

CONTENIDO

- **Introducción**
- **Máquinas térmicas. Rendimiento**
- **Segundo principio. Enunciado de kelvin-Planck**
- **Refrigeradores y bombas de calor**
- **Segundo principio. Enunciado de Clausius**
- **Ciclo de Carnot. Consecuencias**



BIBLIOGRAFÍA

TIPLER, PA. Física para la Ciencia y la Tecnología Ed Reverté, 5ª edición
Cap. 19.1-19.5

DOUGLAS C. GIANCOLI Física para Universitarios
Cap. 20.1-20.4, 20.10

YUNUS A. ÇENGEL, MICHAEL A. BOLES Termodinámica Mc Graw Hill 2006
Cap. 6



INTRODUCCIÓN

El primer principio es una ley experimental que niega la posibilidad de que se verifiquen procesos en los que no se cumpla la conservación de la energía. Sin embargo, no dice nada acerca de en qué dirección se producen. Por ejemplo:

- Dos objetos a diferente temperatura se ponen en contacto térmico. El primer principio no se opone a que el calor pase del cuerpo frío al caliente, sólo establece que el calor cedido por un cuerpo es igual al calor absorbido por el otro. Sin embargo, experimentalmente se observa que las temperaturas se igualan, lo que implica que el calor fluye del objeto más caliente al más frío, nunca del más frío al más caliente.
- Empujamos un bloque por una mesa con rozamiento siguiendo una trayectoria cerrada. El trabajo de rozamiento se transforma en energía térmica que eleva la temperatura del conjunto bloque-mesa. El conjunto cede calor al entorno hasta conseguir el equilibrio térmico. El proceso contrario no ocurre: el bloque y la mesa no se enfrían espontáneamente para convertir esa energía térmica en energía cinética

El segundo principio de la termodinámica establece cuáles procesos pueden ocurrir en la naturaleza y cuáles no. No dice nada acerca de la rapidez con la que se alcanza el equilibrio. Es decir, un proceso permitido termodinámicamente puede ser muy rápido o puede ser tan lento que no se observe en la vida cotidiana y por tanto nos llevamos la idea errónea de que no está permitido.



MÁQUINAS TÉRMICAS

El trabajo se puede convertir en calor de manera directa y por completo, sin embargo convertir el calor en trabajo requiere de dispositivos especiales. Estos dispositivos se llaman **Máquinas Térmicas**.

Las máquinas térmicas:

- Realizan procesos cíclicos
- Contienen una sustancia de trabajo
- Reciben calor, Q_H , de una fuente a temperatura alta, T_H
- Convierten parte del calor que se les suministra en trabajo
- Ceden calor, Q_C , hacia un sumidero de calor a baja temperatura, T_C

Ejemplos: central eléctrica de vapor, motores de combustión interna

Las fuentes y sumideros de calor son sustancias con capacidad calorífica alta, que pueden suministrar o absorber gran cantidad de calor sin que se modifique apreciablemente su temperatura.

Ejemplos: un combustible fósil que se quema, atmósfera, ríos, lagos, etc.



RENDIMIENTO

Si evaluamos el primer principio en un proceso cíclico

$$\Delta U = \Delta Q + W$$

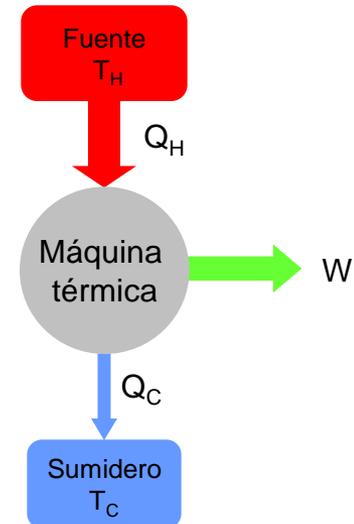
$$\Delta Q = -W \quad \text{puesto que } \Delta U = 0$$

