

TEMA 3: CIRCUITO FRIGORÍFICO. BOMBA DE CALOR

1. Introducción
 - a. Ecuación de los gases perfectos
 - b. Principios de la termodinámica y ley de Joule de los gases ideales
2. Principio de funcionamiento de los circuitos frigoríficos. Ciclo de Carnot
 - a. Sistema de refrigeración de vapor
3. Elementos fundamentales de un equipo frigorífico
4. Bomba de calor
5. Aplicaciones
6. Ejercicios

1. INTRODUCCIÓN

Las transformaciones termodinámicas pueden ser de distintos tipos: isocora, isobara, isoterma y adiabática.

Isocora: Se produce sin que el sistema varíe de volumen

Isobara: Se produce sin que el sistema varíe de presión

Isoterma: Se produce sin que el sistema varíe de temperatura

Adiabática: Se produce sin que el sistema intercambie calor

Politrópica: Transformación en la que la presión y el volumen están relacionados de la forma $p \cdot V^n = \text{cte}$

Si $n=0$ el proceso es isobárico Si $n=1$ el proceso es isotermo Si $n=+\infty$ o $-\infty$ el proceso es isocoro

a) Ecuación de los gases perfectos

La teoría de los gases ideales es un modelo para explicar el comportamiento y la estructura de los gases. Está basada en las siguientes hipótesis básicas:

- Los gases están formados por partículas indivisibles, moléculas, sin masa ni dimensiones
- Las moléculas están en continuo movimiento, sin direcciones fijas
- Los choques de las moléculas con las paredes de un recipiente considerado rígido son totalmente elásticas

Sus propiedades están relacionadas por la siguiente expresión:

$$pV = nRT$$

Donde: $n = n^\circ$ de moles del gas, $n=m/PM$ m =masa de gas PM =peso molecular del gas
 $R = \text{cte de proporcionalidad de los gases ideales} = 0'082 \text{ atm}\cdot\text{l}/\text{K}\cdot\text{mol}$

$T = \text{temperatura absoluta en } ^\circ\text{K}$

b) Principios de la termodinámica y ley de Joule para los gases ideales

Primer principio de la termodinámica:

“La energía del universo ni se crea ni se destruye, únicamente se transforma”. Otra forma de este principio es: “El valor del trabajo neto hecho por o sobre un sistema cerrado sometido a un proceso adiabático entre dos estados dados depende únicamente de los estados inicial y final y no depende de los detalles del proceso”.

Segundo principio de la termodinámica:

“El calor introducido en un sistema cerrado se emplea en aumentar la energía interna del sistema y en realizar un trabajo”

Ley de Joule para los gases:

Relaciona el incremento de la energía interna de un gas ideal con la temperatura entre dos estados y el calor específico a volumen constante

$$\Delta U = C_v(T_2 - T_1)$$

2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CIRCUITOS FRIGORÍFICOS. CICLO DE CARNOT

