

# Física II

## Termodinámica

### Segunda ley de la termodinámica

- Reversibilidad de los procesos.

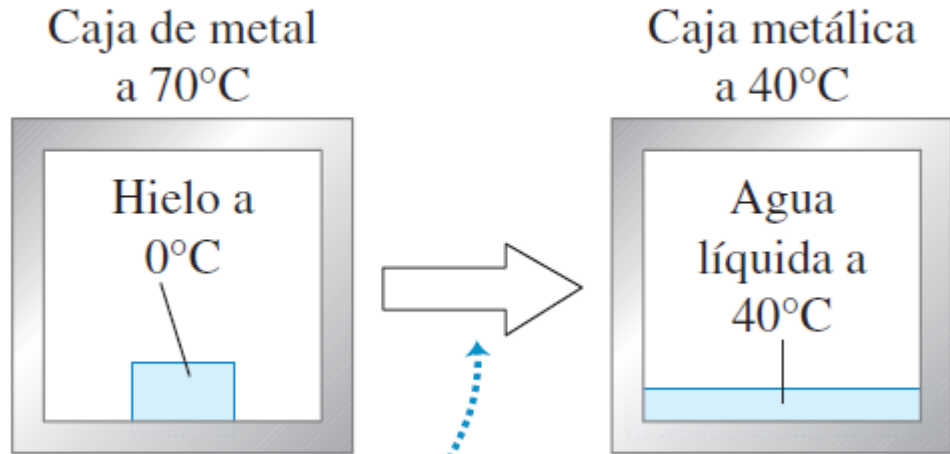
- Máquinas térmicas y refrigeradores: eficiencia

- Enunciados de la 2da. ley de la termodinámica (Clausius, Kelvin-Planck)



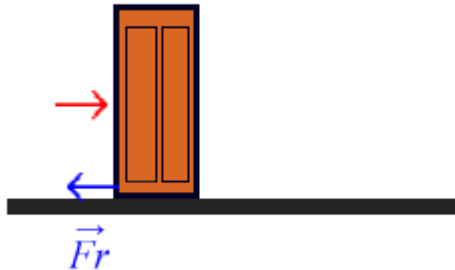
# Reversibilidad de los procesos

a) Un bloque de hielo se derrite *irreversiblemente* cuando lo colocamos en una caja metálica caliente ( $70^{\circ}\text{C}$ ).

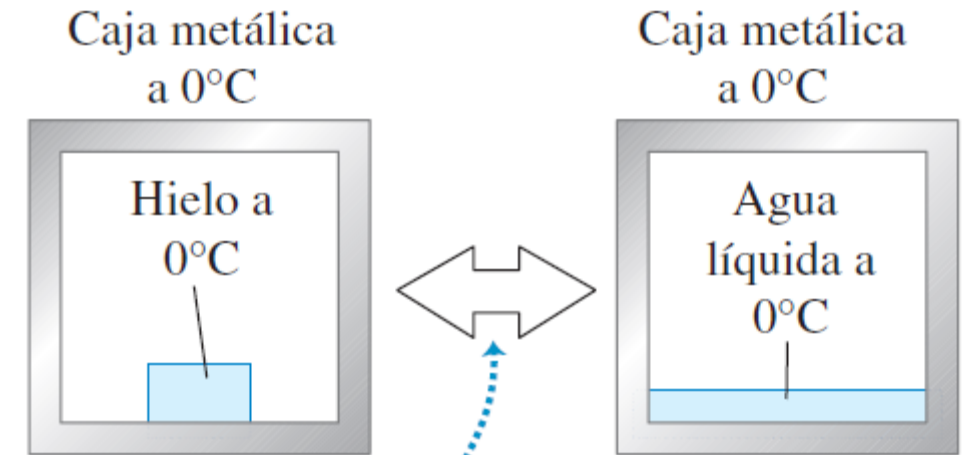


El calor fluye de la caja al hielo y al agua, nunca a la inversa.

Energía mecánica  $\rightarrow$  Calor por fricción



b) Un bloque de hielo a  $0^{\circ}\text{C}$  se puede derretir *reversiblemente* si lo colocamos en una caja metálica a  $0^{\circ}\text{C}$ .