Si calculamos el trabajo realizado **POR** la máquina:

$$W = |Q_H| - |Q_C|$$

↑ calor absorbido
↑ calor cedido

Representación gráfica



RENDIMIENTO, ε : se define como el cociente entre el trabajo **realizado por la máquina** y el calor absorbido

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_H} = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

Valor típico de rendimiento es del 40%

2º PRINCIPIO: Enunciado de Kelvin-Planck

Es imposible construir una máquina térmica que, **operando en un ciclo**, no produzca otro efecto que la absorción de calor de un depósito y la realización de una cantidad de trabajo igual al calor absorbido.

Es decir, una máquina térmica debe intercambiar calor con una fuente de alta temperatura y otra de baja temperatura para funcionar. Por tanto la eficiencia nunca puede ser del 100% y no puede convertir todo el calor que absorbe en trabajo

Ejemplo: Sabemos que podemos calentar un líquido moviéndolo con unas aspas (la energía cinética se transforma en energía térmica), pero el segundo principio nos dice que el líquido no se enfría espontáneamente para transformar su energía térmica en calor, y ésta en energía cinética de las aspas.

Ejercicio: Se transfiere calor a una máquina térmica desde un horno a razón de 80 MW. Si la tasa de calor que se cede a un río cercano es 50 MW, determinar la potencia de la máquina y su rendimiento.

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_H} = \frac{W/t}{|Q_H|/t} = \frac{\text{Potencia}}{|Q_H|/t} = \frac{(|Q_H| - |Q_C|)/t}{|Q_H|/t}$$

$$\text{Como } \frac{(|Q_H| - |Q_C|)}{t} = 80 - 50 = 30 \text{ MW} \equiv \text{Potencia}$$

$$\varepsilon = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} = 0.375 = 37.5\%$$



REFRIGERADORES

La transferencia de calor de un medio que se encuentra a baja temperatura hacia otro de temperatura alta requiere de dispositivos especiales, llamados **refrigeradores**.

Esencialmente un refrigerador es una maquina térmica que funciona en sentido inverso, es decir extrae calor Q_C de un foco frío a temperatura T_C y cede calor Q_H a un foco caliente a temperatura T_H

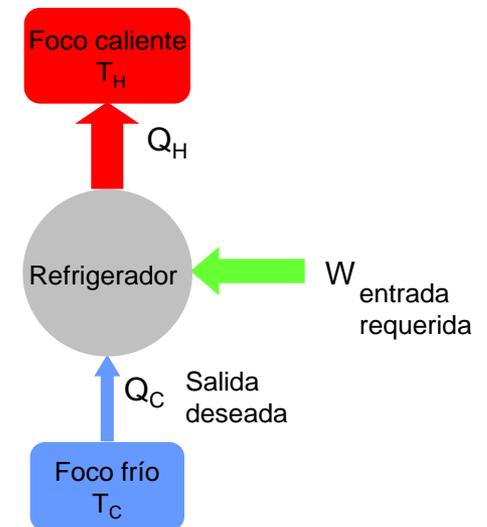
La capacidad de retirar calor de un refrigerador se mide a partir de su **coeficiente de eficiencia η** , que se define como el cociente entre el calor que es capaz de extraer y el **trabajo realizado sobre el** refrigerador

$$\eta = \frac{|Q_C|}{W} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|}$$

El coeficiente de eficiencia puede ser mayor que 1. Valores típicos son 5 o 6.

