



## ANEJO Nº 03

### FUNDAMENTOS DE LA BOMBA DE CALOR



## ÍNDICE

1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CALOR .....	5
2. CICLO DE CARNOT .....	7
3. CICLO TEÓRICO .....	9
4. CICLO REAL O PRÁCTICO.....	10
5. RENDIMIENTO MEDIO ESTACIONAL.....	11
6. REVERSIBILIDAD DE LA BOMBA DE CALOR.....	12

## 1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CALOR

Una bomba de calor es una máquina frigorífica capaz de suministrar calor a un foco caliente a expensas de absorberlo de un foco frío. De acuerdo a las leyes termodinámicas, para poder transferir calor en el sentido contrario al flujo natural de calor, será necesario el aporte de un trabajo externo, normalmente aportado por un compresor accionado por un motor eléctrico. El esquema básico que rige el funcionamiento de una bomba de calor es el siguiente:

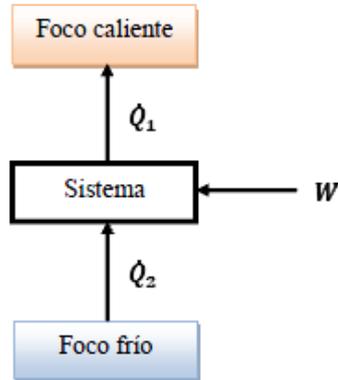


Figura 1: Principio de operación de un ciclo termodinámico

Según la primera ley de la termodinámica, la ecuación que define este ciclo es:

$$Q_1 = Q_2 + W$$

Siendo,

$Q_1$ : Calor cedido al foco caliente (W)

$Q_2$ : Calor absorbido por el foco frío (W)

W: Trabajo realizado por la máquina eléctrica (W)

Los componentes principales que conforman el sistema de una bomba de calor, desde el punto de vista termodinámico, son cuatro: el evaporador, que será el encargado de extraer el calor, el compresor, el condensador, que será el encargado de ceder calor, y la válvula de expansión. En la figura 2 se muestra el esquema completo de una bomba de calor geotérmica trabajando en modo calentamiento de una vivienda:

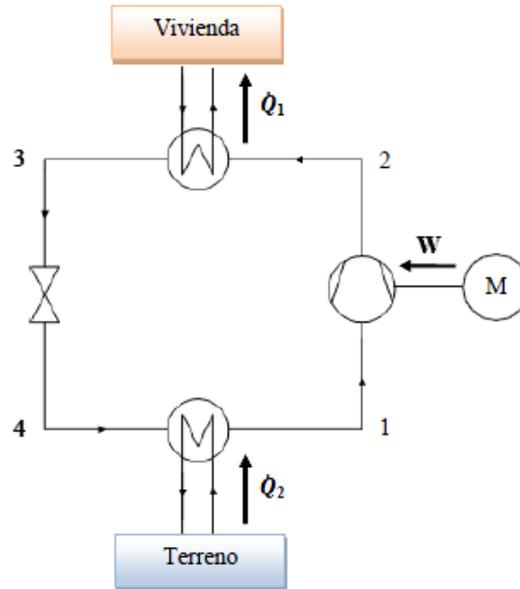


Figura 2: Bomba de calor geotérmica en modo calefacción

El evaporador es un intercambiador de calor donde el fluido refrigerante, a baja presión y temperatura, absorbe el calor traído hasta él por los colectores dispuestos en el subsuelo, que estarán recorridos por un fluido caloportador generalmente formado por una mezcla de agua y glicol, éste último para evitar la congelación de la mezcla.

Al absorber el calor, el fluido refrigerante pasa del estado 4 al 1, evaporándose completamente a presión constante. A continuación, el refrigerante, ya en estado vapor, pasa al compresor que es accionado por un motor, elevándose su presión, temperatura y contenido energético hasta el estado 2. El refrigerante pasa al condensador para ceder a presión constante su energía en forma de calor al fluido de distribución de calefacción del local que se quiere calentar, como puede ser el agua que circula por los radiadores o por el suelo radiante. Debido a esta transformación, al salir del condensador, estado 3, el refrigerante vuelve a estado líquido. Finalmente, el refrigerante pasa a la válvula de expansión, donde se acondiciona el fluido rebajando su presión y temperatura hasta el estado 4, en el que el refrigerante es una mezcla de vapor y líquido, con predominio de este último, completándose así el ciclo.