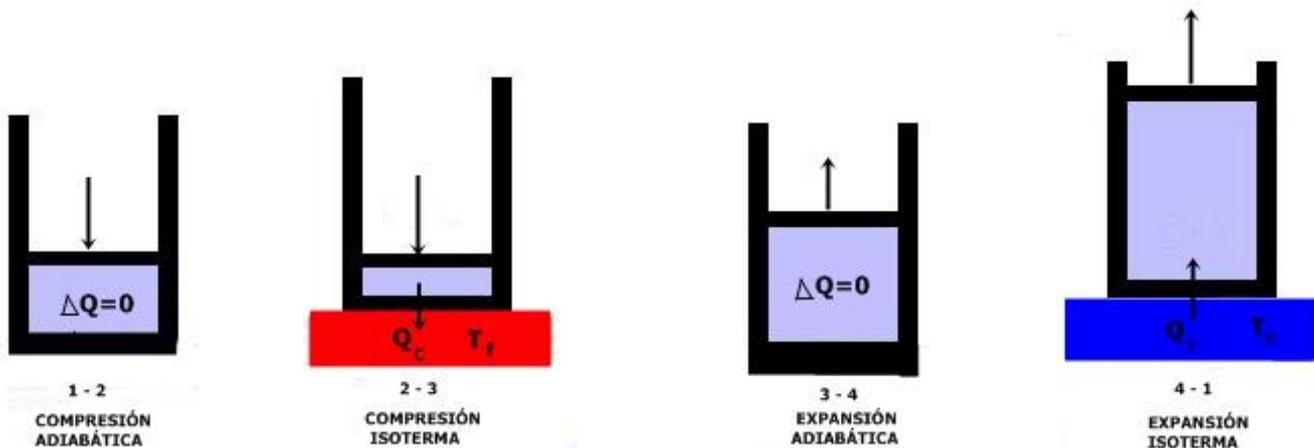
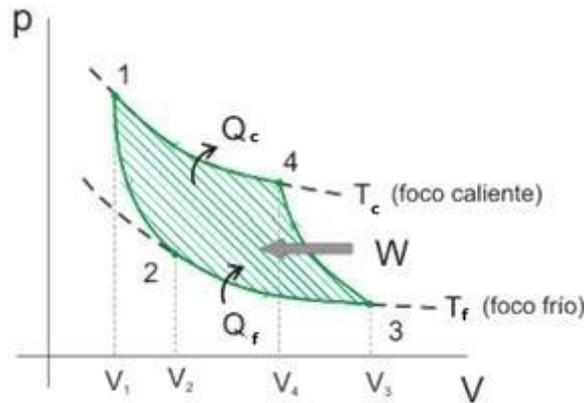
Debido a que el calor no se transfiere de forma espontánea de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura, el funcionamiento de las máquinas frigoríficas es bastante complejo y hasta el siglo XX no se han logrado sistemas efectivos de refrigeración.

El principio de funcionamiento de los ciclos de refrigeración y también de las bombas de calor está en el **ciclo de Carnot**. El ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico **reversible**, que opera entre dos focos térmicos, uno frío (T_f) y otro caliente (T_c). Consta de cuatro procesos como ya hemos visto, dos adiabáticos y dos isotermos, todos ellos reversibles.

El ciclo de Carnot permite hacerse una idea del **rendimiento máximo teórico** que pueden tener los ciclos termodinámicos trabajando en las circunstancias de gas ideal entre los dos focos de temperatura. Esto se resume en los **colorarios de Carnot**:

- Todos los ciclos reversibles que operan entre las mismas temperaturas tienen el mismo rendimiento térmico
- El rendimiento térmico de un ciclo reversible es siempre mayor que el rendimiento térmico de cualquier otro ciclo irreversible, que actúe entre las mismas temperaturas

Un ejemplo de ciclo de Carnot sería el de un dispositivo cilindro-pistón que contuviera un gas ideal en su interior:



La **eficiencia** de un ciclo frigorífico como éste es:

$$\varepsilon = \frac{Q_f}{W_{ciclo}} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Donde Q_f es el calor que se extrae del foco frío (nuestro objetivo), W_{ciclo} es el trabajo que hay que aportar (lo que gastamos para conseguir nuestro objetivo). La temperatura absoluta T está en $^{\circ}K$.

El ciclo de Carnot no sólo puede desarrollarse en un dispositivo cilindro-pistón, sino que puede tener lugar en un circuito formado por una serie de equipos interconectados entre sí por los que circule un fluido refrigerante.

El ciclo de Carnot es ideal y no puede llevarse a cabo en la práctica. Los procesos reales presentan varias dificultades:

- Los procesos reales no son completamente reversibles
- En la fase de compresión existe una mezcla de fluido y de gas, lo cual complica el asunto

a) Sistemas de refrigeración de vapor

Son los más utilizados. En ellos se utilizan fluidos criogénicos (son gases a presión y temperaturas normales; y líquidos a muy bajas temperaturas, por debajo de 150°C), que son sometidos a sucesivas condensaciones y evaporaciones para conseguir el descenso de temperatura.