Un aparato de aire acondicionado es un refrigerador

Representación gráfica

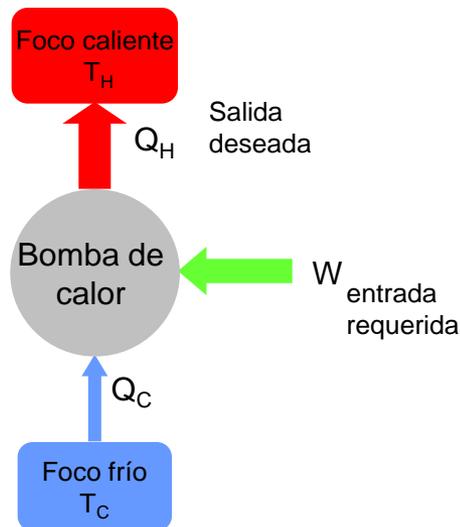


BOMBAS DE CALOR

Su objetivo también es retirar calor de un foco frío. Operan de la misma manera que los refrigeradores pero con diferentes objetivos.

OBJETIVOS:

- Refrigerador: eliminar calor del el espacio refrigerado para mantenerle a una temperatura baja. En el proceso es inevitable ceder calor a un medio a mayor temperatura.
- Bomba de calor: mantener un espacio a una temperatura alta. Para ello absorbe calor de un medio a temperatura baja (ej: aire frío del exterior en invierno) para ceder calor a un medio a mayor temperatura (ej: casa)



Ej: un refrigerador colocado en invierno en la ventana con la puerta abierta al exterior funcionará como una bomba de calor porque absorberá calor del exterior para cederlo al interior de la casa

Su **coeficiente de eficiencia** se define como el cociente entre el calor que cede al foco caliente y el **trabajo realizado sobre** la bomba de calor

$$\eta_{BC} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = 1 + \eta$$



2º PRINCIPIO: Enunciado de Clausius

Es imposible construir un dispositivo que, **operando en un ciclo**, no produzca otro efecto que la transferencia de calor de un medio a menor temperatura a otro a mayor temperatura.

Es decir, un refrigerador no puede funcionar si no se ejerce un trabajo sobre él. Por ejemplo un refrigerador doméstico no funciona si su compresor no se conecta a un motor eléctrico. Por tanto, el efecto en el entorno es la suma del calor que se le cede más la energía consumida para su funcionamiento

Los enunciados del segundo principio de kelvin y de Clausius son equivalentes



TEOREMA DE CARNOT

El segundo principio establece que ninguna máquina térmica puede tener un rendimiento del 100%.
¿Cuál es el más alto que se puede conseguir?

TEOREMA DE CARNOT:

Ninguna máquina térmica que funcione entre dos focos térmicos dado puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que opere entre esos mismos focos.

¿Por qué?

- el trabajo neto que realiza la sustancia de trabajo es máximo en los procesos reversibles

¿Qué condiciones deben cumplirse para que un ciclo sea reversible?

- **no haya fuerzas disipativas**, como por ejemplo el rozamiento
- **sólo haya transferencia de calor entre sistemas a la misma temperatura o separados por un dT**
- **los procesos sean cuasiestáticos**, es decir lo suficientemente lentos para que el sistema pase siempre por estados de equilibrio

