mantiene hasta que se suministre una nueva frecuencia o la señal disminuya.

Una señal de frecuencia inferior a 200 Hz, parará el compresor, y volverá a arrancar cuando se vuelvan a alcanzar los  $203 \pm 2$  Hz.

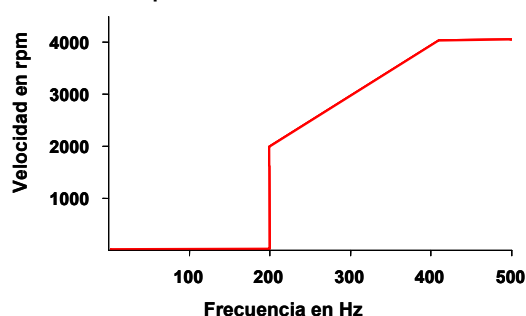


Fig 8. Señal del termostato y velocidad

## Optimización de Energía Adaptativo AEO (Principio de regulación adaptativa)

El controlador electrónico de la unidad gestiona las revoluciones del motor por medio de un algoritmo de control interno. La estrategia principal es trabajar con el compresor 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 tal como se indica en la figura.

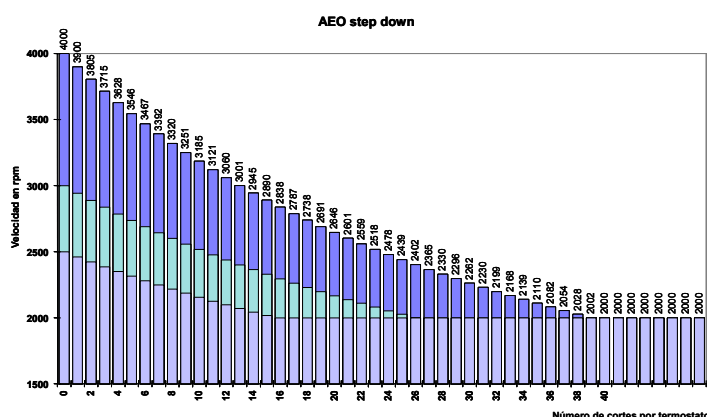


Fig 9. Secuencia de reducción de capacidad



Así tras varios ciclos de funcionamiento y parada, reduce las revoluciones si es necesario hasta un mínimo de 2.000 rpm.

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 según el cuadro de la figura.

Después de un periodo de mas de 75 minutos de marcha, cada 15 minutos aumenta las revoluciones con un ritmo más acelerado. Este incremento de velocidad hace que el compresor alcance las 4.000 rpm. dependiendo del punto inicial de arranque y de la ausencia de señal de corte del termostato.

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

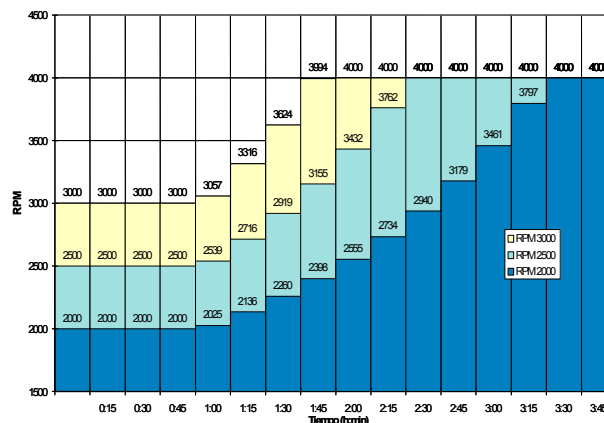


Fig 10. Secuencia de aumento de capacidad

En un caso real tendremos por ejemplo la siguiente secuencia.

Arranca el compresor con 3000 rpm, y funciona hasta que corta por termostato a los 30 minutos.

Como ha estado funcionando menos de 60 minutos, la próxima vez que arranca lo hará con una velocidad menor como son 2943 rpm.

Tras pasar 10 minutos el termostato manda arrancar al compresor, y este ahora empieza con 2943 rpm y esta funcionando durante 40 minutos.

Como ha estado funcionando menos de 60 minutos, la próxima vez en arrancar lo hará con una velocidad de 2889 rpm.

Tras pasar 10 minutos el termostato manda arrancar al compresor, y este ahora empieza con 2889 rpm y esta funcionando durante 50 minutos.

Como ha estado funcionando menos de 60 minutos, la próxima vez en arrancar lo hará con una velocidad de 2837 rpm.

Tras pasar 10 minutos el termostato manda arrancar al compresor, y este ahora empieza con 2837 rpm y esta funcionando durante 59 minutos.

Como ha estado funcionando menos de 60 minutos, la próxima vez en arrancar lo hará con una velocidad de 2786 rpm.

Tras pasar 10 minutos el termostato manda arrancar al compresor, y este ahora empieza con 2786 rpm y esta funcionando durante 70 minutos.

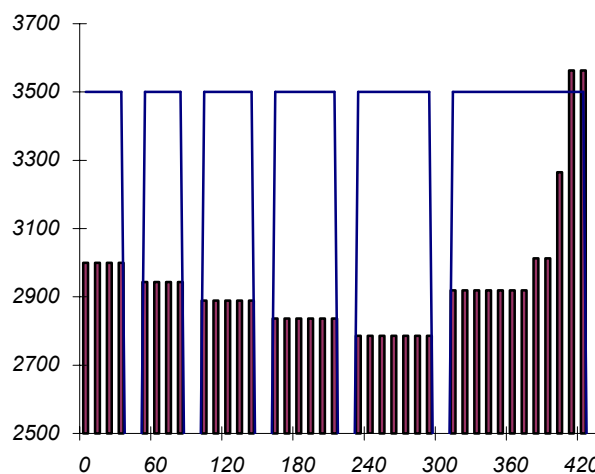


Fig 11. Ejemplo de reducción y aumento de rpm.