Si aumentamos o reducimos infinitesimalmente la temperatura de la caja, podemos hacer que fluya calor hacia el hielo para derretirlo, o extraer calor del agua para volverla a congelar.

- Proceso en equilibrio
- Gradientes de temperatura y las diferencias de presión en la sustancia son muy pequeños

# Reversibilidad de los procesos

Dirección de  
un proceso

Estado  
resultante  
aleatorio

Energía cinética  
macroscópica

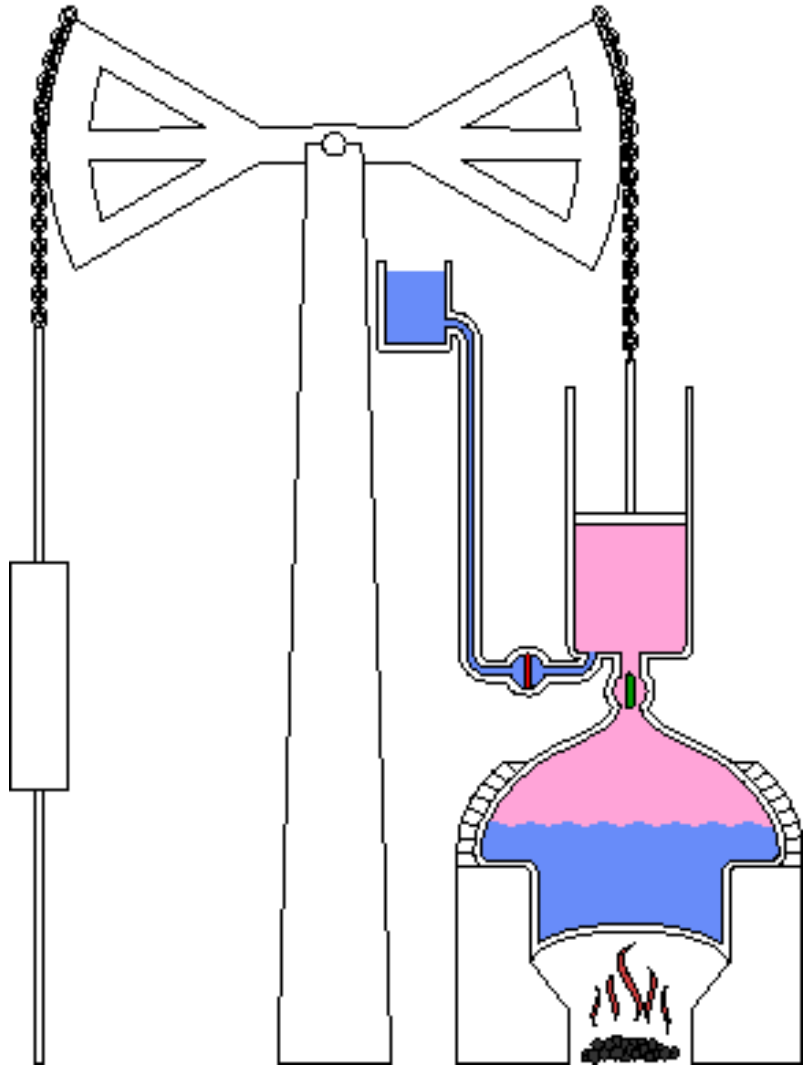
Transferencia  
de calor

Movimiento  
organizado de  
muchas  
moléculas

Cambios de  
energía en un  
movimiento  
molecular  
aleatorio

La conversión de energía  
mecánica en calor implica un  
aumento de la aleatoriedad o el  
desorden

# Máquinas térmicas



Un dispositivo que transforma calor parcialmente en trabajo

Una cantidad de materia dentro de la máquina experimenta:

- Entrada y salida de calor
- Expansión y compresión
- Cambio de fase

→ **Sustancia de trabajo** de la máquina.

