

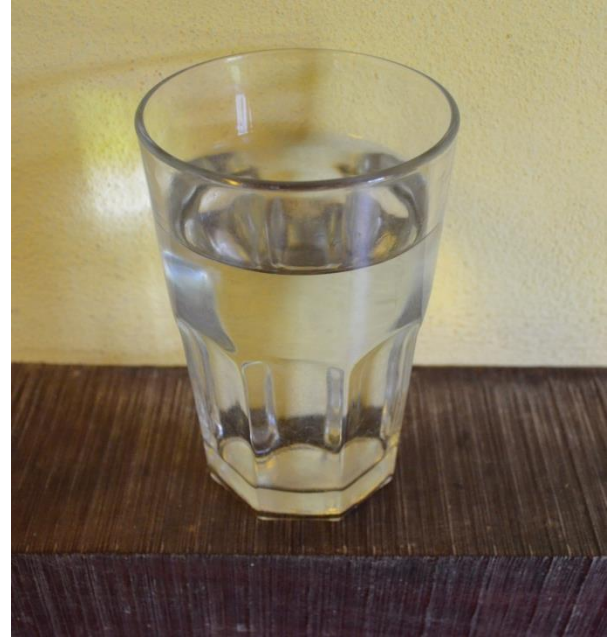
Física I  
Clase 10  
Módulo 2

Turno H  
Prof. Pedro Mendoza Zélis

## Procesos reversibles e irreversibles



# Procesos reversibles e irreversibles



tiempo

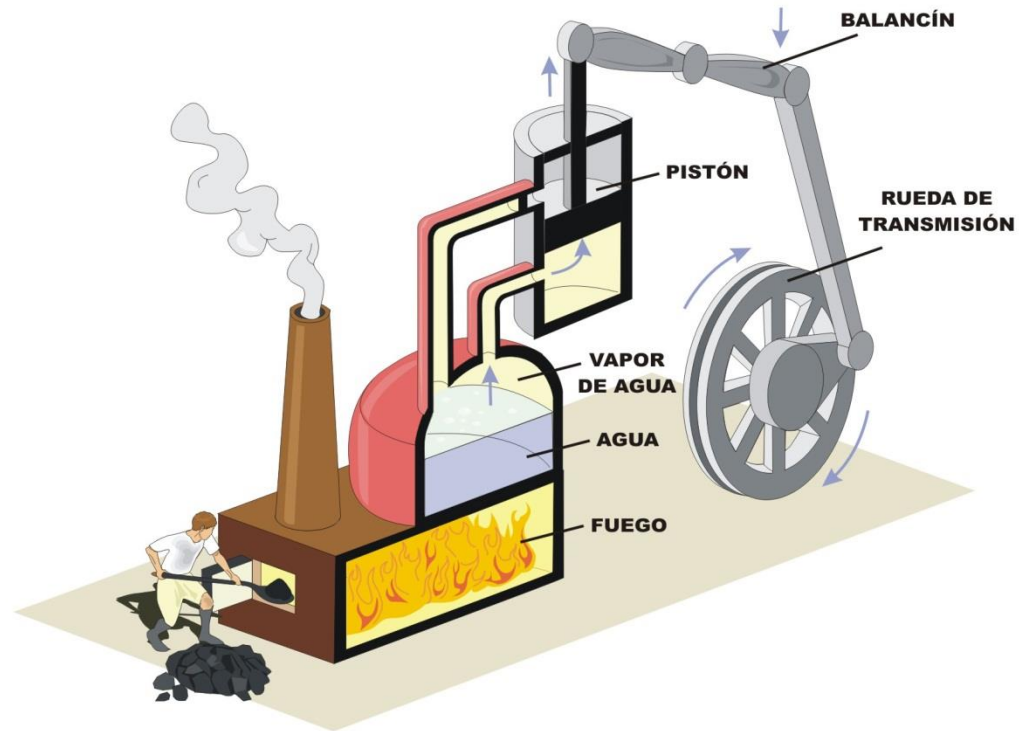
# Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece cuáles procesos pueden ocurrir y cuáles no en la naturaleza. Los siguientes son ejemplos de procesos que son consistentes con la primera ley de la termodinámica pero que proceden de un orden gobernado por la segunda ley:

- Cuando dos objetos a diferente temperatura se ponen en contacto térmico entre sí, la energía térmica siempre fluye del objeto más caliente al más frío, nunca del más frío al más caliente.
- Una bola de hule que se deja caer al suelo rebota varias veces y finalmente queda en reposo, pero una bola que se encuentra en el suelo nunca empieza a botar por sí sola.
- Debido a los choques con las moléculas de aire y la fricción, un péndulo oscilante finalmente se detiene en el punto de suspensión. La energía mecánica se convierte en energía térmica; la transformación inversa de energía nunca ocurre.

# Máquina térmicas

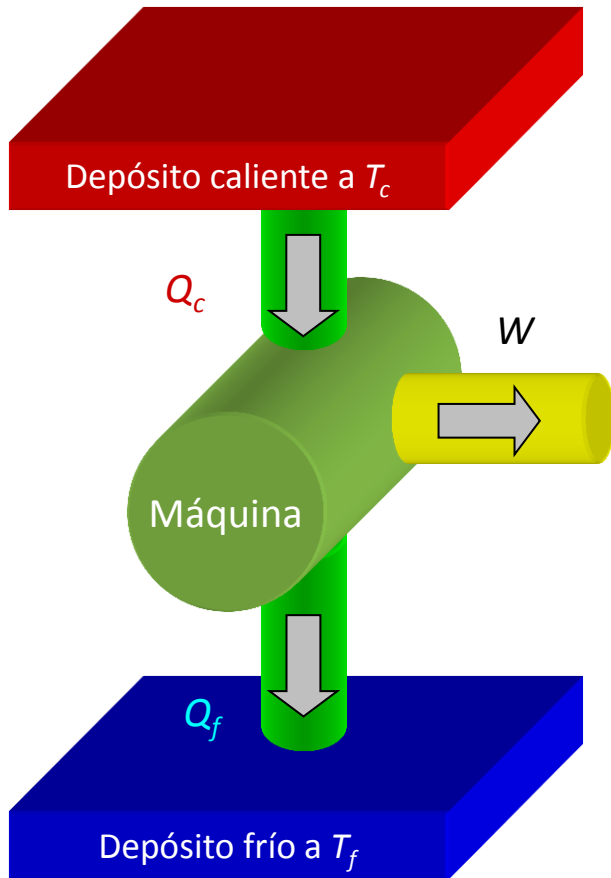
Son un dispositivos para convertir calor en trabajo útil



La primer máquina térmica práctica fue la máquina de vapor inventada en el siglo dieciocho

# Máquina térmicas

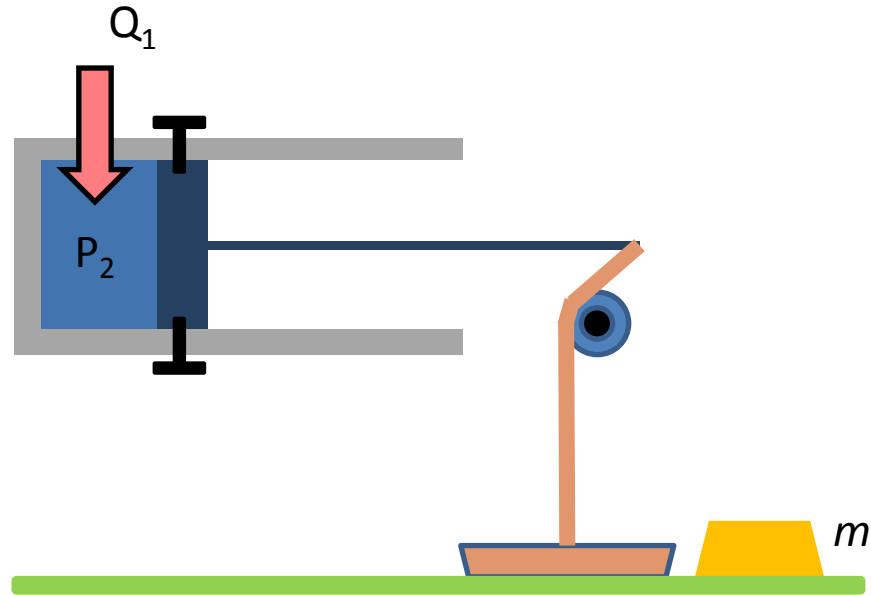
Representación esquemática de una máquina térmica:



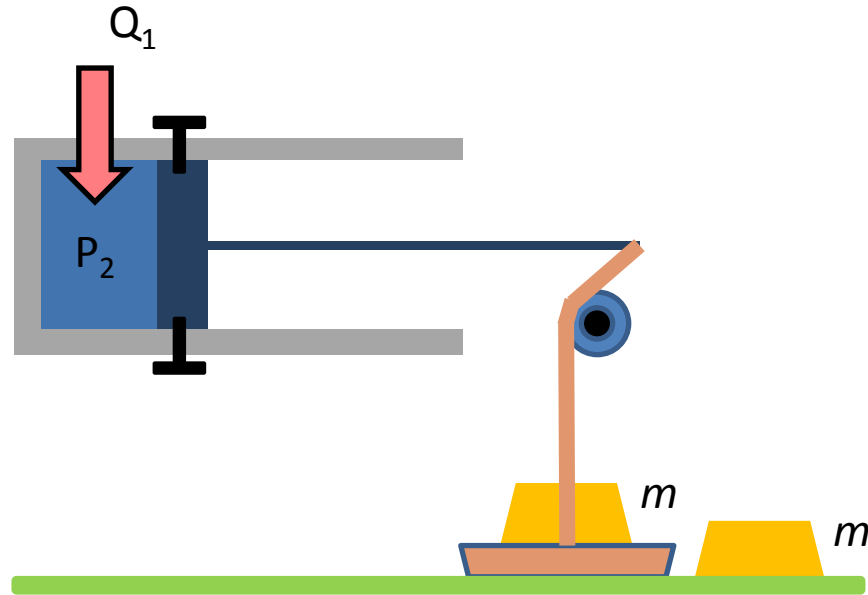
Una máquina térmica lleva a cierta sustancia de trabajo a través de un proceso de un ciclo durante el cual:

La máquina extrae energía térmica  $Q_c$  de un depósito caliente a la temperatura  $T_c$ , realiza trabajo  $W$ , y elimina energía térmica  $Q_f$  al depósito frío de temperatura  $T_f$ .

