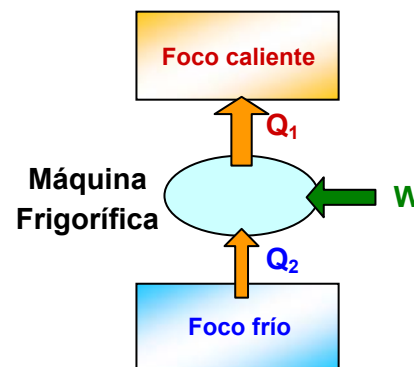


UNIDAD 10. CIRCUITOS FRIGORÍFICOS. BOMBA DE CALOR

1. INTRODUCCIÓN

Ya hemos visto en un tema anterior, que las máquinas frigoríficas tienen la misión de transportar calor de forma cíclica desde un foco frío (cuerpo que se enfría) a un foco caliente. Este proceso no es espontáneo, por lo que, según el segundo principio de la Termodinámica, se requiere efectuar un trabajo desde el exterior (para lo que se usará normalmente un **compresor**). Aplicando el primer principio de la Termodinámica, se cumplirá:

$$Q_1 = W + Q_2$$



El objetivo de una máquina frigorífica puede ser extraer calor del foco frío (frigoríficos, máquinas de aire acondicionado, máquinas de fabricar hielo, instalaciones de licuación de gases para su transporte, etc) o ceder calor al foco caliente (se denominan entonces **bombas de calor** y se usan en viviendas, en secaderos, en invernaderos, en granjas de aves, piscinas climatizadas, etc.).

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Calor sensible y calor latente

Cuando transferimos calor a una sustancia y ésta aumenta su temperatura, se está aplicando **calor sensible**. Por ejemplo, el calor específico del agua es $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, por lo que para aumentar la temperatura de 1 g de agua 1°C hay que aplicarle 1 caloría. Sin embargo, cuando se aplica calor a una sustancia y ésta no varía su temperatura sino que cambia de estado, se está aplicando **calor latente** (de vaporización, si pasa de líquido a vapor o de licuefacción si es de vapor a líquido). Para el caso del agua, el calor latente de vaporización es 537 cal/g , por lo que para que 1 g de agua líquida pase a vapor debe absorber 537 calorías.

Para todos los fluidos, el calor latente es siempre mucho mayor que el calor específico, por lo que es evidente que resulta mucho más rentable extraer calor de un recinto mediante el cambio de estado de un fluido que con el simple calentamiento del mismo.

2.2. Temperatura y presión de saturación

La temperatura y presión de saturación son aquellas a las que se produce el paso de líquido a vapor o viceversa de una sustancia. Estos dos valores están íntimamente relacionados, dependiendo el uno del otro. Cuanto mayor es la presión a que está sometido un líquido, mayor es la temperatura que debe alcanzar para pasar al estado vapor. Por ejemplo, a la presión de 1 atm, el agua hierve a 100°C ; sin embargo, a la presión de 2,3 atm hierve a 125°C y a la presión de 0,5 atm hierve a 82°C .

De lo anterior se desprende, que cualquier vapor puede ser licuado subiendo su presión hasta el valor necesario. Esto es lo que ocurre con sustancias como el butano o el oxígeno que estamos acostumbrados a verlos en forma gaseosa pero que se encuentra en estado líquido en el interior de botellas a alta presión para su almacenamiento y transporte.

2.3. Principio de funcionamiento de la máquina frigorífica

El funcionamiento de las máquinas frigoríficas se basa en la vaporización y licuefacción de fluidos con un bajo punto de ebullición, denominados **fluidos refrigerantes**, en un circuito cerrado. Mediante una disminución de la presión del fluido en un **expansor**, se consigue un líquido a baja presión y temperatura. A continuación, se produce el paso de líquido a vapor (vaporización) absorbiendo calor del ambiente que se quiere mantener frío (foco frío); dicho proceso tiene lugar en el **evaporador**. Posteriormente, el vapor, tras aumentar su presión (e inevitablemente su temperatura) con un **compresor** (aporta trabajo), vuelve a pasar a estado líquido (condensación o licuefacción) en un elemento denominado **condensador**, cediendo calor al ambiente (foco caliente), para que pueda volver a utilizarse de nuevo.