Como ha estado funcionando mas de 60 minutos, la próxima vez que arranca lo hará con una velocidad superior a 2786 rpm, realizando el cambio de tendencia en las revoluciones del compresor. En este caso aumentará a 2919. Tras pasar 10 minutos el termostato manda arrancar al compresor, y este ahora empieza con 2919 rpm y esta funcionando de forma permanente y hasta que no han pasado dos horas el termostato no corta. En este ciclo, desde los 75 minutos, el compresor ha aumentado las revoluciones primero a 3013 rpm, y como el compresor no ha parado, 15 minutos después ha aumentado a 3265 rpm, y como pasados 15 minutos todavía funciona, vuelve a aumentar hasta 3563 rpm. De forma que ha pasado en una hora y tres cuartos de 2786 a 3563 rpm. Justo cuando iba a aumentar las revoluciones a 4000, el termostato corta y para al compresor, con lo cual en el próximo arranque empezará con 3563 rpm.

Con este sistema el compresor se adapta de una forma continua a la demanda de la instalación. También puede verse que la reacción aumentando las revoluciones es más rápida que el al descenso de revoluciones, lo cual es necesario para asegurar siempre una calidad de refrigeración adecuada.

### Capacidad en los compresores con variación de velocidad

Como los compresores pueden girar entre 2000 y 4000 rpm, pueden variar entre el 50% y el 100% la capacidad frigorífica. Teniendo en cuenta este factor, la selección del compresor se realizara para la carga máxima de la aplicación con el máximo de revoluciones posible (4000 rpm).

El rango de capacidades de compresores para las aplicaciones utilizadas en servicios de este tipo, puede variar desde los 50 hasta los 250 vatios.

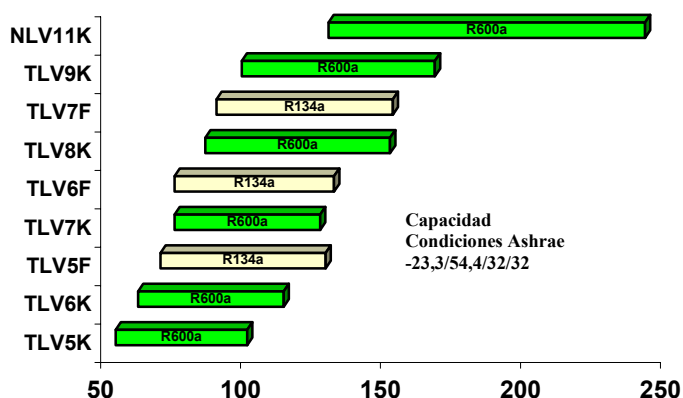


Fig 12. Rango de capacidad de distintos compresores

Existen compresores para R134a y para R600a, siendo el COP bastante mejor en estos compresores que en los compresores normales.

En la figura se ve el COP real obtenido con estos compresores comparado con el teórico, el cual según se ve mejora al reducir el número de revoluciones del

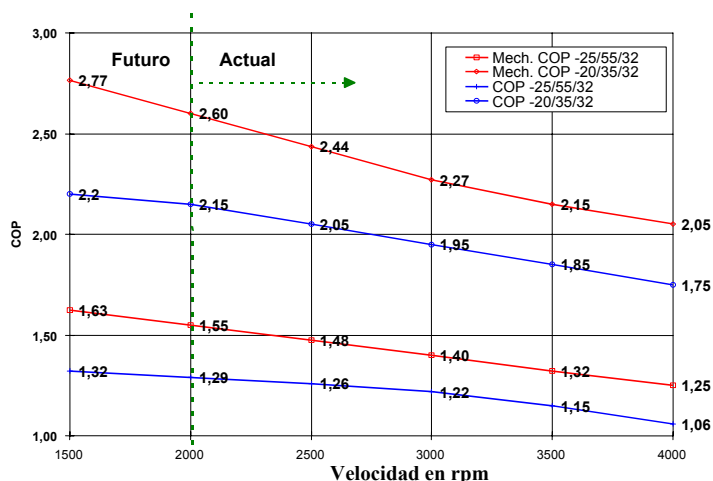


Figura 13. COP teórico y real a distintas revoluciones

compresor, y se espera poder alcanzar en un tiempo próximo trabajar incluso a 1500 rpm, con la posibilidad de llegar a regular incluso por debajo del 40%.

Nota:

Aunque no hemos entrado en la influencia del control de la inyección de líquido, tenemos que recordar que 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 malo para el motor resta eficiencia, ya que produce 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. Este problema se resolvería utilizando válvulas de expansión termostática consiguiendo también un mejor funcionamiento y un considerable ahorro energético. Las pruebas preliminares indican que se pueden conseguir entre un 10 y un 20% cuando se utilizan válvulas de expansión termostática lo cual es muy importante.

### **Bibliografía:**

Industrial Refrigeration Handbook. Stoecker. Mac-Graw Hill

Ahorro de energía. Félix Sanz. Climatización 99

Técnicas de la regulación y gestión de energía de edificios. René Guisan AFISAE.