

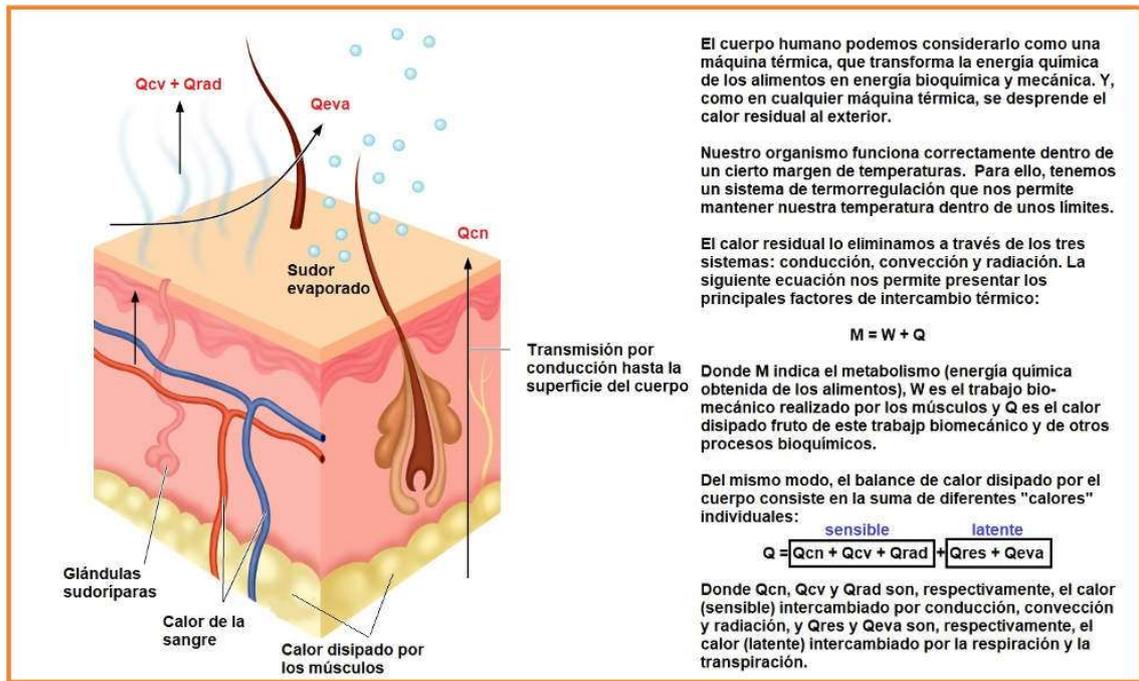
Caso práctico: la máquina de refrigeración más antigua de la Humanidad

Casi sin excepción, todos los procesos tecnológicos artificiales ya están presentes en la naturaleza y el proceso de refrigeración no es una excepción. Los seres vivos de sangre caliente necesitamos una cierta constancia en la temperatura de nuestro cuerpo para que funcionemos adecuadamente. La fiebre, por ejemplo, hace que la temperatura corporal aumente 2 ó 3 grados para dificultar el avance de las infecciones, ya que los microbios son muy sensibles al calor. Pero este aumento de la temperatura en los estados febriles afecta muy negativamente al cerebro, haciendo que deliremos. Entonces, ¿cómo es posible que cuando hay temperaturas ambiente de 40°C o más, nuestro organismo no se vea afectado?

La respuesta es muy sencilla "ponemos en marcha una máquina frigorífica biológica de ciclo abierto". Cuando sudamos, el líquido se evapora y, en este proceso, absorbe el calor latente de vaporización de nuestro cuerpo, contribuyendo a evacuar el calor excedente que haría aumentar nuestra temperatura por encima de los 36 °C. Y sería de ciclo abierto, porque el agua que se evapora va a parar a la atmósfera y debemos reponerla nuevamente ingiriendo más agua. Un ciclo cerrado repetiría el anterior proceso con el mismo agua.

Este proceso es el mismo que se origina cuando aplicamos alcohol a nuestra piel y, al evaporarse, tenemos una sensación de frío. O lo mismo que ocurre cuando se enfría un [botijo](#), ya que la arcilla es algo porosa y una pequeña cantidad de agua atraviesa su pared, evaporándose y absorbiendo calor del interior, manteniendo el agua fresca.

A lo largo de esta unidad didáctica vamos a ver cómo se reproduce artificialmente este proceso natural mediante una máquina frigorífica. Y habrá varias diferencias, pero la esencia termodinámica es la misma.



Termorregulación cutánea (CC0)



Materiales formativos de FP Online propiedad del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

[Aviso Legal](#)

1.- La producción de frío por compresión.

Caso práctico: ¿un buen invento o un disparate?

La máquina más frecuente para producir frío es el frigorífico. Aunque debiéramos aclarar que el frío no existe, sino la existencia de más o menos calor. Cualquier cuerpo por encima de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiene energía térmica (es decir, todos los cuerpos que nos rodean). Pues bien, deseamos refrigerarnos en nuestra casa y se nos ha ocurrido el siguiente invento: utilizar un frigorífico viejo que no usamos e introducir un ventilador dentro, dejando la puerta abierta. Para ello vamos a realizar un experimento en el que deseamos averiguar la temperatura a la que podemos refrescar la habitación que está inicialmente a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, al conectar frigorífico y ventilador.

A lo largo de esta unidad intentaremos resolver este problema.



¿Invento o disparate?

1.1.- Condensación de gases.

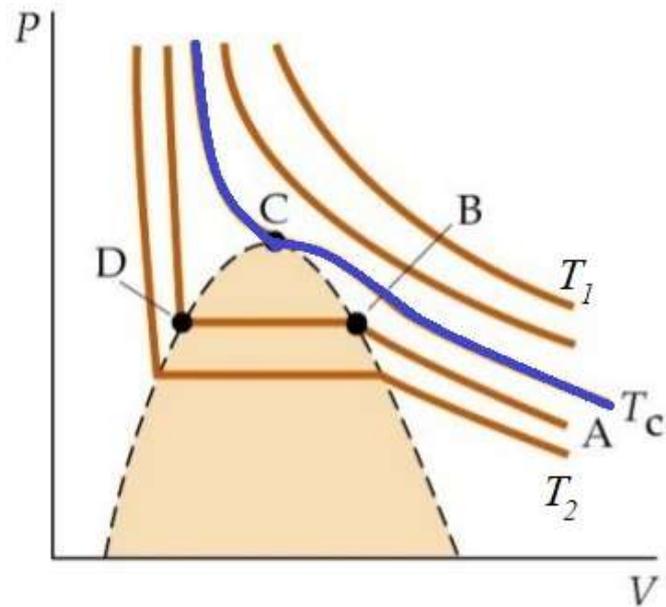
Como ya se ha visto, el proceso por el cual un gas se convierte en líquido se llama **condensación** (por disminución de temperatura) o **licuación** (por aumento de presión) y todos los gases se pueden licuar o condensar. Se denomina temperatura crítica a la temperatura límite para la condensación de un gas. Por encima de esta temperatura es imposible condensar un gas, aunque se le someta a enormes presiones. Se llama presión crítica, a la presión que se necesita para licuar un gas cuando éste se encuentra en su temperatura crítica. En la siguiente tabla pueden verse las temperaturas y presiones críticas de algunos gases.

Temperaturas y presiones críticas

	T. Crítica (°C)	P. Crítica (bar)
H₂	-240	13
N₂	-147	34
O₂	-119	50
CO₂	31	73
R134A	101	40
NH₃	132	112

En el gráfico siguiente puede verse el comportamiento de un gas determinado, que es sometido a presiones crecientes. Las líneas marrones representan el comportamiento de ese gas a diferentes temperaturas, son por lo tanto líneas isotermas. La T_1 es la más elevada y no permite la licuación del gas aunque aumentemos su presión. El gas a esa temperatura se comporta como un gas ideal y sigue las leyes termodinámicas estudiadas.

Si descendemos la temperatura se llega a T_c que es la temperatura crítica. Por debajo de esa temperatura el gas puede ser licuado. A una temperatura T_2 , inferior a la crítica, la isoterma ABD se puede descomponer en tres regiones. Vamos a estudiar esa isoterma de derecha a izquierda. A la derecha de la campana color crema, es un gas que si se comprime (aumenta la presión), disminuye su volumen. Al llegar a la campana comienza a condensarse. A partir de ese punto y hasta que llegue al otro extremo la condensación se hace a presión y temperatura constantes, como hemos visto en los cambios de estado. En el interior de la campana tenemos una mezcla de gas y líquido. Cuanto más a la derecha estamos, la proporción de gas es mayor, mientras que hacia la izquierda es menor y hay más líquido. A la izquierda de la campana el gas ya se ha licuado completamente, y al ser líquido es incompresible: un aumento de la presión apenas reduce el volumen. La campana crema a trazos se ha obtenido experimentalmente uniendo todos los puntos que se generan a diferentes temperaturas.



[Andrews](#). *Isotermas de Andrews*

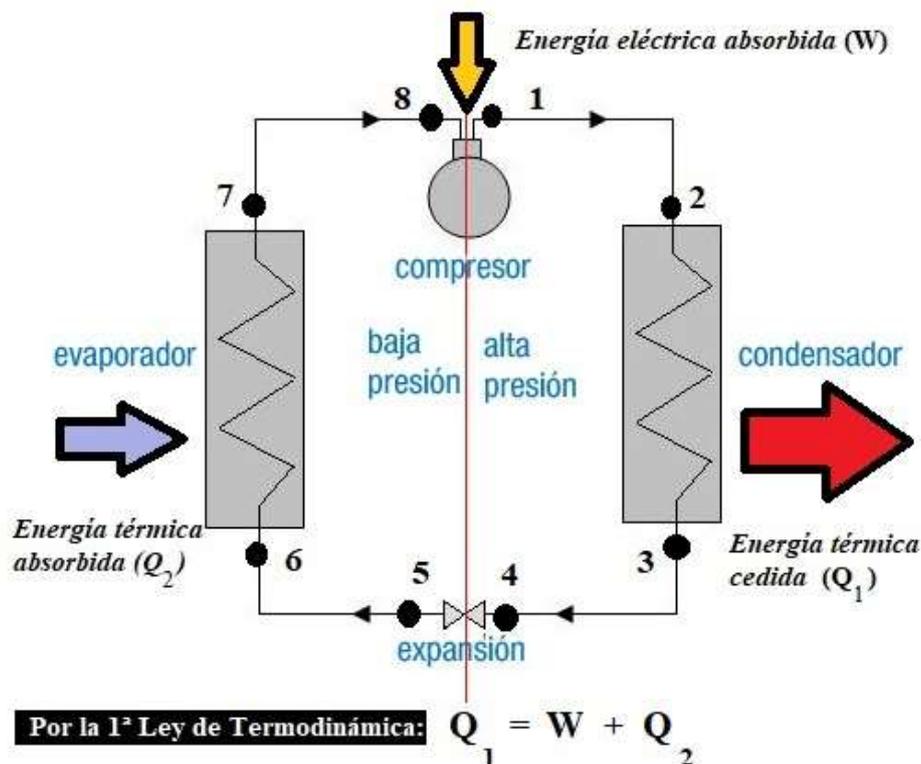
Hay varios sistemas de producción de frío, basados en los cambios de estado de un refrigerante, pero los dos más importantes son:

- Ciclo de refrigeración por compresión. Son más del 90% de las instalaciones.
- Ciclo de refrigeración por absorción.

1.2.- La máquina frigorífica de compresión.

La **refrigeración** se define como el proceso de **reducción y mantenimiento de la temperatura de un espacio o materia por debajo de la temperatura del entorno**. Para poder reducir la temperatura, es necesario extraer el calor contenido en el espacio o materia que deseamos refrigerar, y para extraer el calor de un cuerpo es necesario la presencia de otro cuerpo más frío (temperatura inferior) que absorba el calor que deseamos eliminar, ya que el calor siempre fluye del cuerpo más caliente hacia el cuerpo más frío. El cuerpo que se utiliza para absorber el calor que deseamos eliminar se llama refrigerante. **Un refrigerante es un calorífero que desplaza el calor de un espacio que se debe refrigerar, hacia el exterior**. Es el fluido operante en el ciclo de refrigeración. Cada vez que el refrigerante completa un ciclo, sufre dos cambios de estado, se evapora y se condensa, estos dos cambios de estado son necesarios para poder desplazar el calor del espacio que deseamos refrigerar hacia el exterior.

Por lo tanto, **un equipo frigorífico extrae calor de un foco frío y lo entrega a un foco a una temperatura más alta**. Los equipos frigoríficos de compresión, básicamente utilizan cuatro componentes: un compresor, un condensador, un dispositivo de expansión y un evaporador. El calor se extrae en el evaporador y se cede al condensador. El trabajo mecánico lo aporta el compresor que funciona mediante energía eléctrica. El siguiente circuito esquematiza este funcionamiento:



Representación simplificada de máquina frigorífica

Por el interior de las tuberías circula un fluido frigorífero que es el medio que transporta el calor, análogamente a como lo hace el agua en una instalación de calefacción o el aire en una instalación de aire acondicionado. Para realizar la operación, el fluido trabaja a dos presiones diferentes. Como puedes ver en la figura, una parte de la instalación está a alta presión y la otra a baja.

Como viste en la UT1 de este módulo: Aplicación de la Termotecnia, la temperatura de ebullición depende de la presión. A menor presión menor es la temperatura de ebullición. El fluido que se utiliza tiene un punto de ebullición a la presión y temperatura de la parte de baja presión que lo hace idóneo para refrigerar. Dependiendo de la temperatura (para congelación o para conservación) que necesitemos en la parte frigorífica, utilizaremos un fluido adecuado para ese uso. Aunque más

adelante vas a estudiar en profundidad el ciclo frigorífico este es un buen momento para un primer contacto con el proceso que se da en el mismo. Fíjate en la figura numerada.

Partiremos del compresor. En él, el gas que le llega de 8 es comprimido, lo que hace que aumente su presión y temperatura. En 1 tenemos, entonces, un gas caliente a alta presión. Por la tubería se dirige a la entrada del condensador. Para tu referencia, en el caso del frigorífico doméstico es la parrilla que se encuentra detrás. El condensador hace que ese gas ceda calor y se enfríe hasta su temperatura de condensación y se convierta en líquido. A la salida en 3 se trata de un líquido a alta presión. El líquido, a alta presión, llega al dispositivo de expansión 4. Este dispositivo, puede ser de distintos tipos, como verás más adelante, pero su función es la de bajar la presión del fluido mediante una expansión. Eso produce una bajada inmediata de la temperatura del fluido. Recuerda que la temperatura de ebullición depende de la presión, y al disminuir ésta, la nueva temperatura de ebullición es mucho menor que la anterior. El líquido frigorígeno estaría a una temperatura superior a la de ebullición a esa nueva presión, pero como eso no es posible, se evapora parcialmente para disminuir la temperatura hasta adecuarla a la nueva presión. Ese fenómeno se denomina evaporación flash. A la salida del dispositivo, en 5, tenemos, por lo tanto, una mezcla de líquido y gas a baja presión. La mezcla entra en el punto 6 en el evaporador. Para tu referencia, ese es el circuito que está dentro del frigorífico, enfriando su contenido. En el evaporador el fluido coge calor del contenido de la cámara frigorífica y hierve, pasando todo el líquido a gas. A la salida del evaporador, en 7, tenemos un gas a baja presión y baja temperatura. El gas a baja presión llega a 8. Desde el punto 7 al punto 8 se ha calentado un poco más para asegurarnos de que al compresor no le llegue nada de líquido, ya que sería causa de avería. El ciclo comienza de nuevo al aumentar la presión y la temperatura del gas en el compresor.

Esta serie de procesos se denomina ciclo de refrigeración. El ciclo de refrigeración simple se compone de los cuatro procesos fundamentales:

- Expansión.
- Evaporación.
- Compresión.
- Condensación.

<https://www.youtube.com/embed/RiO3ZeG08KE>

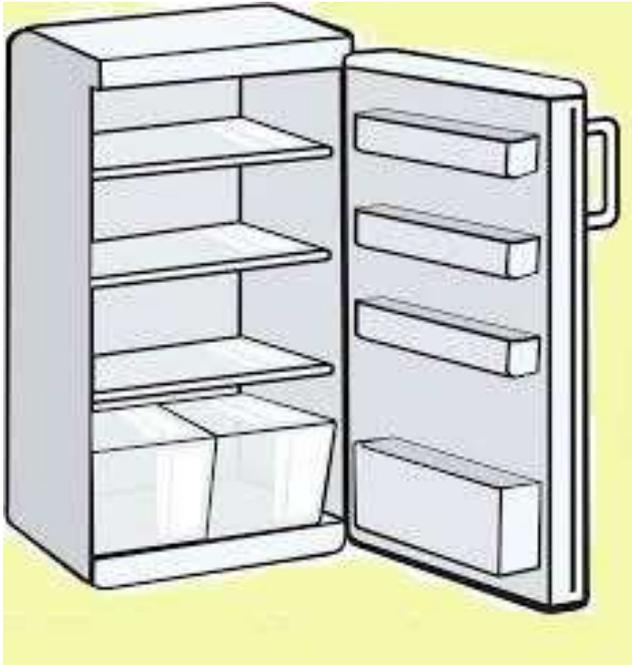
Máquina frigorífica elemental

Ejercicio Resuelto

Valorar la idea mostrada en el caso práctico planteado al inicio de esta unidad.

<https://giphy.com/embed/FzpNPTpiDpsmk>

[GYPHi](#)



Mostrar retroalimentación

El análisis lo vamos a hacer desde tres puntos de vista, el energético, el de confort y el de eficiencia.

Punto de vista energético. Aplicaremos el Primer Principio de la Termodinámica, o lo que es lo mismo, haremos un balance energético de este sistema. Para ello, definiremos todas las temperaturas y energías/potencias puestas en juego:

T_1 : Temperatura detrás del frigorífico y cerca del condensador

T_2 : Temperatura justo delante del frigorífico

T_3 : Temperatura a cierta distancia del frigorífico, en la trayectoria del aire del ventilador

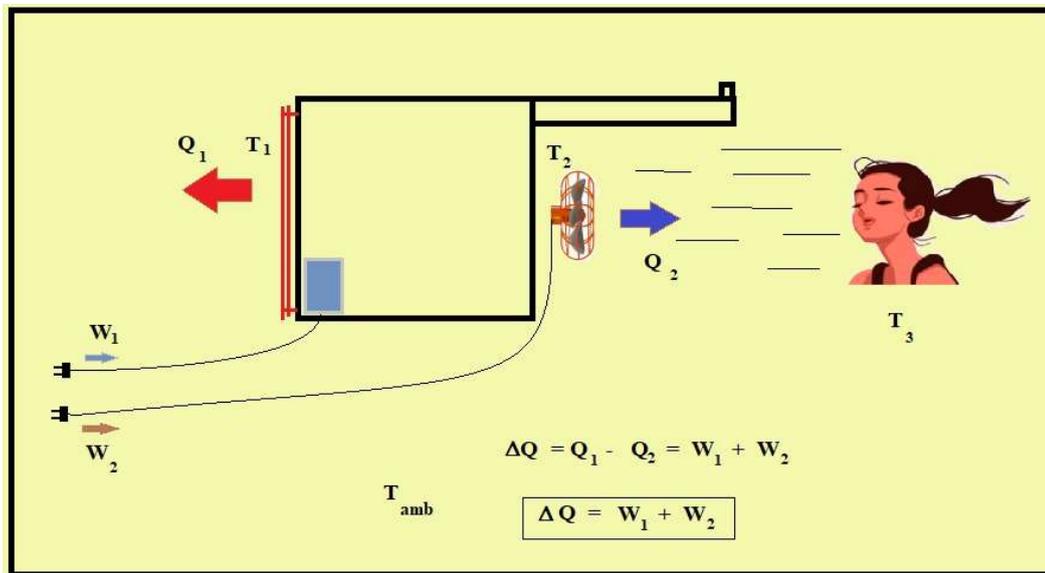
T_{amb} : Temperatura en la habitación, en un punto intermedio

Q_2 : Calor absorbido del interior del refrigerador, con ayuda del evaporador, por lo que se refrescará el aire que el ventilador impulsará al resto de la estancia.

W_1 : Trabajo realizado por el compresor del frigorífico para extraer el calor de su interior y expulsarlo al exterior con ayuda del condensador.

Q_1 : Calor expulsado por el condensador

W_2 : Trabajo realizado por el ventilador para extraer el aire frío del interior del frigorífico y expulsarlo al exterior



Como podemos ver en el dibujo, aplicando la primera Ley de la Termodinámica, el calor neto (positivo) que gana la habitación hace que la temperatura ambiente media aumente, en lugar de disminuir. **La suma de la potencias del compresor y del ventilador serían equivalentes a la potencia de un pequeño radiador**, que calentara la estancia. Para frigoríficos y ventiladores de tipo medio, podríamos calcular que esta potencia ascendería al menos a 400 W.

En resumen, podemos establecer la siguiente relación:

$$T_1 > T_2 > T_3 > T_{\text{amb}}$$

Punto de vista del confort. Sin embargo, el frigorífico, con ayuda de la energía del compresor, ha "ordenado" térmicamente las temperaturas, poniendo altas temperaturas en la parte trasera del frigorífico y bajas temperaturas en su interior. La colocación de un ventilador en su interior facilita el que haya temperaturas más bajas cerca de la puerta abierta. Es prácticamente la misma situación de confort que tenemos cuando disponemos solo de un ventilador, ya que a pesar de que la potencia del ventilador aumenta la temperatura global de la habitación, el estar cerca del mismo nos facilita la evaporación corporal y, consecuentemente, tenemos una mejor sensación térmica.

Punto de vista de la eficiencia. En este caso, no parece muy razonable este invento, ya que el consumo energético puede resultar elevado en comparación con un beneficio local muy cuestionable. Además, los frigoríficos están preparados para funcionar con la puertas cerradas y que el compresor trabaje durante una parte del tiempo. En este caso, el compresor estaría funcionando continuamente y con bastante seguridad, acabaría estropeándose. Y, por supuesto, la temperatura global de la habitación aumentaría y al cabo del día, nada más desconectar los aparatos, la temperatura se homogeneizaría y veríamos que sería algunos grados por encima de si no hubiéramos colocado este sistema. Es algo parecido a cuando se apaga un ventilador, el calor resulta más agobiante.

Autoevaluación

1.- ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta?

- El refrigerante está en fase líquida a la entrada del compresor.
- En la expansión el refrigerante se enfría.