3. FLUIDOS REFRIGERANTES O FRIGORÍGENOS

Las principales cualidades que deben poseer los líquidos frigoríficos son:

- Elevado calor latente de vaporización: con ello una misma cantidad de líquido absorbe más calor al vaporizarse.
- Presión de evaporación (a una T^a aproximada a la del recinto a refrigerar), baja pero de valor superior a la atmosférica, para evitar que pueda entrar aire o vapor de agua en el circuito de refrigeración (el agua puede solidificarse y obstruir algún conducto).
- Baja presión de condensación (a la temperatura del ambiente al que se expulsa el calor): para no tener que conseguir presiones demasiado altas en el compresor, lo que supone ahorro en consumo de energía y de coste de las instalaciones.
- Elevada conductividad térmica: para que no sean necesarias grandes superficies de intercambio.
- Que sea estable y poco reactivo químicamente, sobre todo con el agua, con el aire y con el aceite lubricante del compresor.
- Fácilmente detectable en el caso de fugas en el sistema.
- No atacar la capa de ozono ni contribuir al efecto invernadero.

Casi todos los fluidos refrigerantes son derivados de los **freones**, que son compuestos **cloro-fluoro-carbonados (CFC)**, como el R-11 (CCl_3F), el R-12 (CCl_2F_2), etc. Los freones, por su contenido en cloro, son los principales causantes de la destrucción de la capa de ozono, por lo que su uso está restringido (algunos ya prohibidos y otros con un plazo para dejar de ser utilizados). Los **HCFC (Hidro-cloro-fluoro-carbonados)** como el R-22, R-123, R-124, etc. destruyen en menor medida la capa de ozono, por lo que se están utilizando en sustitución de los anteriores hasta la aplicación de refrigerantes que no afecten a la capa de ozono. Los **HFC (Hidro-fluoro-carbonados)** como el R-134a, R-23, R-125, etc, no contienen cloro, por lo que no atacan la capa de ozono, y son los refrigerantes que deben llevar las nuevas instalaciones.

También se utilizan algunos fluidos inorgánicos como el CO_2 o el amoníaco (NH_3), sin embargo tienen desventajas: el CO_2 requiere presiones muy elevadas para realizar el ciclo, y el amoníaco es tóxico, inflamable y corrosivo.

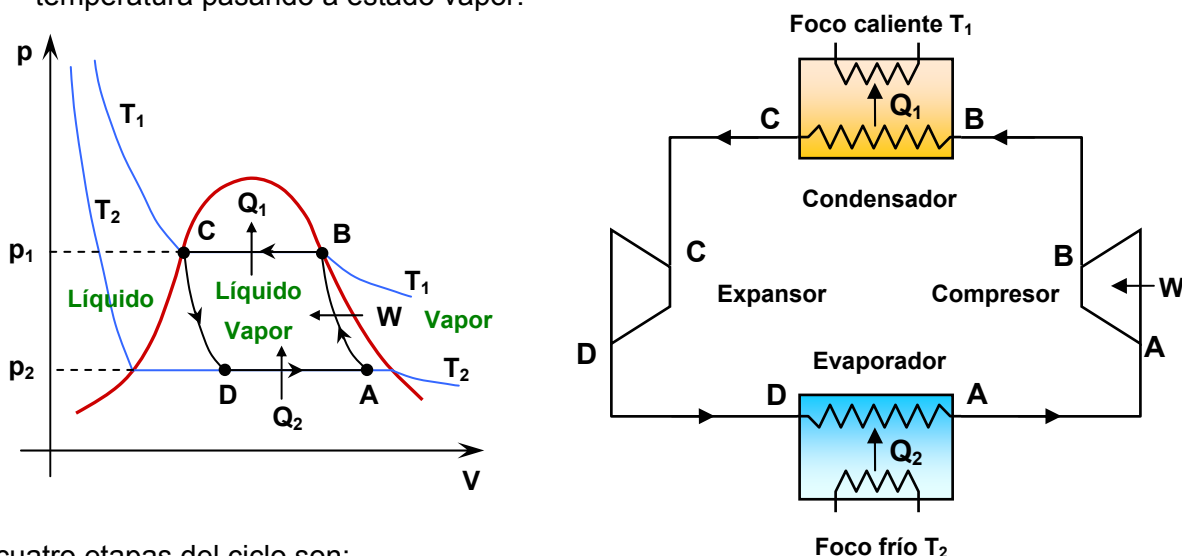
A veces, los fluidos refrigerantes intercambian el calor con el ambiente a través de otro fluido intermedio al cual enfría que se le llama **fluido frigorífero**. Esto impide, en caso de fuga, que el refrigerante entre en contacto con el recinto que se quiere enfriar. Los más usados son el agua (por encima de 0°C) y diversos tipos de salmuera (mezcla de agua y sal) por debajo de 0°C .