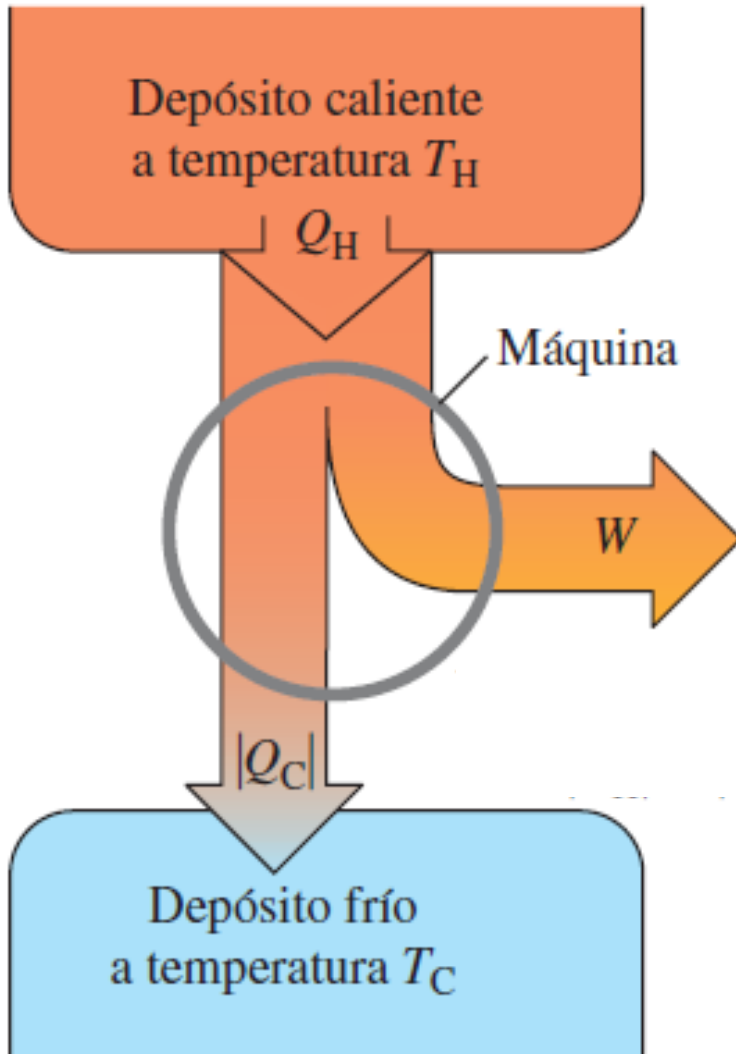
- Motores de combustión interna: mezcla de aire y combustible
- Turbina de vapor: agua.