- En la expansión el refrigerante aumenta su presión.
- Ninguna de las anteriores opciones es correcta

No es correcta, es causa de avería si entra líquido.

Correcto, se enfría hasta la temperatura de ebullición a la nueva presión.

Incorrecto, lo que hace es disminuir la presión.

Incorrecto

Solución

1. Incorrecto
2. Opción correcta
3. Incorrecto
4. Incorrecto

2.- El compresor de un frigorífico absorbe 300 W de la red eléctrica y el evaporador tiene una capacidad de absorción de 600 W. Por lo tanto, el condensador cederá una potencia térmica al ambiente de ...

- 300 W
- 450 W
- 900 W
- Ninguna de las anteriores opciones es correcta

Incorrecto

Incorrecto

Opción correcta

Incorrecto

Solución

1. Incorrecto
2. Incorrecto
3. Opción correcta
4. Incorrecto

3.- El condensador de un frigorífico ...

- Está en la parte de baja presión
- Tiene líquido a baja presión
- Está en el interior de la cámara frigorífica
- Ninguna de las anteriores respuestas es correcta

Incorrecto

Incorrecto

Incorrecto

El condensador está en la parte de alta presión y está en el exterior de la cámara o frigorífico

Solución

1. Incorrecto
2. Incorrecto
3. Incorrecto
4. Opción correcta

4.- El agua no es un buen refrigerante para frigoríficos porque ...

- Su temperatura de ebullición es demasiado baja

- Su temperatura de ebullición es demasiado alta y se hiela a 0 °C
- El agua oxida la tuberías de cobre
- Ninguna de las anteriores respuestas es correcta

Incorrecto

Así es

Incorrecto

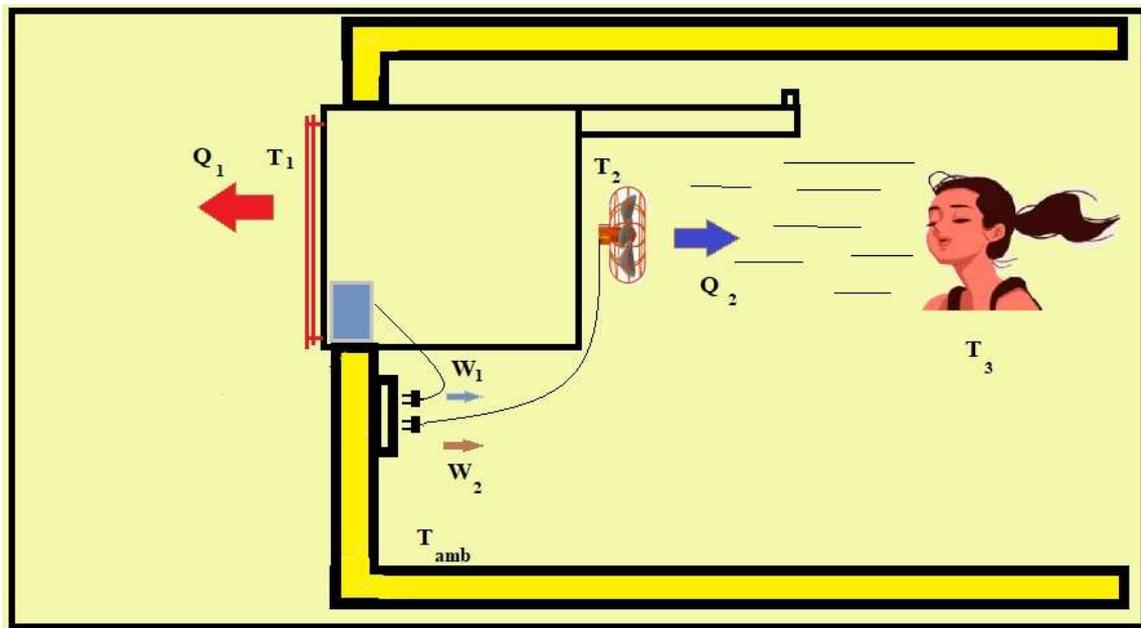
Incorrecto

Solución

1. Incorrecto
2. Opción correcta
3. Incorrecto
4. Incorrecto

Ejercicio para Resolver

Realiza un análisis similar al del ejercicio resuelto anterior, pero si colocáramos la parte del frigorífico con la rejilla del condensador en el exterior, tal como se aprecia en el dibujo.



Mostrar retroalimentación

En este caso, lo que hemos realizado es un pequeño aparato de acondicionamiento de aire. Y, aunque tecnológicamente no es la instalación que quisiéramos para nuestra casa, funcionaría y tendría cierta eficiencia. El mayor problema, además del estético, es que la máquina frigorífica tiene poca potencia y estaría funcionando de forma continua, pudiéndose estropear el equipo.

1.3.- El diagrama de Mollier. Concepto

En los cálculos que hay que realizar en una instalación frigorífica intervienen varias fórmulas matemáticas y tablas de datos. El ingeniero alemán Richard Mollier (1863-1935) elaboró un diagrama que permite hacer todos esos cálculos en forma gráfica, facilitando así el cálculo.

El diagrama de Mollier, también conocido como diagrama presión entalpía (p-h), es la representación gráfica de los estados posibles de los refrigerantes en un gráfico con escala logarítmica de presión en ordenadas y de escala de entalpía en abscisas. La forma de campana es semejante a la que has visto para el diagrama P-V (también llamado diagrama de Andrews).

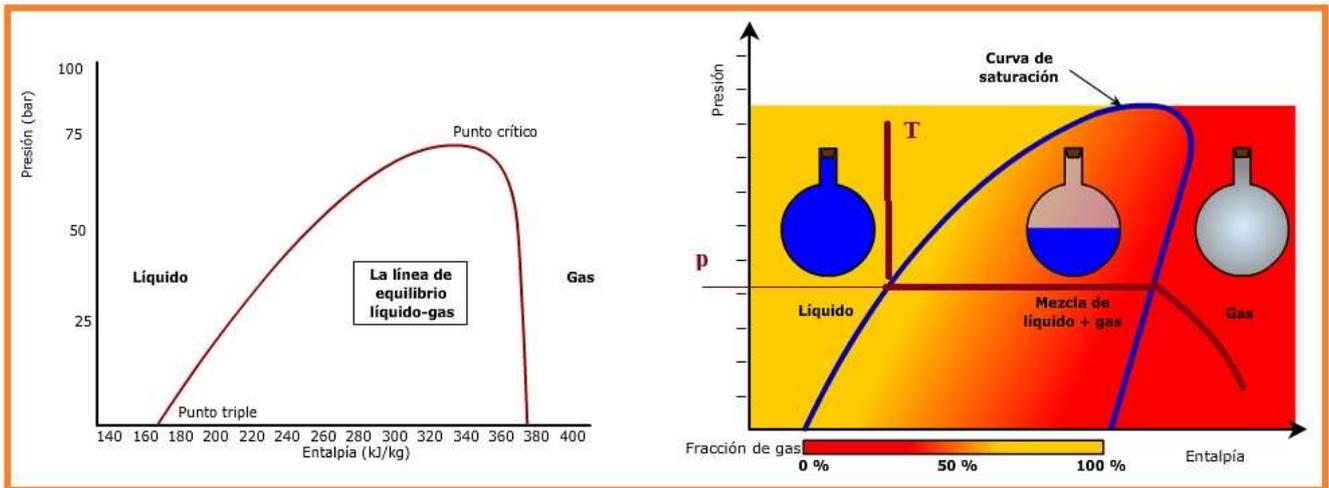
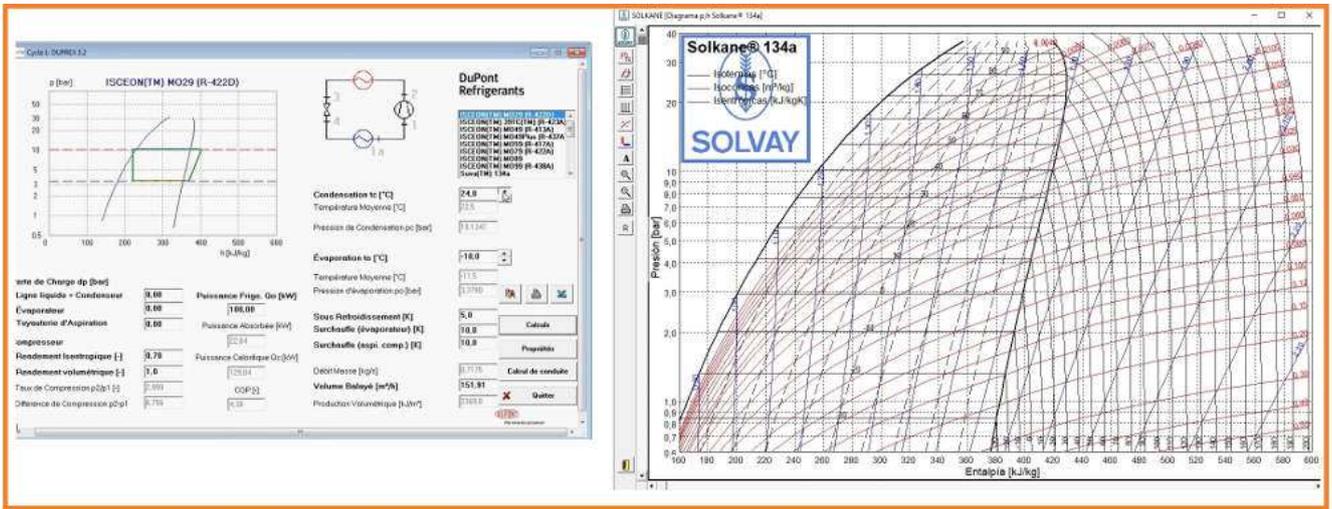


Diagrama de Mollier simplificado

Hay que recordar el concepto de entalpía, que podríamos simplificar diciendo que es la energía total que tiene un fluido en un determinado punto. Por ello, la diferencia de entalpía entre dos puntos es la energía que ha ganado o perdido un fluido entre esos puntos. Por ejemplo, si a la entrada del condensador el fluido tiene una entalpía de 320 kJ/kg y a la salida tiene 260 kJ/kg, eso significa que ha perdido una energía calorífica de $320 - 260 = 60$ kJ/kg, que es justo el calor cedido al ambiente exterior (Q_1).

El diagrama de Mollier ha sido trasladado a software por diferentes empresas, entre las que encuentran algunos fabricantes de refrigerantes y distintas asociaciones profesionales: Dupont, Solvay, ...



Dupont, Solvay, Ashrae. Programas de cálculo refrigerantes (Todos los derechos reservados)

Los cálculos y estudios de máquinas frigoríficas pueden hacerse analíticamente mediante las fórmulas que relacionan las distintas variables, pero también pueden hacerse gráficamente de forma más rápida y visual. Finalmente, los nuevos programas informáticos han integrado todo ello en software. Algunos de estos programas los veremos más adelante. Igualmente, en Internet puedes encontrar diagramas para los distintos fluidos frigorígenos elaborados por los fabricantes como el de la imagen, para el refrigerante R134A:

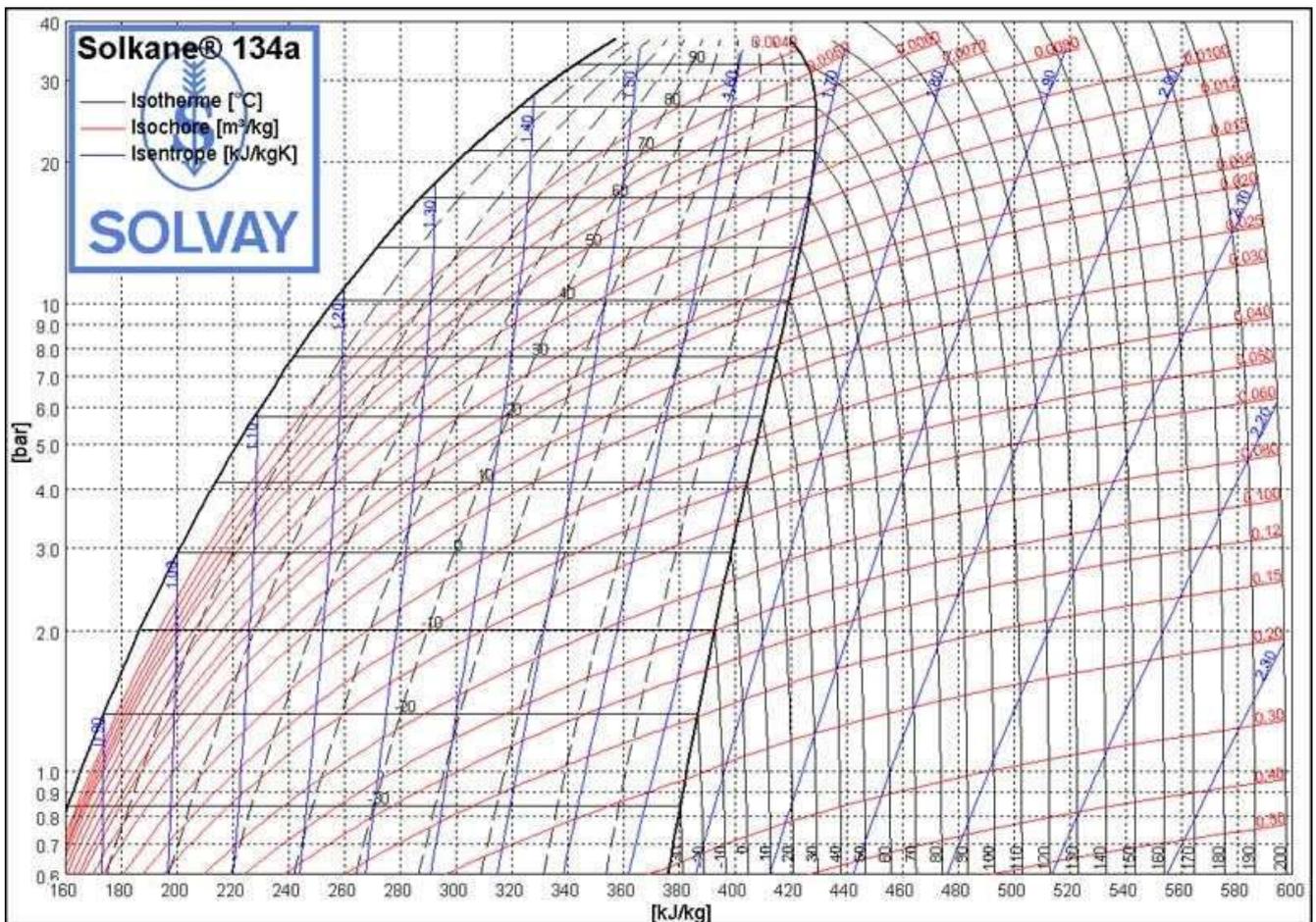


Diagrama de Mollier del refrigerante 134a de Solvay (Todos los derechos reservados)

Los fabricantes publican en sus web diagramas de Mollier para los distintos refrigerantes e incluso programas de cálculo como el que se tratará más adelante, de la empresa

Solvay y que puede descargarse en el enlace adjunto.

[SOLKANE - SOLVAY](#)

1.4.- El diagrama de Mollier. Análisis

Como has visto el diagrama de Mollier tiene muchas más líneas que las de los dos ejes de Presión y Entalpía. Vamos a ver todas ellas al detalle. Puedes ver este vídeo de introducción para, posteriormente, analizar en mayor detalle las distintas líneas del diagrama.

<https://www.youtube.com/embed/Cz9GjI8QFr4>

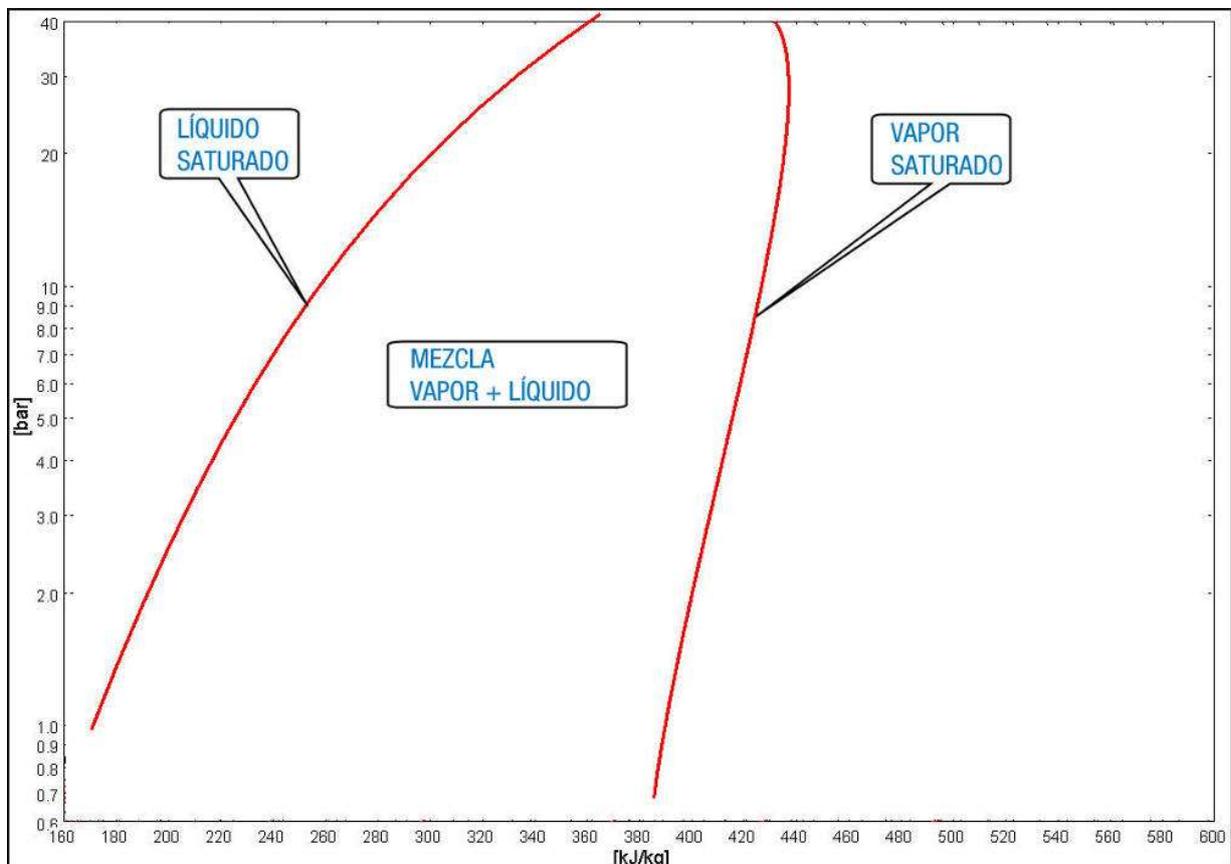
Análisis de parámetros mediante el diagrama de Mollier

[Curva de saturación](#) [Temperaturas](#) [Títulos](#) [Volumen específico/Densidad](#)

[Entropía](#)

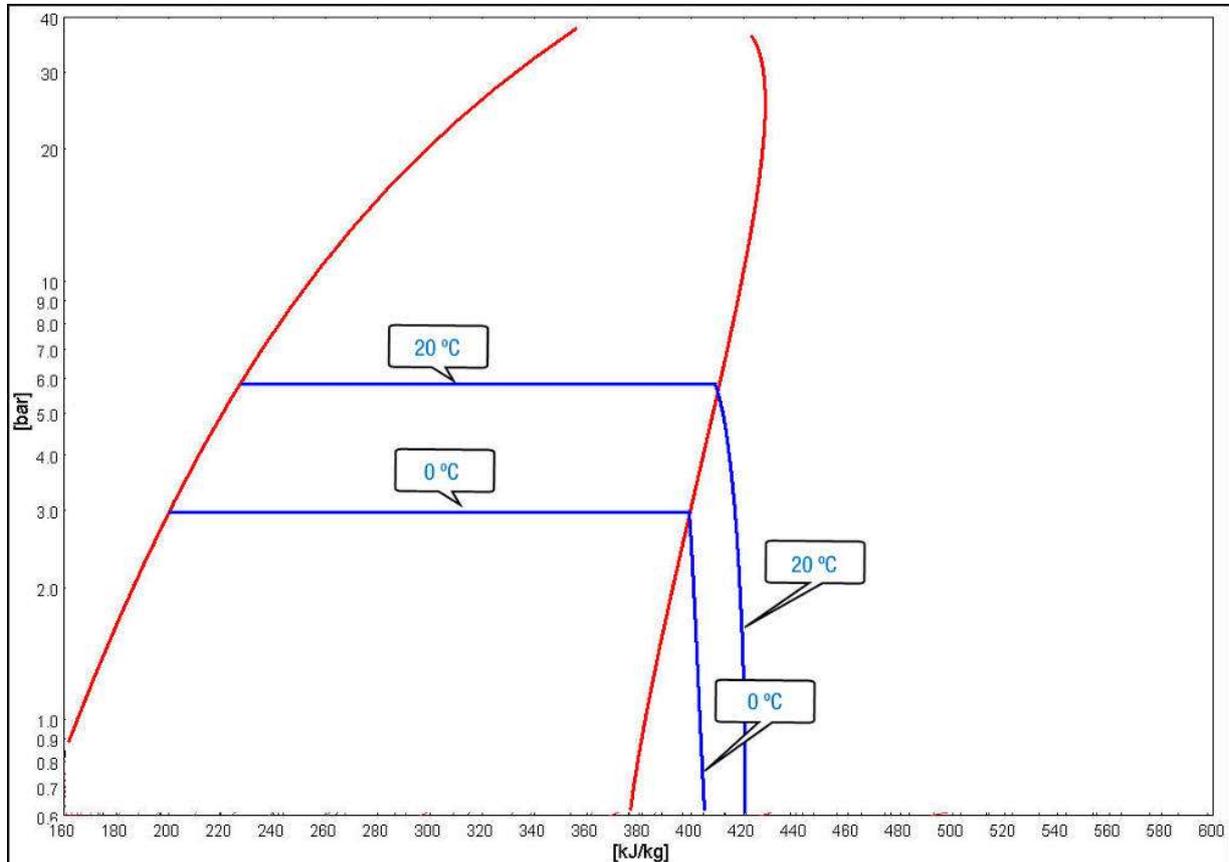
Curva de saturación

En primer lugar tenemos que fijarnos en las coordenadas. Como has visto antes en ordenadas tienes las presiones en escala logarítmica. Es importante que tengas en cuenta que la presión indicada es la absoluta. En abscisas tienes los valores de la entalpía. Además, como ya hemos explicado, dentro del diagrama tenemos la figura de una campana, que no es otra cosa que los puntos de saturación. Esta curva, como se ha visto, separa las tres zonas: líquido, mezcla y vapor.