4. MÁQUINA FRIGORÍFICA DE CARNOT

El funcionamiento de los circuitos frigoríficos se basa en el ciclo reversible de Carnot recorrido en el sentido contrario a las agujas del reloj (en sentido contrario al de los motores térmicos). Aportando un trabajo (igual al área encerrada por el ciclo en un diagrama pV), el fluido extrae una cantidad de calor Q_2 del foco frío (T_2) y cede una cantidad Q_1 al foco caliente (T_1).

Una instalación frigorífica que funcionara con este ciclo constaría de los siguientes elementos:

- **Condensador:** es el foco caliente (a temperatura T_1) al que el fluido cede calor (Q_1) licuándose.
- **Evaporador:** es el foco frío (a temperatura T_2) del que el fluido absorbe calor (Q_2) evaporándose.
- **Compresor:** eleva la presión (y la temperatura) del fluido en forma de vapor.
- **Expansor:** el fluido en forma líquida se expande disminuyendo su presión y temperatura pasando a estado vapor.



Las cuatro etapas del ciclo son:

- 1.- Proceso A-B:** El **compresor**, movido por un motor, realiza un trabajo W y comprime el fluido refrigerante casi totalmente vaporizado (punto A) de p_2 a p_1 . Al mismo tiempo, eleva su temperatura desde T_2 a T_1 . El proceso es **adiabático** (sin intercambio de calor).
- 2.- Proceso B-C:** En el **condensador**, el fluido en estado de vapor saturado es refrigerado y se licua (punto C), cediendo el calor Q_1 al ambiente o agua de refrigeración. El proceso es una compresión (disminuye el volumen) **isotérmica** (a $T_1 = \text{cte}$) e **isobara** (a $p_1 = \text{cte}$).
- 3.- Proceso C-D:** En el **expansor**, el fluido en estado líquido se expande **adiabáticamente** disminuyendo su presión y su temperatura, con lo que se vaporiza parcialmente (punto D). En esta transformación el fluido realiza un cierto trabajo, pero es tan pequeño que, en la práctica, no puede ser aprovechado.
- 4.- Proceso D-A:** En el **evaporador** el fluido se vaporiza casi en su totalidad a la presión constante p_2 y temperatura constante T_2 . El proceso es una expansión (aumento de volumen) **isoterma** e **isóbara**.

Como ya vimos al estudiar el ciclo de Carnot, al tratarse de un ciclo cerrado, $\Delta U = 0$. En virtud del primer principio de la Termodinámica podemos decir:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta U = Q - W \\ \Delta U = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow W = Q = Q_1 - Q_2$$

Puede demostrarse, aplicando que la entropía es función de estado, que: $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$

De estas dos ecuaciones podemos obtener el trabajo mínimo necesario para extraer el calor Q_2 del foco frío.

$$W = Q = Q_1 - Q_2 = Q_2 \cdot \frac{T_1}{T_2} - Q_2 = Q_2 \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

Se define la **eficiencia** o **efecto frigorífico** (ε) de una máquina frigorífica como la relación entre el calor extraído del foco frío Q_2 y el trabajo utilizado W .

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

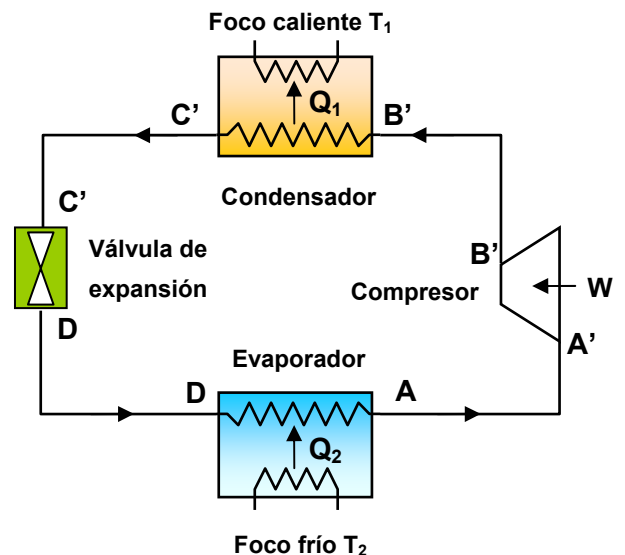
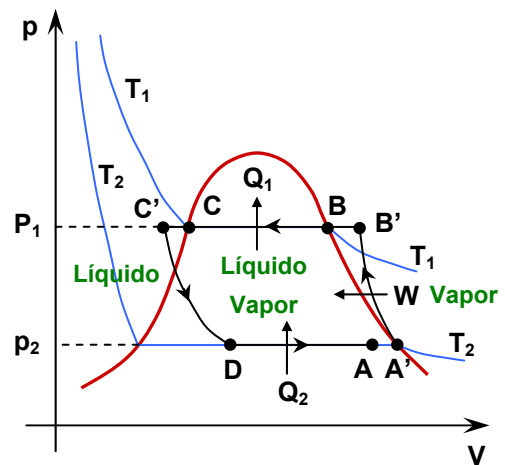
El valor de la eficiencia suele ser mayor que la unidad, y depende en gran medida de la temperatura del foco frío.