**Proceso cíclico:** Una sucesión de procesos que al final deja la sustancia en el estado en que inició.

$$U_2 - U_1 = 0 = Q - W$$

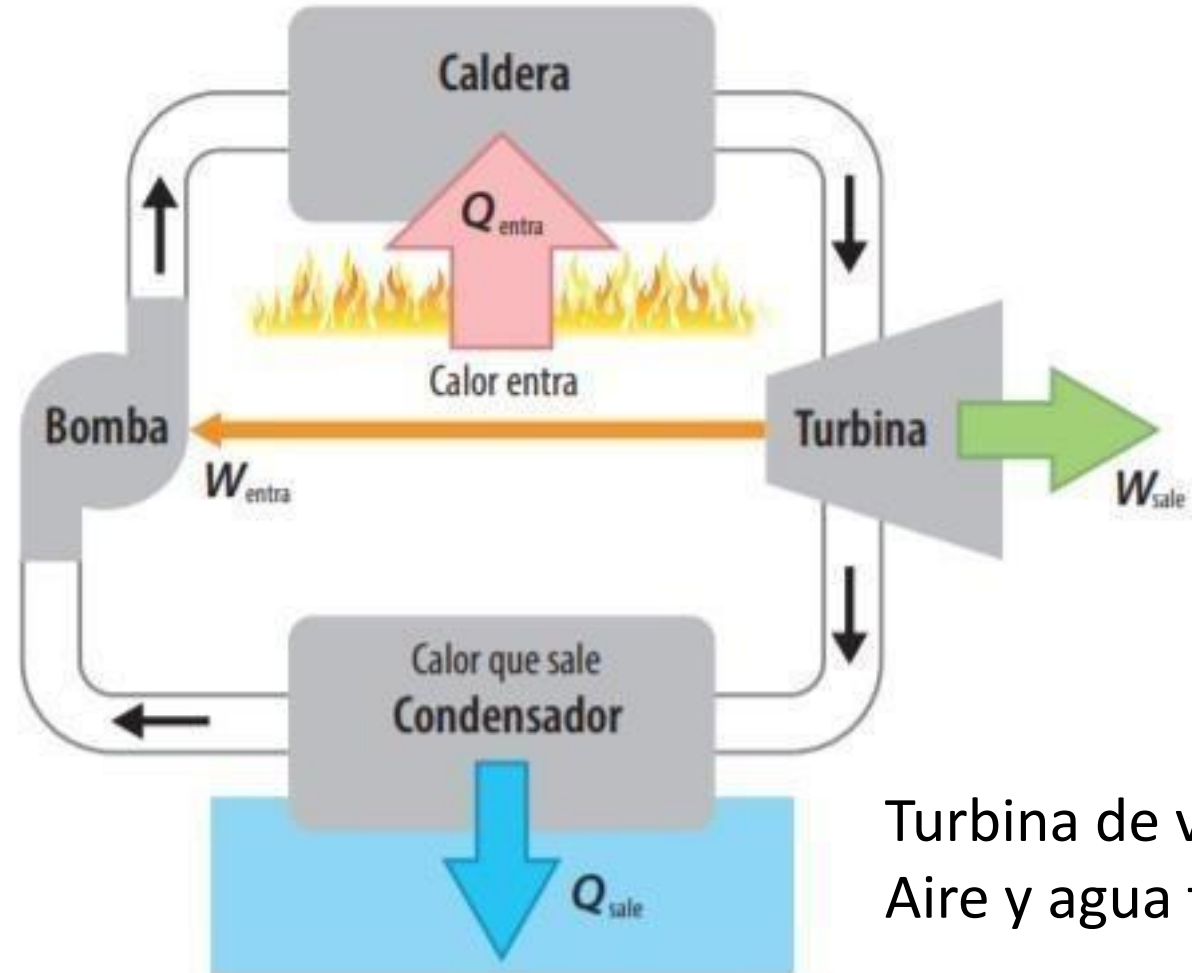
$$Q = W$$

# Máquinas térmicas



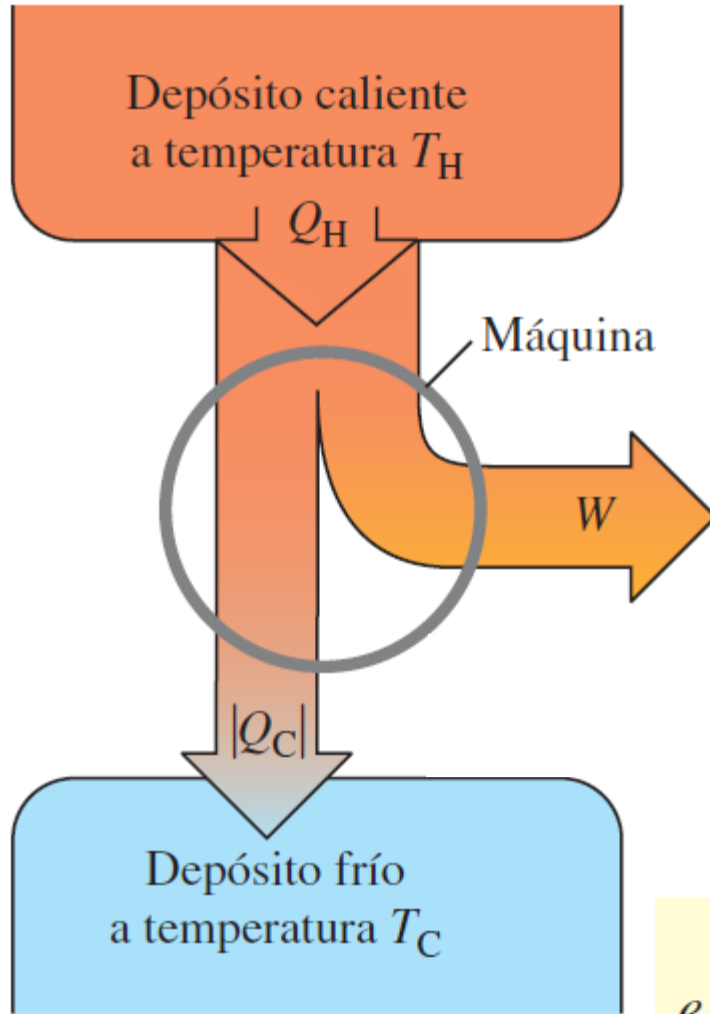
Turbina de vapor:  
Flamas y gases calientes de la caldera

