

F. Tipos de transformaciones. Ciclos termodinámicos. Rendimientos de una máquina térmica

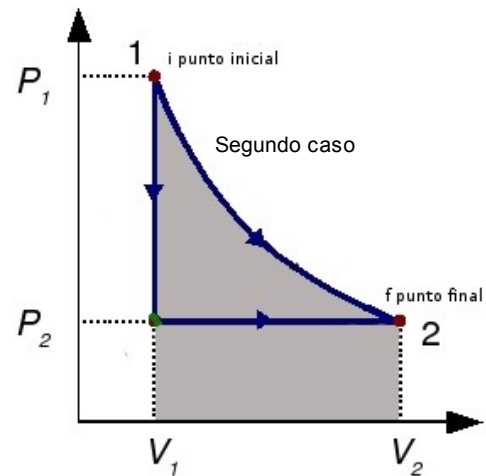
El trabajo no depende solamente del estado energético inicial y final del sistema, sino también depende del camino seguido por el sistema.

Analicemos este concepto en un diagrama P-V (presión-volumen) de un gas, que lo ilustra mejor.

Sea **i el punto inicial de partida**, que es un gas que ocupa un volumen V_1 y a una presión P_1 . Sea **f el punto final de llegada**, que es el gas que ocupa otro volumen V_2 a presión P_2 . Elegimos dos formas de ir del punto i al punto f.

a) En el **primer caso**, se mantiene el volumen constante (V_1) y se comprime el gas (de P_1 a P_2), luego se mantiene constante la presión (P_2) y aumenta el volumen (de V_1 a V_2).

b) En el **segundo caso**, se disminuye presión y volumen al mismo tiempo, siguiendo un tramo directo.



En este caso, el trabajo realizado en el segundo caso es mayor, pues equivale al área del diagrama situada bajo la línea curva, en cambio el trabajo que se realiza en el primer caso es mucho menor, pues representa el área del diagrama bajo la línea a presión P_2 .

Recordando que en un diagrama P-V el trabajo realizado es aquel conseguido al medir la superficie que hay bajo la curva se concluye que el trabajo realizado en el primer caso es mayor que en el segundo caso.

Este es un ejemplo de que partiendo del mismo punto, y llegando al mismo destino, el trabajo realizado no tiene porqué ser el mismo. Va a depender del recorrido.

Definición: Cuando el estado inicial y final coinciden, se dice que el proceso es **cerrado** o cíclico, por el contrario cuando el estado final e inicial son diferentes, se dice que el proceso es **abierto**.

En este caso, ambos recorridos son abiertos, pero si en algún caso, se volviese del punto f al i, se habrá completado un ciclo cerrado.

En una máquina, los procesos son cíclicos ya que se repite una serie de transformaciones y debe llegar a producir trabajo.

Al considerar el calor como una manifestación más de la energía, se ha de admitir la posibilidad de la mutua transformación entre trabajo y calor.

Trabajo ↔ **Calor**

De hecho, una rama de la física, la termodinámica, estudia los procesos de transformación de trabajo en calor, y viceversa.

Definiciones:

- **Sistema abierto:** Aquel en el que hay un posible intercambio de calor y materia con el exterior.
- **Sistema cerrado:** Sólo es posible el intercambio de energía con el exterior.
- **Sistema aislado:** no se puede intercambiar con el exterior materia o energía.

Definición: Diferencia entre calor y temperatura

El calor es una manifestación de la energía en tránsito que pasa de un cuerpo a otro, de forma que el cuerpo que absorbe incrementa la energía que poseen las partículas que lo constituyen.

El calor se puede medir en Julios o Calorías, siendo

$$\begin{aligned}1 \text{ cal} &= 4,18 \text{ Julios} \\1 \text{ Julio} &= 0,24 \text{ cal}\end{aligned}$$

Temperatura: Todos los cuerpos están constituidos por partículas que se encuentran en incesante movimiento. Este movimiento se traduce en un estado energético que posee el cuerpo, es la energía interna, pues bien, como se mencionó antes, al suministrar calor al objeto se incrementa la energía que poseen las partículas (puesto que el movimiento de las partículas es alto) y la experiencia nos dice que aumenta la temperatura.