Una máquina refrigeradora reversible que funcionara siguiendo un ciclo de Carnot frigorífico (recorrido en sentido contrario a las agujas del reloj) entre dos temperaturas determinadas poseerá la máxima eficiencia. Cualquier otra máquina (no reversible) poseerá una eficiencia menor.

4.1. Ciclo en máquinas frigoríficas reales

Los ciclos de refrigeración que se realizan en la práctica difieren del de Carnot en los siguientes aspectos:

- La evaporación se realiza completa (punto A') pues resulta prácticamente imposible que la evaporación finalice exactamente en el punto A del ciclo de Carnot. Además, la presencia de una parte de líquido mezclado con el vapor daría lugar a problemas de corrosión en el compresor. De esta forma, la compresión se realiza con el fluido completamente en estado vapor (proceso A'B').
- El líquido condensado (punto C) se somete a un subenfriamiento (proceso CC') antes de sufrir la correspondiente expansión para garantizar tener solamente líquido en la válvula de expansión (mejora el rendimiento).
- El expansor, que podría ser una turbina, se sustituye por un elemento más simple y barato como una **válvula de estrangulamiento** o **válvula de expansión**. Esto se basa en que un fluido experimenta una disminución de presión al pasar por un estrechamiento.



La eficiencia de esta máquina frigorífica es: $\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$

Sin embargo, al tratarse de una máquina que sigue un ciclo irreversible, se cumplirá que: $\varepsilon < \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

4.2. Componentes de una instalación frigorífica real



- ❑ **Compresor:** se encarga de elevar la presión del vapor hasta un valor suficientemente alto para que la temperatura de saturación correspondiente sea superior a la temperatura ambiente que existe en el exterior de la máquina, de forma que sea posible el paso del fluido de estado vapor a estado líquido con cesión de calor al ambiente. El compresor es movido por un motor térmico o eléctrico.
- ❑ **Presostatos de alta y baja presión:** tienen la función de controlar los valores de presión en el circuito, lo que permite detectar anomalías y proteger la instalación.
- ❑ **Condensador:** es un intercambiador de calor formado por un conducto en forma de serpentín (para aumentar la superficie de contacto entre el fluido interior y el medio exterior) en el que entra vapor a alta presión y temperatura procedente del compresor. En el condensador el vapor se va licuando conforme cede calor al ambiente. En un frigorífico convencional es la rejilla situada en la parte trasera del mismo.

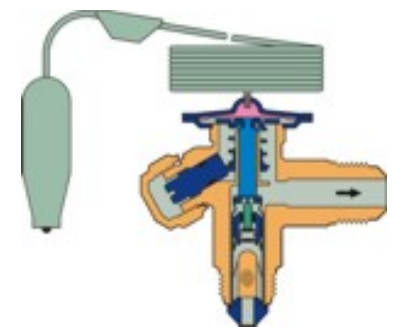


- ❑ **Recipiente de líquido, filtros y visores de líquido y humedad:** a veces están incluidos todos en un mismo dispositivo. El recipiente es una especie de botella que tiene las funciones de acumulador y de absorber las variaciones de volumen provocadas por las variaciones de temperatura y las pulsaciones del compresor. El visor permite apreciar el nivel de carga del circuito observando si hay burbujas a través de una mirilla. También permiten observar si hay humedad (mediante el cambio de color de un papel impregnado en una sal de cobalto).