Esquema de una máquina térmica



Turbina de vapor:  
Aire y agua fríos

# Máquinas térmicas: eficiencia



Calor neto absorbido por ciclo:

$$Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$$

Trabajo neto efectuado por la sustancia de trabajo:

$$W = Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$$

*$Q_C$  nunca es cero.*

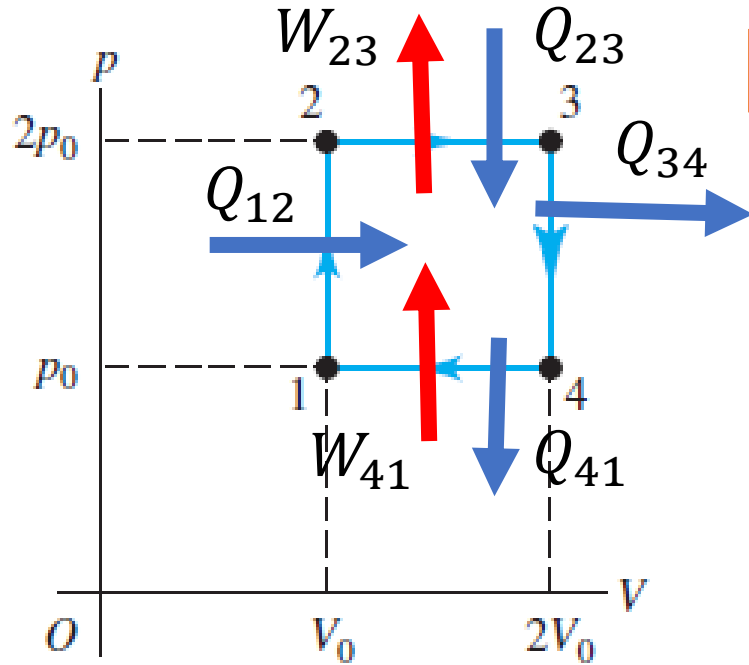
Eficiencia térmica:

$$e = \frac{W}{Q_H}$$

Fracción de  $Q_H$  que se convierte en trabajo

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \left| \frac{Q_C}{Q_H} \right| \quad (\text{eficiencia térmica de una máquina})$$

Ejemplo 1: Máquina térmica  $C_V = \frac{5}{2}R$   $C_p = \frac{7}{2}R$   
 Calcule la **eficiencia térmica** de una máquina en la que  $n$  moles de un gas ideal diatómico realizan el ciclo  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$  que se muestra en la figura