# Máquina térmica simple

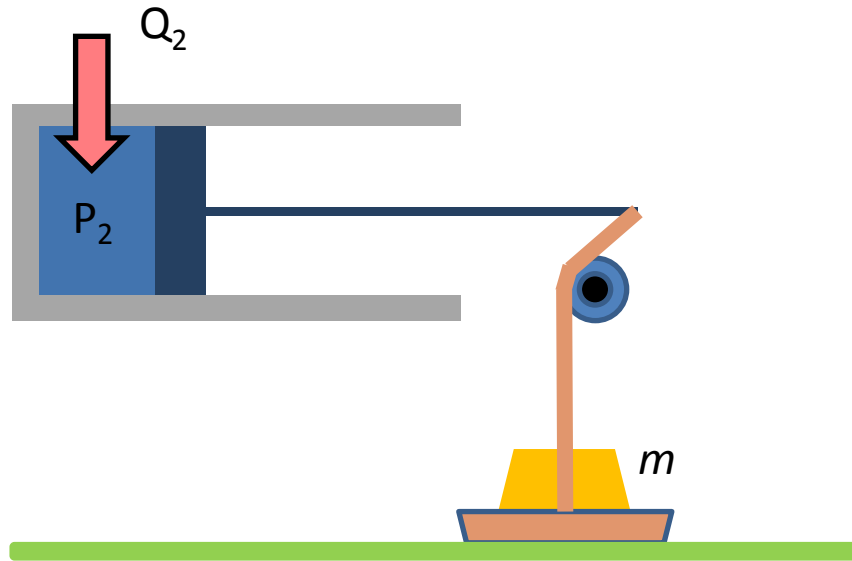


# Máquina térmica simple

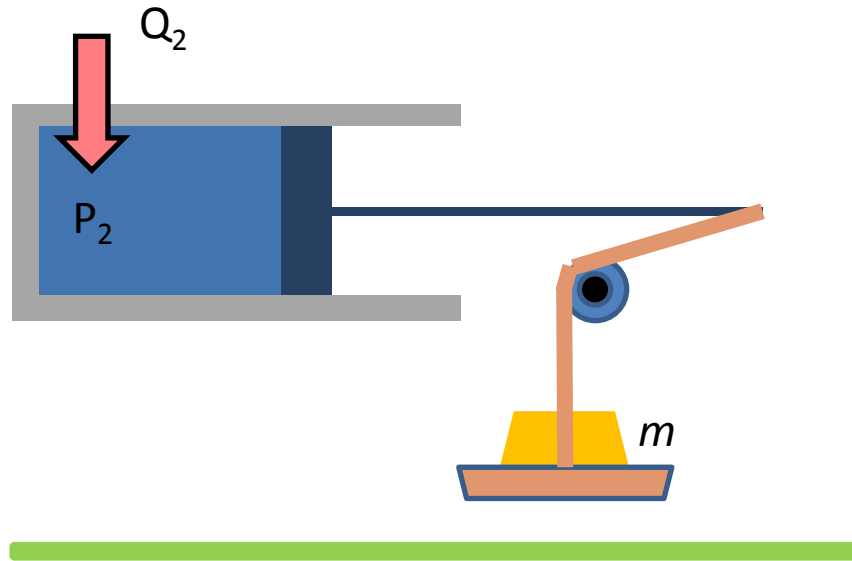




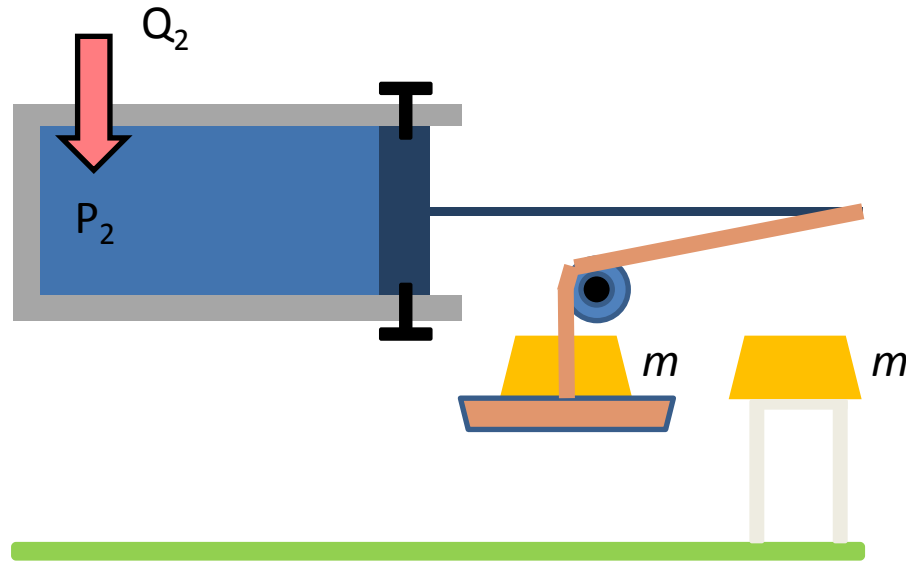
# Máquina térmica simple



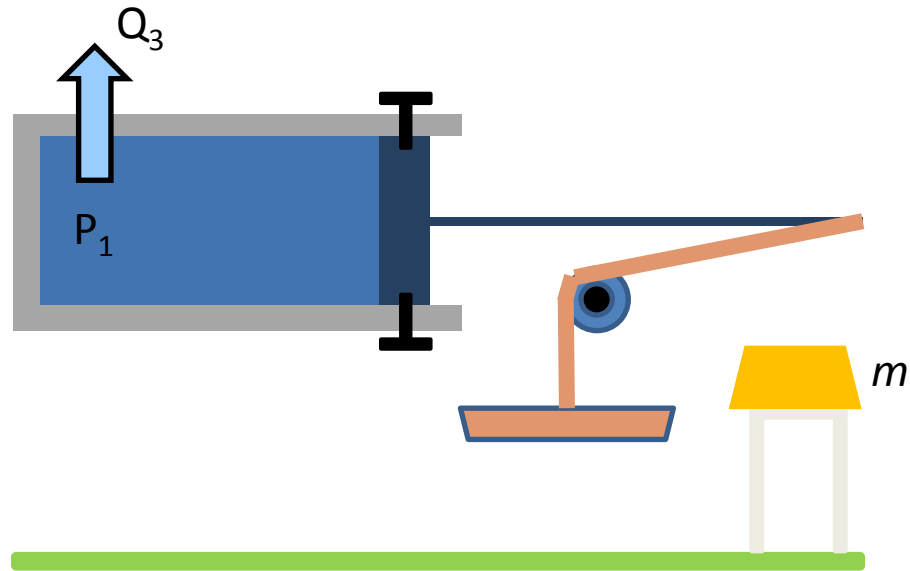
# Máquina térmica simple



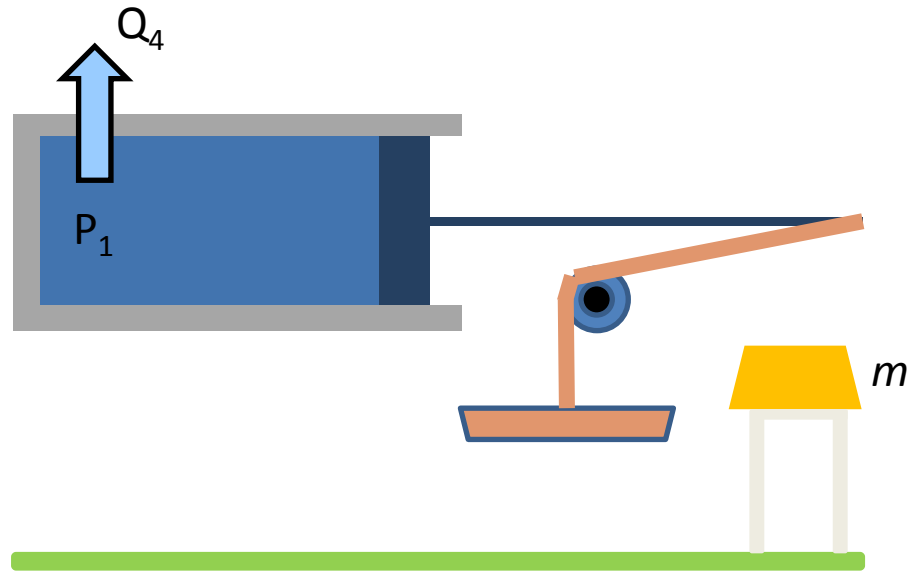
# Máquina térmica simple



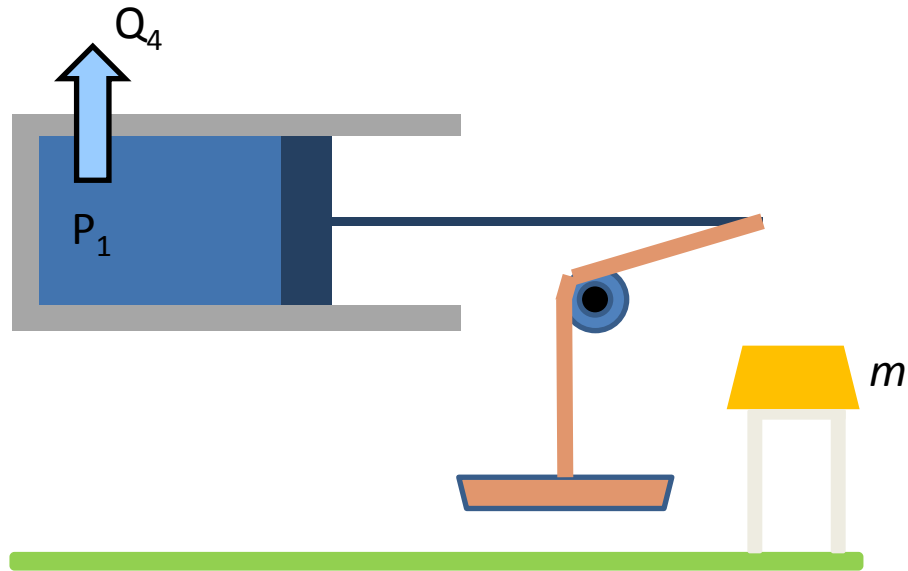
# Máquina térmica simple



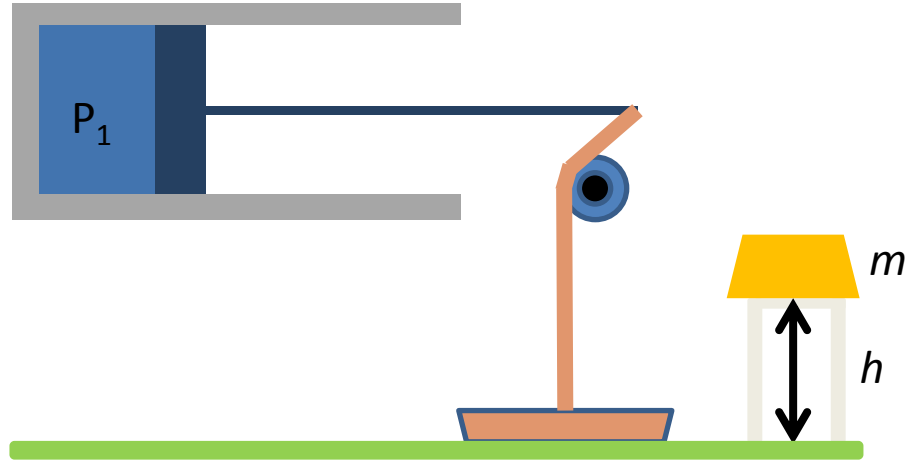
# Máquina térmica simple



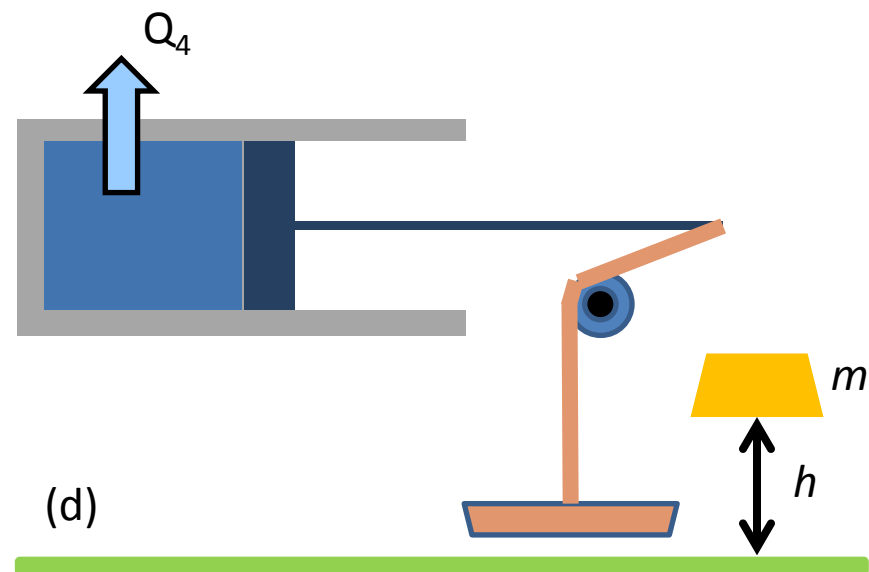
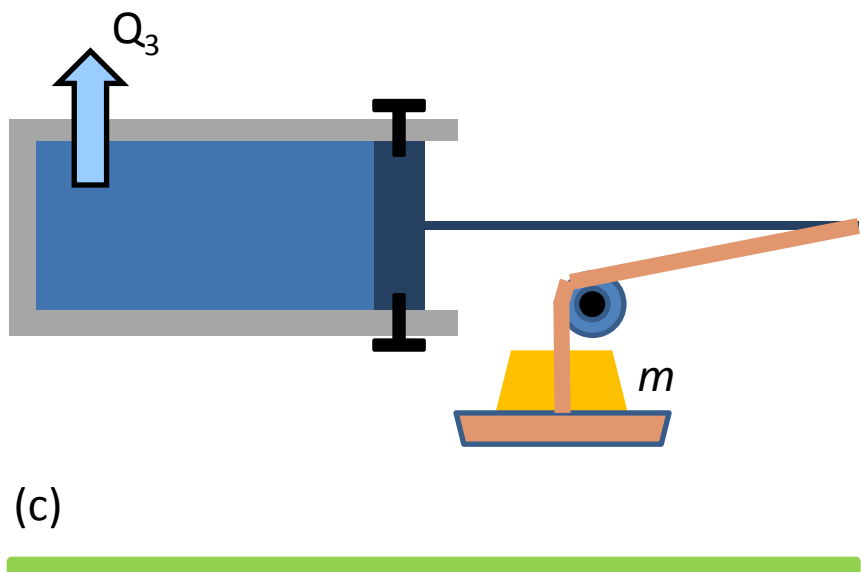
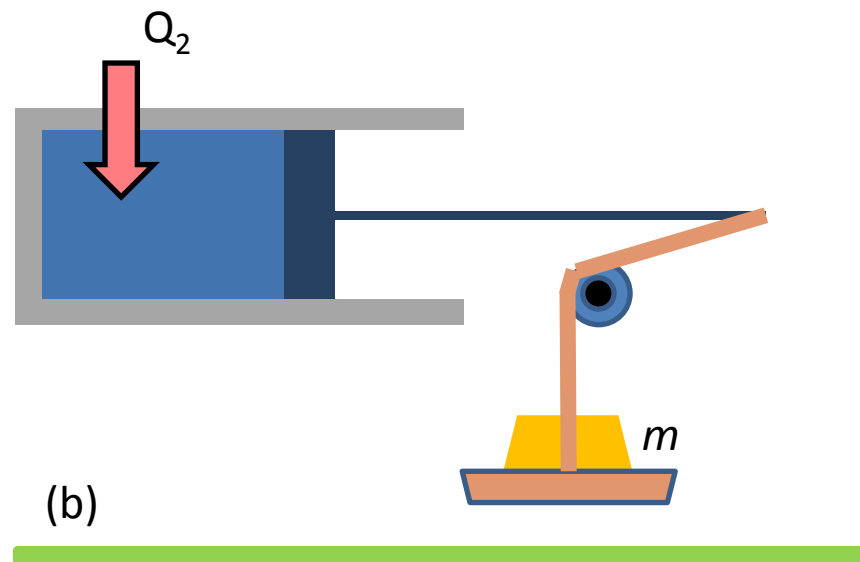
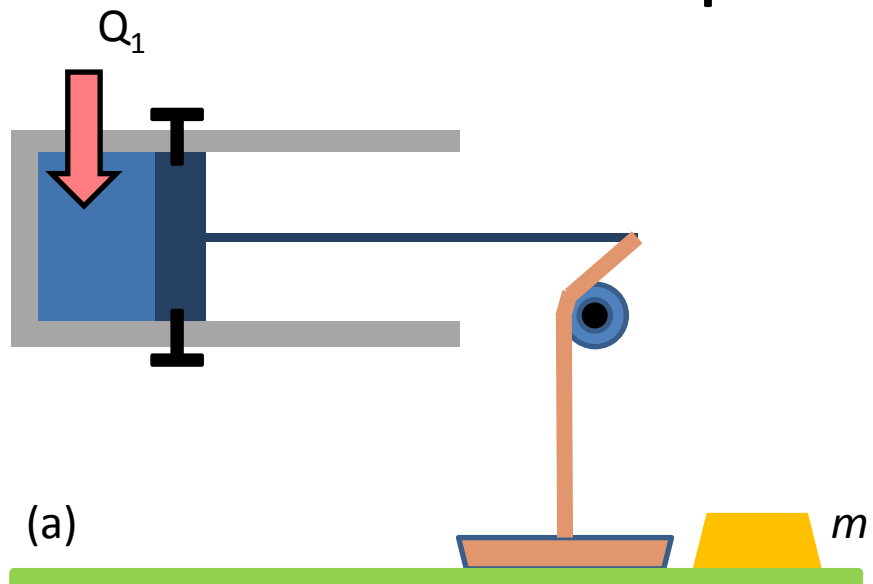
# Máquina térmica simple



# Máquina térmica simple



# Máquina térmica simple





# Máquina térmica simple

Un cilindro que contiene gas a presión  $P_1$  lleva un pistón ajustado.

(a) El pistón se mantiene fijo mientras el gas se calienta hasta alcanzar una nueva presión  $P_2$ . La presión aumenta a volumen constante.

-Se añade una masa  $m$  para equilibrar la fuerza que se ejerce sobre el pistón debido a la mayor presión.

(b) Se adiciona más calor, permitiéndose al gas que se expanda a presión constante, levantando el peso hasta cierta altura  $h$ . El volumen aumenta a presión constante.

(c) Se vuelve a mantener fijo el pistón al mismo tiempo que se elimina calor hasta que la presión adquiere nuevamente el valor  $P_1$ . La presión decrece a volumen constante.

-Se quita la masa de manera que el pistón se encuentra otra vez en equilibrio

(d) Se comprime el gas a presión constante, eliminándose calor al mismo tiempo, hasta que el gas adquiere su volumen inicial.