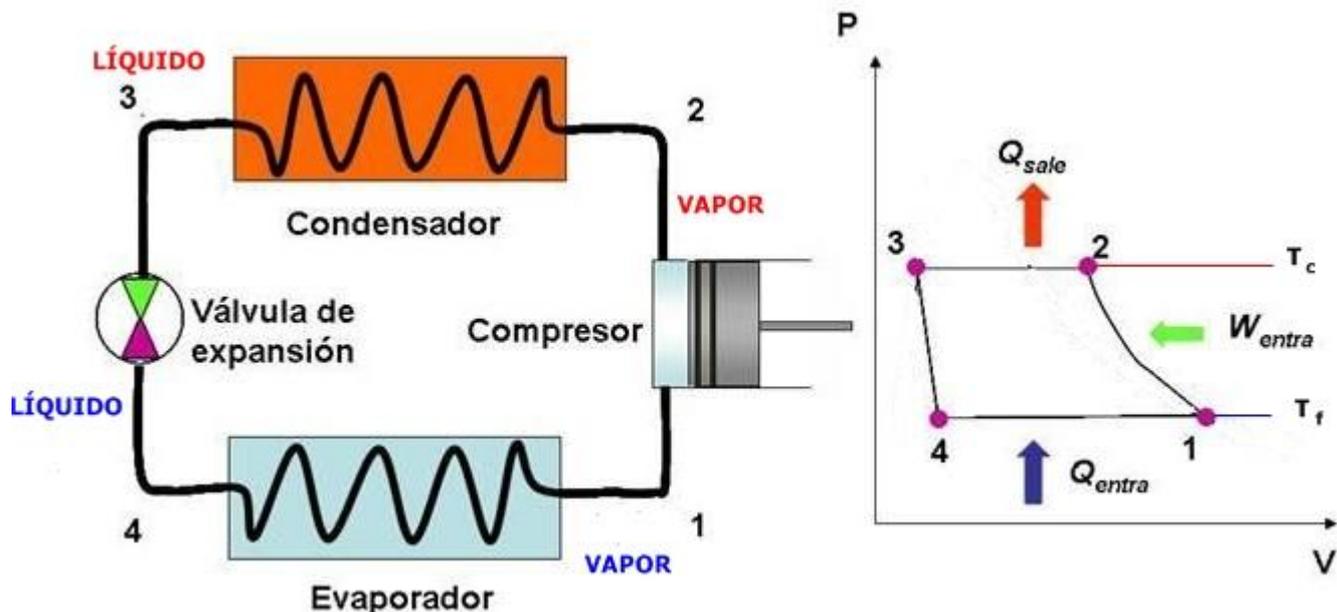
Conceptos a tener en cuenta:

Calor sensible: Cuando se aplica calor a una sustancia y ésta aumenta su temperatura, se está aplicando calor sensible.

Calor latente: Cuando se aplica calor a una sustancia y ésta no varía su temperatura sino que cambia de estado, se está aplicando calor latente que, según sea el cambio de estado se denominará calor latente de vaporización (de líquido a vapor) o de licuefacción (de vapor a líquido).

Temperatura y presión de saturación: Es aquella a la que una determinada sustancia realiza el paso de líquido a vapor, o viceversa.

Todo gas puede ser licuado: Depende de la temperatura y la presión, así por ejemplo, para licuar amoníaco a temperatura ambiente basta con aumentar su presión a 10 atms.



Proceso 1-2: Compresión adiabática de una mezcla bifásica de líquido y vapor a la entrada del **compresor**. A la salida sólo existe vapor saturado a una presión mayor, y con la temperatura aumentada de T_f a T_c . Se consume trabajo

Proceso 2-3: Cesión de calor por parte del vapor saturado al foco caliente (T_c). El vapor saturado cambia de fase y sale del **condensador** como líquido saturado. La temperatura y la presión permanecen constantes.

Proceso 3-4: Expansión adiabática en una **válvula de expansión**, de aquí sale una mezcla de líquido y vapor. Disminuye la temperatura de T_c a T_f , y la presión también baja. Se produce trabajo.