**Trabajo neto**

$$W = W_{23} + W_{41}$$

$$W = 2p_0(2V_0 - V_0) + p_0(V_0 - 2V_0)$$

$$W = 2p_0V_0 - p_0V_0 = p_0V_0$$

**Calor de entrada**

$$Q_H = Q_{12} + Q_{23}$$

$$= \frac{5p_0V_0}{2} + 7p_0V_0$$

$$= \frac{19}{2}p_0V_0$$

$$Q_{12} = nC_V\Delta T$$

$$= nC_V\left(\frac{\Delta pV}{nR}\right)$$

$$= \frac{C_V(p_0)(V_0)}{R}$$

$$= \frac{5p_0V_0}{2}$$

$$Q_{23} = nC_p\Delta T$$

$$= nC_p\left(\frac{p\Delta V}{nR}\right)$$

$$= \frac{C_p(2p_0)(V_0)}{R}$$

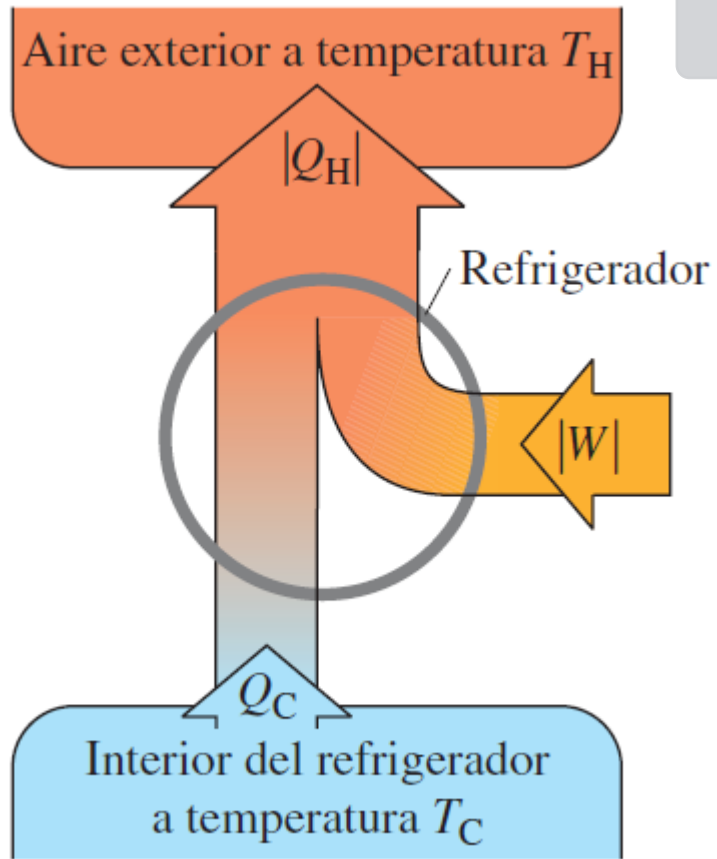
$$= 7p_0V_0$$

$pV = nRT$   $pV = nRT$   
 $\Delta pV = nR\Delta T$   $p\Delta V = nR\Delta T$   
 $\frac{\Delta pV}{nR} = \Delta T$   $\frac{p\Delta V}{nR} = \Delta T$   
 Isocórico Isobárico

$$e = \frac{W}{Q_H} = \frac{p_0V_0}{(19/2)p_0V_0} = \frac{2}{19} = 10.5\%$$

$$e = \frac{W}{Q_H}$$

# Refrigeradores



## Maquina térmica

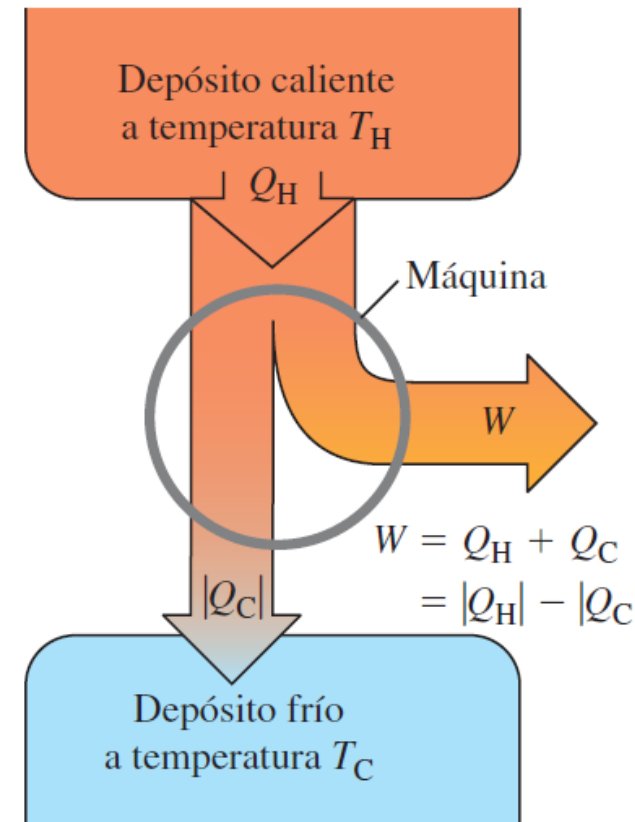
Tiene una salida neta de trabajo mecánico