Así, se define la temperatura como una magnitud física que depende de la velocidad media de las partículas constituyentes del cuerpo.

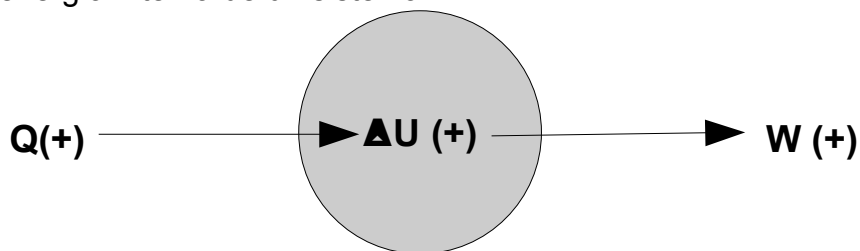
Se puede definir también como la magnitud que mide o es proporcional a la energía cinética media o energía interna del cuerpo. Se mide en grados Kelvin.

G. Principios de la Termodinámica

Primer principio: Básicamente, dice que hay dos formas de variar o modificar la energía interna de un sistema, o lo que es lo mismo, un sistema intercambia energía con el exterior de dos maneras diferentes:

- En forma de calor, cuando existe una diferencia de temperatura
- En forma de trabajo.

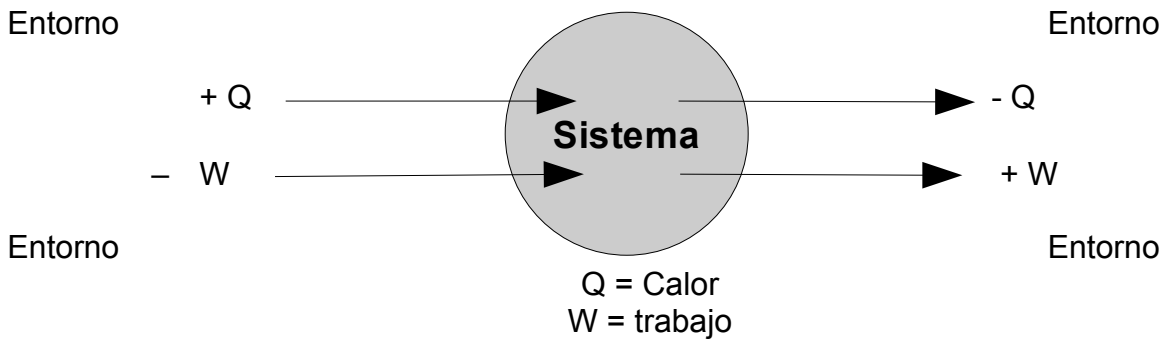
También se puede interpretar así: el calor suministrado se emplea en producir trabajo y en aumentar la energía interna de un sistema.



Así, el primer principio se resume en una expresión (Q calor, W trabajo)

$$Q = W + \Delta U \quad \rightarrow \quad \Delta U = Q - W$$

siendo ΔU , la variación de energía interna del sistema.