Proceso 4-1: Absorción de calor por parte del refrigerante que entra en el **evaporador** como mezcla de líquido y vapor. A la salida hay una mezcla de líquido y vapor pero más vapor que líquido. La temperatura permanece constante a T_f , la presión también se mantiene constante.

3. ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE UN EQUIPO FRIGORÍFICO

- **Compresor:** Es el elemento mecánico que se encarga de aspirar los vapores fríos procedentes del evaporador a una presión baja, y descargar estos vapores comprimidos a una mayor presión y temperatura a la entrada del condensador. Aquí es donde se alcanza la mayor presión de todo el circuito. Idealmente el funcionamiento del condensador es adiabático, pero en la práctica el compresor cede un poco de calor al ambiente, perdiendo algo de rendimiento.



- **Condensador:** Es en esencia un intercambiador de calor, al igual que el evaporador. En la práctica lo podemos ver en los serpentines que hay detrás de cualquier frigorífico. Cede calor al medio ambiente. A la entrada de tenemos vapor a una determinada presión, a la salida tenemos líquido saturado a la misma presión que en la entrada. En este proceso hay un cambio de fase de gas a líquido, por eso la presión se mantiene constante. La circulación de aire a través del condensador suele ser forzada por un ventilador, para aumentar la transferencia térmica.



- **Elemento de expansión:** Cumple la función de reducir la presión del líquido a la salida del condensador hasta la presión existente en el evaporador, a la vez que reduce la temperatura del líquido.



- **Evaporador:** El refrigerante líquido que entra en el evaporador se transforma en gas al absorber el calor del recinto. El líquido va transformándose poco a poco en vapor, para empezar de nuevo el ciclo.



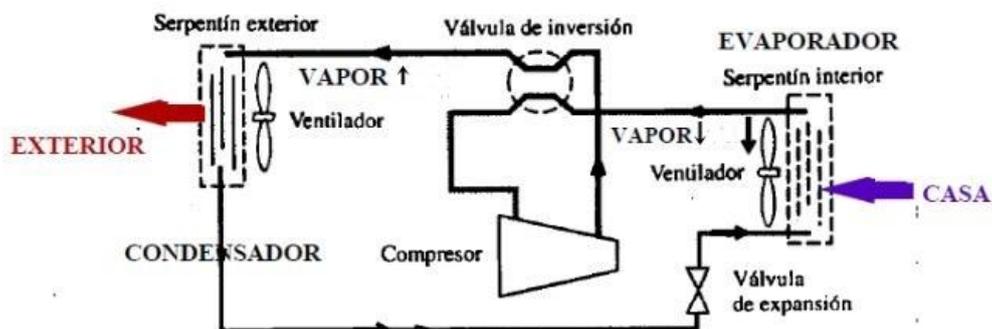
4. BOMBA DE CALOR

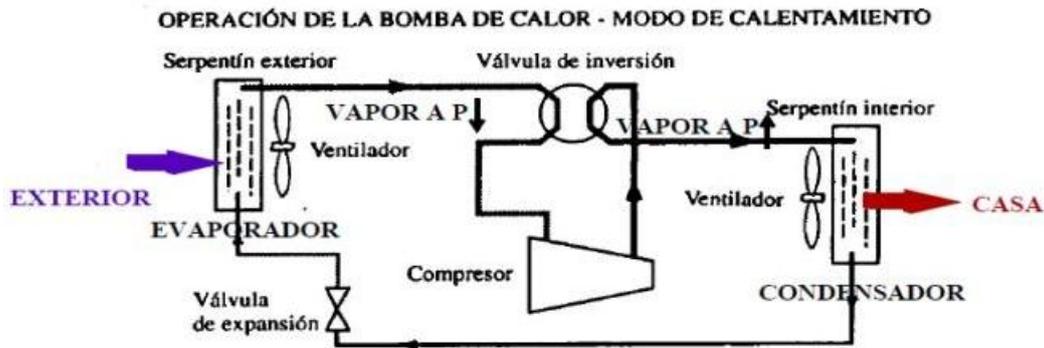
El objetivo de la bomba de calor consiste en aportar calor a un recinto que se encuentra a temperatura T_c desde un foco cuya temperatura es T_f es inferior. Para esto es necesario un aporte de trabajo.