# Máquina térmica simple

Resultado neto:

-se ha introducido y extraído en el sistema una cantidades de calor:

$$Q_{\text{entra}} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{\text{sale}} = Q_3 + Q_4$$

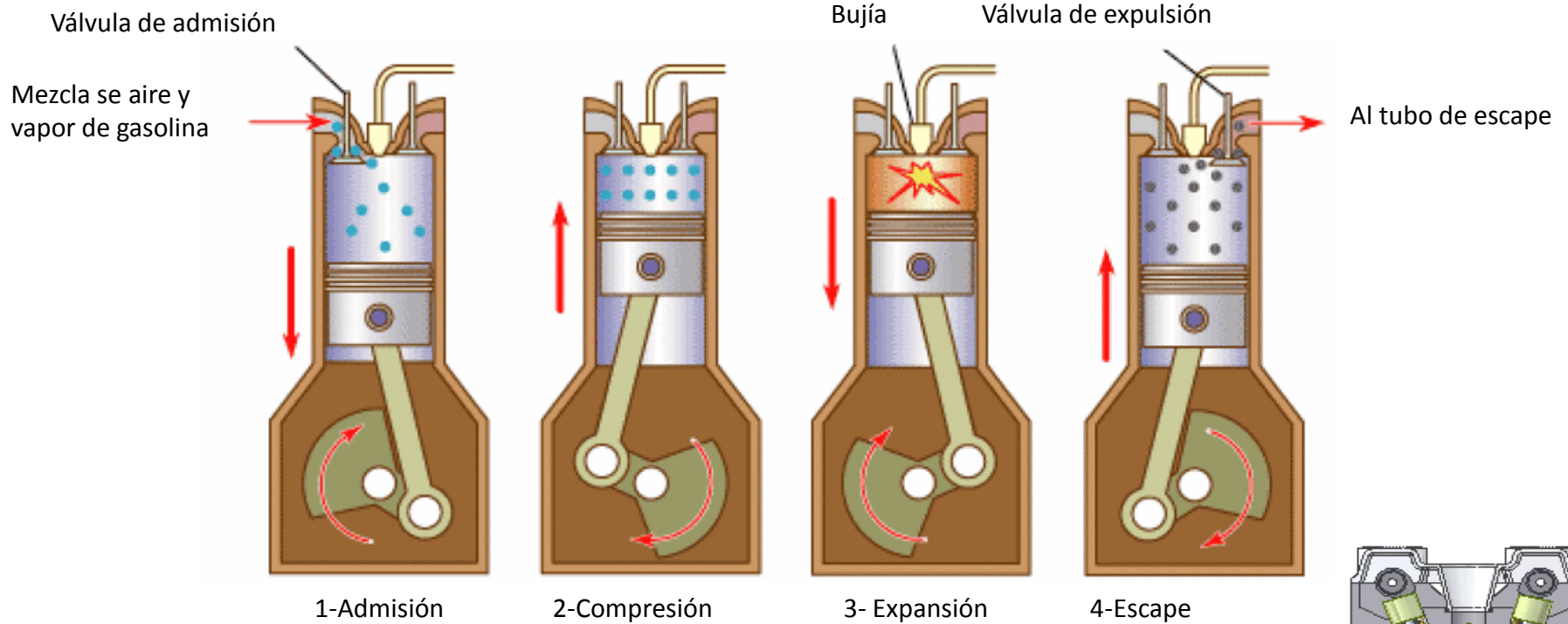
-se ha realizado un trabajo:

$$W = mgh$$

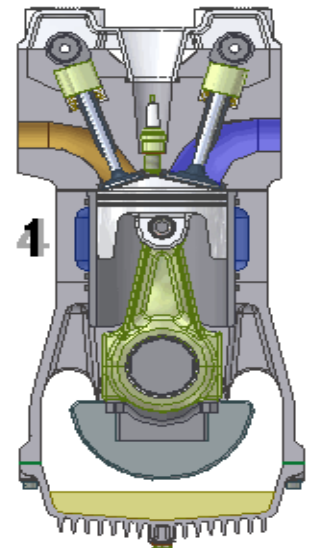
El cambio de energía interna para el ciclo debe ser cero ( $\Delta U = 0$ ), porque el ciclo comienza y termina en el mismo punto. Utilizando el primer principio podemos escribir:

$$W = Q_{\text{entra}} - |Q_{\text{sale}}|$$

# Motor de combustión interna



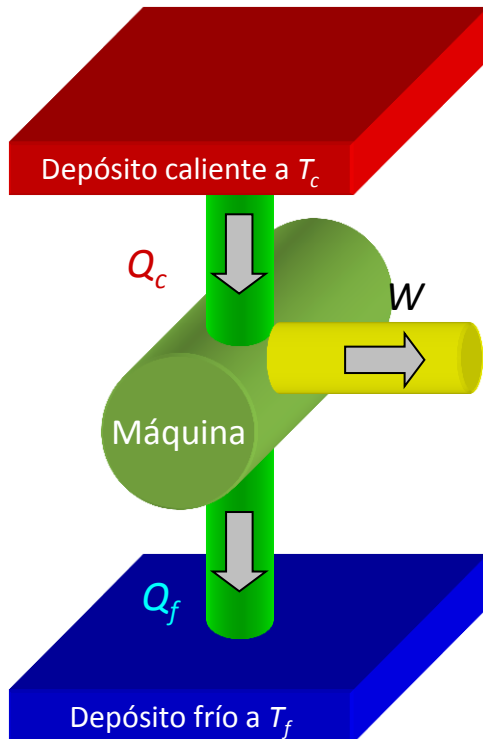
Motor de cuatro tiempos



# Rendimiento

Se define el **rendimiento**  $\varepsilon$  como el cociente entre el trabajo realizado y el calor absorbido del foco caliente:

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_c} = \frac{Q_c - |Q_F|}{Q_c} = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_c}$$

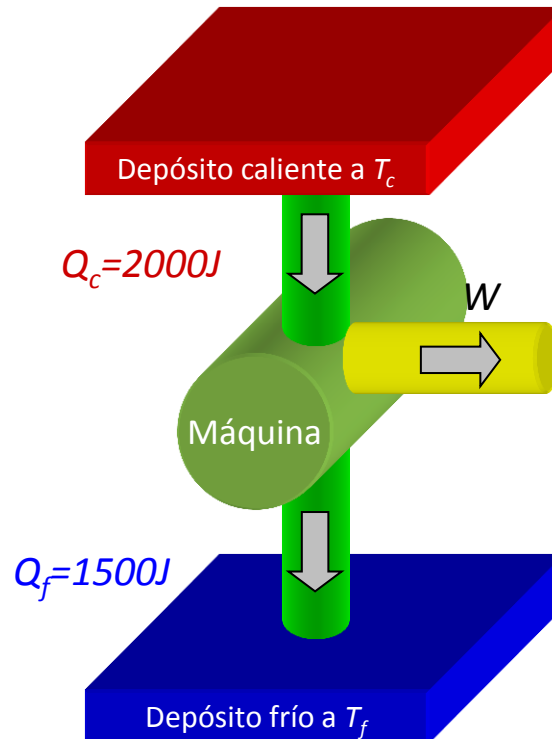


Para un rendimiento perfecto ( $\varepsilon = 1$ ) tendría que ser  $|Q_F| = 0$ . Es decir debería convertirse en trabajo todo el calor absorbido del foco caliente sin eliminar hacia el foco frío nada de calor.

# Rendimiento

Ejemplo:

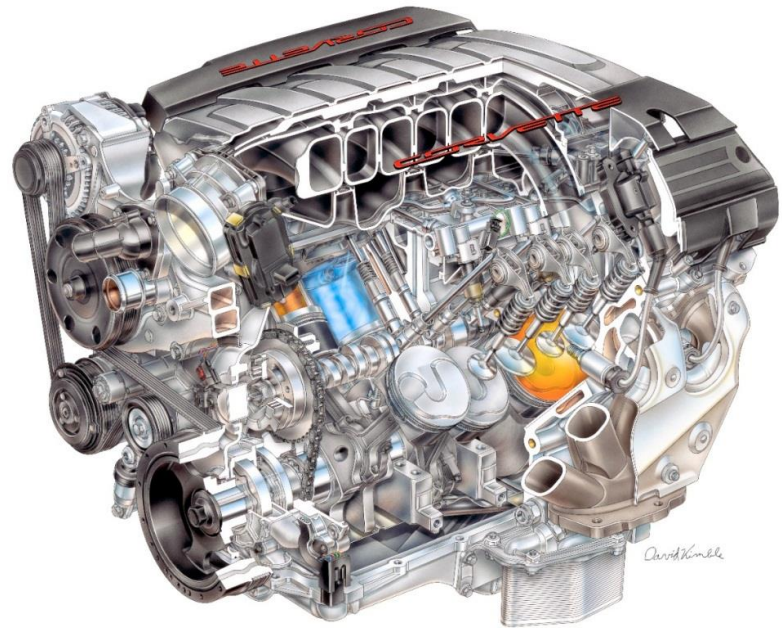
¿Cuál es el rendimiento de una máquina térmica que absorbe 2000 J de energía de un depósito caliente y entrega 1500 J a un depósito frío?



# Rendimiento

## Ejemplo:

Un motor de automóvil, cuyo rendimiento es 25%, cuando opera a 6000 revoluciones por minuto desarrolla una potencia de 134hp ( $10^5\text{J/s}$ )

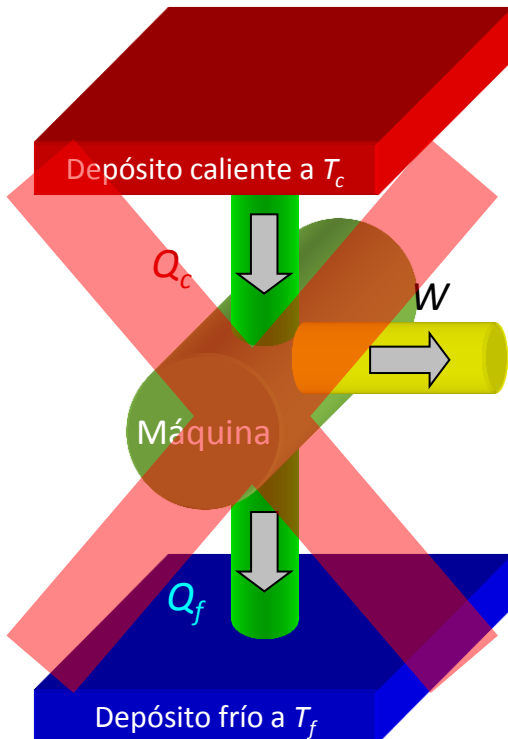


- ¿Cuánto trabajo por ciclo realiza el motor?
- ¿Cuánto calor entra y sale del motor en cada ciclo?

# Segundo principio de la termodinámica

(Enunciado de la máquina térmica o Kelvin-Planck )

Es imposible construir una máquina térmica que opere **cíclicamente** sin producir ningún otro efecto que extraer calor de un solo foco, realizando una cantidad de trabajo exactamente equivalente.