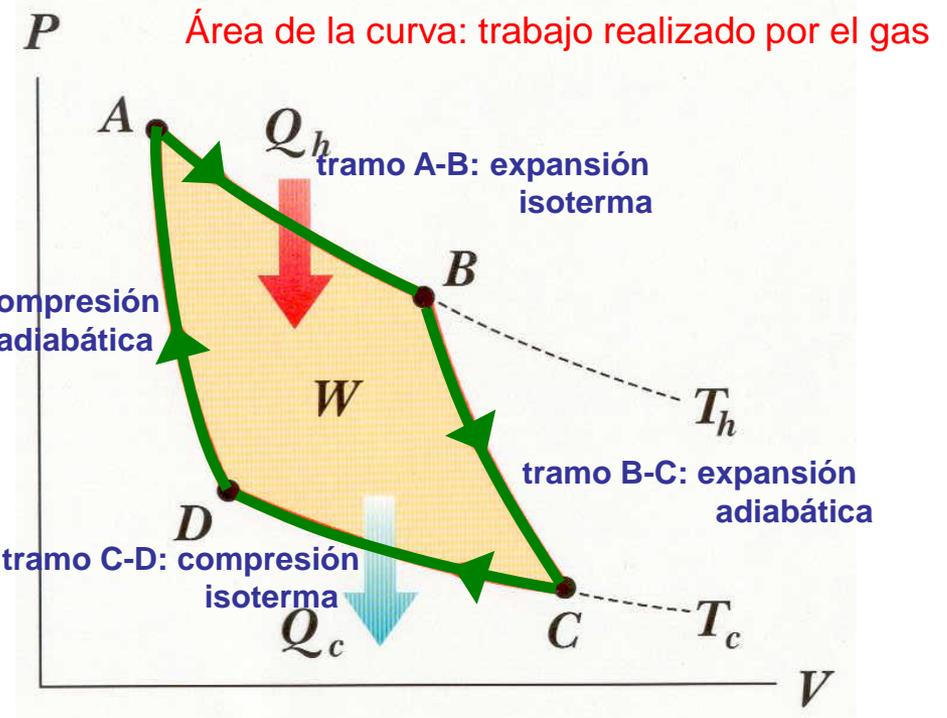
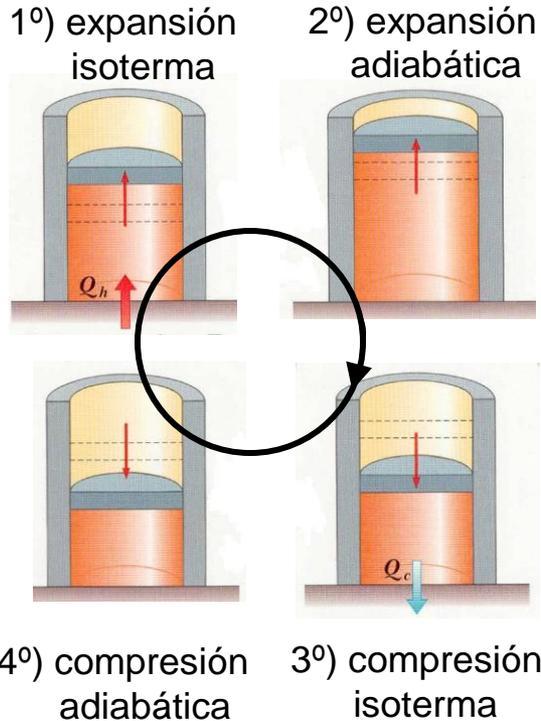
Cuando se realiza un ciclo reversible, TODO, es decir la sustancia de trabajo y el resto del universo, vuelven a su situación de partida

Todos los procesos reales son irreversibles. Es importante estudiar los reversibles porque nos dan el máximo valor posible de rendimiento que se puede conseguir



CICLO DE CARNOT

Ciclo reversible más conocido. Es un ciclo ideal, no hay ninguna máquina real que lo cumpla