El filtro limpia de impurezas el refrigerante y elimina la humedad para evitar obturaciones de la válvula de expansión. También neutralizan ácidos presentes en el refrigerante.

- ❑ **Válvula de expansión:** es este dispositivo, el fluido en estado líquido a alta presión procedente del recipiente se expande al pasar por un estrechamiento, transformándose en una mezcla de líquido y vapor (80% líquido, 20% vapor aproximadamente) a baja presión y temperatura. Se debe bajar la presión lo suficiente para que la temperatura de saturación correspondiente a la misma esté por debajo de la temperatura del recinto que se quiere enfriar, de forma que sea posible el paso del líquido a estado vapor absorbiendo calor del recinto.

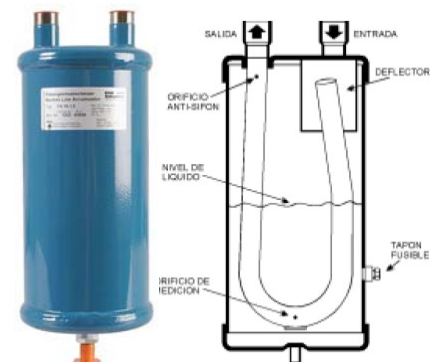


Esta válvula regula además el caudal de entrada de fluido refrigerante en el evaporador. Está gobernada por una sonda termostática, que está situada en contacto con el tubo de salida del evaporador. Si la temperatura del fluido a la salida del evaporador sube, es que está circulando poco fluido y la válvula automáticamente se abre más para que pase más fluido. Si la temperatura es demasiado baja, entonces es que está circulando demasiado fluido, con lo que se corre el riesgo de que no se evapore todo y entre fluido en estado líquido en el compresor, lo que es negativo para éste por los problemas de corrosión que provoca. En este caso, la válvula disminuye su apertura para reducir el caudal.



- ❑ **Evaporador:** es un intercambiador de calor que recibe el fluido en estado mayoritariamente líquido y a baja presión procedente de la válvula de expansión; como la temperatura de saturación para la presión en que se encuentra el fluido es inferior a la del recinto que se quiere enfriar, el líquido se va evaporando conforme absorbe calor de dicho recinto, enfriándolo. En un frigorífico convencional, el evaporador es el serpentín situado en las paredes interiores del congelador y frigorífico.

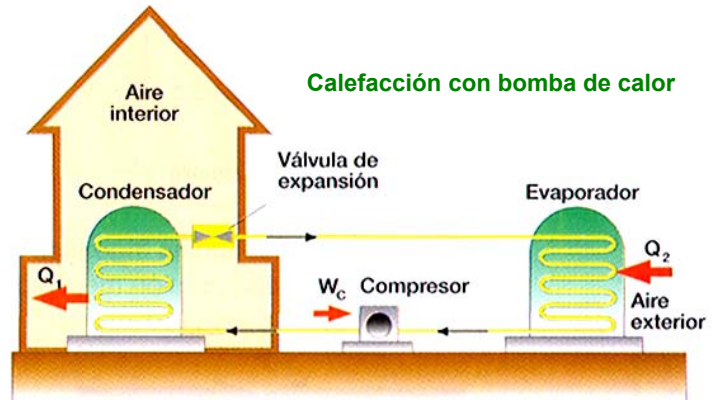
- ❑ **Acumulador de succión:** es un depósito cuya función es evitar que llegue aceite o fluido en estado líquido al compresor. Lo almacena temporalmente y después lo envía al compresor en una proporción que no le cause daños.



5. LA BOMBA DE CALOR

Hasta ahora la función que hemos asignado a la máquina frigorífica era la de refrigerar, es decir, extraer el máximo calor del foco frío (Q_2), con el mínimo trabajo (W), sin importarnos el calor (Q_1) cedido al foco caliente, en este caso el ambiente.

Sin embargo, cabe utilizar la misma máquina con la función de calefacción, es decir, ceder el máximo calor al foco caliente (Q_1) con el mínimo trabajo (W), absorbiendo calor (Q_2) del foco frío, que sería ahora el ambiente. Cuando la máquina funciona de esta manera se denomina **bomba de calor**.



El funcionamiento de la bomba de calor es idéntico al de la máquina frigorífica.