Ha de tenerse en cuenta que para que se produzca intercambio de calor adecuado el refrigerante debe estar a una temperatura inferior a la del terreno ( $T_{r2} < T_2$ ) en el evaporador y a una temperatura superior a la del fluido de la calefacción en el condensador ( $T_{r1} < T_1$ ), en ambos casos con un margen adecuado (en torno a los 10 °C) para que se dé una buena transferencia de calor y se completen los procesos de evaporación y condensación.

## 2. CICLO DE CARNOT

El ciclo de Carnot es un ciclo térmico en el que el fluido toma calor  $Q_2$  reversiblemente del foco frío a temperatura constante  $T_2$ , absorbiendo del exterior a una cantidad de trabajo  $W$ . El paso de temperatura de  $T_2$  a  $T_1$  y viceversa se realiza reversible y adiabáticamente. En la figura 3 se representa el diagrama T-S y el convencional de un ciclo de Carnot ideal:

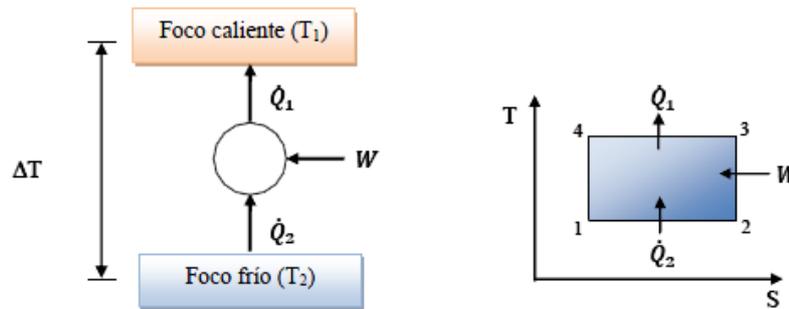


Figura 3: Ciclo de Carnot

En el ciclo teórico de Carnot se define la eficacia como la relación entre el efecto perseguido y el trabajo empleado para conseguirlo. Por tanto, existen dos coeficientes, según se esté hablando de calentamiento (COP) o de refrigeración (EER):

$$\text{COP}_{\text{ideal}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1 \cdot \Delta s}{T_1 \cdot \Delta s - T_2 \cdot \Delta s} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\text{EER}_{\text{ideal}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{T_2 \cdot \Delta s}{T_1 \cdot \Delta s - T_2 \cdot \Delta s} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Recordando la primera ley de la termodinámica:

$$Q_1 = Q_2 + W$$

Es decir:

$$\frac{Q_1}{W} = \frac{Q_2}{W} + 1$$

Resulta:

$$\text{COP}_{\text{ideal}} = \text{EER}_{\text{ideal}} + 1$$

El ciclo teórico sólo sirve de referencia, ya que toma unas condiciones de idealidad que nunca se van a dar en funcionamiento real. Estas condiciones son:

- Procesos reversibles sin rozamientos ni pérdidas
- Procesos isotérmicos y adiabáticos
- Intercambios de calor con diferencias de temperatura infinitesimales

En definitiva, lo que el COP y el EER representan es cuántas partes de energía térmica aporta la bomba de calor por cada parte de energía eléctrica consumida. En la siguiente figura se



muestra que para un COP de 4 se obtienen tres partes de energía térmica por cada parte de energía eléctrica.

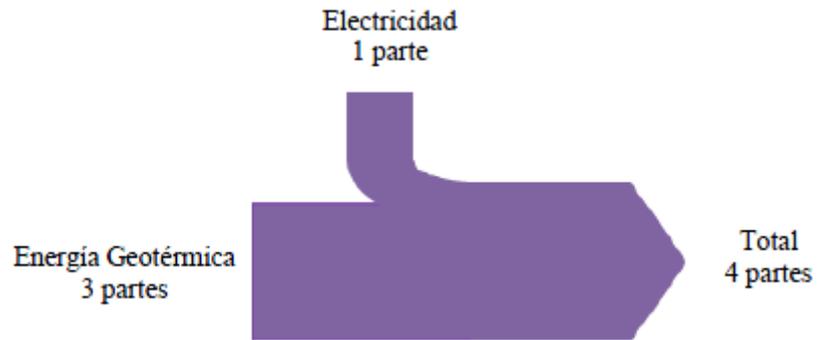


Figura 4: Diagrama de flujo de energía

### 3. CICLO TEÓRICO

El ciclo que sigue realmente una bomba de calor se separa del ideal. En la figura 5 se observa el diagrama real teórico de una bomba de calor siguiendo un ciclo de refrigeración por compresión. En el diagrama se parecía cómo las temperaturas reales a las que evoluciona el fluido en la máquina son diferentes a las del terreno ( $T_2$ ) o las del interior del local ( $T_1$ ). Así, la temperatura del fluido en el evaporador ( $T_{f2}$ ) debe ser inferior a la del terreno para que éste le ceda calor, y la temperatura del fluido en el condensador ( $T_{f1}$ ) debe ser mayor que la del local para poder cederle calor.