Sustancia de trabajo: gas ideal

CICLO DE CARNOT

A → B Expansión Isotérmica. $T = T_H$

$$T_A = T_B = T_H$$

$$\Delta U_{AB} = 0$$

$$Q_H = -W$$

$$W_{AB} = -nRT_H \ln \frac{V_B}{V_A} < 0$$

$$P_A V_A = P_B V_B$$

Como es < 0 es W realizado por el gas
 $Q_H > 0$

B → C Expansión Adiabática. $Q=0$

$$P_B V_B^\gamma = P_C V_C^\gamma$$

$$\Delta U_{BC} = W_{BC}$$

$$W_{BC} = C_v (T_C - T_B)$$

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$$

$$W_{BC} = C_v (T_C - T_H)$$

$$T_B = T_H \quad T_C = T_C$$

C → D Compresión Isotérmica. $T = T_C$

$$T_C = T_D = T_{C(\text{fría})}$$

$$\Delta U_{CD} = 0$$

$$Q_C = -W$$

$$W_{CD} = -nRT_C \ln \frac{V_D}{V_C} > 0$$

$$P_C V_C = P_D V_D$$

Como es > 0 es W realizado sobre el gas
 $Q_C < 0$

D → A Compresión Adiabática. $Q=0$

$$P_D V_D^\gamma = P_A V_A^\gamma$$

$$\Delta U_{DA} = W_{DA}$$

$$W_{DA} = C_v (T_A - T_D)$$

$$T_D V_D^{\gamma-1} = T_A V_A^{\gamma-1}$$

$$W_{DA} = C_v (T_{H(\text{caliente})} - T_{C(\text{fría})})$$

$$T_D = T_C \quad T_A = T_H$$



CICLO DE CARNOT

Trabajo total:

$$W_{\text{NETO}} = W_{\text{AB}} + W_{\text{BC}} + W_{\text{CD}} + W_{\text{DA}} = -nRT_H \ln \frac{V_B}{V_A} - nRT_C \ln \frac{V_D}{V_C} < 0$$

Es decir el gas realiza un trabajo neto

Su rendimiento es:

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_H} = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

$$Q_H = nRT_H \ln \frac{V_B}{V_A} \quad |Q_H| = nRT_H \ln \frac{V_B}{V_A} \quad \varepsilon = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_C \ln \frac{V_C}{V_D}}{T_H \ln \frac{V_B}{V_A}}$$

$$Q_C = nRT_C \ln \frac{V_D}{V_C} \quad |Q_C| = nRT_C \ln \frac{V_C}{V_D}$$

Como: $T_H V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$ y $T_C V_D^{\gamma-1} = T_H V_A^{\gamma-1} \longrightarrow \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Es independiente de la sustancia de trabajo, sólo depende de las temperaturas de los focos frío y caliente

OJO, TEMPERATURAS EN KELVIN

Que corresponde con el rendimiento máximo de una máquina térmica que opere entre las temperaturas T_C y T_H



CICLO DE CARNOT. CICLOS REVERSIBLES

Todas las máquinas reversibles que operan entre las mismas dos temperaturas constantes T_H y T_C tienen el mismo rendimiento (rendimiento que hemos calculado en el ciclo de Carnot). Cualquier máquina irreversible que opere entre las mismas dos temperaturas tendrá un rendimiento menor.

CALIDAD DE LA ENERGÍA

La energía en forma de W tiene más calidad (es más valiosa) que el calor, puesto que el 100% del W se puede convertir en calor, pero no el 100% del calor se puede convertir en W . Además más porcentaje de energía térmica de alta temperatura que de baja temperatura se puede convertir en W .

Ej: Sea una máquina térmica de Carnot que opera entre un depósito a temperatura alta T_H y otro a $T_C = 303$ K. Si calculamos el rendimiento en función del valor de T_H

T_H (K)	η %
925	67.2
700	56.7
500	39.4
350	13.4

CICLO DE CARNOT INVERSO

Como es un proceso reversible, se puede invertir el ciclo y realizarlo en sentido inverso. En ese caso se convierte en un refrigerador de Carnot: el calor Q_C se absorbe del depósito a baja temperatura y el calor Q_H se cede al depósito a alta temperatura. Para ello se necesita una cantidad de trabajo W aportada del entorno

Coeficiente de eficiencia $\eta = \frac{|Q_C|}{W} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1}$

Es el coeficiente de eficiencia más alto que puede tener un refrigerador



EFICIENCIA Y RENDIMIENTO MAXIMOS

Rendimiento máximo de una máquina térmica:

$$\varepsilon_{\text{MAX}} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Eficiencia máxima de un refrigerador:

$$\eta_{\text{MAX}} = \frac{|Q_C|}{W} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

Eficiencia máxima de una bomba de calor:

$$\eta_{\text{MAX}}^{\text{BC}} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{|Q_H| - |Q_C|} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$



ESCALA TERMODINÁMICA DE TEMPERATURAS

Escala independiente de las propiedades de la sustancia de trabajo.