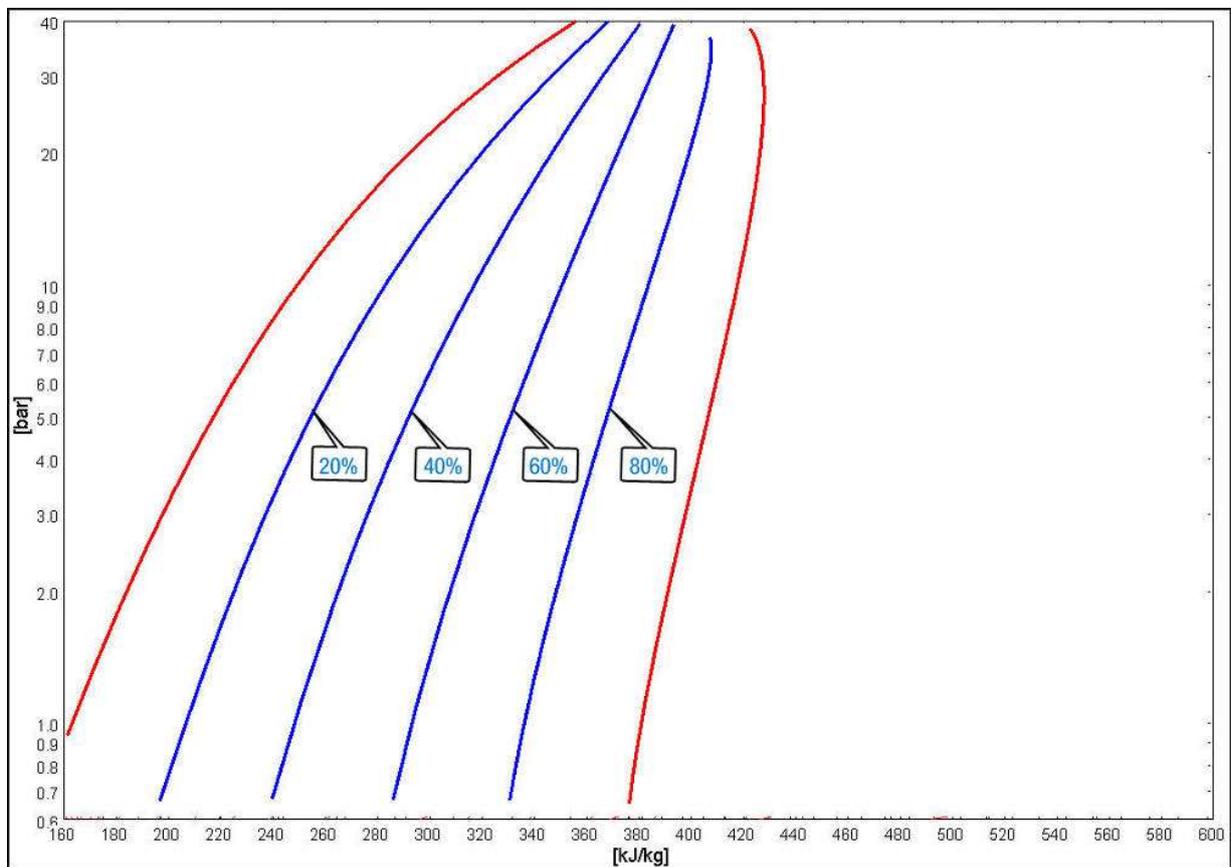
Temperaturas

Otras líneas representadas son las líneas de temperatura, también llamadas isotermas. En la zona de líquido se aproximan mucho a la vertical, y no se suelen representar en el diagrama. En la zona de líquido-vapor las líneas son horizontales. Se superponen a la isóbara correspondiente debido a que el cambio de fase se hace a una temperatura y presión constante. En la zona de vapor, las isotermas descienden de forma asintótica.



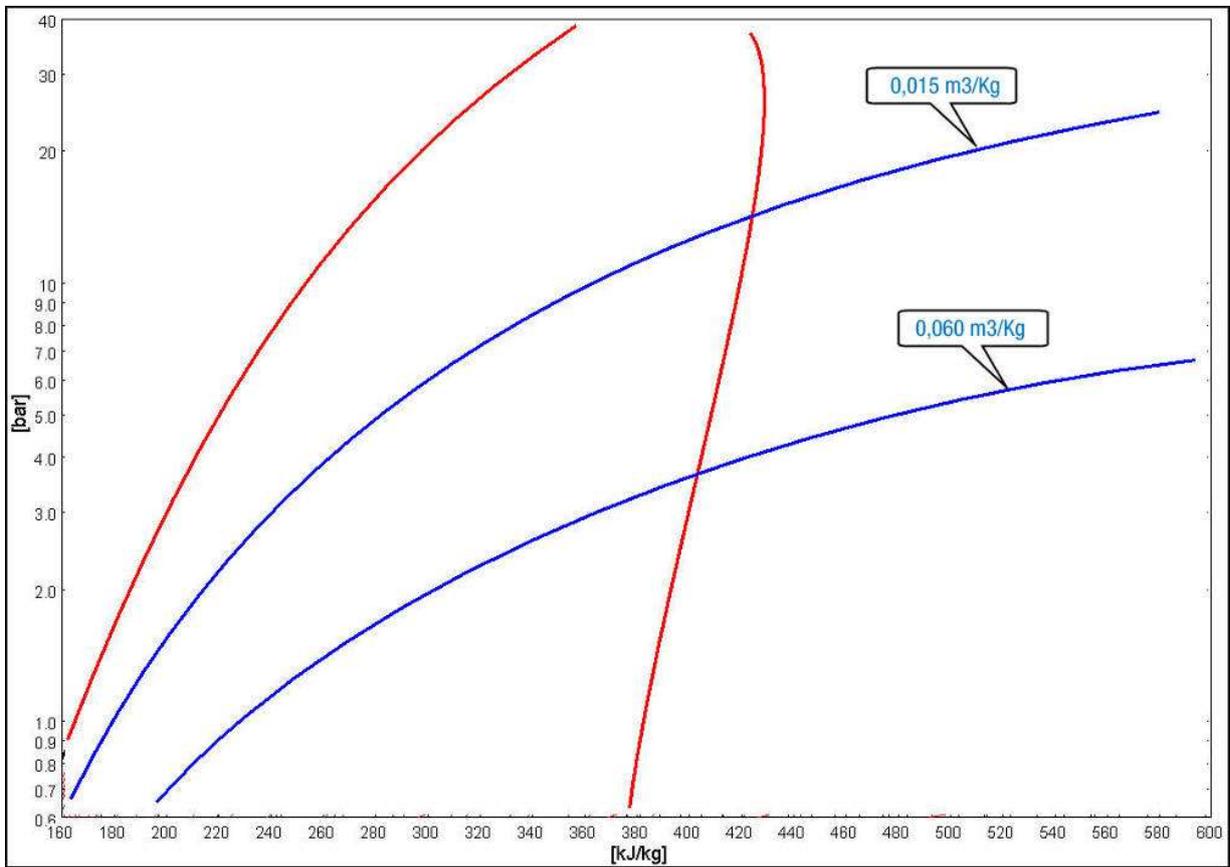
Títulos

Dentro de la zona mixta hay otras líneas que nos van a permitir conocer el porcentaje de vapor con respecto al total del fluido, llamado título (X). Los puntos de mezcla en ebullición que tienen el mismo título (X) quedan unidos por líneas que descienden desde el punto crítico.



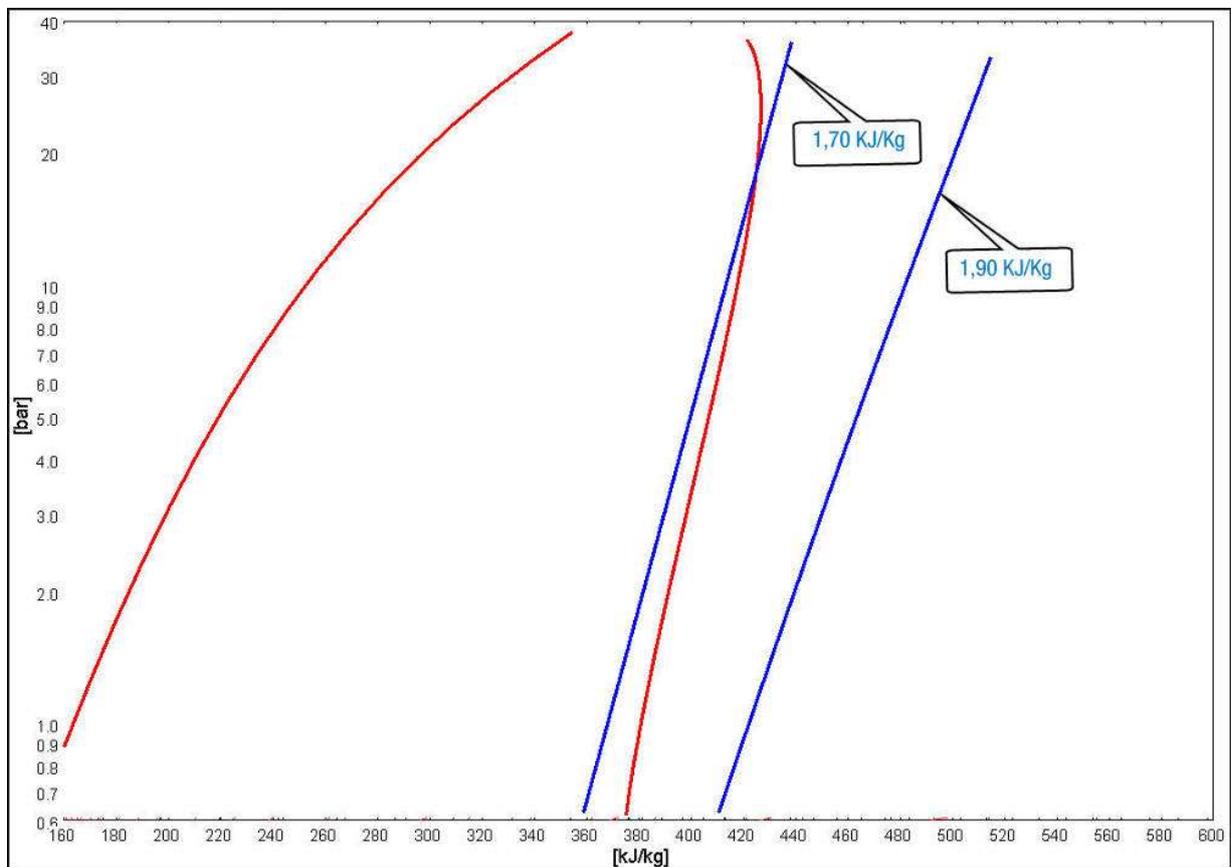
Volumen específico/Densidad

Tenemos las líneas de volumen específico o de densidad. En algunos diagramas dan el volumen específico en m^3/kg y en otros casos son densidades en kg/m^3 . Obviamente, un valor es inverso del otro, es decir la densidad es la inversa del volumen específico y viceversa.



Entropía

Las líneas de entropía, S , son las que seguirán la compresión del fluido en el compresor si suponemos que el proceso es adiabático, aunque en los procesos reales sabemos que la entropía crece, por lo que los ciclos tendrán una inclinación algo mayor.



Ejercicios Resueltos

1.- Determinar los siguientes puntos en el diagrama de Mollier del refrigerante R-134a y determinar si está en estado líquido, mezcla o gas (todas las presiones son relativas)

- Entalpía 200 kJ/kg, presión 2 bar
- Entalpía 300 kJ/kg, presión 5 bar
- Entalpía 420 kJ/kg, presión 9 bar
- Temperatura 45 °C, entalpía 340 kJ/kg
- Presión 300 kPa, temperatura 30 °C
- Densidad 70 kg/m³, entalpía 400 kJ/kg
- Presión 1,9 MPa, densidad 120 kg/m³

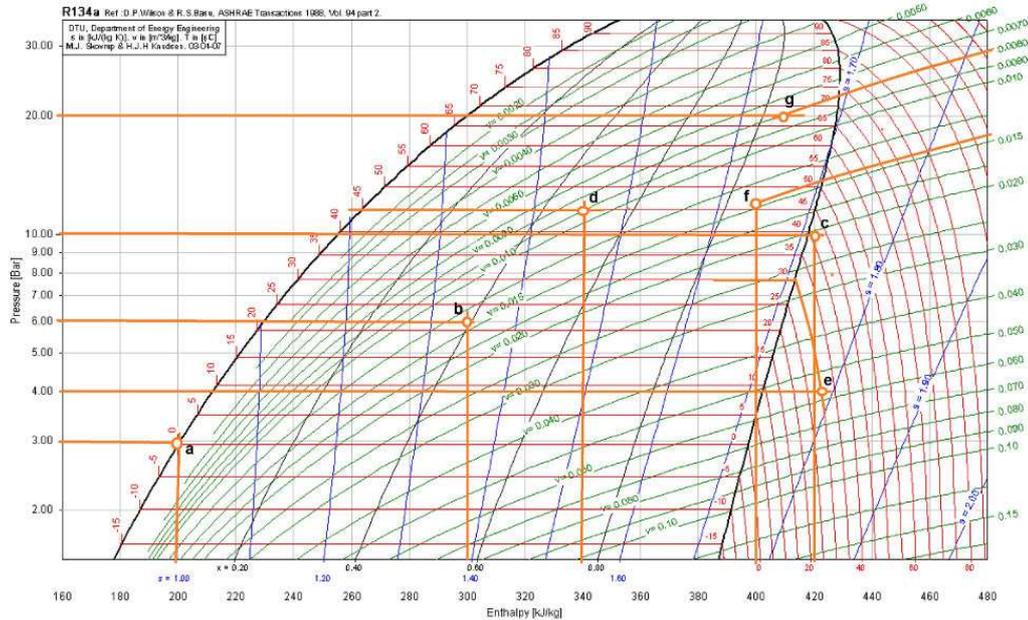
Diagrama de Mollier del R-134a

Mostrar retroalimentación

En el gráfico siguiente vemos los puntos pedidos. Hay que tener en cuenta que las presiones son las absolutas y las dadas son manométricas (relativas), por lo que hay que sumar, aproximadamente 1 bar a cada una de ellas. También hay que tener en cuenta que conocemos las densidades del refrigerante, mientras que en el gráfico tenemos los volúmenes específicos. Eso significa que debemos calcular la inversa del dato dado.

Una vez situados los puntos, el estado del refrigerante en cada uno de ellos es:

- a) Líquido saturado
- b) Mezcla de vapor y líquido
- c) Vapor ligeramente sobrecalentado
- d) Mezcla de vapor y líquido
- e) Vapor sobrecalentado
- f) Mezcla de vapor y líquido
- g) Mezcla de vapor y líquido



2.- Averigua el título de cada uno de los puntos anteriores situados en la zona de mezcla

Mostrar retroalimentación

De forma aproximada e interpolando, podemos ver que los títulos son:

Punto b: $x = 0,40$

Punto d: $x = 0,50$

Punto f: $x = 0,87$

Punto g: $x = 0,85$

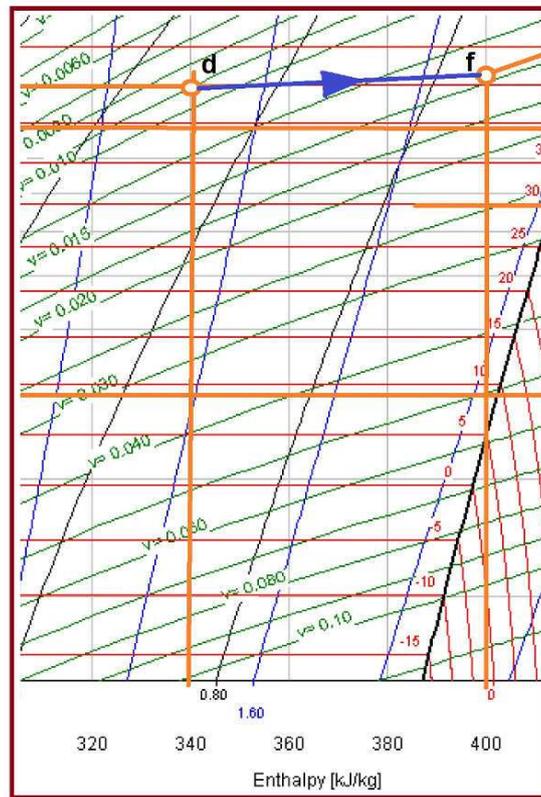
3.- Determina la variación de entropía y entalpía en una transformación de d) a f)

Mostrar retroalimentación

$$\Delta h = h_f - h_d = 400 - 340 = 60 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta s = s_f - s_d = 1,64 - 1,45 = 0,19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

4.- Si el refrigerante ha pasado del estado d) al f) con un caudal de 0,5 kg/s, halla la potencia térmica puesta en juego y determina si ha cedido o ha absorbido calor.



Mostrar retroalimentación

La potencia térmica, como sabemos, es el producto del caudal másico por la diferencia de entalpías, por tanto:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{d-f} = \dot{m} \cdot (h_f - h_d) = 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 30 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 30 \text{ kW}$$

Cuando una máquina térmica absorbe calor, sabemos que es un calor positivo. Por tanto, como cabe esperar, el refrigerante ha absorbido calor. En este caso, al ritmo del caudal másico de 0,5 kg/s, absorbe una potencia de térmica de 30 kW.

Ejercicio para Resolver

Realiza los mismos cuatro ejercicios hechos con el R-134a, pero con el refrigerante R-404A cuyo diagrama de Mollier puedes descargar en el siguiente enlace. Para trazar las líneas de los puntos, puedes copiar la imagen en un programa sencillo, como Paint, y representarlas.

[Diagrama de Mollier del R-404A](#)

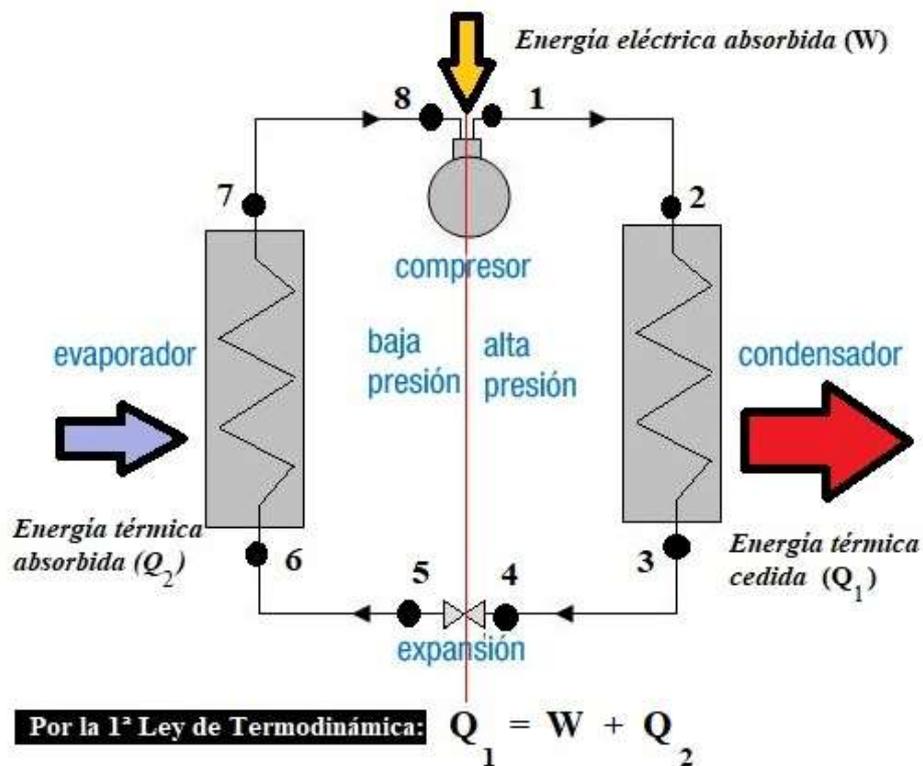
1.5.- El ciclo frigorífico.

Ha llegado el momento de unir los dos puntos anteriores. ¿Cómo encaja el ciclo frigorífico en el diagrama de Mollier?

<https://www.youtube.com/embed/7IngGUazVoM>

Máquina frigorífica y Mollier

Vamos a verlo paso a paso, a partir del circuito frigorífico elemental ya visto.



Máquina frigorífica elemental

Compresión

Condensación

Expansión

Evaporación

Autoevaluación

1.- El recalentamiento del refrigerante tiene por objeto ...

- Eliminar el calor del evaporador
- Bajar la temperatura del condensador
- Asegurarnos de que no entra líquido en el condensador
- Ninguna de las otras opciones es correcta

Incorrecto

Incorrecto

Incorrecto

Así es. El fin del recalentamiento es asegurarnos que no entra líquido en el compresor, ya que al ser incompresible puede estropearlo.

Solución

1. Incorrecto
2. Incorrecto
3. Incorrecto
4. Opción correcta

2.- Con el subenfriamiento conseguimos ...

- Aumentar el rendimiento de la máquina
- Bajar la temperatura de la cámara por debajo del setpoint
- No es conveniente subenfriar, ya que el refrigerante puede congelarse
- Ninguna de las restantes opciones es correcta

Así es, ya que al desplazar la condensación más a la izquierda conseguimos tener más energía de evaporación del refrigerante: aumenta la variación de entalpía

entre la entrada al evaporador y su salida, aumentando la potencia de refrigeración Q_2

No es correcto, ya que la temperatura depende de la capacidad del compresor y de la regulación de los presostatos y termostatos.

Incorrecto

Incorrecto

Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto
3. Incorrecto
4. Incorrecto

3.- Según el diagrama de Mollier, el refrigerante tiene la más alta entalpía a ...

- La salida del evaporador
- La entrada del condensador
- La salida del compresor
- Ninguna de las anteriores opciones es correcta

Incorrecto

Incorrecto

Opción correcta

Incorrecto

Solución

1. Incorrecto
2. Incorrecto
3. Opción correcta
4. Incorrecto

4.- En el diagrama de Mollier podemos calcular las distintas variables representadas ...

- Normalmente, con dos cualesquiera de las reflejadas en el diagrama podemos obtener las restantes
- Necesitamos conocer necesariamente la temperatura
- Necesitamos conocer necesariamente la temperatura y la presión
- Ninguna de las anteriores opciones es correcta.