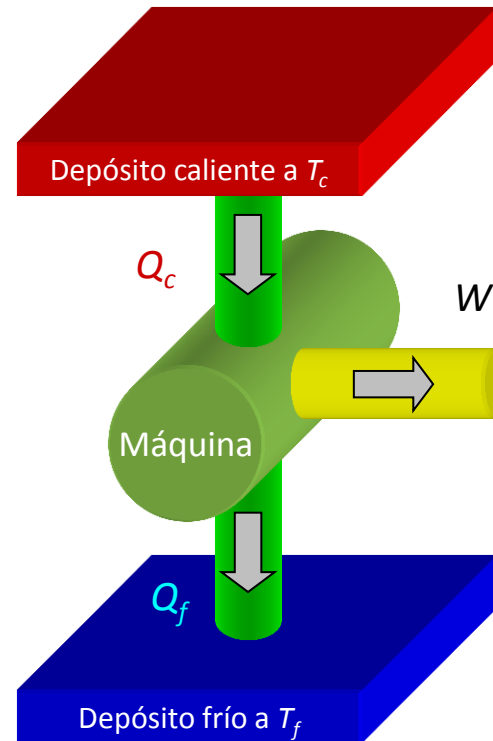


Es imposible construir una máquina térmica con un rendimiento del 100%:

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

# Refrigeradores

Los refrigeradores y las bombas de calor son esencialmente máquinas térmicas que funcionan en sentido inverso. Hay que realizar trabajo sobre el refrigerador para extraer calor de un foco frío y transferirlo a un foco caliente.



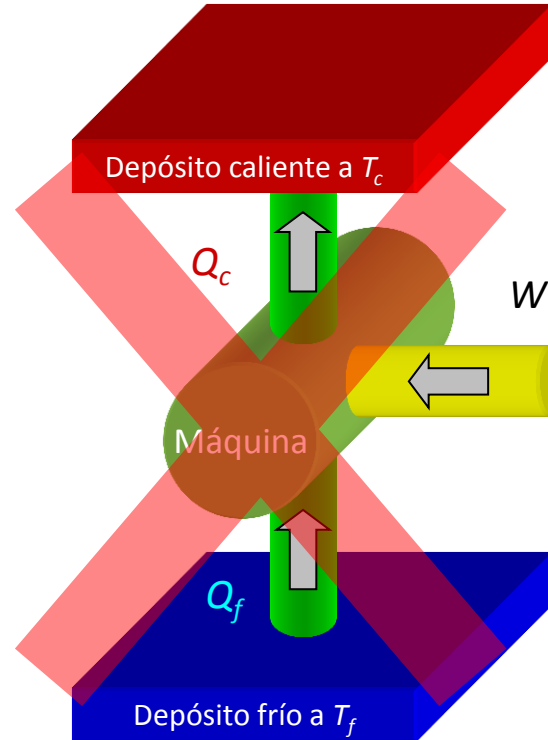


# Segundo principio de la termodinámica

(Enunciado de Clausius o de refrigerador)

Es imposible construir un refrigerador que opere cíclicamente sin producir otro efecto que la transferencia de calor de un objeto frío a otro caliente

En términos simples, la energía térmica no fluye espontáneamente de un objeto frío a uno caliente.



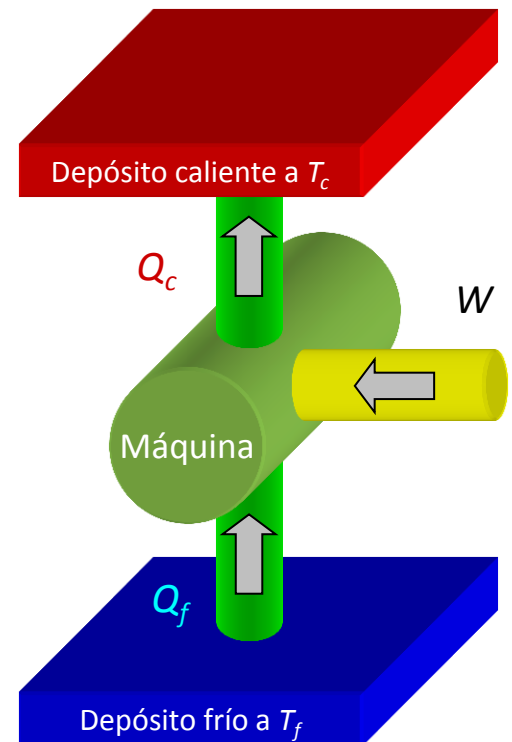
## Refrigeradores. Coeficiente de eficacia.

$$\Delta U = 0 = Q_{\text{neto}} - W_{\text{neto}, \text{sist.}}$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{neto}} = Q_f - |Q_c| \\ W_{\text{neto}, \text{sist.}} = -W_{\text{sobre sist.}} \end{array} \right\} W_{\text{sobre sist.}} = |Q_c| - Q_f$$

Una medida de la calidad de un refrigerador es el cociente entre el calor extraído del foco frío y el trabajo realizado sobre por ciclo. Esta cantidad suele denominarse **coeficiente de eficacia**:

$$\eta = \frac{Q_f}{W_{\text{sobre sist.}}} = \frac{Q_f}{|Q_c| - Q_f} > 1$$



# Refrigeradores

## Ejemplo:

Una heladera doméstica, cuyo coeficiente de rendimiento  $\eta$  es 5, extrae calor de la cámara de enfriamiento a 250 J por ciclo.

¿Cuánto trabajo por ciclo se requiere para operar la heladera?

¿Cuánto calor por ciclo se descarga a la habitación, la cual constituye el depósito de alta temperatura de la heladera?



# Entropía

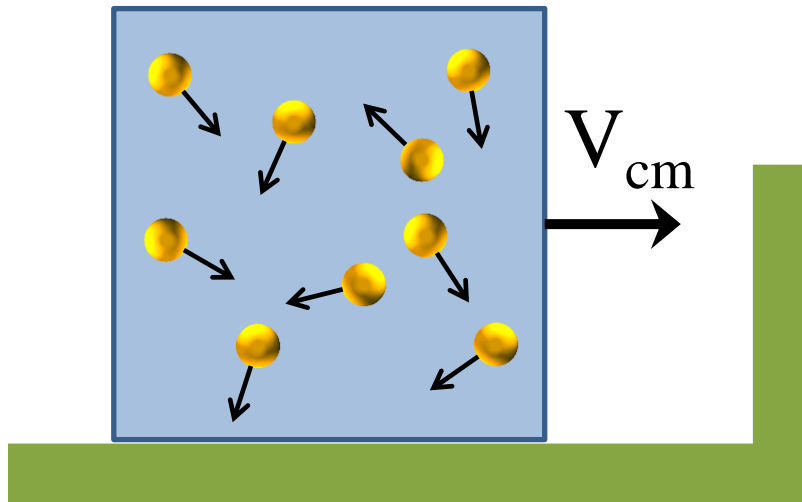
# Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

Hemos visto que el segundo principio de la termodinámica está relacionado con el hecho de que algunos procesos son irreversibles; es decir, que solo pueden progresar en un sentido.

Sin embargo hay muchos procesos irreversibles que no pueden describirse fácilmente con los enunciados ya vistos (máquina y refrigerador). Por ejemplo la expansión libre de un gas.

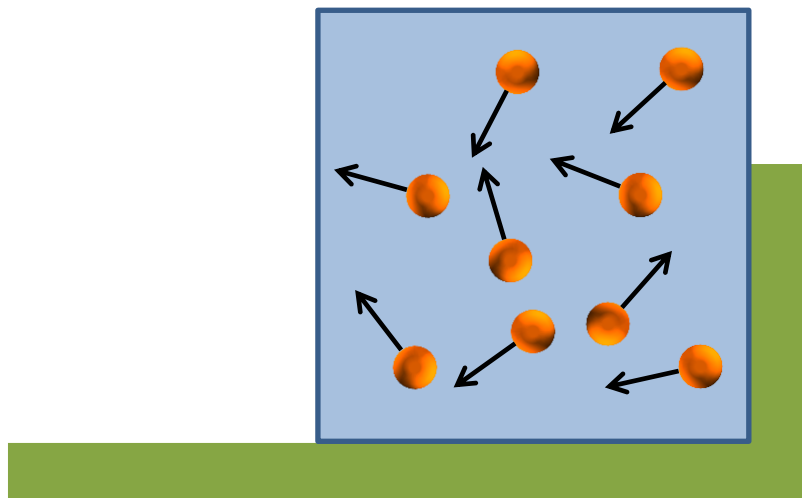
Todos los procesos irreversibles tienen una cosa en común: el sistema más su entorno se desplaza hacia un estado menos ordenado.

Caja con gas de masa  $M$  y temperatura  $T$  que se mueve con velocidad  $V_{cm}$ .



Energía cinética asociada al movimiento del centro de masa  $\frac{1}{2} M V_{cm}^2$ . Energía ordenada que se puede transformar en trabajo directamente.

Energía térmica interna del gas asociada a la energía cinética del gas de las moléculas moviéndose respecto al centro de masa relacionada con  $T$ .



Aumenta el desorden y se ha perdido la posibilidad de realizar trabajo de manera directa.

Existe una función termodinámica llamada entropía  $S$  que es una medida del desorden del sistema.

Como la presión  $P$ , el volumen  $V$ , y temperatura  $T$ , y la energía interna  $U$ , la entropía es una función de estado del sistema.

Igual que con  $U$ , lo importante son las variaciones de la entropía.

La variación de entropía de un sistema cuando pasa de un estado a otro se define como:

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{rev}}{T}$$

$dQ_{rev}$  es el calor que debe añadirse al sistema siguiendo un proceso reversible para llevarlo del estado inicial al final. Si se extrae calor,  $dQ_{rev}$  es negativo igual que el cambio de entropía.

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

Gas ideal:

$$dQ = dU + dW = du + P dV$$

$dU = C_v dT$  y como vale  $PV = nRT$

$$dQ = C_v dT + nRT dV/V$$

Dividiendo por T:

$$dQ/T = C_v/T dT + nR dV/V$$

Integrando:

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{rev}}{T} = C_v \ln(T_2/T_1) + n R \ln(V_2/V_1)$$



- >La entropía es una función de estado que mide el desorden de un sistema.
- >En un proceso reversible la variación de entropía del universo (sistema más su entorno) es nula.
- >En un proceso irreversible la entropía del universo aumenta.
- >Enunciado del segundo principio de la termodinámica:

**En cualquier proceso, la entropía del universo nunca disminuye**

# El ciclo de Carnot

Hemos visto que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, es imposible construir una máquina térmica que opere cíclicamente entre dos focos térmicos y tenga un rendimiento del 100%.

¿Cuál es el rendimiento máximo posible para esta máquina?

Esta cuestión fue contestada por Sadi Carnot, antes de que se hubiera establecido el primer principio de la termodinámica.



***Sadi Carnot fue ingeniero francés que nació el 1 de junio de 1796 en París y murió allí mismo el 24 de agosto de 1832.***

# El ciclo de Carnot

Carnot dedujo que:

todas las máquinas reversibles que trabajan entre los dos mismos focos térmicos, tienen el mismo rendimiento, y que no hay ninguna máquina térmica que pueda tener un rendimiento mayor que éste.