Podemos utilizar un ciclo de Carnot para definir la relación entre dos temperaturas. Necesitamos:

- Una máquina reversible que funcione entre dos focos a distinta temperatura T_H y T_C
- Medir el calor absorbido y cedido por cada uno de los focos durante un ciclo

$$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H}$$

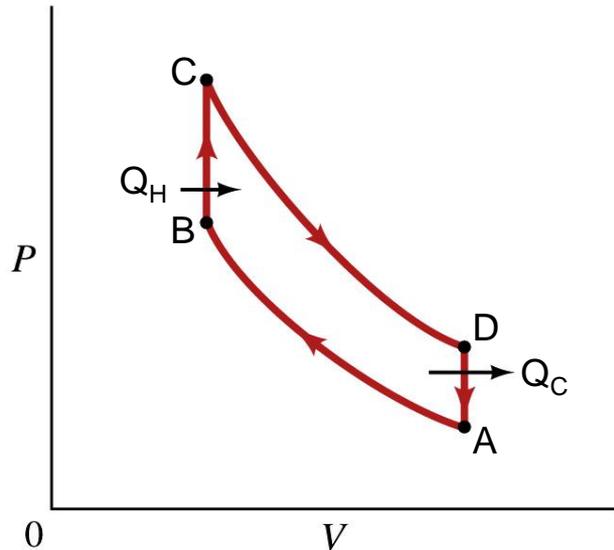
- Elegir un punto fijo. Este punto fijo se definió como 273.16 K para el punto triple del agua.

Esta escala coincide con la escala de temperaturas de termómetros de gas ideal



CICLOS COMUNES

CICLO OTTO: ciclo reversible ideal. Es el que se aproxima al motor de combustión de gasolina



A \rightarrow B Compresión adiabática $Q=0$

Como resultado la temperatura se eleva

B \rightarrow C Proceso isocoro

Como resultado la temperatura y la presión aumentan

C \rightarrow D Expansión adiabática $Q=0$

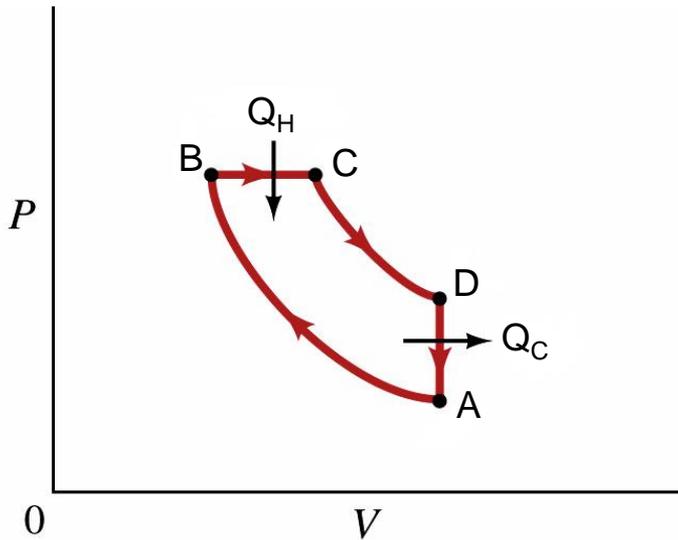
Como resultado la temperatura disminuye

D \rightarrow A Proceso isocoro

Como resultado la temperatura y la presión disminuyen

CICLOS COMUNES

CICLO DIESEL: ciclo reversible ideal. Es el que mejor se aproxima a un motor diesel



A → B Compresión adiabática $Q=0$

Como resultado la temperatura se eleva

B → C Expansión isobara

Con absorción de calor Q_H , la temperatura aumenta

C → D Expansión adiabática $Q=0$

Como resultado la temperatura disminuye

D → A Proceso isocoro

El sistema cede calor Q_C . Como resultado la temperatura y la presión disminuyen