Una bomba de calor es exactamente igual a una máquina frigorífica que opera entre una temperatura del foco frío igual a la del ambiente, y una temperatura del foco caliente mayor que la del ambiente.

Una bomba de calor y una máquina frigorífica pueden funcionar reversiblemente, simplemente hay que cambiar una válvula para que el fluido circule en la dirección contraria:

Veamos el siguiente ejemplo de una bomba de calor aplicada a una vivienda:





Las eficiencias de las máquinas frigoríficas y las bombas de calor son distintas, ya que en la primera lo que obtenemos es el calor que absorbemos del foco frío (Q_f) y en el caso de las segundas lo que obtenemos es el calor que cedemos al foco caliente (Q_c)

Para el caso de la máquina frigorífica:

$$\varepsilon = \frac{Q_f}{W_{ciclo}} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Para el caso de la bomba de calor:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W_{ciclo}} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_f} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

T_f y T_c son las temperaturas absolutas en $^{\circ}\text{K}$

5. APLICACIONES

Una aplicación inmediata de los ciclos de refrigeración es la **conservación de los alimentos**, ya sean carnes, vegetales o pescados. Y fue ésta precisamente la primera aplicación que se le dio al frío. Una aplicación reciente pero ligada a la anterior es la congelación.

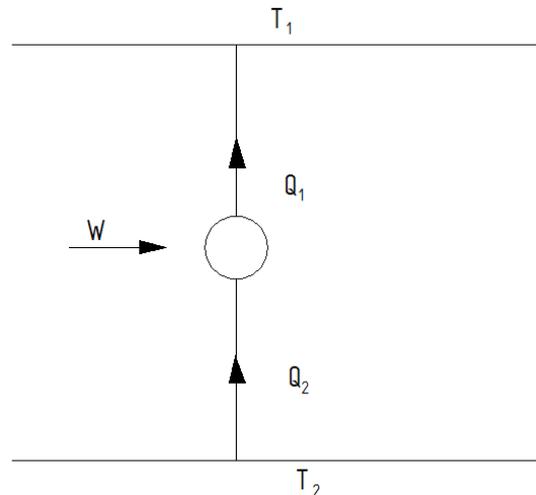
Además de la industria alimentaria, la producción de frío se aplica a **todo tipo de industrias** metalúrgicas, mecánicas, químicas, con usos muy variados.

Hay que destacar también otros usos más recientes como el **acondicionamiento del aire, la criocirugía, la conservación de medicamentos y plasma sanguíneo en medicina, etc.**

En cuanto a las aplicaciones de la bomba de calor, su primer uso fue fundamentalmente la calefacción. Aunque debido a la posibilidad de invertir su funcionamiento, se usa en las casas como bomba de calor en invierno y como sistema de refrigeración en verano.

6. EJERCICIOS

- 1) Tenemos una máquina frigorífica cuyo rendimiento es la mitad del rendimiento del ciclo de Carnot. Esta máquina funciona entre dos fuentes de calor que están a unas temperaturas de 200 y 350 °K. Además, sabemos que la máquina absorbe 1200 J de la fuente fría. ¿Cuánto calor cede la máquina a la fuente caliente?



- 2) Imagina que tienen en casa una nevera que funciona según el ciclo frigorífico de Carnot y enfría a una velocidad de 700 KJ/hora. La temperatura de tu nevera debe ser la apropiada para que no se descongelen los alimentos que tiene en su interior, aproximadamente de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. En tu casa la temperatura ambiente es de unos $28\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ¿Qué potencia de motor debe tener tu nevera para conseguir esta temperatura?
 - Si el rendimiento de tu nevera fuera del 60% del rendimiento ideal de Carnot, ¿cuál debería ser entonces la potencia del motor?
- 3) Supón que quieres congelar un litro de agua a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando una máquina frigorífica que trabaja en un entorno de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ¿Cuál es el trabajo mínimo necesario para congelar el agua?
 - ¿Cuánta energía se cede al entorno?
 - ¿Crees que es un proceso reversible?
- 4) El calor se transfiere espontáneamente:
- En función de las condiciones ambientales
 - En función de la conductividad térmica del medio
 - De un cuerpo a menor temperatura a uno a mayor temperatura
 - Ninguna de las anteriores es correcta
- 5) Si tenemos una máquina reversible y otra irreversible el rendimiento:
- Siempre será mayor en la irreversible
 - Siempre será mayor en la reversible
 - Dependerá de la temperatura de los focos de cada una
 - Ninguna de las anteriores es correcta