En muchos casos es suficiente con dos de ellas, aunque no siempre dos valores cualesquiera nos dan un resultado coherente. Por ejemplo, si consideramos un refrigerante con una entalpía elevada e introducimos una título de 0,5, a lo mejor no obtenemos valor alguno, ya que no son valores compatibles. No obstante, si sabemos dos valores reales, podemos obtener el resto.

Incorrecto

Incorrecto

Incorrecto

Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto
3. Incorrecto
4. Incorrecto

1.6.- Balance energético.

Una vez que ya has visto como se comporta un ciclo frigorífico y has aprendido a trasladarlo a un diagrama de Mollier, vamos a utilizarlo para calcular las transferencias de energía que se producen en el proceso. Supondremos que nos encontramos en un ciclo ideal. Más adelante verás como el ciclo real difiere un poco del que estamos estudiando.

El balance energético, no es otra cosa que el estudio del equilibrio entre las energías o potencias entrantes y las salientes. O, de otra manera, la comprobación de la Primera Ley de la Termodinámica: la suma de todas las energías (positivas y negativas) se anulan mutuamente. Para comprenderlo mejor, vamos a aplicar todo ello a los siguientes ejercicios resueltos.

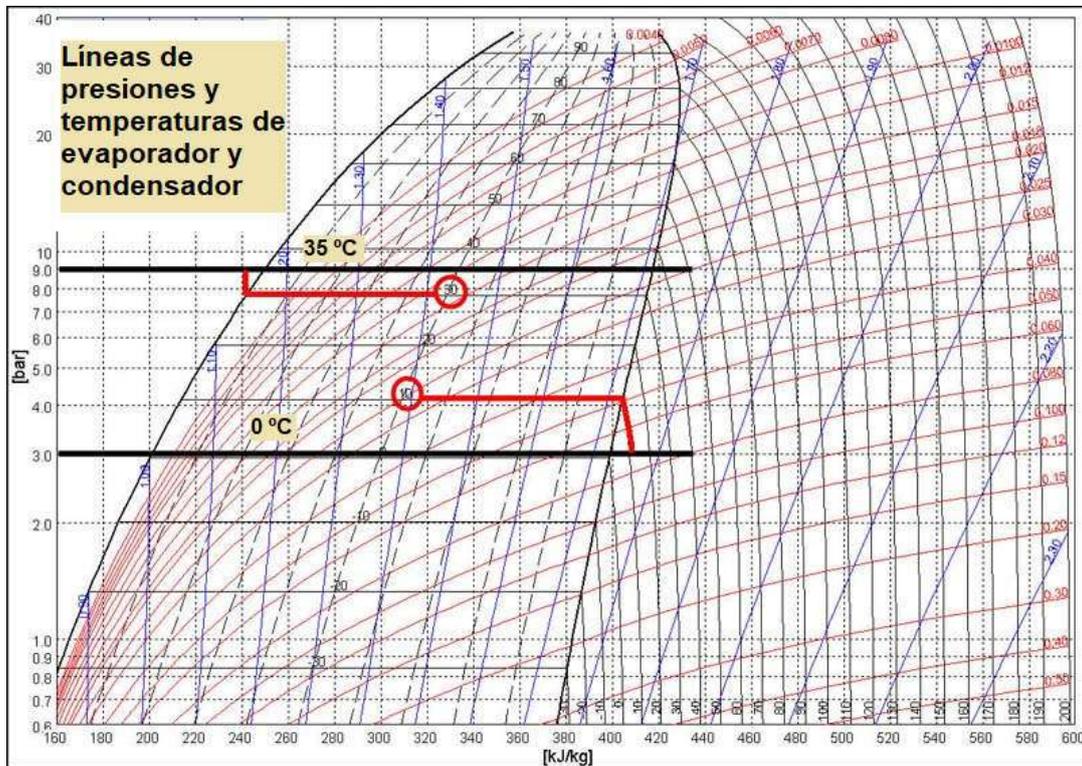
Ejercicios resueltos

1.- Dibujar sobre un diagrama de R134 el ciclo frigorífico de un sistema que tiene una presión manométrica de alta de 8 bar y de 2 bar de baja. La temperatura a la entrada del compresor es de 10 °C y a la entrada al dispositivo de expansión de 30 °C

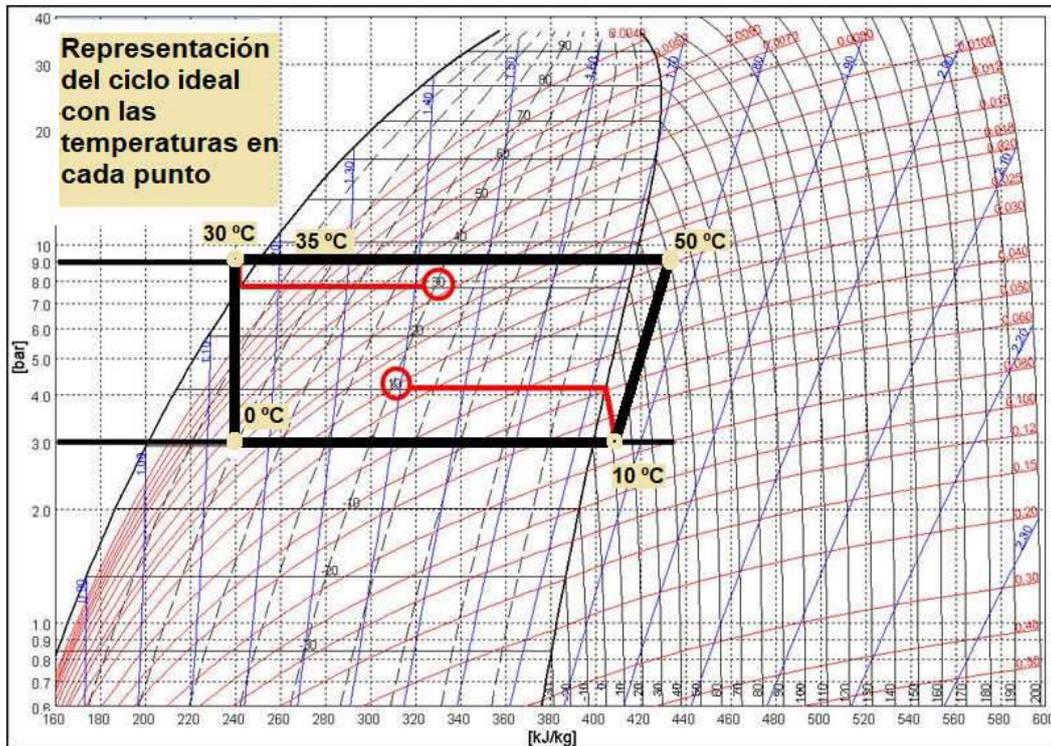
Mostrar retroalimentación

Lo primero que haremos será trazar las líneas de alta y baja presión. Ten cuidado porque en el diagrama se representa la presión absoluta y las que te han dado son manométricas por lo que hay que sumarles la presión atmosférica (aproximadamente 1 bar). La presión de baja es 3 bar absolutos y la de alta 9 bar absolutos.

Para las temperaturas busca la isoterma dentro de la campana y sal de la misma, en vertical para la temperatura del líquido a la entrada de la expansión y siguiendo la curva isoterma para el gas sobrecalentado a la entrada del compresor. Lo tienes en la siguiente figura, en la que vemos que las temperaturas en evaporador y condensador son respectivamente 0 °C y 35 °C:

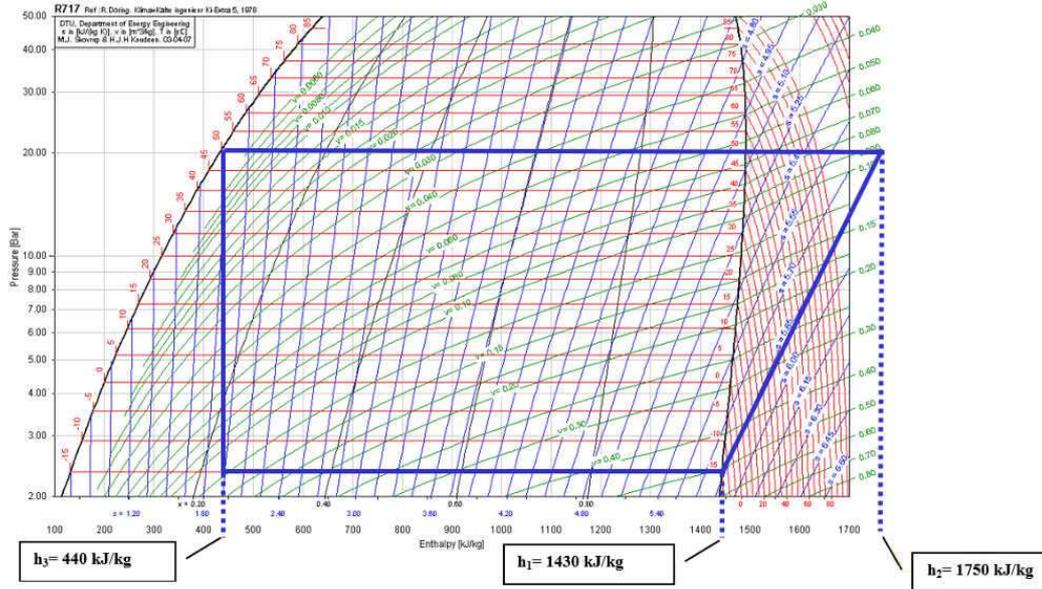


Con esos punto podemos trazar el ciclo frigorífico ideal, ya que en la fase de compresión, si no hay pérdidas de calor (proceso ideal) la entropía permanecerá constante y, por lo tanto, el proceso ocurrirá paralelo a las líneas de entropía. Por otro lado, en el proceso de expansión no hay pérdida o ganancia de energía-entalpía, lo que significa que será una línea vertical:



2.-Tenemos dos máquinas frigoríficas ideales de 1 kW de potencia (sin sobrecalentamiento ni subenfriamiento). Ambas operan entre -15°C y 50°C . Una de ellas funciona con amoníaco como refrigerante (NH_3 y conocido como R-717) y la otra con R-134a. Dibuja los ciclos frigoríficos ideales, calcula el caudal de refrigerante necesario y determina cuál de ellas supone un menor consumo energético.

a) **R-717**. En el caso del amoníaco tendremos:



En un ciclo ideal, sin recalentamiento ni subenfriamiento, tendremos que el calor específico absorbido por el evaporador será:

$$Q_e = h_1 - h_3 = 1\,430 - 440 = 990 \text{ kJ/kg}$$

El caudal de refrigerante, para una potencia de refrigeración de 1 kW será:

$$1 \text{ kW} = \dot{m} \cdot 990 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \rightarrow \quad \dot{m} = 0,00101 \text{ kg/s}$$

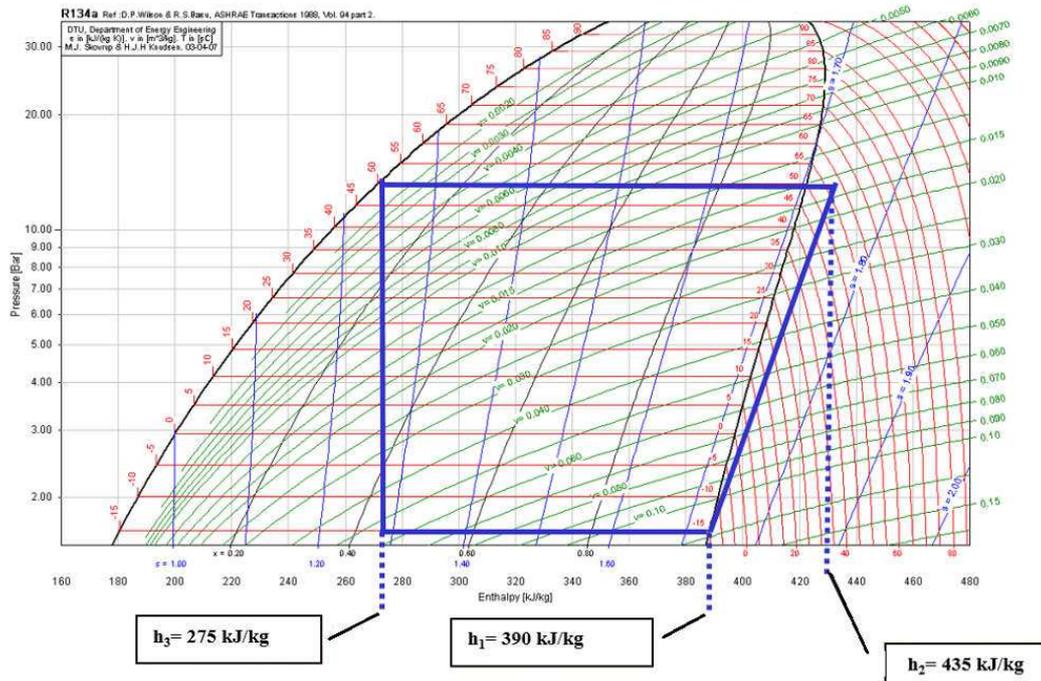
Del mismo modo, el trabajo de compresión, por cada kg de refrigerante será:

$$Q_c = h_2 - h_1 = 1\,750 - 1\,430 = 320 \text{ kJ/kg}$$

Y la potencia del compresor, que es la que realmente gastamos, será:

$$W = \dot{m} \cdot \Delta h = 0,00101 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 320 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0.323 \text{ kW}$$

b) **R-134a**. En el caso de este refrigerante tendremos:



Repitiendo el mismo procedimiento del caso anterior, con los valores representados en el diagrama de Mollier, encontramos que la potencia del compresor será de:

$$W = 0,391 \text{ kW}$$

Como esta potencia es mayor que la del R-717, podemos concluir que hay menor consumo con el amoníaco.

En el ciclo representado en el primer ejercicio resuelto anterior, vamos a calcular el balance energético que se produciría para una potencia frigorífica de 10 kW (Calor absorbido por el evaporador), calculando las potencias puestas en juego en cada etapa,

Calor absorbido por el evaporador

Trabajo aportado por el compresor

Calor cedido por el condensador

Balance energético total

De 2 a 2' pérdidas de carga debido a la tubería de líquido que va del condensador a la válvula de expansión.

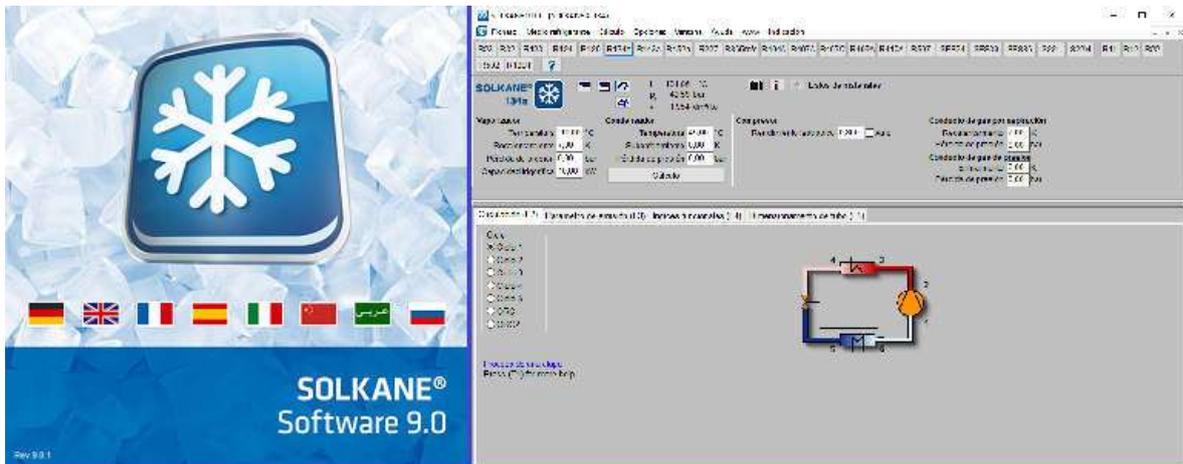
De 3' a 4' pérdidas de carga debido al evaporador.

De 4' a 4" pérdidas de carga debido a la tubería de aspiración y válvula de aspiración del compresor.

De 4" a 1" esta línea ya no es en el ciclo real paralela a las líneas de entropía (isentrópicas), sino que se inclina más a la derecha, ya que hay aumento de entropía en la compresión. La Segunda Ley de la Termodinámica nos dice que en la Naturaleza todos los procesos reales son con entropía creciente, es decir hay pérdidas de calor y no son perfectamente adiabáticos..

Como es evidente tenemos que procurar que las pérdidas de carga sean lo menor posible. Se suele admitir unas pérdidas máximas de 0,10 a 0,20 bar evaporador y condensador y la válvula de expansión se pone lo más cerca posible del evaporador para que la tubería que lleva el líquido a baja temperatura y presión al evaporador, no aumente su temperatura en el trayecto.

Para analizar o configurar instalaciones frigoríficas reales, es necesario utilizar programas informáticos apropiados que ayuden a calcular y visualizar resultados. En este caso, vamos a presentar uno de los más interesantes y conocidos que, además, el fabricante Solvay lo suministra gratuitamente a las personas interesadas:



Cuando se utilizan estos programas, los datos que se introducen son múltiples. Por ejemplo, las pérdidas de carga en las tuberías de líquido o gas de la máquina frigorífica y el rendimiento isotrópico del compresor, como datos más relevantes, además de los ya conocidos de presiones, temperaturas, sobrecalentamiento y subenfriamiento.

Existen puntos donde una caída de presión es necesaria como es el caso de la válvula de expansión, sin embargo, un diferencial de presión en otros componentes no es deseable debido a que dichas pérdidas ocasionarán un consumo energético mayor.

Algunas referencias para estos datos son las siguientes:

Línea de succión. La línea de succión es el segmento del ciclo en donde es más crítica la correcta selección de la tubería ya que toda caída de presión en este trecho obligará a una mayor compresión, afectando directamente a la eficiencia del sistema. La selección de esta línea debe basarse en la caída de presión equivalente a 1 °C tomando como referencia la temperatura de evaporación del sistema que, para cada refrigerante y máquina varía. Esta caída de presión oscila entre 0,15 bar (- 5 °C) y 0,05 bar (- 25 °C). Velocidades típicas para el dimensionamiento de la línea de succión van de los 5 hasta los 10 m/s, siendo que en tramos ascendentes la velocidad nunca deberá de ser menor que 7,5 m/s.

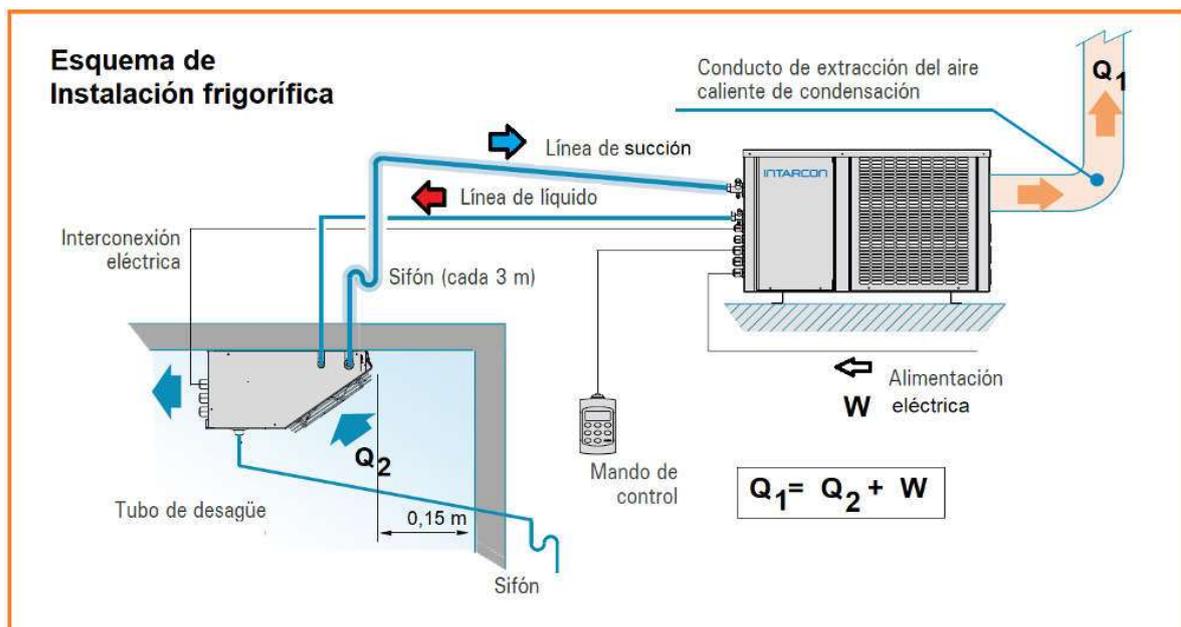
Línea de descarga. En las máquinas frigoríficas de pequeña potencia, la línea de descarga es dimensionada por el fabricante dentro del conjunto de la unidad condensadora. Una unidad condensadora mantiene en un armario el compresor y el

condensador, por lo que la distancia entre ambos es mínima y suele estar ya prefijada. Sin embargo, en las instalaciones frigoríficas industriales el condensador suele situarse a cierta distancia del compresor y es necesario realizar un análisis de la caída de presión. Como regla general, la tubería de estos sistemas debe ser dimensionada para una pérdida de presión no mayor que 0,25 bar. Velocidades típicas para la selección de la línea de descarga van de los 10 hasta 13 m/s.

Línea de líquido. En contraste con las otras líneas, la línea de líquido es un segmento del sistema de refrigeración que no transporta refrigerante en estado gaseoso. Por este motivo la velocidad del fluido no es un factor primordial para el correcto funcionamiento de la instalación ya que el aceite se mezcla completamente con el refrigerante líquido (en estado vapor es más difícil que se mezcle aceite y refrigerante y por eso las velocidades deben ser mayores). Es preciso decir aquí, que por el circuito de vapor de refrigeración circula refrigerante mezclado con un aceite apropiado para que el compresor tenga la lubricación necesaria. Más o menos como el motor de un coche. Los tramos horizontales de la tubería no son un problema en términos de caída de presión, por lo contrario, los segmentos ascendentes necesitan de especial atención. Altas pérdidas de carga en segmentos ascendentes son inevitables, ya que podemos decir que por cada metro de ascensión, perdemos 0,1 bar (ya que el líquido refrigerante tiene, más o menos, la densidad del agua y $1 \text{ m cda} \approx 0,1 \text{ bar}$).