Al igual que antes, en virtud del primer principio de la Termodinámica: $Q_1 = Q_2 + W$

Como ahora lo que interesa es el calor cedido al foco caliente (Q_1), se define la **eficiencia de la bomba de calor** como:

$$\varepsilon' = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} > 1$$

la cual siempre es mayor que la unidad:

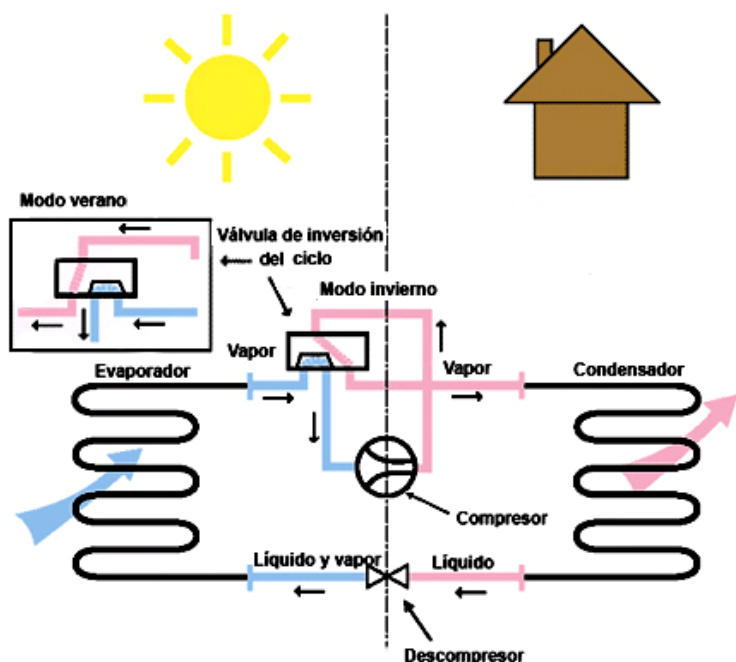
Comparando las eficiencias de la máquina frigorífica (ε) y de la bomba de calor (ε') entre los mismos focos caloríficos resulta:

$$\varepsilon' = \varepsilon + 1$$

Las bombas de calor son mucho más eficaces para uso como calefacción que los calefactores eléctricos, pues mientras éstos últimos sólo pueden convertir en calor el trabajo que le aporta la corriente eléctrica (W), la bomba de calor cede el trabajo realizado por el compresor más el calor extraído del foco frío ($W + Q_2$).

Como hemos observado, la máquina frigorífica y la bomba de calor son muy similares. De hecho una misma máquina puede funcionar de ambas formas, simplemente disponiendo de una válvula 4/2 que intercambie las funciones del evaporador y del condensador. Estas máquinas se denominan **bombas de calor reversibles** y se usan actualmente casi en todas las instalaciones de aire acondicionado.

Así, en verano, el intercambiador situado dentro del local debe hacer la función de evaporador y el situado fuera del local de condensador. En invierno es al contrario.



UNIDAD 10. ANEXO PARA PROBLEMAS

La **nomenclatura** que vamos a usar preferentemente será:

Magnitud	Designación	Unidad habitual
Temperatura del foco caliente	T_1	K
Temperatura del foco frío	T_2	K
Calor intercambiado con el foco caliente	Q_1	J ó Cal
Calor intercambiado con el foco frío	Q_2	J ó Cal
Trabajo	W	J
Potencia	P	W
Eficiencia ideal (ciclo reversible de Carnot)	ε_i	
Eficiencia real	ε_r	
Eficiencia de la máquina frigorífica	ε_{MF}	
Eficiencias de la bomba de calor	ε_{BC}	
Calor específico	c_e	J/(Kg·K) ó cal/(Kg·K)

Relaciones: (las unidades en el S.I. salvo que se indique lo contrario)

Máquina frigorífica

$$\varepsilon_{MF} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Bomba de calor

$$\varepsilon_{BC} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

Si las máquinas siguen un ciclo ideal de Carnot, estas expresiones equivalen a:

$$\varepsilon_{MF} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\varepsilon_{BC} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\varepsilon_{BC} = \varepsilon_{MF} + 1$$

$$P = \frac{W}{t}$$

Nota: se usa comúnmente, aunque cada vez menos, una unidad de medida informal (no está admitida en ningún sistema de medida) denominada **frigoría**, que es equivalente a una **kilocaloría “negativa”**. Es decir, se puede definir como la energía que hay que *extraer* de 1 kg de agua a la presión atmosférica para reducir su temperatura 1 °C. La equivalencia es, aproximadamente: 1 kw = 0,861 frigorías/hora