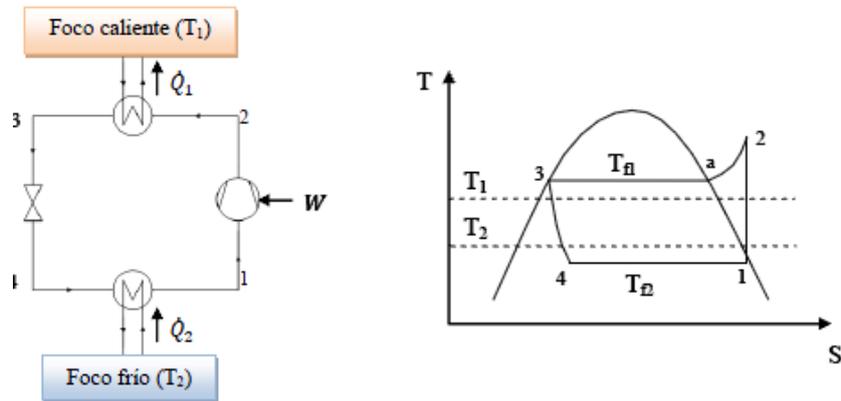


Figura 5: Ciclo teórico de Carnot

De este modo, los nuevos COP y EER teóricos reales quedan definidos:

$$\text{COP}_t = \frac{Q_1}{W} \approx \frac{T_{f1}}{T_{f1} - T_{f2}}$$

$$\text{EER}_t = \frac{Q_2}{W} \approx \frac{T_{f2}}{T_{f2} - T_{f1}}$$

Ahora la diferencia entre  $T_{f1}$  y  $T_{f2}$  es mayor que en el caso ideal, por lo que disminuye el valor de los rendimientos.

#### 4. CICLO REAL O PRÁCTICO

El diagrama p-h (presión entalpía) es el más habitual en el estudio de ciclos de refrigeración. Al igual que en el diagrama T-S, la campana representa el límite a partir del cual el fluido es vapor o líquido: a la derecha de la campana es vapor y a su izquierda es líquido, mientras que dentro de ella una parte del fluido es líquido y otra parte vapor.

En la siguiente figura se representa un diagrama p-h correspondiente al ciclo teórico y otro real de una bomba de calor:

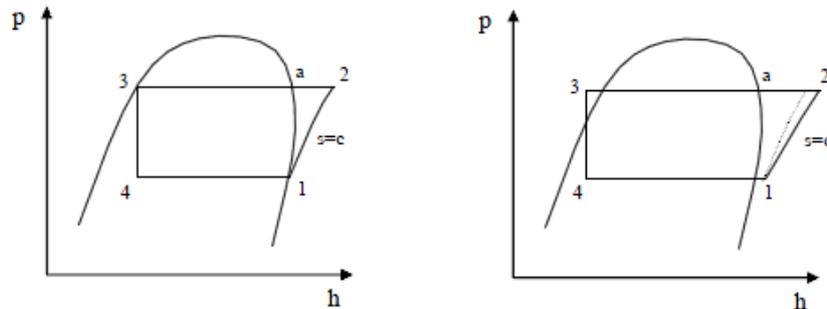


Figura 6: Diagramas p-h del ciclo teórico y del ciclo real

En una bomba de calor real, el fluido no sale del evaporador justo cuando se ha vaporizado completamente, sino que se produce un sobrecalentamiento para asegurar que no entra nada de líquido al compresor (punto 1), ya que eso sería muy perjudicial para éste. Por otra parte, el fluido sufre choques, rozamientos y pérdidas de energía al pasar por el interior del compresor, de modo que el compresor tendrá que aportar más trabajo del teórico necesario para llevarlo al punto 2. El fluido en forma de vapor al entrar al condensador primero tiene que perder calor (tramo 2-a) antes de que dé comienzo su condensación (comienza en a). La extracción de calor en el condensador no termina justo cuando todo el vapor se ha condensado sino que se le extrae más calor para asegurar que no hay burbujas de vapor que puedan dificultar la entrada a la válvula de expansión (punto 3).