6) El ciclo de Carnot:

- a. Es fundamental en la mayoría de las industrias de hoy en día
- b. Es un ciclo puramente teórico
- c. Está superado por otros ciclos más modernos
- d. Ninguna de las anteriores es correcta

7) La turbina:

- a. Es un dispositivo que comprime los gases y algunos líquidos.
- b. Comprime sólo gases
- c. Expande los fluidos y aumenta su temperatura

8) El objetivo de una bomba de calor es:

- a. Aportar calor a un recinto donde la temperatura es mayor que el lugar de donde toma ese calor aportando un trabajo
- b. El mismo que en el apartado a) pero sin aportar trabajo ya que el calor fluye espontáneamente entre esos focos.
- c. Proporcionar temperaturas muy elevadas
- d. Ninguna de las anteriores es correcta

9) Un condensador es:

- a. Un intercambiador de calor, al igual que un evaporador también lo es
- b. Un elemento que realiza una función equivalente al serpentín termo-criogénico
- c. Un sinónimo de evaporador a alta presión
- d. Ninguna de las anteriores es correcta

10) En una compresión adiabática:

- a. En ningún caso sin excepción puede haber intercambio de calor
- b. El intercambio de calor se produce ente el medio y el refrigerante
- c. El fluido se comprime desprendiendo calor
- d. Ninguna de las anteriores es correcta

11) En un circuito de refrigeración, ¿cómo se llama el elemento donde el fluido refrigerante extrae calor del recinto a enfriar?

- a. Condensador
- b. Válvula de expansión
- c. Compresor
- d. Evaporador

12) La eficiencia de una bomba de calor es siempre:

- a. Menor que uno
- b. Mayor que dos
- c. Mayor o igual que uno
- d. Cero

- 13) Se dispone de un aparato de aire acondicionado por bomba de calor para mantener la temperatura de un recinto a 22°C en todo tiempo. Supóngase una temperatura media en verano de 33°C y, en invierno, de 6°C . El aparato tiene una eficiencia del 60% de la ideal, una potencia de 2000 W y está funcionando cinco horas diarias. Se pide:
- Calcular la cantidad de calor aportada al recinto en un día de invierno.
 - Calcular la cantidad de calor extraída del recinto en un día de verano.
 - Realizar un esquema de la instalación nombrando sus componentes.
- 14) Una maquina frigorífica funciona según un ciclo reversible de Carnot entre 2 focos a -6°C y 28°C , recibiendo desde el exterior una energía de 85000 KJ. Se pide:
- Calcular las eficiencias de la maquina, funcionando como maquina frigorífica y como bomba de calor.
 - Calcular la cantidad de calor entregado al foco caliente.
- 15) Un refrigerador desarrolla un ciclo que absorbe calor desde un congelador a un ritmo de 192×10^6 J por día, cuando la temperatura interior es de -5°C y la exterior de 22°C .
- Determine la eficiencia máxima de la máquina.
 - Calcule la potencia mínima necesaria para hacer funcionar el refrigerador.
- 16) Se dispone de un aparato de aire acondicionado accionado por bomba de calor para mantener la temperatura de un recinto a 24°C . Supóngase una temperatura media en verano de 35°C y en invierno de 8°C . El aparato tiene una eficiencia del 70 % de la ideal, una potencia de 2 KW y está funcionando seis horas diarias.
- Calcule la cantidad de calor extraída del recinto en un día de verano.
 - Calcule la cantidad de calor aportada al recinto en un día de invierno.
 - Dibuje los circuitos de la maquina en cada caso.