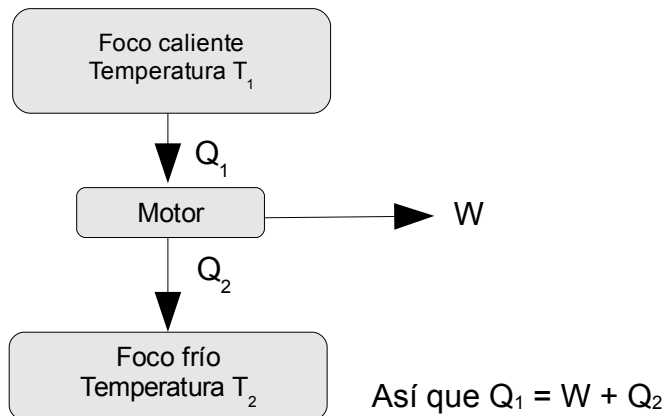


notas: según el gráfico anterior

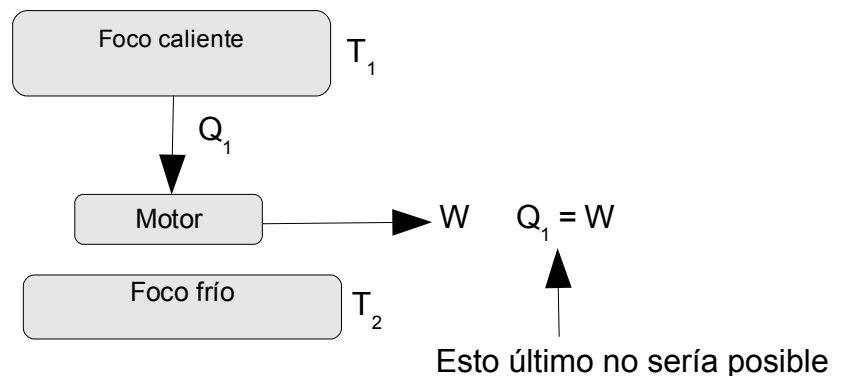
- Se considera positivo el calor absorbido por el sistema
- Se considera negativo el calor cedido por el sistema al entorno
- Se considera positivo el trabajo que el sistema ejerce sobre su entorno
- Se considera negativo el trabajo que el entorno ejerce sobre el sistema

Segundo principio: Se puede enunciar de muchas formas según la situación, pero veamos su definición aplicado a un motor térmico. Según este principio, el calor se intercambia de forma natural y espontánea de un foco de calor más caliente (T_1) a otro foco más frío (a temperatura T_2).

Pues bien, una máquina cíclica que actúa entre dos focos a distintas temperaturas absorbe calor del foco caliente para convertir una parte en trabajo y el resto pasa al foco frío.



Cuanto menor sea el intercambio del calor del foco caliente al frío, más cantidad de calor se transforma en trabajo. En una máquina ideal, el calor cedido por el foco caliente (Q_1) se transformaría totalmente en trabajo.



El rendimiento de un motor térmico sería

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

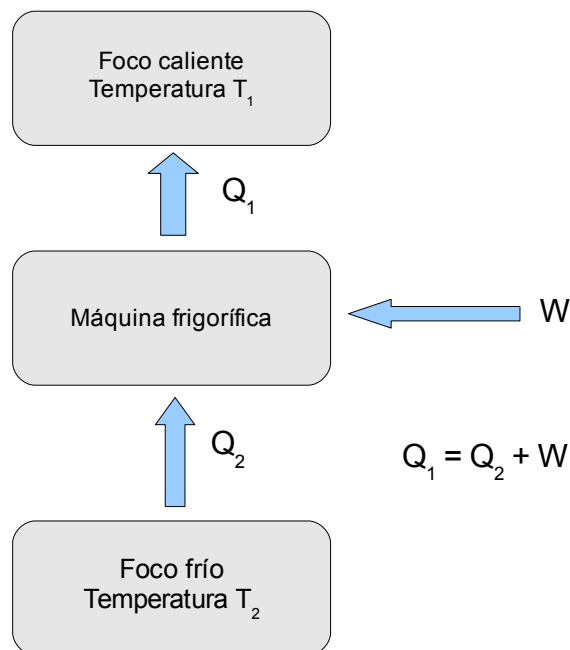
siendo W el trabajo útil realizado por la máquina
 Q_1 el calor que cede el foco caliente

se puede deducir que, dado que $Q_1 = W + Q_2$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