La línea de líquido se proyecta con velocidades inferiores a 1,5 m/s para evitar el fenómeno conocido que hemos visto del **golpe de ariete**, el cual puede presentarse después del accionamiento de válvulas solenoides.

En el siguiente esquema podemos apreciar el circuito de un sistema frigorífico comercial de media potencia.



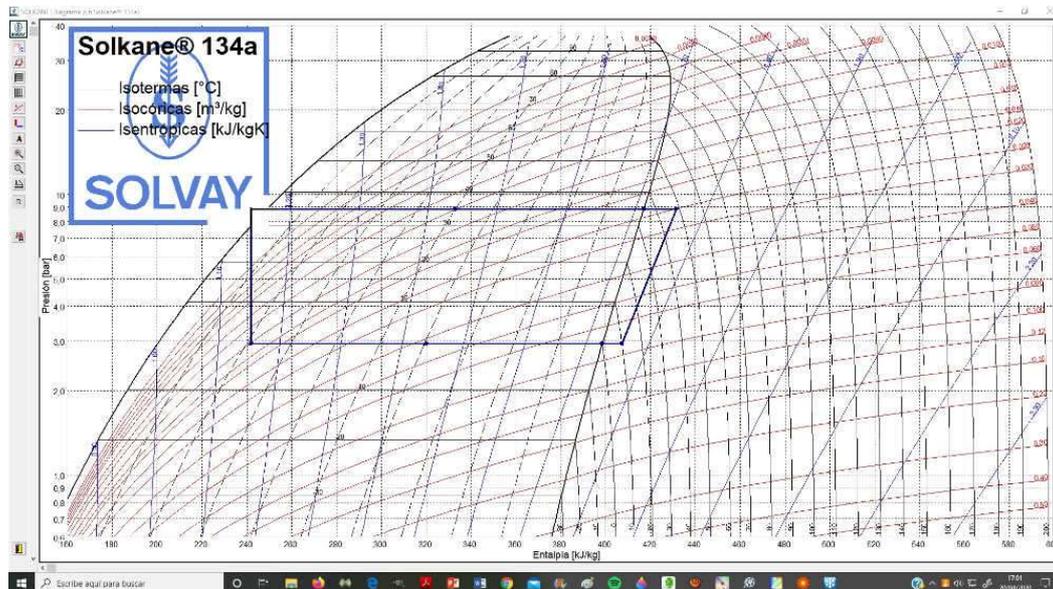
[Intarcon](#). Instalación frigorífica (Todos los derechos reservados)

Ejercicios Resueltos

1.- Dibujar sobre un diagrama de R134a el ciclo frigorífico de un sistema que tiene una temperatura en el condensador de 35 °C. La temperatura en el evaporador es de 0 °C, hay un subenfriamiento de 5 °C y un recalentamiento de 10 °C. Resolverlo con el programa Solkane.

Mostrar retroalimentación

Utilizaremos el programa Solkane y pondremos los valores necesarios en un ciclo simple ideal. En el vídeo posterior vemos la obtención del siguiente diagrama.



<https://www.youtube.com/embed/wi6GQhTI9zA>

2.- Tenemos una máquina frigorífica simple con las siguientes características:

- Potencia frigorífica 10 kW
- Temperatura en evaporador -10 °C
- Temperatura en condensador 35 °C
- Refrigerante R-407C
- Sobrecalentamiento 5 °C
- Subenfriamiento 7 °C
- Pérdidas de carga en aspiración y en la salida al condensador de 0,1 bar
- Pérdida de carga en evaporador 0,05 bar
- Pérdida de carga en unidad condensadora 0,03 bar
- Rendimiento isotrópico 0,75

Partiendo de los anteriores datos, obtener lo siguiente:

- Representar el ciclo frigorífico en el diagrama de Mollier.
- Calcular el caudal de refrigerante necesario.

c) Determinar la potencia del compresor

d) Determinar la temperatura y presión a la que sale el vapor del compresor.

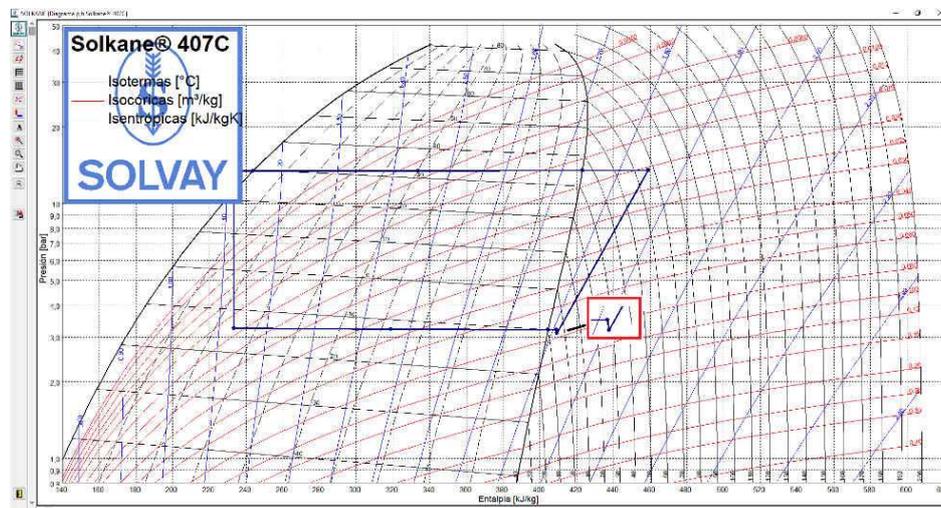
Mostrar retroalimentación

Vamos a utilizar el programa Solkane y ver los resultados siguientes en el vídeo mostrado:

Diagrama de Mollier Caudal másico Potencia compresor

Temperatura y presión de salida

Diagrama de Mollier



Caudal másico

Lo podríamos calcular a partir del diagrama, como hemos hecho con anterioridad y comprobaríamos que el resultado es muy similar al valor de la tabla.

SOLKANE 9.0.1 - [SOLKANE® 407C]

Fichero Medio refrigerante Cálculo Opciones Ventana Ayuda www Indicación

R23 R32 R123 R124 R125 R134a R143a R152a R227 R365mfc R404A R407A **R407C** R409A R410A R507 SES24 SES30 SES36 S22L
S22M R11 R12 R22 R502 R13B1 ?

SOLKANE® 407C

t_c 86,03 °C p_c 46,30 bar v_c 2,065 dm³/kg Datos de materiales

Vaporizador	Temperatura -10,00 °C	Condensador	Temperatura 35,00 °C	Compresor	Rendimiento isotrópico 0,750 <input type="checkbox"/> Auto	Conducto de gas por aspiración	Recalentamiento 0,00 K
	Recalentamiento 5,00 K		Subenfriamiento 7,00 K				Pérdida de presión 0,10 bar
	Pérdida de presión 0,05 bar		Pérdida de presión 0,03 bar			Conducto de gas de presión	Enfriamiento 0,00 K
	Capacidad frigorífica 10,0 kW		Cálculo				Pérdida de presión 0,10 bar

Circulación (F2) Parámetro de emisión (F3) Índices funcionales (F4) Dimensionamiento de tubo (F5)

Potencias	Proceso de una etapa		
Vaporizador	10,0 kW	Índice de compresión	4,22
Condensador	12,9 kW	Diferencia de presión	10,29 bar
Compresor	2,84 kW	Caudal másico	56,93 g/s
		Caudal de volumen desplazado	15,77 m ³ /h
		Potencia de enfriamiento volúm.	2282 kJ/m ³
Conducto de gas por aspiración	0,016 kW	Índice de potencia de enfriamiento	3,52
Conducto de gas de presión	-0,009 kW		

Potencia compresor

El valor es de la imagen

SOLKANE 9.0.1 - [SOLKANE® 407C]

Fichero Medio refrigerante Cálculo Opciones Ventana Ayuda www Indicación

R23 R32 R123 R124 R125 R134a R143a R152a R227 R365mfc R404A R407A **R407C** R409A R410A R507 SES24 SES30 SES36 S22L
S22M R11 R12 R22 R502 R13B1 ?

SOLKANE® 407C

t_c 86,03 °C p_c 46,30 bar v_c 2,065 dm³/kg Datos de materiales

Vaporizador	Temperatura -10,00 °C	Condensador	Temperatura 35,00 °C	Compresor	Rendimiento isotrópico 0,750 <input type="checkbox"/> Auto	Conducto de gas por aspiración	Recalentamiento 0,00 K
	Recalentamiento 5,00 K		Subenfriamiento 7,00 K				Pérdida de presión 0,10 bar
	Pérdida de presión 0,05 bar		Pérdida de presión 0,03 bar			Conducto de gas de presión	Enfriamiento 0,00 K
	Capacidad frigorífica 10,0 kW		Cálculo				Pérdida de presión 0,10 bar

Circulación (F2) Parámetro de emisión (F3) Índices funcionales (F4) Dimensionamiento de tubo (F5)

Potencias	Proceso de una etapa		
Vaporizador	10,0 kW	Índice de compresión	4,22
Condensador	12,9 kW	Diferencia de presión	10,29 bar
Compresor	2,84 kW	Caudal másico	56,93 g/s
		Caudal de volumen desplazado	15,77 m ³ /h
		Potencia de enfriamiento volúm.	2282 kJ/m ³
Conducto de gas por aspiración	0,016 kW	Índice de potencia de enfriamiento	3,52
Conducto de gas de presión	-0,009 kW		

Temperatura y presión de salida

En la tabla podemos ver los valores exactos a la salida del compresor. Hay que tener en cuenta que la presión manométrica sería 1 bar menos, por lo que si colocáramos un manómetro a la salida, obtendríamos 12,59 bar

Fichero Medio refrigerante Cálculo Opciones Ventana Ayuda www Indicación

R23 R32 R123 R124 R125 R134a R143a R152a R227 R365mfc R404A R407A **R407C** R409A R410A R507 SES24 SES30 SES36 S22L

S22M R11 R12 R22 R502 R13B1 ?

SOLKANE®
407C

t_c 86,03 °C
 p_c 46,30 bar
 v_c 2,065 dm³/kg

Datos de materiales

Vaporizador
Temperatura -10,00 °C
Recalentamiento 5,00 K
Pérdida de presión 0,05 bar
Capacidad frigorífica 10,0 kW

Condensador
Temperatura 35,00 °C
Subenfriamiento 7,00 K
Pérdida de presión 0,03 bar

Compresor
Rendimiento isotrópico 0,750 Auto

Conducto de gas por aspiración
Recalentamiento 0,00 K
Pérdida de presión 0,10 bar

Conducto de gas de presión
Enfriamiento 0,00 K
Pérdida de presión 0,10 bar

Cálculo

Circulación (F2) Parámetro de emisión (F3) Índices funcionales (F4) Dimensionamiento de tubo (F5)

Punto	p bar	t °C	v dm³/kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	x --
1	3,10	-5,00	76,97	409,18	1,8099	
2s	13,59	55,68	19,38	446,55	1,8099	
2	13,59	67,17	20,63	459,01	1,8471	
3	13,49	67,17	20,81	459,16	1,8481	
3'	13,49	35,00	16,99	423,11	1,7368	
3'4m	13,48	32,32	8,94	333,50	1,4428	
4'	13,46	29,64	0,90	243,90	1,1489	
4	13,46	22,64	0,87	233,25	1,1138	
5	3,25	-14,48	18,09	233,25	1,1305	0,245
56'm	3,22	-12,24	45,26	318,90	1,4601	
6"	3,20	-10,00	72,43	404,54	1,7896	
6	3,20	-5,00	74,34	408,91	1,8060	

Proceso de una etapa

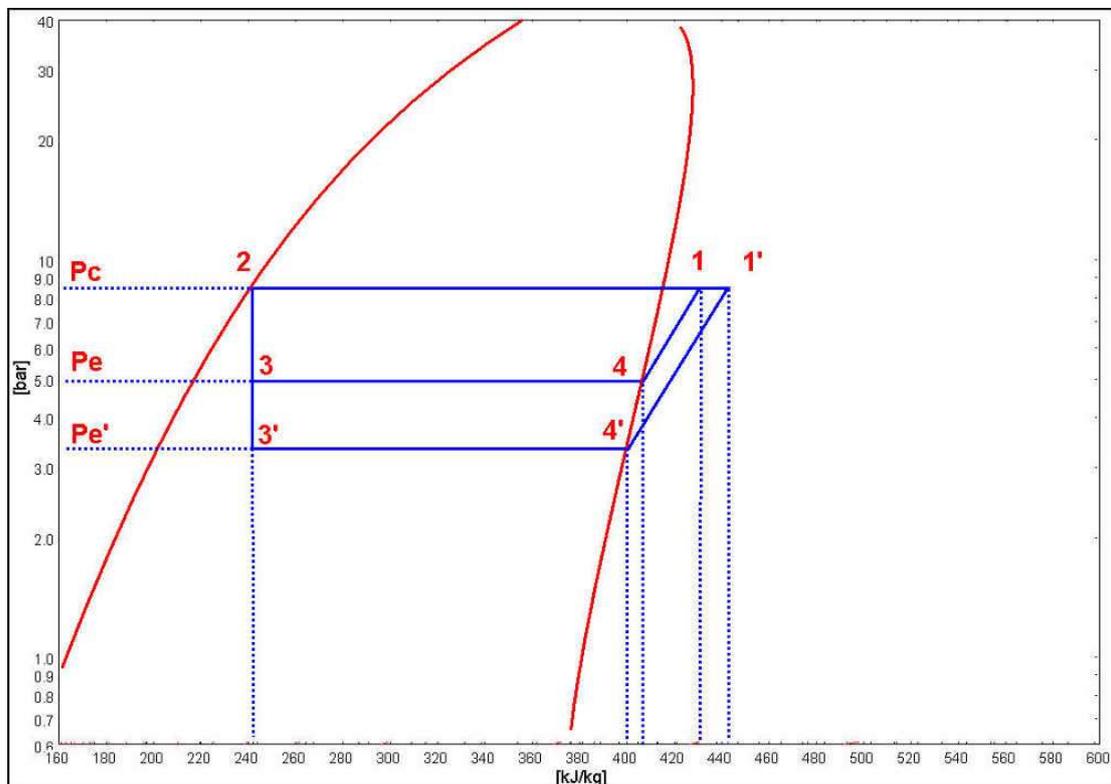
https://www.youtube.com/embed/l_Su604gyLI

1.8.- Eficiencia energética en el ciclo frigorífico.

En la explicación del ciclo real has visto como afectan a la eficiencia energética dos de las variables del ciclo, el sobrecalentamiento y el subenfriamiento. Has visto que debemos mantener el sobrecalentamiento lo menor posible ya que va en contra de la eficiencia energética y que debemos tener un subenfriamiento que va a favorecer un aumento del rendimiento del ciclo. Las otras dos variables sobre las que en alguna medida podemos actuar son la temperatura de vaporización y la temperatura de condensación.

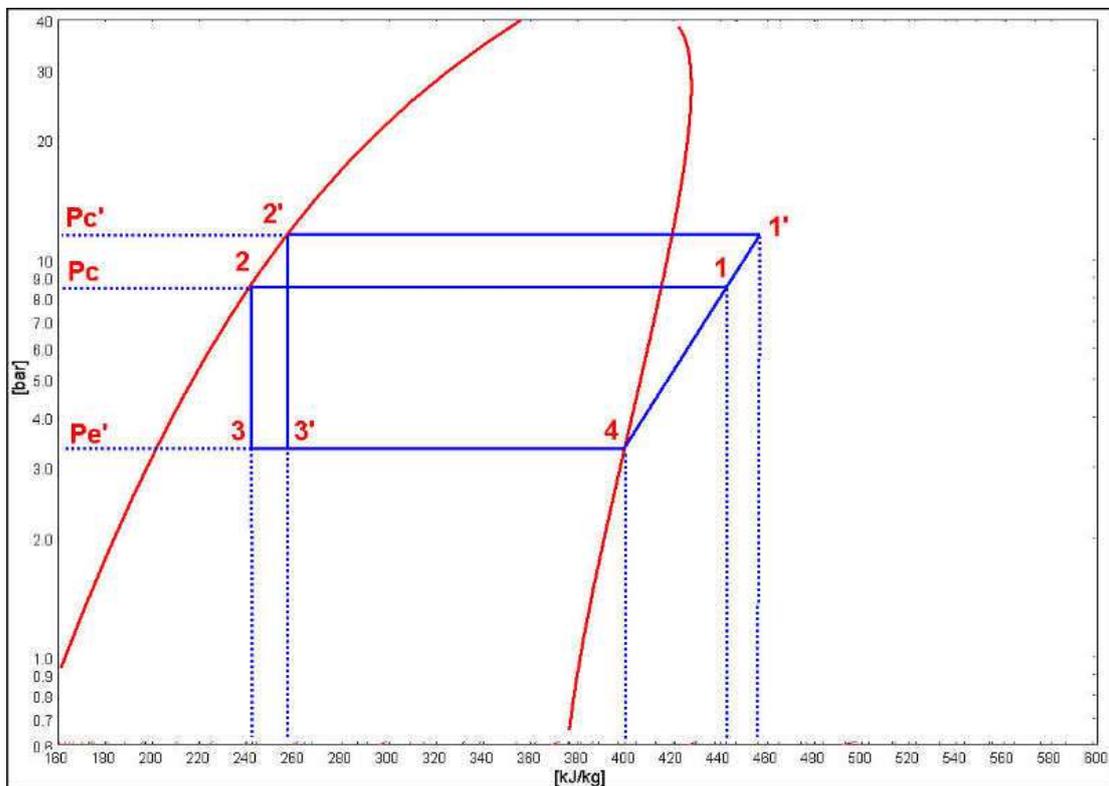
Te habrás dado cuenta de que a veces decimos temperatura de vaporización y otras veces presión de vaporización. Realmente estamos hablando de lo mismo. Recuerda que cada compuesto tiene una temperatura única de ebullición para cada presión.

La eficiencia de un ciclo de refrigeración varía considerablemente con la temperatura de vaporización. Observa la siguiente figura en la que se representan dos ciclos simples con distintas temperaturas de vaporización.



Comparando ambos ciclos, vemos que el efecto refrigerante es mayor para el ciclo que tiene la temperatura de vaporización mas alta, ya que, $h_4 - h_3 > h_{4'} - h_{3'}$. Al ser mayor el efecto refrigerante la cantidad de fluido frigorígeno que ha de circular es menor para la misma potencia frigorífica. Por otro lado, como la diferencia entre las presiones de vaporización y condensación es menor, el trabajo de compresión también ha de ser menor, lo que implica que la potencia teórica requerida en el compresor será inferior.

El volumen de vapor movido por el compresor varía mucho con los cambios de temperatura de vaporización, disminuyendo a medida que esta aumenta. Este es probablemente el factor más importante de todos los que afectan a la capacidad y eficiencia del ciclo. Debido a la menor potencia del compresor, el calor eliminado en el condensador ha de ser menor, ya que $h_1 - h_2 < h_{1'} - h_{2'}$. El efecto de la temperatura de condensación es inverso al que presenta la temperatura de vaporización. Manteniendo la temperatura de vaporización constante, la eficacia del ciclo disminuye si la temperatura de condensación aumenta. Observa la siguiente figura.



A una presión de condensación mayor el efecto refrigerante disminuye, ya que $h_4 - h_{3'} < h_4 - h_3$. Al reducirse el efecto refrigerante, el peso (caudal) de refrigerante que debe circular es mayor, aumentando por eso el volumen de vapor que debe ser comprimido. El trabajo de compresión necesario para aumentar la presión del vapor es mayor a medida que aumenta la temperatura de condensación, $h_{1'} - h_4 > h_1 - h_4$. Aunque la cantidad de calor eliminado en el condensador por Kg de fluido varía muy poco, debido a que el aumento de calor de compresión es compensado por la disminución del efecto frigorífico, el rendimiento baja considerablemente: absorbemos menos calor de la cámara frigorífica y, sin embargo, consumimos más energía con el compresor. Ello lo podemos explicar de otra manera más simple, cuando la temperatura del condensador es más alta, es como si una bomba debiera subir agua a más altura: gastará más y disminuirá el caudal de agua que bombeemos.

Como se ha visto, **para que el ciclo funcione de una forma eficiente lo conveniente es que la presión de evaporación y la de condensación estén lo más próximas posible.**

PARÁMETROS DE CÁLCULO

Primero, definamos los siguientes términos:

Capacidad frigorífica (kW). Es la capacidad de enfriamiento de un equipo, funcionando en modo frío a pleno rendimiento.

EER (Energía Efficiency Rating: coeficiente de eficiencia energética). Es la ratio entre la capacidad frigorífica y el consumo de energía utilizado para obtenerlo. Cuanto más alto es el EER, mejor rendimiento tendría la máquina.

Capacidad calorífica (kW). Es la capacidad de calefacción de un equipo, funcionando en modo calor a pleno rendimiento.

COP (Coeficient Of Performance: coeficiente de rendimiento) es el ratio entre la capacidad calorífica y el consumo de energía utilizado para obtenerlo. Cuanto más alto es el COP, mejor rendimiento tendría la máquina.