Toma calor de un lugar caliente y cede calor a un lugar más frío

## Refrigerador

Requiere de una entrada neta de trabajo mecánico

Toma calor de un lugar frío y cede calor a un lugar más caliente





# Refrigeradores: Coeficiente de rendimiento

Por la 1er ley un proceso cíclico:

$$|W| = -W \text{ y } |Q_H| = -Q_H.$$

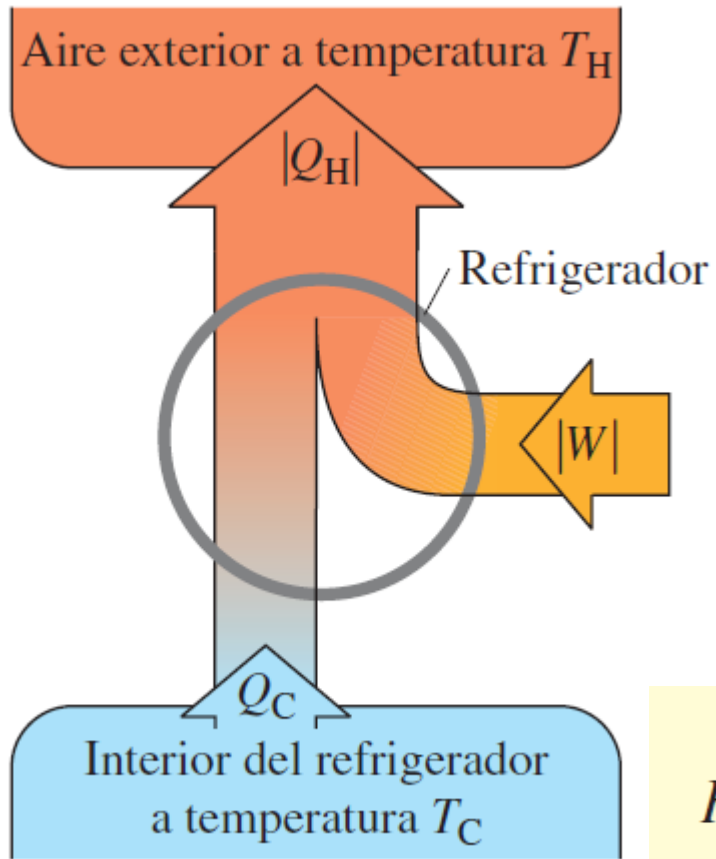
$$Q_H + Q_C - W = 0$$

$$-Q_H = Q_C - W$$

$$|Q_H| = Q_C + |W|$$

$$|Q_H| = |Q_C| + |W|$$

Válida tanto para máquinas térmicas como para refrigeradores.



Coeficiente de rendimiento:

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} \quad (\text{coeficiente de rendimiento de un refrigerador})$$

## Ejemplo 2: Refrigerador $k = \frac{|Q_c|}{|W|}$

Un congelador tiene un coeficiente de rendimiento de 2.40, y debe convertir 1.80 kg de agua a 25.0°C en 1.80 kg de hielo a -5.0°C en 1 hora.

- a) ¿Cuánto calor es necesario extraer del agua a 25.0°C para convertirla en hielo a -5.0°C?
- b) ¿Cuánta energía eléctrica consume el congelador en esa hora?
- c) ¿Cuánto calor es cedido al cuarto donde está el congelador?

$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3$  Calor a extraer del interior del refrigerador

Enfriar el agua hasta 0°C

$$Q_1 = mc(0^\circ\text{C} - 25.0^\circ\text{C}) = -(1.80 \text{ kg}) \left( 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (25 \text{ K})$$