Una máquina térmica reversible que trabaje entre dos focos térmicos se denomina **máquina de Carnot**

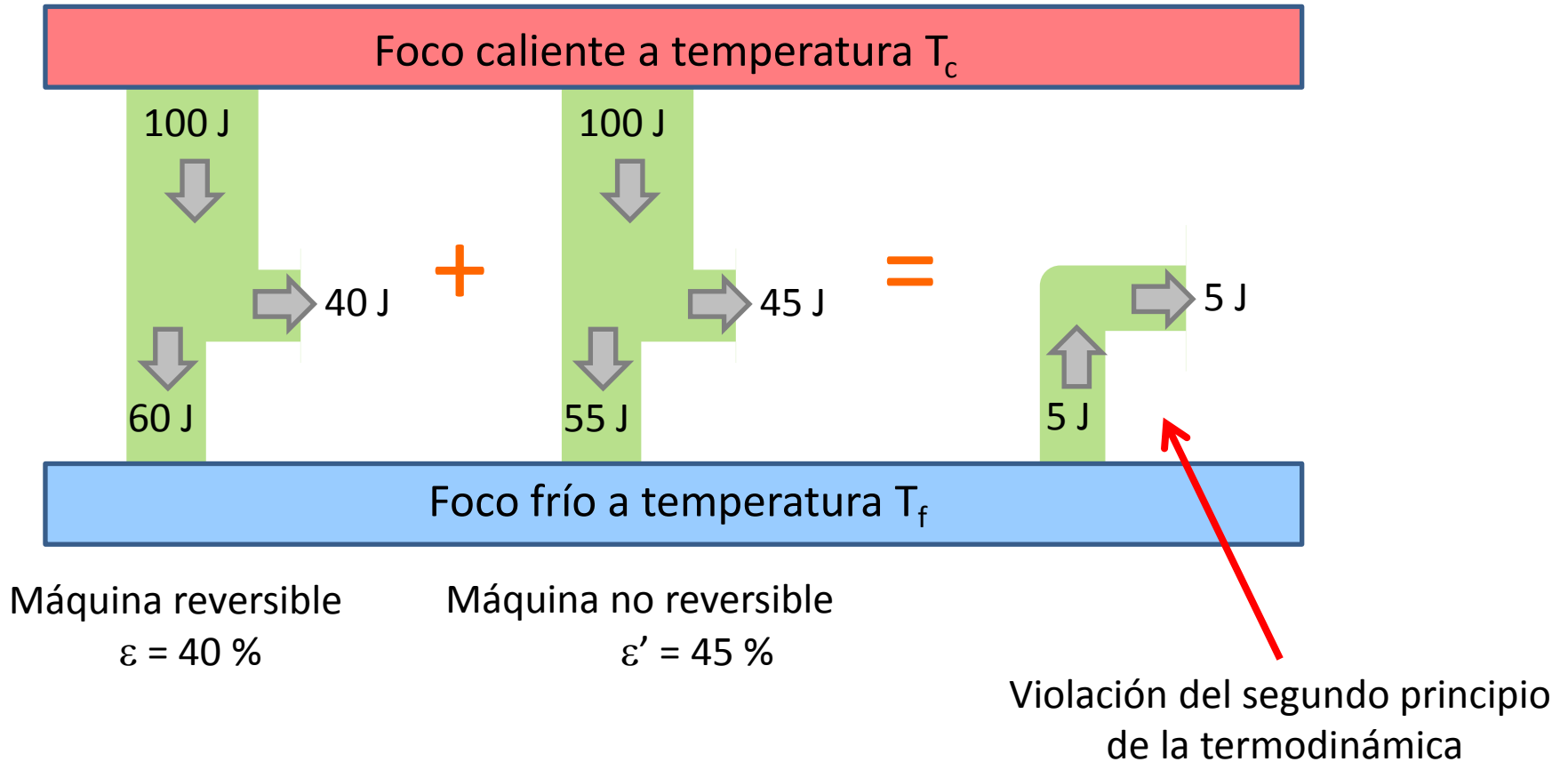
Máquina reversible:

- 1-No debe haber trabajo de fuerzas disipativas
- 2-No puede existir conducción de calor debido a una diferencia de  $T$  finita
- 3-El proceso debe ser cuasiestático



***Sadi Carnot***

# El teorema de Carnot



Supongamos que existe  
una máquina no reversible con  $\varepsilon' > \varepsilon$

## Rendimiento del ciclo de Carnot

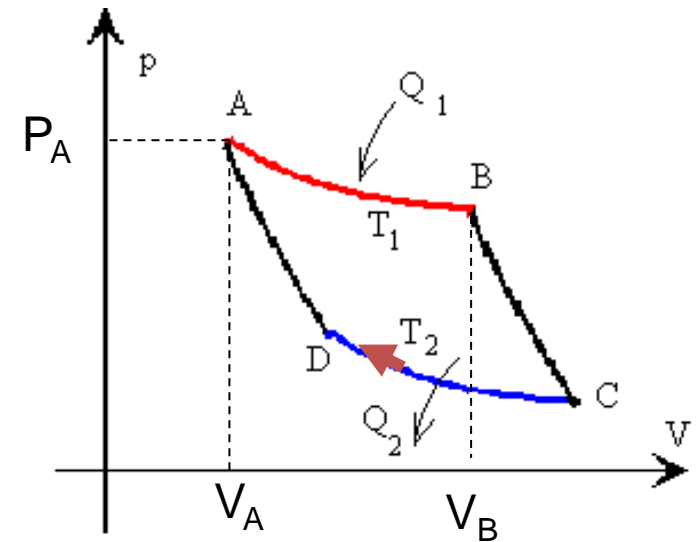
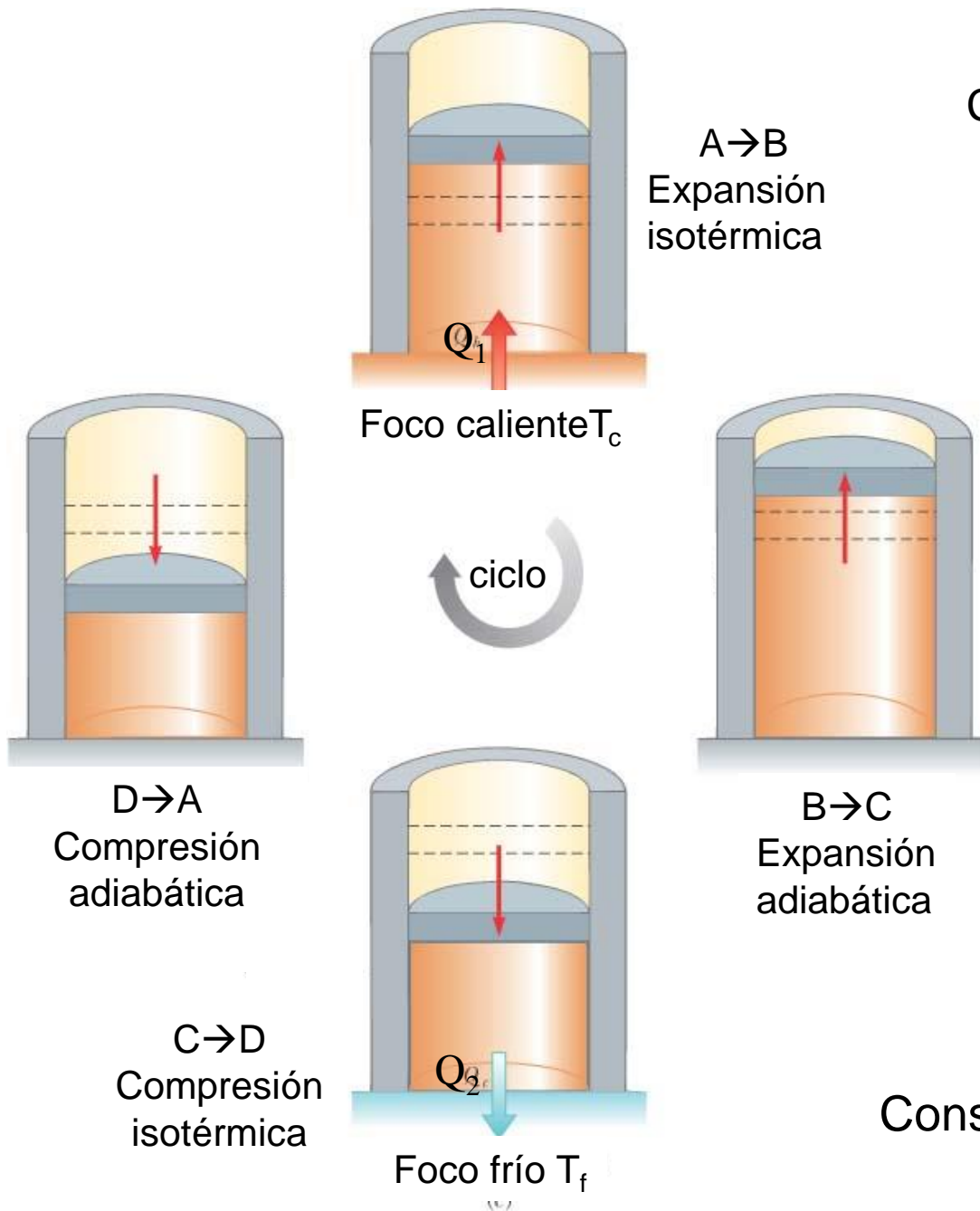
Todas las máquinas reversibles que operen entre los mismos dos focos deben tener el mismo rendimiento denominado **rendimiento de Carnot**

Este rendimiento es independiente de las sustancias de trabajo y depende únicamente de la temperatura de los focos

Calcularemos el rendimiento de Carnot considerando una máquina reversible que opere con un gas ideal