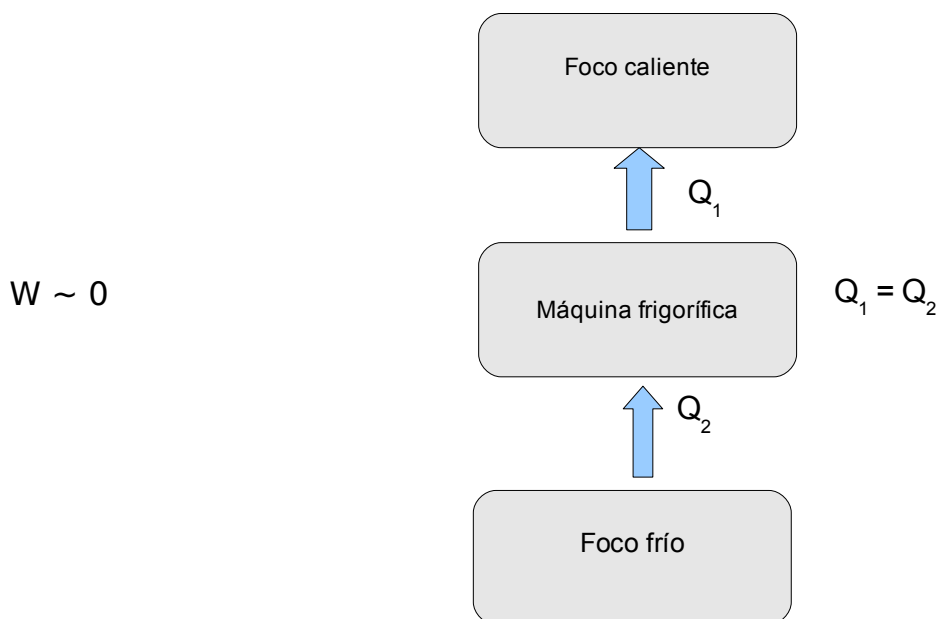
El segundo principio en las máquinas frigoríficas

Las máquinas frigoríficas funcionan a la inversa de las máquinas térmicas, es decir, absorben una cantidad de calor Q_2 de un foco frío y ceden calor Q_1 a un foco caliente, **consumiendo trabajo, W** . Para estas máquinas se define **eficiencia** como la relación entre el calor absorbido del foco frío y el trabajo necesario para ello.



Eficiencia $\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$ El trabajo lo suministra el compresor

El mejor ciclo de refrigeración (el ideal) sería aquel que extrae la mayor cantidad de calor Q_2 del foco frío a temperatura T_2 con el mínimo de trabajo, e incluso, sin trabajo.



H. Ciclos de Carnot

Antes de pasar a definir los [ciclos de Carnot](#), definamos lo que es un proceso reversible. Es un proceso cuya trayectoria se puede llevar a cabo a la inversa de forma exacta que el recorrido inicial. Si una trayectoria termodinámica es reversible, se puede afirmar que en todo momento el sistema siempre se encuentra en equilibrio, es decir, que la temperatura y presión del sistema permanecen invariables a lo largo del tiempo.

Este tipo de procesos o transformaciones son ideales, no existen en la naturaleza porque en todo proceso existe una pérdida de energía por pequeña que sea y nunca se puede recuperar al invertir el proceso.

Ejemplos: Un objeto que se desliza por el suelo desde un punto A hasta otro punto B pierde energía por rozamiento, si volviese desde B hasta A, nunca recuperaría su energía perdida por rozamiento.

Si quemamos butano, existe una combustión que lo transforma en CO_2 y H_2O , además de calor. No es posible invertir el proceso, es decir, que ese calor generado combine CO_2 y H_2O para obtener butano.

Existe un ciclo ideal que realiza un **motor térmico ideal** propuesto por el francés Carnot, que es reversible y sirve como referencia para estudiar cualquier motor. Es el ciclo de Carnot para **motores de Carnot**. Estos motores no son reales, son ideales.

Características:

1. Actúan entre dos focos de calor, el caliente a temperatura T_1 y el frío a temperatura T_2
2. Se realizan en cuatro etapas o tiempos
3. Se considera reversible

Tiempos del motor de Carnot.

Tiempo 1: Expansión isotérmica del cilindro a la temperatura T_1 . En este tiempo, el cilindro genera trabajo y absorbe calor Q_1 , que es...

El trabajo es
$$W_1 = Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

siendo V_2 el volumen final que tiene el cilindro

V_1 el volumen inicial que tiene el cilindro
 R constante de los gases ideales

NOTA: isoterma significa a temperatura constante.