Coeficiente de eficiencia energética (EER)

Es conocido por sus siglas EER, aunque también se emplea el concepto de $COP_{\text{frigorífico}}$. Como se vió en la Unidad 1, el rendimiento de una máquina frigorífica es:

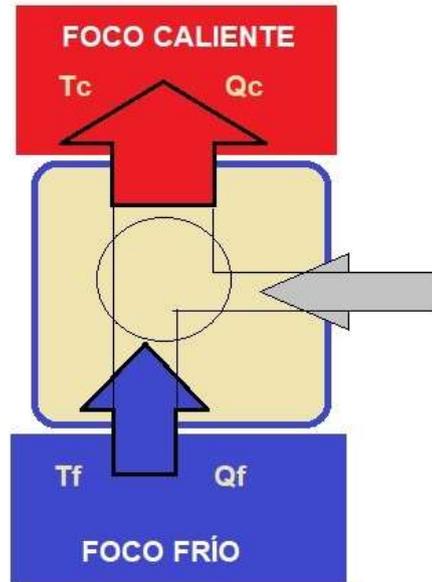
Por definición, el rendimiento es el cociente entre la energía producida y la energía absorbida. Por tanto:

$$\eta = \frac{Q_f}{W}$$

Por la Primera Ley de la Termodinámica, por la que la energía es una magnitud conservativa,

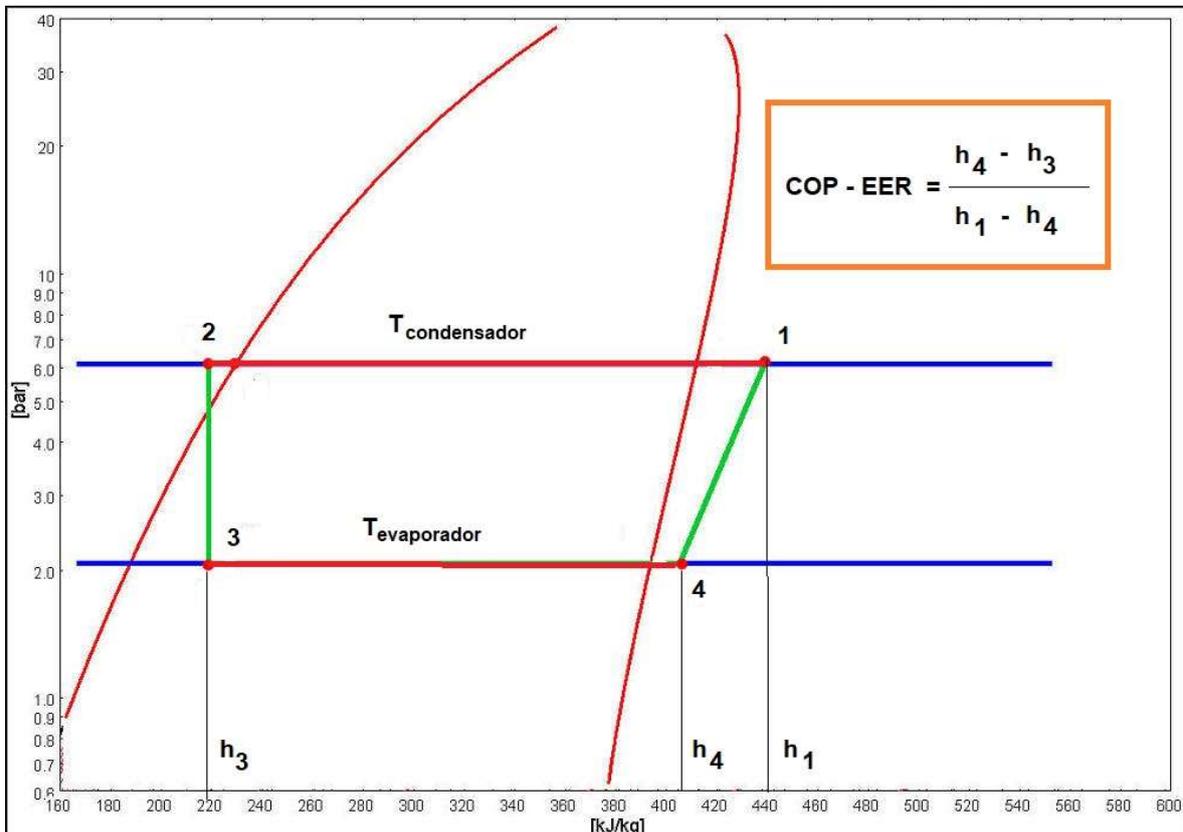
$$\eta = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f}$$

MÁQUINA FRIGORÍFICA



El trabajo W se encarga de extraer-bompear el calor Q_f del foco frío al caliente. La suma de ambos es Q_c

Por consiguiente, en una máquina frigorífica, su rendimiento se denomina EER o COP (frigorífico) y es la relación entre la capacidad refrigerante y la energía requerida por el compresor. Este valor varía según las temperaturas de evaporación y condensación. Si observas el ciclo, el calor que se absorbe en el evaporador es mucho mayor que el necesario para realizar la compresión del gas. Cuanto más alta sea esta relación, mejor prestaciones tendrá la máquina frigorífica. El coeficiente anterior es teórico, ya que el compresor no se comporta en la realidad como en el ciclo sino que tiene un mayor consumo. El COP real nos mide la relación entre el calor absorbido de la cámara frigorífica por el evaporador y el consumo energético del compresor.



COP-EER estacional

El COP-EER depende mucho de las condiciones del ambiente exterior, ya que la temperatura exterior es variable con las condiciones climáticas. El EER-COP instantáneo o de un corto intervalo de tiempo, no es representativo del rendimiento que obtendremos a lo largo del año. Para paliarlo, se utiliza el COP estacional, que es un cociente entre la energía térmica absorbida por la máquina durante un amplio periodo y la energía eléctrica consumida en el mismo periodo, es decir, la de los recibos de electricidad de la temporada.

COP máximo teórico de Carnot

Sabemos que el rendimiento máximo de una máquina térmica lo da el ciclo de Carnot. Ninguna otra máquina puede mejorarlo y este rendimiento teórico no contempla pérdidas de ningún tipo y depende exclusivamente de las temperaturas. Por ello, la comparación entre el rendimiento o COP de una máquina frigorífica con el rendimiento máximo posible es un cálculo comparativo interesante. También vimos en la Unidad 1, que este rendimiento de la máquina de Carnot dependía de las temperaturas de los focos caliente y frío, mediante la fórmula:

$$\text{COP}_{\text{frigorífico máximo}} = \frac{T_{\text{foco frío}}}{T_{\text{foco caliente}} - T_{\text{foco frío}}} = \frac{T_{\text{evaporador}}}{T_{\text{condensador}} - T_{\text{evaporador}}}$$

Hay que recordar, que en esta fórmula los valores de las temperaturas deben ir en Kelvin.

Relación de compresión

Este es otro coeficiente que te va a servir para realizar comparaciones. También llamado índice de compresión. Es el cociente entre las presiones del condensador y del evaporador en valores absolutos. Cuanto mayor sea, menor será la cantidad de refrigerante en circulación y por lo tanto la capacidad frigorífica de la máquina.

$$R_c = \frac{P_{\text{condensador}}}{P_{\text{evaporador}}}$$

Recordar que las presiones son absolutas, es decir, las que indican los diagramas de Mollier, no los manómetros.

Ejercicios resueltos

1.- Calcula el COP frigorífico y la relación de compresión de la instalación frigorífica con R134-A que tiene una temperatura en el condensador de 40 °C y en el evaporador de -10 °C. Utiliza Solkane en modo ciclo ideal sin pérdidas ni subenfriamiento o recalentamiento.

Mostrar retroalimentación

SOLKANE 9.0.1 - [SOLKANE® 134a]

Fichero Medio refrigerante Cálculo Opciones Ventana Ayuda www Indicación

R23 R32 R123 R124 R125 **R134a** R143a R152a R227 R365mfc R404A R407A R407C R409A R410A R507 SES24 SES30 SES36 S22

R502 R13B1 ?

SOLKANE® 134a

t_c 101,06 °C
 p_c 40,59 bar
 v_c 1,954 dm³/kg

Datos de materiales

Vaporizador
 Temperatura -10,00 °C
 Recalentamiento 0,00 K
 Pérdida de presión 0,00 bar
 Capacidad frigorífica 1,00 kW

Condensador
 Temperatura 40,00 °C
 Subenfriamientos 0,00 K
 Pérdida de presión 0,00 bar

Compresor
 Rendimiento isotrópico 1,000 Auto

Conducto de gas por aspiración
 Recalentamiento 0,00 K
 Pérdida de presión 0,00 bar

Conducto de gas de presión
 Enfriamiento 0,00 K
 Pérdida de presión 0,00 bar

Cálculo

Circulación (F2) Parámetro de emisión (F3) Índices funcionales (F4) Dimensionamiento de tubo (F5)

Potencias Proceso de una etapa

Vaporizador	1,00 kW	Índice de compresión	5,07
Condensador	1,25 kW	Diferencia de presión	8,16 bar
Compresor	0,25 kW	Caudal másico	7,345 g/s
		Caudal de volúmen desplazado	2,63 m³/h
		Potencia de enfriamiento volúm.	1368 kJ/m³
Conducto de gas por aspiración	0,000 kW	Índice de potencia de enfriamiento	4,03
Conducto de gas de presión	0,000 kW		

Estos mismos valores podemos obtenerlos analíticamente a partir de los valores de entalpías y presiones de la tabla

Punto	p	t	v	h	s	x
	bar	°C	dm³/kg	kJ/kg	kJ/kgK	--
1	2,01	-10,00	99,54	392,58	1,7331	--
2s	10,17	46,40	20,87	426,40	1,7331	--
2	10,17	46,40	20,87	426,40	1,7331	--
3	10,17	46,40	20,87	426,40	1,7331	--
3'	10,17	40,00	19,98	419,33	1,7107	--
3'-4 m	10,17	40,00	10,42	337,88	1,4602	--
4	10,17	40,00	0,87	256,43	1,1897	--
4	10,17	40,00	0,87	256,43	1,1897	--
5	2,01	-10,00	34,23	256,43	1,2158	0,339
5-6 m	2,01	-10,00	66,89	324,51	1,4744	--
6	2,01	-10,00	99,54	392,58	1,7331	--
6	2,01	-10,00	99,54	392,58	1,7331	--

Proceso de una etapa

$R = \frac{10,17}{2,01} = 5,06$

$COP_{teórico} = \frac{392,58 - 256,43}{426,40 - 392,58}$

$COP_{teórico} = \frac{136,15}{33,82} = 4,026$

Valores obtenidos con el programa Solkane

Date cuenta que el COP frigorífico calculado es mayor que el real, ya que existen otros consumos no contabilizados.

2.- Averigua el COP máximo que podríamos obtener en una máquina ideal de Carnot, con los datos del ejercicio anterior

Mostrar retroalimentación

Una máquina que funcionara sin pérdidas y siguiendo el ciclo de Carnot, tendría el siguiente rendimiento (no habría máquina que lo superara):

$$COP_{frigorífico\ máximo} = \frac{T_{evaporador}}{T_{condensador} - T_{evaporador}} = \frac{263}{313 - 263} = 5,26$$

Autoevaluación

1.- ¿La relación de compresión es mayor en un ciclo real que en uno ideal?

- Es cierto.

- No es cierto.

Correcto. En un ciclo real debido a las pérdidas de carga la presión a la entrada del compresor es más baja que en el ideal. Además la salida del compresor es más alta también debido a la presión necesaria para accionar las válvulas.

Estás en un error. Observa en la figura como la diferencia de presiones es mayor en el ciclo real.

Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto

2.- El coeficiente de eficiencia de una máquina frigorífica, EEF ...

- Nunca puede valer 1
- Teóricamente puede llegar a un valor tan alto como deseemos.
- El valor máximo del EEF será 273
- Ninguna de la anteriores opciones es correcta

Podría valer 1, ya que es el caso en el que la potencia del compresor coincide con la potencia frigorífica. Puedes trazar ciclos en el diagrama de Mollier en donde la diferencia de entalpías a la entrada y salida del compresor coincidan con la diferencia de entalpías a la entrada y salida del evaporador.

Si en la fórmula del coeficiente EER para un ciclo de Carnot, hiciéramos que las temperaturas del evaporador y condensador se aproximaran lo más posible, el valor de EER crecería tanto como quisiéramos.

No es correcto.

Incorrecto

Solución

1. Incorrecto
2. Opción correcta
3. Incorrecto
4. Incorrecto

Para saber más

La etiqueta energética para equipos de aire acondicionado es obligatoria según normativa europea desde 2004. Afecta a equipos de potencia inferior o igual a 12 kW. Estos equipos que, como sabemos, funcionan como máquinas frigoríficas en verano y como bombas de calor en invierno, aportan los valores de EER y COP estacionales para poder clasificarlos en las 7 categorías siguientes, con los consumos siguientes en el caso de un frigorífico y cuyo parámetro más relevante es el valor de EEF (COP frigorífico):

Clase	Consumo de energía en 15 años (kWh)	Coste económico en 15 años (euros)	Ahorro al sustituirlo por uno de clase A (euros)
A++	2.956	296	-
A+	4.138	414	118
A	5.420	542	246
B	6.406	641	345
C	8.130	813	517
D	9.855	986	690
E	10.348	1.035	739
F	11.580	1.158	862
G	12.319	1.232	936

Coste considerado por kWh: 0,1 euros

[IDAE](#). Consumos anuales y ahorros de frigoríficos (CC BY)

En la anterior tabla aparece el ahorro que se puede obtener al comprar un frigorífico de clases A, A+ y A++. Si tenemos un frigorífico de clase C, el consumo de energía durante 15 años será de 8 130 kWh. Si sustituimos este frigorífico por uno de clase A, el ahorro durante este mismo periodo será de 271 € y si lo sustituimos por uno de clase A++, el ahorro para el mismo periodo será de 517 €.

Ejercicios para Resolver

1.- Calcula valores de EER en los distintos ejercicios vistos con anterioridad y comprueba los resultados con el programa Solkane.

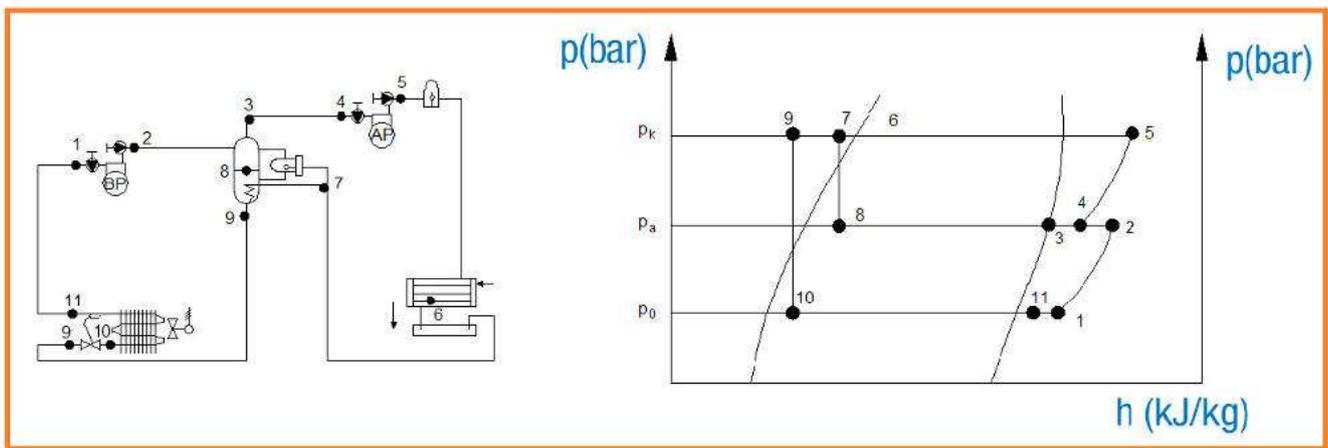
Mostrar retroalimentación

Los valores calculados deben coincidir. En el caso que utilices el diagrama de Mollier, los resultados tendrán un cierto margen de error en comparación con el uso del programa.

2.- Calculos los valores de las relaciones de compresión en ejercicios anteriores y comprueba el resultado con el programa Solkane.

Mostrar retroalimentación

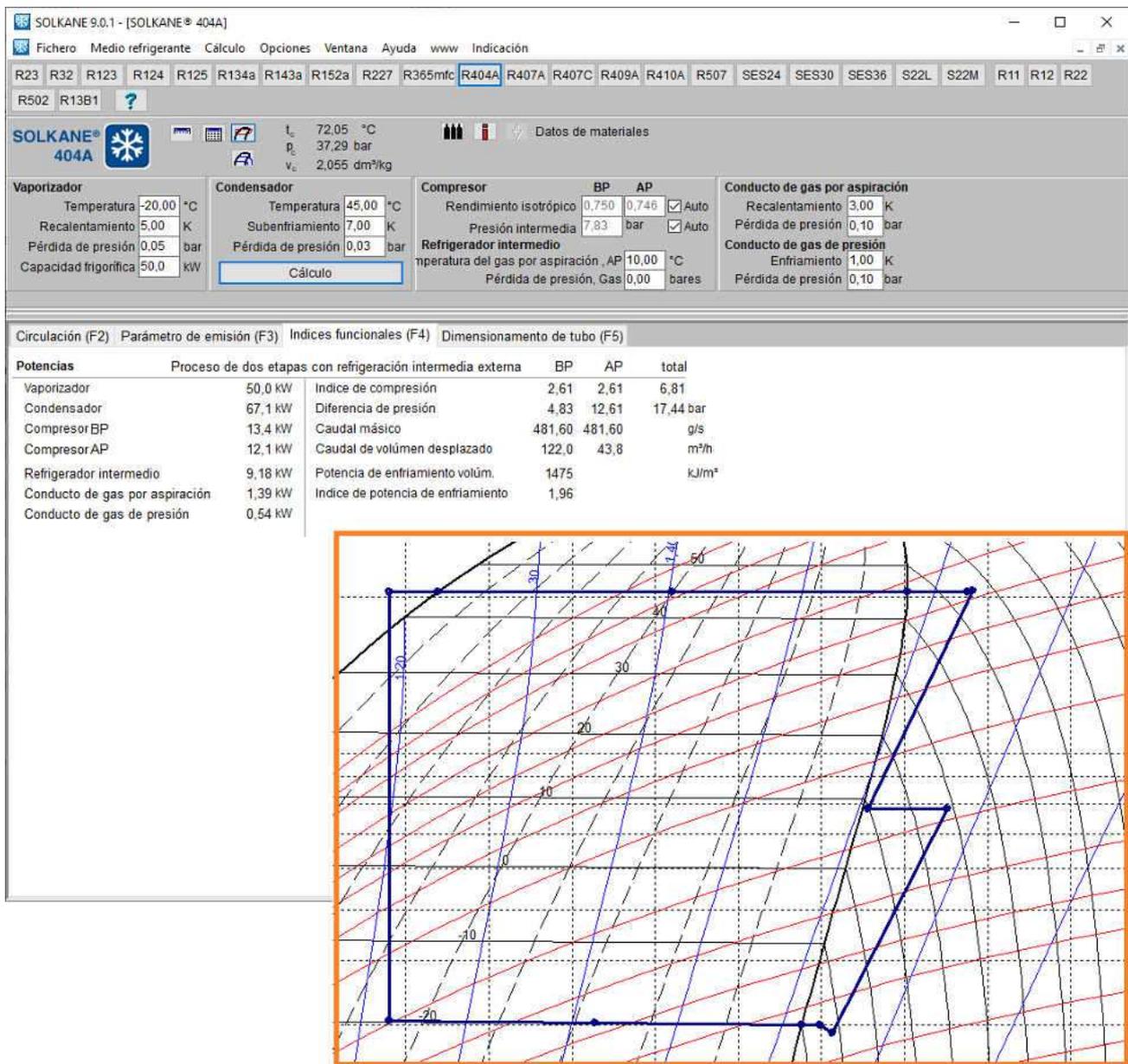
Los valores calculados deben coincidir. En el caso que utilices el diagrama de Mollier, los resultados tendrán un cierto margen de error en comparación con el uso del programa.



Circuito frigorífico de inyección parcial

- El vapor recalentado es aspirado (1) por el compresor de baja presión y se comprime (2). El gas sobrecalentado entra en el recipiente intermedio donde es enfriado (3).
- El vapor saturado (3) del recipiente intermedio es aspirado por el compresor de alta presión, recalentándose en la tubería de aspiración (4). Se comprime (5) se condensa (6) y subenfria (7).
- A partir de este estado (7) se produce la expansión parcial del líquido en el recipiente intermedio a través de una válvula de expansión (8) que sirve para el subenfriamiento del resto de líquido que no se expansiona (9), y para enfriar el gas recalentado que descarga el compresor de baja presión desde el estado 2 al estado 3. El resto de refrigerante pasa a través de un serpentín dispuesto en la parte baja del recipiente intermedio subenfriándose en este (9). El líquido subenfriado (9) llega a la válvula de expansión del evaporador de baja presión. Una vez expandido (10) se obtiene una mezcla líquido y vapor. El refrigerante en estado líquido se evapora en el evaporador de baja presión y se recalienta (11). Una vez que sale la tubería de la cámara comienza el recalentamiento del refrigerante hasta la entrada del compresor (1) donde vuelve a comenzar el ciclo.

Los sistemas de multicompresión en cascada, con un sistema de refrigeración intermedia permiten aumentar la eficiencia frente a los de compresión simple única. Sobre todo cuando se manejan grandes relaciones de compresión, o lo que es lo mismo, grandes diferencias de temperaturas entre el evaporador y el condensador. El programa Solkane nos permite trabajar con este tipo de ciclos. La imagen muestra una máquina frigorífica con este sistema, en el que normalmente los compresores tienen, aproximadamente las mismas relación de compresión y potencia. Los datos que se han introducido son similares a los de casos anteriores y la temperatura de aspiración de la fase de alta presión se ha seleccionado en relación a la disponibilidad de una fuente de refrigeración con esta temperatura (por ejemplo agua de una enfriadora o de la propia red de abastecimiento). Esta fase intermedia de refrigeración, como podemos ver, hace que la temperatura de salida del vapor del compresor BP a 30 °C la rebajemos hasta 10 °C.



Diagramas obtenidos con el programa Solkane

Autoevaluación

¿El sistema de inyección total permite trabajar con cámaras a dos temperaturas distintas?

- No es cierto.
- Cierto.

Correcto. El sistema de inyección total no tiene una salida a evaporador de media temperatura, al contrario del de inyección parcial.

Estás en un error. Observa en la figura como únicamente funciona con un evaporador a baja temperatura.

Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto

Ejercicio Resuelto

Comparar la eficiencia de la máquina frigorífica que utiliza el sistema de multicompresión de más arriba, con un sistema simple y con los mismos datos.

Mostrar retroalimentación

Cuanto más alto sea el índice de potencia mayor ahorro. Los valores obtenidos son:

- a) Compresión múltiple con enfriamiento: 1,96
- b) Compresión simple: 1,88

Esto equivale a un ahorro energético en el ciclo múltiple, aproximado, 4,25 %

The screenshot shows the SOLKANE 9.0.1 software interface for R404A. The main window displays various parameters for the refrigerant, including temperature ($t_c = 72.05$ °C), pressure ($p_c = 37.29$ bar), and specific volume ($v_c = 2.055$ dm³/kg). The interface is divided into sections for Vaporizador, Condensador, Compresor, and Conducto de gas por aspiración. The Condensador section shows a temperature of 45.00 °C and a subcooling of 7.00 K. The Compresor section shows an isentropic efficiency of 0.747. The Conducto de gas por aspiración section shows a recalculation of 3.00 K and a pressure loss of 0.10 bar. The bottom section displays a table of performance metrics for the process of a stage.