# Ciclo de Carnot

Ciclo reversible con un gas ideal como sustancia de trabajo



Se miden :  $V_A$ ,  $V_B$  y  $P_A$

Consideramos:  $T_2 = T_f$  y  $T_1 = T_c$

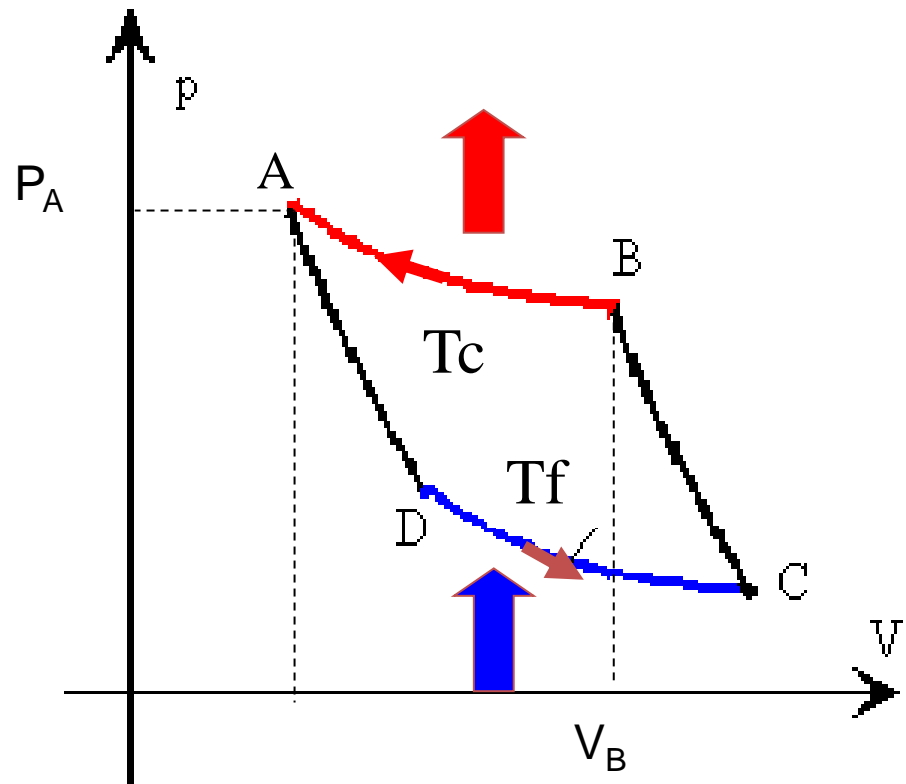
# Rendimiento del ciclo de Carnot

Ninguna máquina térmica que opere cíclicamente entre dos focos puede tener un rendimiento mayor al rendimiento al de una máquina de Carnot operado entre esos dos focos.

## Rendimiento máximo

$$\varepsilon_{Carnot} = 1 - \frac{|Q_f|}{Q_{c1}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

# Frigorífico de Carnot

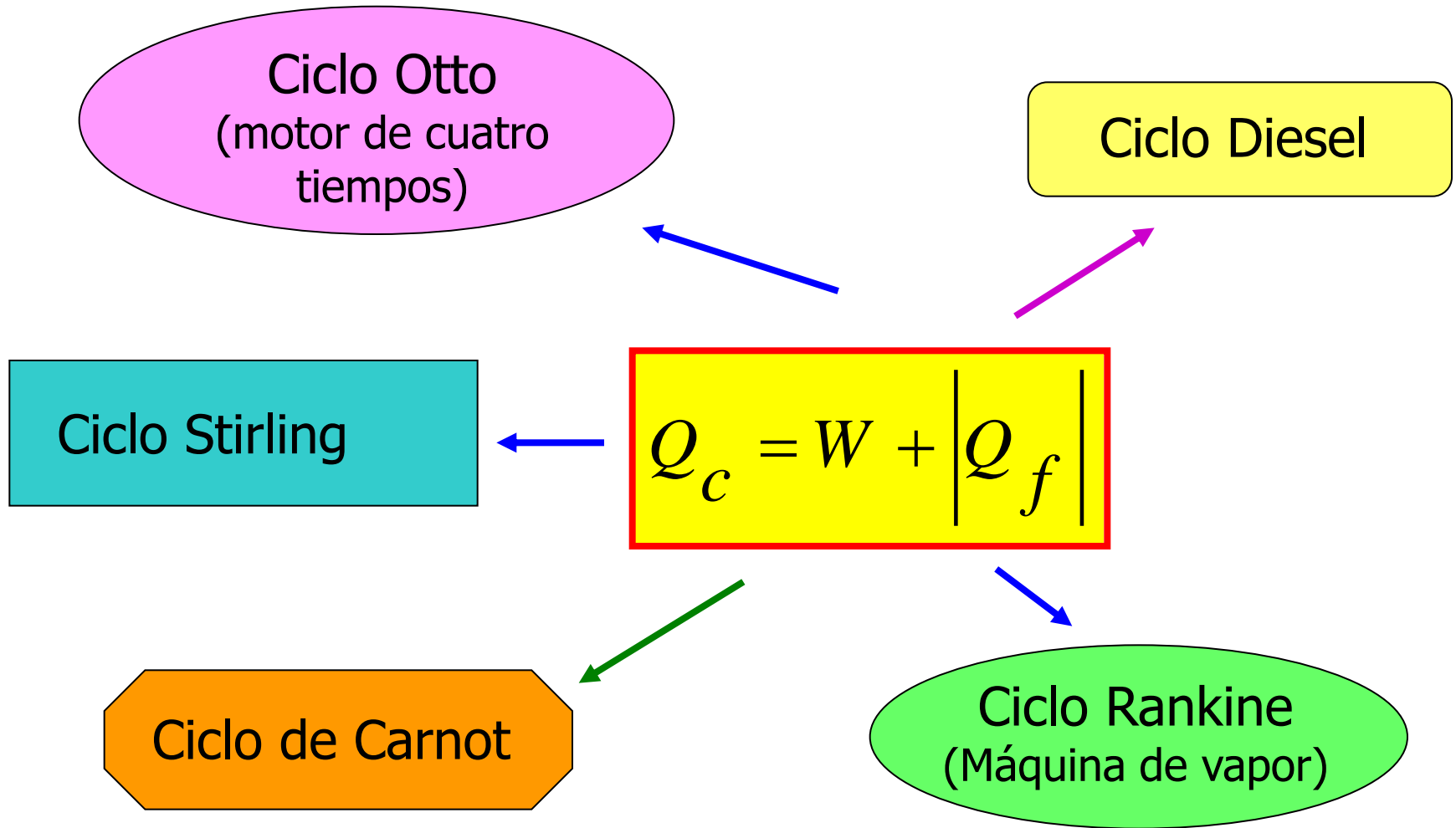


Coeficiente de eficiencia:

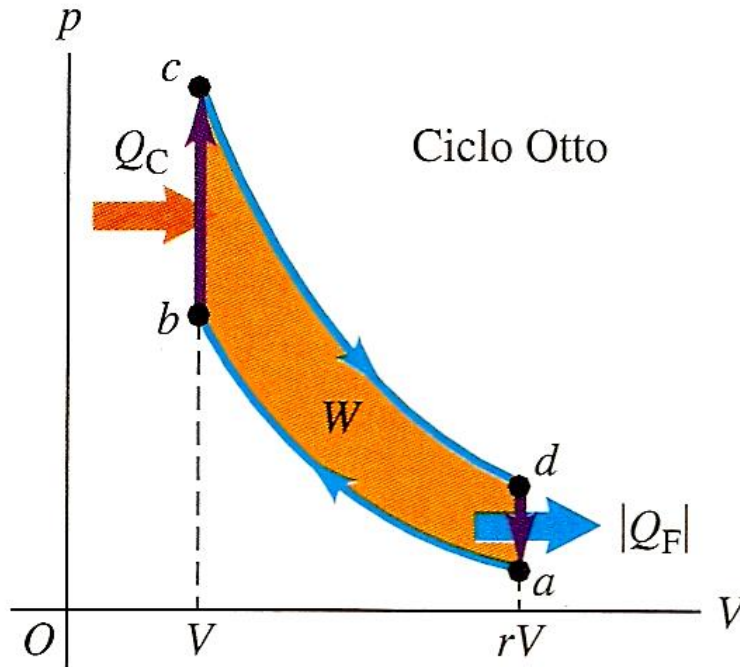
$$\eta_{Carnot} = \frac{T_f}{T_c - T_f} > 1$$