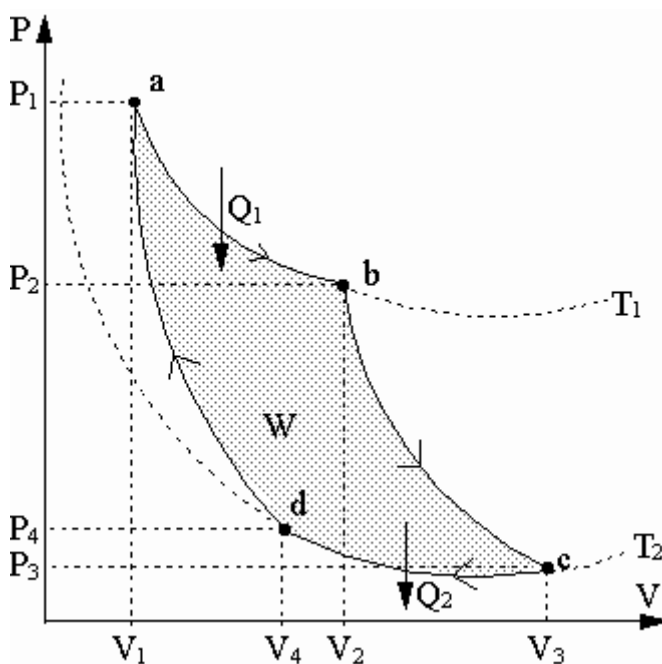
Tiempo 2: Expansión adiabática. No hay intercambio de calor con el exterior. Se cumple la ecuación

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

siendo γ una constante que depende del gas del interior del cilindro. Esta constante se llama coeficiente adiabático. En este tiempo se produce trabajo

Tiempo 3: compresión isotérmica. En este tiempo el gas se comprime a temperatura constante (T_2) del foco frío, cediendo una cierta cantidad de calor Q_2 . Esto exige un consumo de trabajo....

$$W_2 = Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4} \quad \text{NOTA: } W_2 < W_1$$



Tiempo 4: Compresión adiabática. El gas se comprime adiabáticamente, es decir, sin que haya intercambio de calor. Su temperatura pasa de T_2 a T_1 , finalizando el ciclo. En este tiempo, se cumple la ecuación...

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1}$$

NOTA: Un proceso adiabático es aquel en el que no existe intercambio de calor con el exterior, es decir, el calor no entra ni sale del sistema.

En el gráfico se aprecian los cuatro tiempos del ciclo de Carnot

ab: Tiempo 1: Expansión isotérmica a temperatura T_1 . Se absorbe el calor Q_1

bc: Tiempo 2. Expansión adiabática. Baja la temperatura de T_1 a T_2

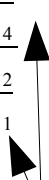
cd: Tiempo 3. Compresión isotérmica a temperatura T_2 . Se cede el calor Q_2

da: Tiempo 4. Compresión adiabática. Sube la temperatura de T_2 a T_1

la zona sombreada es el trabajo realizado por el motor de Carnot.

El rendimiento, recordemos, es...

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$


comparando los tiempos 2 y 4

$$\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

$$\left(\frac{V_3}{V_2}\right) = \left(\frac{V_4}{V_1}\right) \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{V_3}{V_4}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

sustituyendo

$$\eta = 1 - \frac{RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}}{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

y deducimos, finalmente, la siguiente expresión

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Interpretación de esta expresión:

El rendimiento de un ciclo que pertenece al motor de Carnot solo depende de la temperatura del foco frío y del caliente, siendo independiente

de la naturaleza del sistema.

Si el ciclo de Carnot funcionase al revés (puesto que es reversible), hablamos de máquina frigorífica.

NOTA IMPORTANTE: El rendimiento de otra máquina cualquiera (real) que actúa entre los mismos focos de temperatura (T_1 y T_2) no puede ser superior a la Carnot, NUNCA.

Ejemplo: un ciclo de Carnot que trabaje entre un foco de 20°C y 900 °C

Temperatura del foco caliente: $T_1 = 900 + 273 \text{ K} = 1173 \text{ K}$

Temperatura del foco frío: $T_2 = 20 + 273 \text{ K} = 293 \text{ K}$

El rendimiento será

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \eta = 1 - \frac{293}{1173} = 0,75$$

El rendimiento de esta máquina de Carnot es del 75%