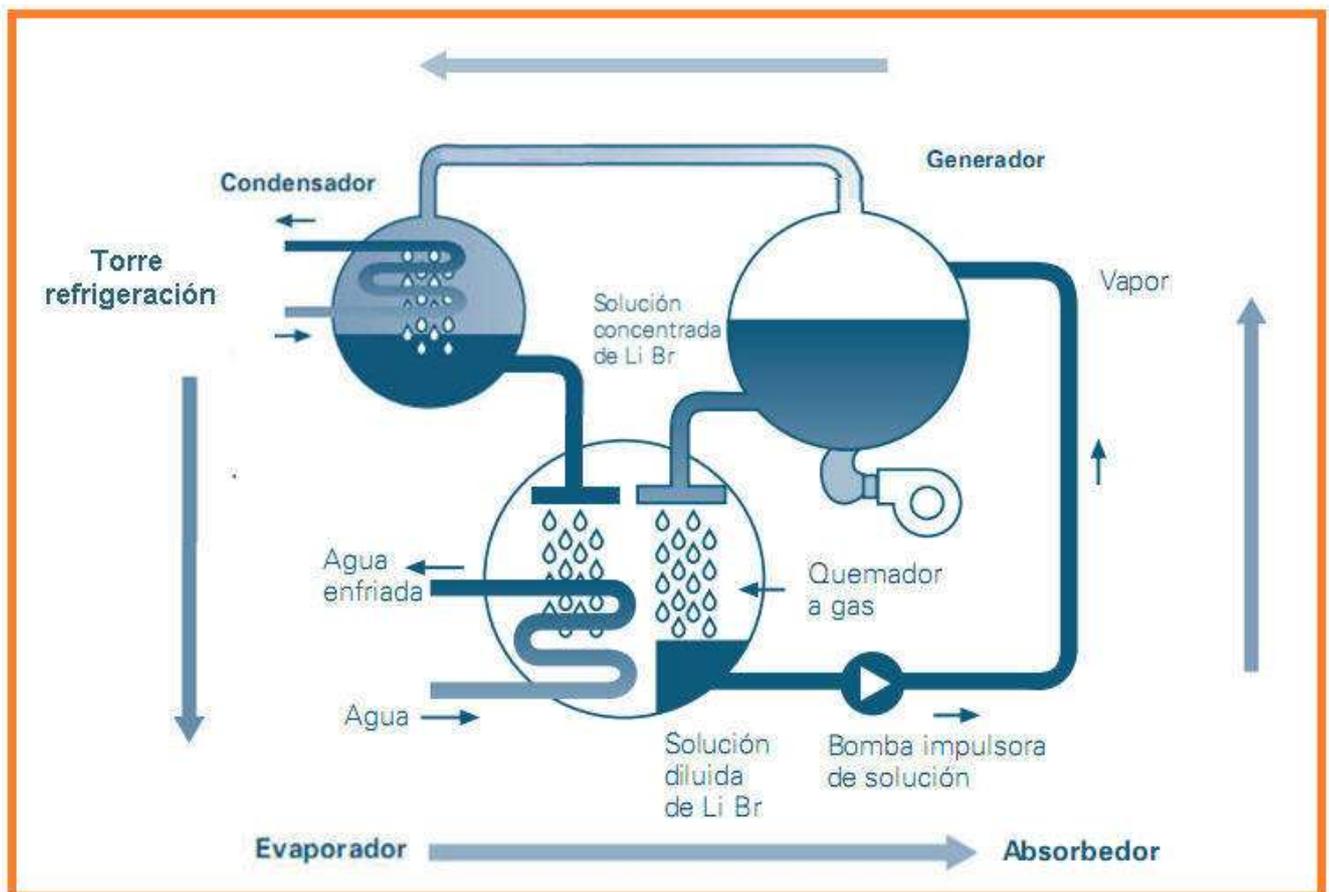
Potencias	Proceso de una etapa	Indicadores	Valores
Vaporizador	50,0 kW	Índice de compresión	6,81
Condensador	77,5 kW	Diferencia de presión	17,44 bar
Compresor	26,6 kW	Caudal másico	481,60 g/s
		Caudal de volumen desplazado	122,0 m ³ /h
		Potencia de enfriamiento volúm.	1475 kJ/m ³
Conducto de gas por aspiración	1,39 kW	Índice de potencia de enfriamiento	1,88
Conducto de gas de presión	0,51 kW		

1.10.- Refrigeración por absorción.

Probablemente has oído que las instalaciones solares térmicas también son válidas para la producción de frío en verano. Para ello se utilizan máquinas que tienen un ciclo distinto al de compresión, un ciclo de absorción. Las más habituales son las de $\text{LiBr-H}_2\text{O}$. También existen otras con amoníaco. El LiBr es una sal muy higroscópica y esta característica es la que la hace idónea para este tipo de máquinas.

Las máquinas de absorción tienen la desventaja de su bajo rendimiento, frente a las de compresión. Tienen un EFF-COP muy bajo. Pero como ventaja tienen que funcionan con fuentes térmicas de baja temperatura. Esto las hace idóneas para aquellas instalaciones solares de baja temperatura o cuando tenemos un calor residual (en lugar de echarlo directamente a la atmósfera nos puede permitir su uso para una instalación de aire acondicionado).

Para comprender como funciona el ciclo de absorción observa la figura.



La cámara central se encuentra a baja presión, unos 8 mbar. A esa presión el agua hierve a 5°C . El agua que cae de la ducha de la izquierda del dibujo, proveniente del condensador, extrae el calor del circuito que va a ir a los acondicionadores de aire: entra agua de retorno del circuito y sale enfriada hacia el circuito otra vez. En el diagrama no se ha representado el sistema de bombeo, únicamente la entrada y la salida de la tubería de agua. Por otra parte tenemos otra ducha por la que va cayendo una solución concentrada de $\text{LiBr-H}_2\text{O}$. Como la sal es muy higroscópica atrae los vapores de agua que se van creando en la cámara, cayendo a una bandeja y diluyendo su concentración.

Hasta aquí es la parte dónde se genera el frío. El resto de los componentes del circuito sirve para regenerar la sal concentrada por un lado y agua pura por el otro. Prosigamos con el ciclo. La solución diluida se impulsa al generador. Aquí se aplica el calor y se destila el agua. El vapor de agua se dirige al condensador, dejando en el generador una solución concentrada de $\text{LiBr-H}_2\text{O}$, que es la que se va a volver a utilizar en la cámara presurizada.

El vapor de agua al llegar al condensador vuelve al estado líquido. Para ello ha de ser enfriado. En el diagrama está representado un serpentín con salida a una torre de refrigeración. Por último, el agua

enfriada contenida en el condensador se vuelve a utilizar para introducirla en la cámara presurizada e iniciar de nuevo el ciclo.

Ejercicio para Resolver

En la siguiente secuencia gráfica del funcionamiento de una máquina de absorción puedes ver en mayor detalle el proceso. No obstante está en inglés. Intenta traducir los textos y entender el funcionamiento. Puedes ver el documento del que se ha extraído el proceso en el fabricante [Thermax](#)

Principios de funcionamiento

Fase 1: Evaporación del agua a baja presión

Fase 2: Absorción del agua por el bromuro de litio

Fase 3: Calentamiento del bromuro de litio

Fase 4: Separación y condensación del agua

Fase 5: Repetición del ciclo

2.- Refrigerantes y lubricantes.

Caso práctico: placa de características

El frigorífico que hemos utilizado para hacer el invento disparatado del inicio de esta unidad, con ayuda de un ventilador, tiene la etiqueta de la imagen, en la que vemos algunos datos de interés. En los siguientes apartados responderemos a preguntas tales como ¿qué eficiencia energética tendría? ¿qué tipo de refrigerante lleva dentro? Si se rompe un tubo del serpentín en el condensador de la parte trasera del frigorífico saldrá vapor o líquido? ¿es contaminante, combustible o peligroso?



Placa de características de frigorífico doméstico

EVOLUCIÓN DE LOS REFRIGERANTES

Como has visto, para la máquina frigorífica es fundamental que circule un fluido frigorígeno. Los diferentes gases refrigerantes, por orden de comienzo de su empleo son: amoníaco (NH_3), anhídrido carbónico (CO_2), anhídrido sulfuroso (SO_2), cloruro de metilo, (CH_3Cl) y los refrigerantes halogenados, compuestos de carbono, hidrógeno y halógenos. Se llaman halógenos a aquellos elementos que se encuentran ubicados en el grupo 17 de la tabla periódica: Cl, F, Br, I, At y Ts (Cloro, Fluor, Bromo, Yodo, Astatio y Teneso). Estos elementos se caracterizan por presentar 7 electrones en su última capa, por lo cual sólo necesitan un electrón adicional para completar la estable configuración de gas noble (regla del octeto).

Amoníaco: Los primeros compresores de amoníaco fueron construidos por Carl von Linde en 1877 en Alemania y, a continuación, por otros fabricantes de Europa y América, donde a partir de 1880 se producían en gran escala. Por sus favorables propiedades energéticas, el amoníaco ha seguido utilizándose para grandes instalaciones hasta la aparición de los refrigerantes halogenados hacia

1950, que compartieron con él su empleo. Hoy en día tiende a extenderse de nuevo, recuperando el amoníaco su puesto frente a los demás refrigerantes.

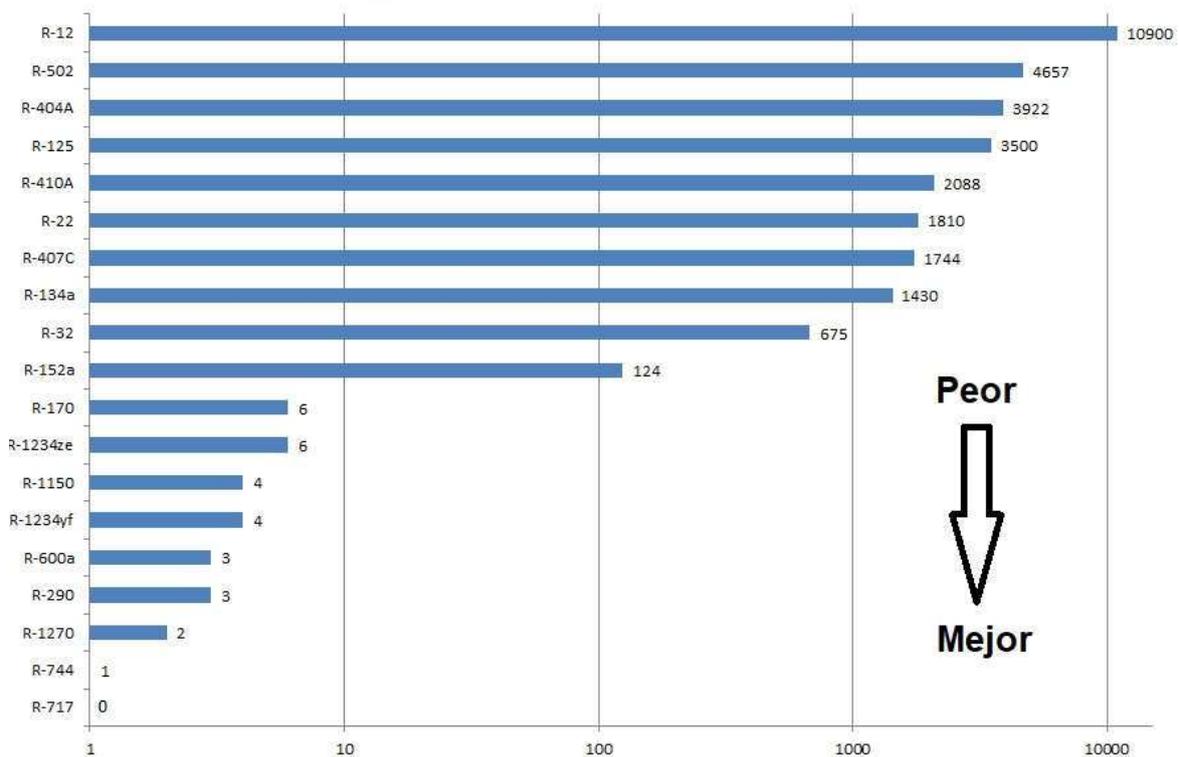
Anhídrido carbónico o Dióxido de Carbono (CO₂): A partir de 1887 se extiende el empleo del CO₂ como refrigerante y, debido a su seguridad, se aplica con preferencia en buques frigoríficos, sustituyendo al ciclo de aire que había utilizado hasta entonces. Su empleo continuó en la marina hasta 1940. Posteriormente se abandonó debido a sus altas presiones de funcionamiento, que hacen la instalación pesada y cara. No obstante está resurgiendo. Se conoce también como R-744 y es un refrigerante natural que no daña la capa de ozono.

Anhídrido sulfuroso y cloruro de metilo: Ambos gases refrigerantes se aplicaron a circuitos de pequeña potencia y fueron sustituidos hacia 1940 por los refrigerantes halogenados debido a su toxicidad. El primero es además corrosivo (SO₂), y el segundo (CH₃Cl), fácilmente inflamable. No se utilizan actualmente.

Refrigerantes halogenados: Los refrigerantes halogenados constituyen una familia de una veintena de gases denominados inicialmente "freones", por el nombre de una marca comercial, pero que tienen una designación numérica, por ejemplo: R-12, o R-245. Los primeros refrigerantes de este tipo se introdujeron en los EE UU hacia 1930, con el empleo del R-12 para los frigoríficos domésticos. Fue seguido de la introducción del R-11 para las grandes unidades con compresor centrífugo para la naciente industria del aire acondicionado. Más tarde, el R-22 fue compitiendo con el amoníaco a partir de los años 1950, y la gama de estos refrigerantes y su empleo ha ido extendiéndose hasta hace poco. Sin embargo, su nivel de contaminación ambiental, la destrucción de la capa de ozono y el efecto invernadero, ha hecho que se replanteen nuevamente los refrigerantes a emplear.

Se habla de «refrigerantes verdes», o refrigerantes de bajo PCA (Potencial de Calentamiento Atmosférico) o GWP (Global Warming Potential). El PCA es una unidad que mide cómo de nocivo es el gas para la atmósfera, así que mientras mayor sea el PCA, más dañino será el gas. Estos nuevos refrigerantes, como el R-407C, el R-134A y el R-410A, tampoco podrán usarse a partir de 2022 para equipos nuevos y está sin determinar la fecha límite de su uso para servicio y mantenimiento. Curiosamente, todo este problema está haciendo que se vuelva la vista hacia los ahora denominados «refrigerantes naturales» como el amoníaco, su aplicación en equipos de refrigeración comercial se ha mantenido hasta hoy en día y muchos profesionales lo consideran como el refrigerante del futuro

PCA (GWP) de algunos refrigerantes



2.1.- El agujero de la capa de ozono.

Hasta finales del siglo XX los instaladores de frío tenían muy claro qué refrigerantes emplear, dependiendo del tipo de instalación:

- ✓ Instalaciones industriales grandes: **Amoníaco**, denominado actualmente **R-717**
- ✓ Instalaciones industriales medianas en refrigerados, aire acondicionado: **R-22**
- ✓ Instalaciones industriales en congelados: **R-502**
- ✓ Instalaciones pequeñas, frigoríficos domésticos, aire acondicionado coches: **R-12**

Estos gases halogenados (R-12, R-22, R-502), eran gases ideales, ya que no eran tóxicos, ni irritantes, incoloros e inodoros; además nos permitían utilizar cobre, que es un material fácil de trabajar y soldar, comparándolo con el acero.

Con estos gases se ha trabajado durante muchos años, hasta que se ha comprobado que la reducción de la capa de ozono de la atmósfera era debida, entre otras cosas, al cloro que llevan estos refrigerantes.

Así, en un primer momento, estos gases se han sustituido por otros que no llevan cloro. Por ejemplo, El R-12 se ha estado sustituyendo por el R-134-a, que es un gas muy parecido en presiones al anterior y El R-22 y R-502 se sustituían por el R-404-A. Éste no es un gas puro, sino una mezcla de gases y, por tanto, la evaporación y la condensación no la hacen a temperatura constante, sino que hay un deslizamiento, pero muy pequeño (0,4°C), y las presiones son más altas que con el R-22.

Para aire acondicionado se ha estado empleando el R-134-A en instalaciones pequeñas, y el R-404-A en equipos más grandes. También se emplea el R-407, que se está aplicando en unidades montadas en fábrica, pero tiene un deslizamiento muy grande (mayor de 5°C).

Actualmente se están diseñando y empleando nuevos refrigerantes que sustituirán a los empleados en los últimos años. El Protocolo de Kyoto y el reciente Acuerdo de París plantean un proceso de lucha contra el cambio climático y la reducción de gases de efecto invernadero.

No hay que olvidar otros refrigerantes como el amoníaco, que está recuperando parte de su espacio perdido debido a que no ataca al ozono ni provoca efecto invernadero. O el isobutano, para instalaciones muy pequeñas (frigoríficos domésticos), por las mismas razones que el amoníaco; aunque hay que tener en cuenta que es explosivo.

Para saber más

Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan el ozono es un tratado internacional diseñado para proteger la capa de ozono reduciendo la producción y el consumo de numerosas sustancias que se ha estudiado que reaccionan con el ozono y se cree que son responsables por el agotamiento de la capa de ozono.

[El protocolo de Montreal.](#)

2.2.- Clasificación de los refrigerantes.

Los refrigerantes se pueden clasificar de diversas formas. Las más importantes son:

SEGÚN SU COMPOSICIÓN

En primer lugar lo vamos a hacer de acuerdo a su **composición química**. La mayor cantidad de los refrigerantes utilizados en la práctica son derivados de hidrocarburos (metano y etano fundamentalmente), en los que se sustituyen átomos de hidrógeno por halógenos (flúor, cloro fundamentalmente y en alguna ocasión bromo).

Se clasifican en tres grupos tradicionales y uno alternativo:

.....**CFC's**, aquellos refrigerantes que en molécula está compuesta por Cloro, Carbono y Fluor.

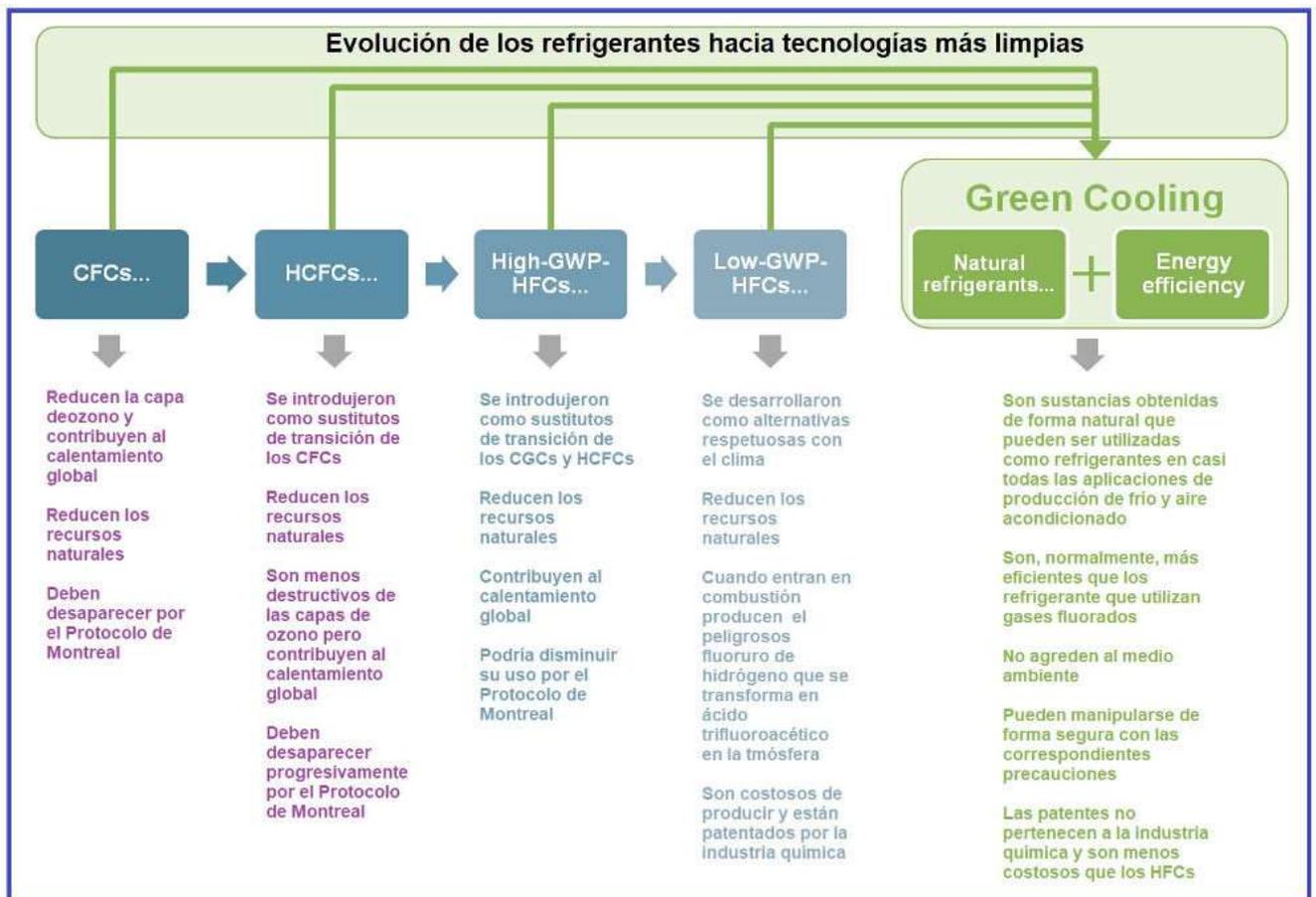
.....**HCFC's** aquellos refrigerantes que en molécula está compuesta por Hidrógeno, Cloro, Carbono y Fluor.

.....**HFC's** aquellos refrigerantes que en molécula está compuesta por Hidrógeno, Carbono y Fluor.

.....**Refrigerantes de composición alternativa**. Son aquellas sustancias eficientes, seguras y respetuosas con el medio ambiente.

SEGÚN SU IMPACTO AMBIENTAL

Después de años de uso, se ha comprobado que los CFC's (por ejemplo el R-11) y los HCFC's (por ejemplo el R-22) tienen importante impacto ambiental. Tanto es así, que ya no está permitido su uso, ni para cargar con este refrigerante máquinas nuevas ni para sustituirlo en máquinas en funcionamiento. En la actualidad sólo está permitido su uso en máquinas que estén en funcionamiento (las cuales tienen que estar identificadas y etiquetadas), pero si se estropean o hay que recargarlas con este refrigerante, está prohibido en la Unión Europea. Por ello, se han puesto rescatado del olvido refrigerantes naturales ya utilizados con anterioridad, como son el R744 (dióxido de carbono), el R717 (amoníaco), el R600a (isobutano) o el R290 (propano).