# Diferentes máquinas térmicas



# Ciclo Otto

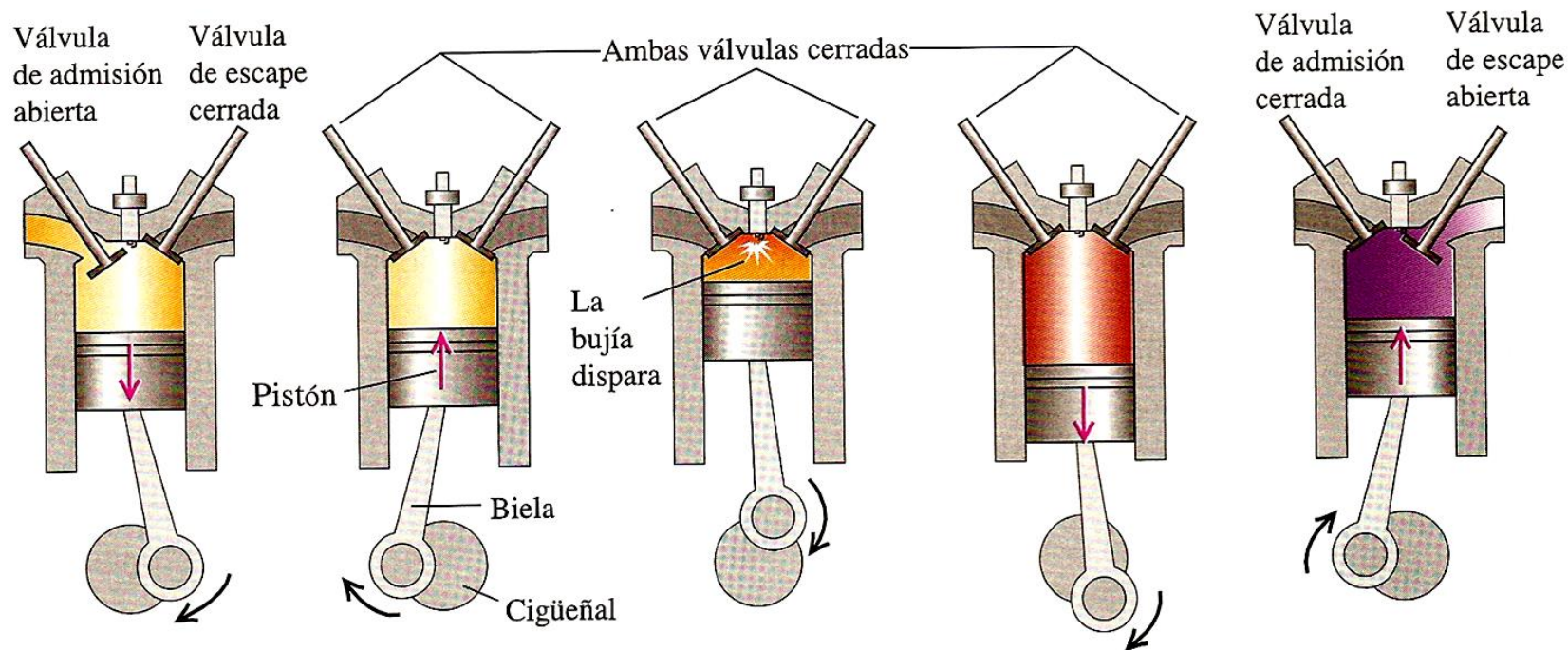


$$\varepsilon = \frac{W_{neto}}{Q_{absorbido}} = \frac{Q_C - |Q_F|}{Q_C}$$

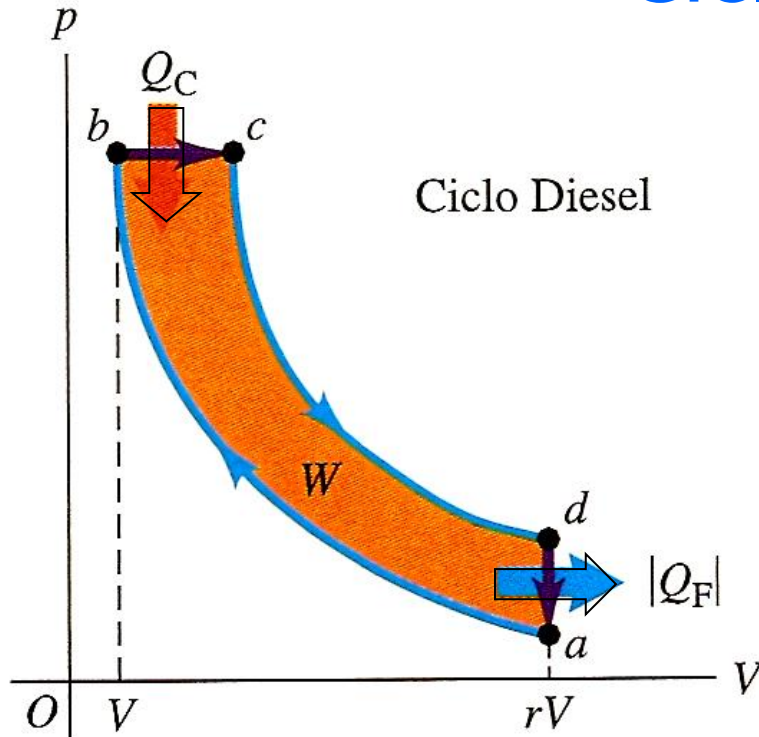
- $a \rightarrow b$ : Carrera de compresión  
(compresión adiabática)
- $b \rightarrow c$ : Encendido de combustible  
(calentamiento a volumen constante)
- $c \rightarrow d$ : Carrera de potencia  
(expansión adiabática)
- $d \rightarrow a$ : Expulsión de calor al entorno  
(enfriamiento a volumen constante)

# Ciclo Otto

## Motor de cuatro tiempos



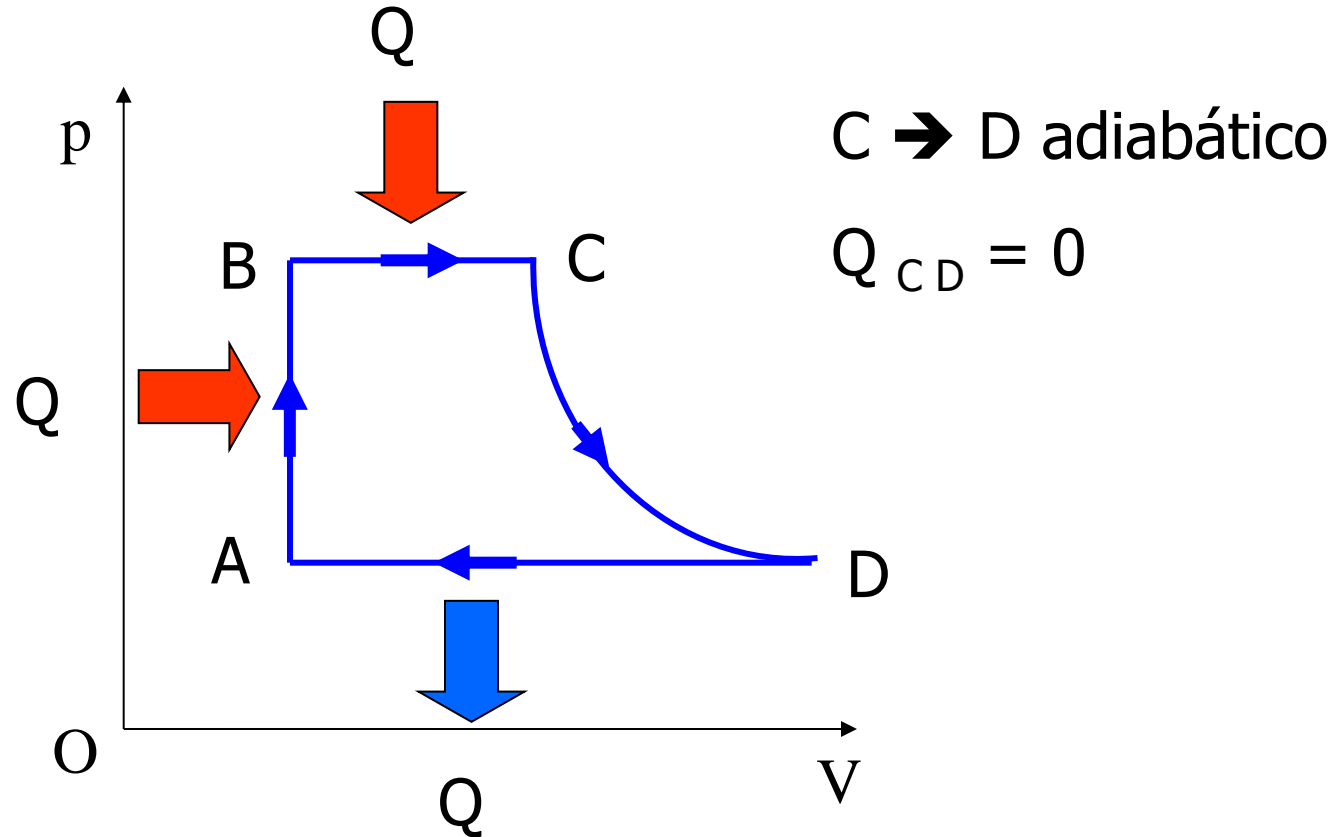
# Ciclo Diesel



- $a \rightarrow b$ : Carrera de compresión  
(compresión adiabática)
- $b \rightarrow c$ : Encendido de combustible  
(calentamiento a presión constante)
- $c \rightarrow d$ : Carrera de potencia  
(expansión adiabática)
- $d \rightarrow a$ : Expulsión de calor al entorno  
(enfriamiento a volumen constante)

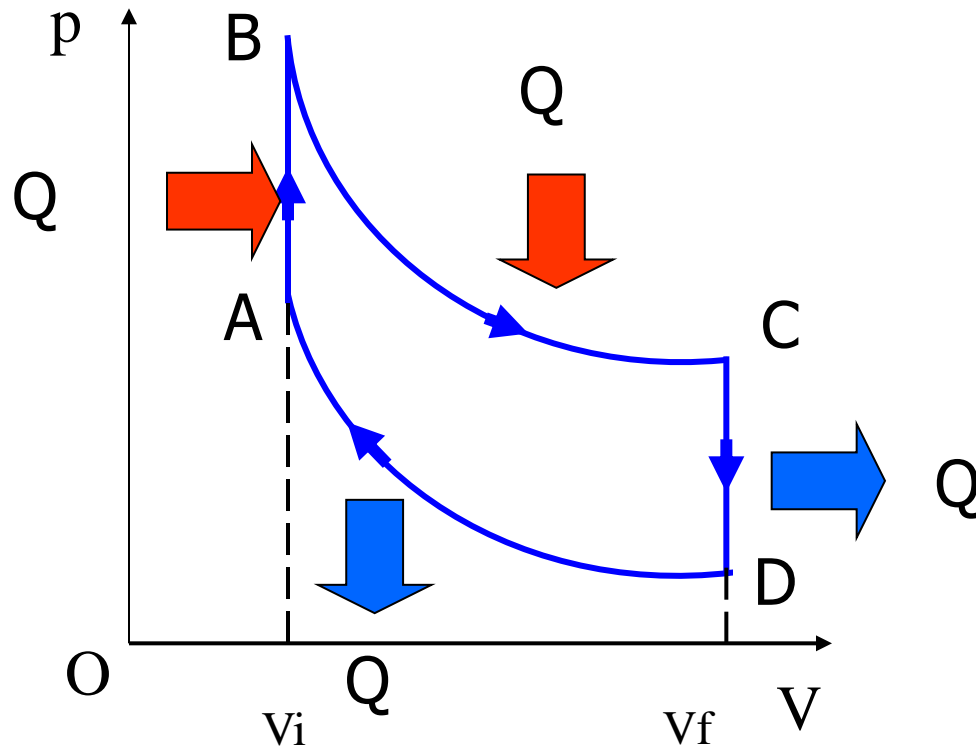
$$\varepsilon = \frac{W_{neto}}{Q_{absorbido}} = \frac{Q_C - |Q_F|}{Q_C}$$

# Ciclo Rankine (Máquina de vapor)



$$\varepsilon = \frac{W_{neto}}{Q_{absorbido}} = \frac{W_{B-C} + W_{C-D} + W_{D-A}}{Q_{A-B} + Q_{B-C}}$$

# Ciclo Stirling



B  $\rightarrow$  C proceso isotérmico

D  $\rightarrow$  A proceso isotérmico

$$\varepsilon = \frac{W_{neto}}{Q_{absorbido}} = \frac{W_{B-C} - W_{D-A}}{Q_{A-B} + Q_{B-C}}$$

# Ciclo Stirling