Todas estas consideraciones, con las mencionadas pérdidas en el compresor, además de otras pérdidas de calor y de presión en el circuito que no se reflejan en el diagrama por cuestiones de simplicidad, hacen que sea más conveniente definir los rendimientos reales en función de la entalpía que tenga realmente el fluido en cada punto del ciclo:

$$\text{COP} = \frac{Q_1}{W} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \alpha \cdot \frac{T_{f1}}{T_{f1} - T_{f2}}$$

$$\text{EER}_t = \frac{Q_2}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \alpha \cdot \frac{T_{f2}}{T_{f2} - T_{f1}}$$

El coeficiente  $\alpha$  es un valor adimensional menor que la unidad que hace que los rendimientos reales sean menores que los teóricos. Este coeficiente varía desde 0,4 en máquinas pequeñas hasta 0,65 en las de gran potencia. Se estima como valor medio aceptable  $\alpha = 0,50$ .



## 5. RENDIMIENTO MEDIO ESTACIONAL

A lo largo del año las temperaturas externas van a ir variando estacionalmente, y con ellas las temperaturas que se necesiten acondicionar en el interior del local. Aunque es más estable, la temperatura del foco frío también podría presentar cierta variación, dependiendo sobre todo de la profundidad a la que se hayan instalado los colectores del terreno. Con las temperaturas de foco frío y foco caliente irán variando las temperaturas  $T_{f1}$  y  $T_{f2}$  del fluido en la bomba de calor. Esto significa que los rendimientos (COP y EER) van a ser variables a lo largo de todo el año. Se define el rendimiento medio estacional como:

$$COP_{est} = \frac{\Sigma Q_1}{\Sigma W}$$

$$EER_{est} = \frac{\Sigma Q_2}{\Sigma W}$$

Siendo,

$\Sigma Q_1$ : Calor total aportado a lo largo de un período determinado (W)

$\Sigma Q_2$ : Calor total extraído en refrigeración a lo largo de un período determinado (W)

$\Sigma W$ : Trabajo total realizado por el compresor a lo largo del mismo período (W)

## 6. REVERSIBILIDAD DE LA BOMBA DE CALOR

En las bombas de calor se puede efectuar una inversión del ciclo para permutar las funciones respectivas del cambiador interior y exterior. Se dice entonces que la bomba de calor es reversible y su efecto útil pasa de ser la producción de calor a la de frío.

La inversión del ciclo se realiza generalmente mediante una válvula de cuatro vías, tal y como se muestra en las figuras 7 y 8.

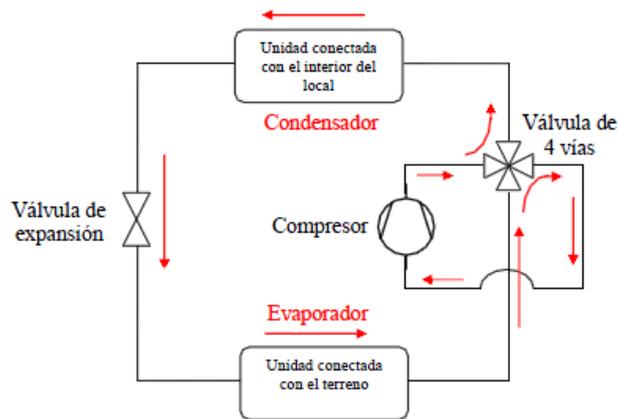


Figura 7: Bomba de calor reversible en modo calefacción

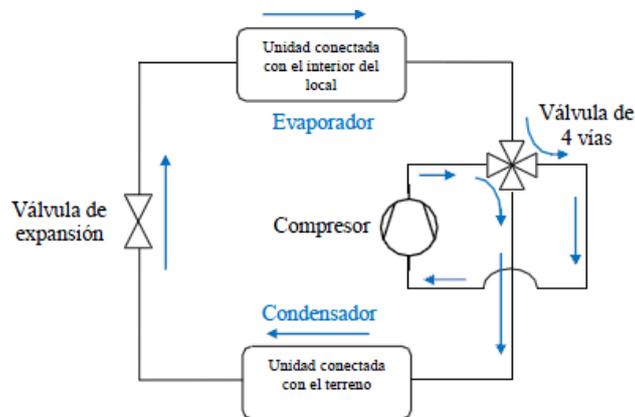


Figura 8: Bomba de calor reversible en modo refrigeración