Evolución de refrigerantes

SEGÚN SU NATURALEZA

Los refrigerantes pueden ser **sustancias puras o mezclas** de varios componentes. Las mezclas pueden ser

Azeotrópicas: Se llama así a las mezclas de dos o más componentes, que al ser utilizadas en un sistema de refrigeración, no cambian su composición ni su temperatura de saturación al hervir en el evaporador, o se condensan a una presión constante. La composición del líquido es la misma que la del vapor. Son mezclas azeotrópicas en la serie R500 (R501, R502, ...R508A, etc)

Zeotrópicas: Se llama así a las mezclas formadas por dos o más componentes (refrigerantes puros) de diferente volatilidad. Cuando estas mezclas se evaporan o se condensan en un sistema de refrigeración, su composición y su temperatura de saturación cambian. Al hervir esta mezcla, la composición del líquido remanente cambia. Esto es, al empezar a hervir el líquido, se evapora un porcentaje más elevado del componente más volátil. Por lo tanto, conforme continúa hirviendo la mezcla, el líquido remanente tiene menor concentración del componente más volátil, y mayor concentración del menos volátil. El cambio de composición del líquido, da como resultado un cambio en el punto de ebullición. La temperatura a la cual empieza a hervir el líquido (líquido saturado), se le conoce punto de burbuja. La temperatura a la cual se evapora la última gota de líquido (vapor saturado), se le llama punto de rocío. A una misma presión, la temperatura del punto de burbuja es más baja que la del punto de rocío para cualquier mezcla zeotrópica. A este fenómeno se le conoce como "deslizamiento de temperatura". Este deslizamiento de temperatura también ocurre en el condensador, pero aquí, la temperatura de condensación disminuye en lugar de aumentar. El deslizamiento de temperatura puede variar, dependiendo de la mezcla, desde 1°C ó 2 °C hasta varias decenas de grados centígrados, lo que hay tener en cuenta de cara a efectuar cálculos. Son mezclas zeotrópicas los refrigerantes de la serie: R400 (R410A, R401B, R402A, etc).

SEGÚN LA SEGURIDAD PARA LAS PERSONAS

Atendiendo a **criterios de seguridad** (toxicidad e inflamabilidad), el reglamento de seguridad de las instalaciones frigoríficas clasifica a los refrigerantes en los siguientes grupos simplificados:

2.3.- Índices ecológicos.

Como has visto antes el problema de la capa de ozono hizo que se modificaran los refrigerantes que se venían usando hasta hace pocos años. Otro problema medioambiental es el **efecto invernadero** causado, principalmente, por las emisiones de CO₂, pero también por las emisiones de otros gases que tienen su efecto negativo.

Desde un punto de vista medioambiental los refrigerantes se comparan según los siguientes índices índices:

ODP (Ozone Depletion potential). Potencial de agotamiento de la capa de ozono:

Es un parámetro adimensional que mide el potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférico de la unidad de masa de una sustancia en relación con la del R-11 que se adopta como unidad.

GWP (Global Warming Potential). Potencial de calentamiento atmosférico (PCA):

Es un parámetro que mide el potencial de calentamiento atmosférico producido por un kilo de toda sustancia emitida a la atmósfera, en relación con el efecto producido por un kilo de dióxido de carbono, CO₂, que se toma como referencia, sobre un tiempo de integración dado. Cuando el tiempo de integración es de 100 años se indica con PCA 100.

TEWI (Total Equivalent Warming Impact). Impacto total equivalente sobre el calentamiento atmosférico:

Es un parámetro que evalúa la contribución total al calentamiento atmosférico producido durante su vida útil por un sistema de refrigeración utilizado. Engloba la contribución directa de las emisiones de refrigerante a la atmósfera y la indirecta debida a las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) consecuencia de la producción de energía necesaria para el funcionamiento del sistema de refrigeración durante su período de vida útil. Se expresa en kilogramos equivalentes de CO₂.

Para saber más

En nuestro país la regulación del uso de refrigerantes y la seguridad en instalaciones frigoríficas viene regulado por el Real Decreto 138/2011, de 4 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias, así como por el Real Decreto 115/2017 por el que se regula la comercialización y manipulación de gases fluorados.

[Reglamento de seguridad en instalaciones frigoríficas](#) (pdf - 2,38 MB)

[Regulación gases fluorados y equipos que los utilizan](#) (pdf - 1 MB)

Citas para pensar

Se puede vivir dos meses sin comida y dos semanas sin agua, pero sólo se puede vivir unos minutos sin aire. La tierra no es una herencia de nuestros padres, sino un préstamo de nuestros hijos. El amor es la fuerza más

grande del universo, y si en el planeta hay un caos medioambiental es también porque falta amor por él. Hay suficiente en el mundo para cubrir las necesidades de todos los hombres, pero no para satisfacer su codicia.

Mahatma Gandhi.

2.4.- Selección de refrigerantes.

Has visto que hay muchos refrigerantes y no es sencillo en estos momentos elegir cuál es el más adecuado. Este es un problema que afecta más a los fabricantes de equipos pero es importante que conozcas cuáles son las características que deben cumplir los refrigerantes. Entre todos los fluidos potencialmente aptos para utilizar como refrigerantes buscaremos aquellos que reúnan las siguientes características en mayor grado:

- ✓ Presión de evaporación lo suficientemente alta a la temperatura de evaporación deseada. Es deseable que esta presión sea superior a la atmosférica.
- ✓ Calor de vaporización lo mas elevado posible, a fin de que la transmisión de calor se lleve a cabo con la menor cantidad de refrigerante posible.
- ✓ Volumen específico, a la temperatura de evaporación, sea lo más bajo posible. Cuanto mayor sea el calor de vaporización y menor sea el volumen específico, tanto menor será el tamaño del compresor necesario.
- ✓ Presión de condensación, a temperatura ambiente, baja.
- ✓ Temperatura de descarga lo mas baja posible.
- ✓ No tóxico, ni inflamable, ni explosivo. Cuando el refrigerante a utilizar tenga alguna de estas características debe ser utilizado con precauciones especiales.
- ✓ No corrosivo, tanto en estado líquido como en estado de vapor.
- ✓ Estable física y químicamente a las temperaturas y presiones a las que vamos a utilizarlo
- ✓ Buen comportamiento con los aceites.
- ✓ Económico.
- ✓ Bajo ODP, un bajo GWP y un bajo TEWI.
- ✓ Bajo deslizamiento (GLIDE).

Ejercicio Resuelto

Con lo que hemos visto hasta ahora, vamos a intentar responder a las preguntas que se han planteado en el caso práctico al inicio del apartado 2. Es decir,

- 1.- ¿Qué tipo de refrigerante lleva dentro?
- 2.- Si se rompe un tubo del radiador de la parte trasera del frigorífico (condensador) saldrá vapor o líquido?
- 3.- ¿Es contaminante, combustible o peligroso el refrigerante?
- 4.- ¿Qué eficiencia energética tendría?

Mostrar retroalimentación

Los problemas reales no suelen estar predefinidos y con todos los datos en el enunciado. Suele ser necesario hacer hipótesis y estimar datos de partida de una manera abierta y buscando información complementaria.

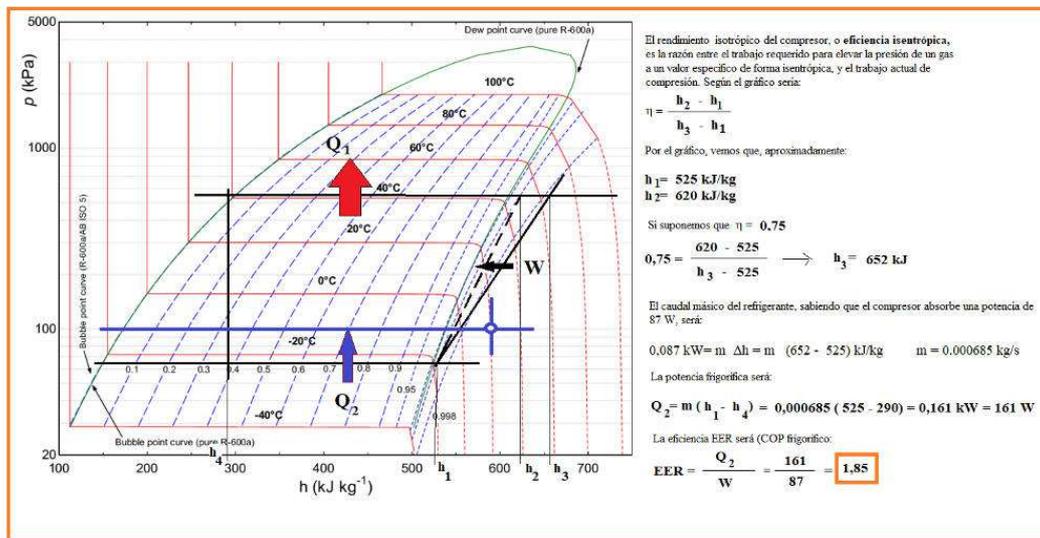
En este caso, la etiqueta nos aporta dos datos con los que podemos hacer bastantes cosas: el refrigerante es el R 600a y la potencia absorbida por el compresor es de 87 W. La potencia del sistema de desescarche y otros datos, como el material usado en el aislante, no son necesarios en las preguntas que se plantean. Vamos a abordarlas:

Tipo de refrigerante, eficiencia y comportamiento en una fuga del condensador

En cuanto al tipo de refrigerante, la respuesta es fácil, es el R-600a, que es un isobutano y del que podemos encontrar fácilmente su diagrama de Mollier, que nos hará falta para responder a las siguientes preguntas. No obstante, antes de representar el ciclo en el diagrama, deberemos determinar las temperaturas estimadas de evaporador y condensador, así como recalentamiento, subenfriamiento y otros parámetros.

Como estamos haciendo una estimación, no tendremos en cuenta las pérdidas de carga y temperatura en las tuberías y en los intercambiadores (evaporador y condensador). Un frigorífico como este dispone de dos temperaturas, la del evaporador y la del recinto de conservación. Si suponemos que sólo tiene un compresor (lo más usual), el frío del evaporador, convenientemente direccionado, sirve para mantener la temperatura en el resto mediante los sensores, sistemas de control y ventiladores correspondientes. Por ello, supondremos que su ciclo tiene una temperatura en el evaporador suficiente para un frigorífico de 3 estrellas, es decir, si el congelador tiene $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, el evaporador debería estar a, unos $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Respecto al condensador, si la temperatura ambiente (en el entorno del condensador) es de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura en el condensador deberá ser de, aproximadamente, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para que haya intercambio de calor.

Supondremos un recalentamiento de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un subenfriamiento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Supondremos también, que el compresor tiene un rendimiento isotrópico de 0,75, que por simplificación en estas potencias, lo asimilaremos al rendimiento global del compresor (realmente el rendimiento global sería algo más pequeño). Con toda esta información podemos dibujar el ciclo, calcular su eficiencia y determinar que, ante una fuga en el serpentín del condensador, el refrigerante, a pesar de que está a alta presión y estado líquido, al escaparse a la atmósfera baja hasta una presión de, aproximadamente 100 kPa y una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eso significa que estará en estado vapor. Puede verse todo ello en el siguiente esquema:



Peligrosidad o grado de contaminación

Hay más de 300 millones de refrigeradores en el mundo usan el isobutano como refrigerante. A finales de 2009 aparecieron informes que sugieren que el uso del isobutano como refrigerante en los refrigeradores domésticos era potencialmente peligroso, pero los pocos casos no muestran relevancia estadística. No obstante, el isobutano es inflamable y, a pesar de la poca cantidad que tiene el frigorífico (68 g) podría originar un incendio en presencia de llama. En la hoja de seguridad de este refrigerante podemos ver que el límite de exposición es de 1,8 g por cada m^3 , es decir, que si se fugaran los 68 g en un pequeño recinto cerrado de $4 \times 3 \times 2,5 = 30 \text{ m}^3$ podríamos tener problemas, ya que la concentración sería de $2,27 \text{ g/m}^3$, supuesto que salga todo el refrigerante, no haya fugas al exterior de la habitación y considerando una mezcla homogénea con el aire de la habitación.

[Hoja de seguridad del R600a](#)



2.5.- Lubricantes.

Si tienes coche o moto conoces la importancia de lubricar el motor. Un motor sin aceite se gripa rápidamente. En el caso del motor frigorífico sucede lo mismo. En estos momentos hay distintos tipos de aceites que son más o menos adecuados dependiendo del refrigerante. Una característica importante es la miscibilidad. El aceite en una instalación frigorífica sale del compresor y circula por toda la instalación. El aceite que sale arrastrado por el gas de descarga o en fase vapor, puede constituir un obstáculo para el intercambio térmico si se acumula en evaporadores e intercambiadores; por ello, debe procederse a retirarlo de dichos puntos. La forma en la que esto se lleve a cabo dependerá de la **miscibilidad** del aceite con el refrigerante.

Que el refrigerante y el lubricante sean miscibles significa que forman una mezcla homogénea, es decir que la mezcla mantendrá las mismas proporciones en todo el recorrido. Otra propiedad es la solubilidad. Está indica que el lubricante es soluble en el refrigerante. La diferencia entre ambos conceptos radica en el hecho de que los dos fluidos si son miscibles forman una mezcla homogénea en cualquier proporción que se unan, en tanto que si son solubles tienen una capacidad limitada de dilución. Lo ideal es que ambos fluidos sean totalmente miscibles en todo el campo de temperaturas que pueden presentarse a lo largo del circuito.

Los aceites que se utilizaban en las instalaciones antes de la sustitución de los refrigerantes eran los aceites minerales MO (mineral oil, en inglés). A partir de la aparición de los nuevos refrigerantes se hizo necesario otros tipos de lubricantes.

- Los lubricantes AB (alquilbencénicos) son los más indicados para instalaciones donde se empleaba aceite mineral (MO), antes de cambiar el refrigerante.
- Los lubricantes POE (Poliol-eter) están especialmente recomendados para instalaciones nuevas equipadas con refrigerante HFC, con preferencia para R-134A, R-407C, R-410A, y R-404A.
- Los lubricantes PAG (polialquilglicoles) lubricantes se utilizan para aplicaciones de aire acondicionado en automóviles equipados con R-134-A.

En la siguiente tabla puedes ver la compatibilidad entre los diferentes tipos de refrigerante y los tipos de lubricantes:

Compatibilidad de lubricantes

Gas	MO (Mineral Oil)	AB (alquilbencenos)	M/A (Minerales Alquilbencénicos)	POE (Poliol-eter)	PAG (Polialquilglicoles)
HCFC	Adecuado.	Adecuado.	Adecuado.	Adecuado.	No compatible.
HFC	No compatible.	Con limitaciones.	No compatible.	Adecuado.	Con limitaciones.
HC	Adecuado.	Adecuado.	Adecuado.	Adecuado.	Con limitaciones.
NH ₃	Adecuado.	Con limitaciones.	Con limitaciones.	No compatible.	Con limitaciones.

Para saber más

En el siguiente enlace vas a poder profundizar sobre las características de los lubricantes.

Ejercicios para Resolver

1.- Determinar la potencia necesaria (en kW) para conseguir un transporte de 4000 kcal/h desde el foco frío a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el foco caliente a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un ciclo frigorífico ideal. Calcular el COP_{max}

Mostrar retroalimentación

Soluciones: $P = 0,704\text{ kW}$; $\text{COP} = 6,58$

2.- Efectuar el análisis termodinámico de un ciclo simple de compresión de vapor que utiliza R-134a como fluido frigorífico, con $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el evaporador y $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el condensador. Hay un recalentamiento de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ del vapor saturado en el evaporador y un subenfriamiento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la salida del condensador. El rendimiento isotrópico del compresor es del 82 % y la potencia frigorífica es de 10 kW. Calcular la potencia del compresor, el COP (Índice de potencia), la RC y el COP máximo. Utilizar el programa SOLKANE

Mostrar retroalimentación

Soluciones: $P_c = 5,69\text{ kW}$; $\text{RC} = 16,21$; $\text{COP}_{\text{máquina}} = 1,76$; $\text{COP}_{\text{máx}} = 3,1$

3.- Dibuja sobre un diagrama de R134 a el ciclo frigorífico de un sistema que tiene una presión de alta de 9,5 bar y de 2,2 bar de baja. La temperatura a la entrada del compresor es de $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a la entrada al dispositivo de expansión de $39\text{ }^{\circ}\text{C}$

Mostrar retroalimentación

No debe ofrecer dificultad alguna este ejercicio

4.- Tenemos dos máquinas frigoríficas de 20 kW de potencia. Ambas operan entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una de ellas funciona con el R32 y la otra con R-134a. Dibuja los ciclos frigoríficos si en ambas tenemos un sobrecalentamiento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el evaporador y un subenfriamiento de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el condensador. Calcula el caudal de refrigerante necesario y determina cuál de ellas supone un menor consumo energético. Despreciar el resto de pérdidas y suponer un rendimiento isotrópico para el compresor de 0,8 en ambos casos (Utilizar Solkane).

Mostrar retroalimentación

Solución: R32 ($\text{IP} = 5,14$ y $m = 72,89\text{ g/s}$); R134a ($\text{IP} = 5,39$ y $m = 121,7\text{ g/s}$) El R134a es más eficiente

5.- Se nos ha gripado el compresor de una máquina frigorífica:

- a. ¿En qué consiste esta avería?
- b. ¿Cuáles pueden ser las causas?

Mostrar retroalimentación

Puedes buscar en Internet más información de detalle que complemente la presentada en este apartado

6.- Realizar un estudio de una máquina frigorífica, enfriadora de agua, de 100 kW de potencia, funcionando con un ciclo simple. Sin embargo, se ha estropeado y debemos sustituir el refrigerante R-407C por el R-410A. La temperatura de condensación es de 40 °C y la de evaporación de 5 °C. El recalentamiento es de 5 °C y el subenfriamiento de 8 °C. El rendimiento isotrópico es de 0,78 y las pérdidas de presión y temperatura son las siguientes:

- Vaporizador: 0,1 bar
- Condensador: 0,08 bar
- Línea descarga: 0,07 bar y subenfriamiento 1 °C
- Línea aspiración: 0,05 bar y sobrecalentamiento 1,5 °C

Determinar todos los parámetros de funcionamiento con ambos tipos de refrigerantes, realizar un estudio comparativo y calcular el ahorro anual que supondría emplear el refrigerante de mayor eficiencia, sabiendo que funciona anualmente una media de 1 200 h a plena potencia en las condiciones señaladas, con un rendimiento del compresor del 82% (la potencia obtenida en Mollier es la potencia que el compresor da en su eje, que es un 82% de la potencia absorbida de la red eléctrica) y se paga a razón de 0,10 €/kWh. Utilizar el programa SOLKANE

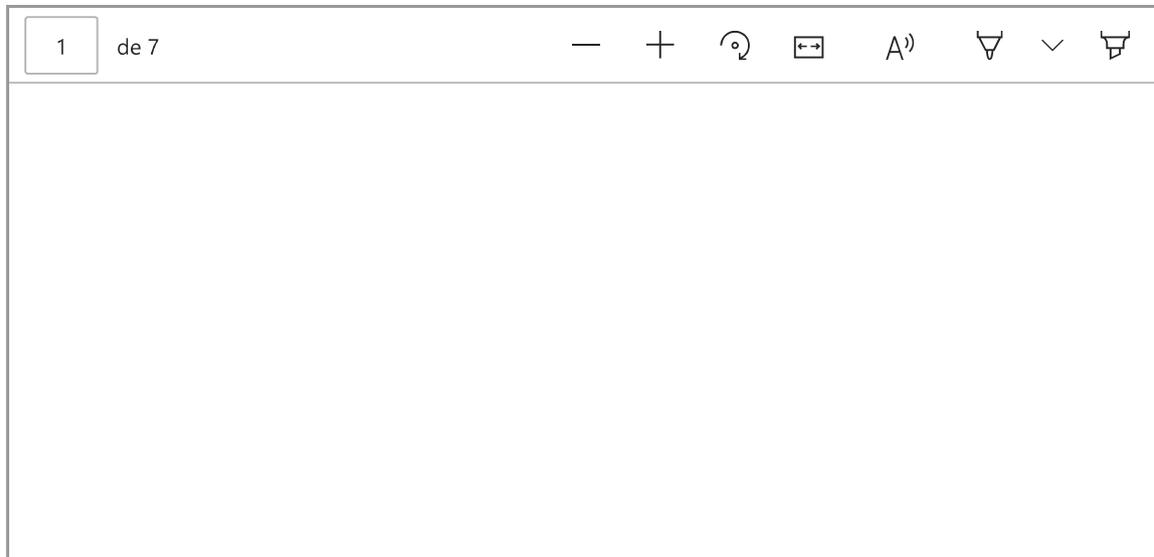
Mostrar retroalimentación

Solución: Es un problema bastante completo y real y consistiría en un informe de eficiencia energética ante el cambio de un refrigerante por otro. Estos cálculos son especialmente interesantes cuando en una gran máquina hay que sustituir un refrigerante prohibido y que no podemos reponer (por ejemplo el R22) por otro más ecológico.

- Grupo de alta seguridad (L1): Refrigerantes no inflamables y con ligera o nula toxicidad. Prácticamente todos los CFC's, HCFC's y HFC's, pertenecen a éste grupo.
- Grupo de media seguridad (L2): Refrigerantes de acción tóxica o corrosiva o inflamable o explosivos mezclados con aire en un porcentaje en volumen igual o superior a 3,5 por cien. Entre ellos se encuentra el amoníaco (NH₃, R-717), el cloruro de metilo (R-30), el difluor metano (R-32) El cloruro de metilo (R-40), el cloruro de etilo (R-160), el anhídrido sulfuroso (R-764) y otros.
- Grupo de baja seguridad (L3): Refrigerantes inflamables o explosivos mezclados con aire en un porcentaje en volumen inferior al 3,5 por cien. Entre ellos se encuentran el etano (R-170), el propano (R-200) el butano (R-600), el isobutano (R-600 a) y el etileno (R-1150).

Debes conocer

El Reglamento de seguridad de instalaciones frigoríficas clasifica todos los refrigerantes en esos tres grupos, tal como vemos en el siguiente documento:



Clasificación de refrigerantes

Para saber más

https://www.youtube.com/embed/N49SKJo_CyM

Calendario de prohibiciones gases refrigerantes