Convertir el agua (a 0°C) en hielo

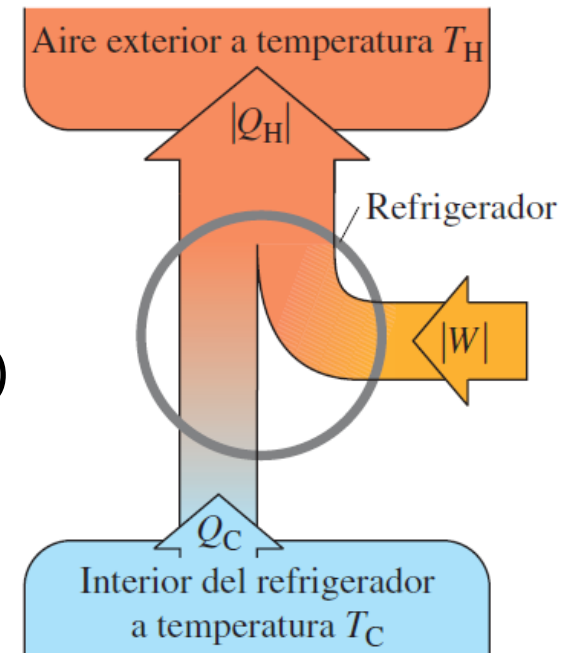
$$Q_2 = -mL_f = -(1.80 \text{ kg})(3.34 \times 10^5 \text{ J/kg})$$

Enfriar el hielo hasta -5°C

$$Q_3 = mc_h(-5^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = -(1.80 \text{ kg}) \left( 2010 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (5 \text{ K})$$

$$Q_c = -(1.80 \text{ kg}) \left[ \left( 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (25 \text{ K}) + 3.34 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + \left( 2010 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (5 \text{ K}) \right]$$

$$Q_c = -8.08 \times 10^5 \text{ J}$$



## Ejemplo 2: Refrigerador $k = \frac{|Q_c|}{|W|}$

Un congelador tiene un coeficiente de rendimiento de 2.40, y debe convertir 1.80 kg de agua a 25.0°C en 1.80 kg de hielo a -5.0°C en 1 hora.

- a) ¿Cuánto calor es necesario extraer del agua a 25.0°C para convertirla en hielo a -5.0°C?
- b) ¿Cuánta energía eléctrica consume el congelador en esa hora?
- c) ¿Cuánto calor es cedido al cuarto donde está el congelador?

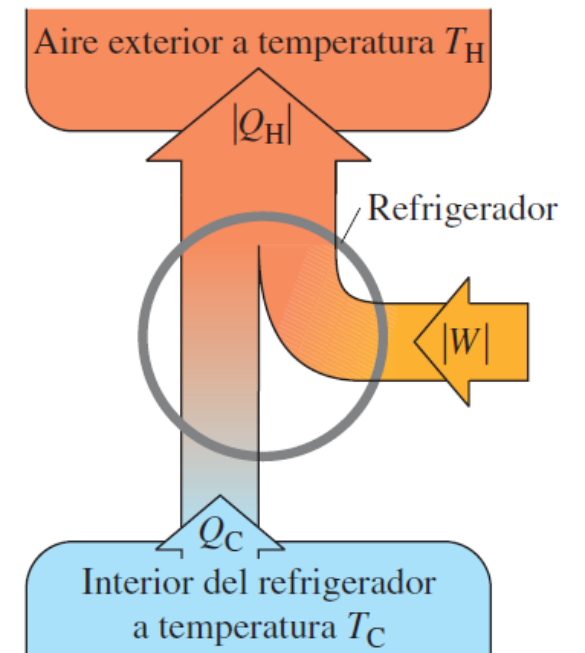
$$|W| = \frac{|Q_c|}{k} = \frac{8.08 \times 10^5 J}{2.40} = 3.37 \times 10^5 J$$

Calor cedido al cuarto  $Q_H$

$$|W| = -W \text{ y } |Q_H| = -Q_H.$$

$$|Q_H| = Q_C + |W|$$

$$|Q_H| = 8.08 \times 10^5 J + 3.37 \times 10^5 J = 11.45 \times 10^5 J$$



# Enunciado de la 2da. ley de la termodinámica (Kelvin-Planck): Enunciado de la máquina

En base a pruebas experimentales:

- Es imposible construir una máquina térmica que convierta calor totalmente en trabajo
- Es imposible construir una máquina con una eficiencia térmica del 100%.

Es imposible que un sistema efectúe un proceso en el que absorba calor de un depósito de temperatura uniforme y lo convierta totalmente en trabajo mecánico, terminando en el mismo estado en que inició.

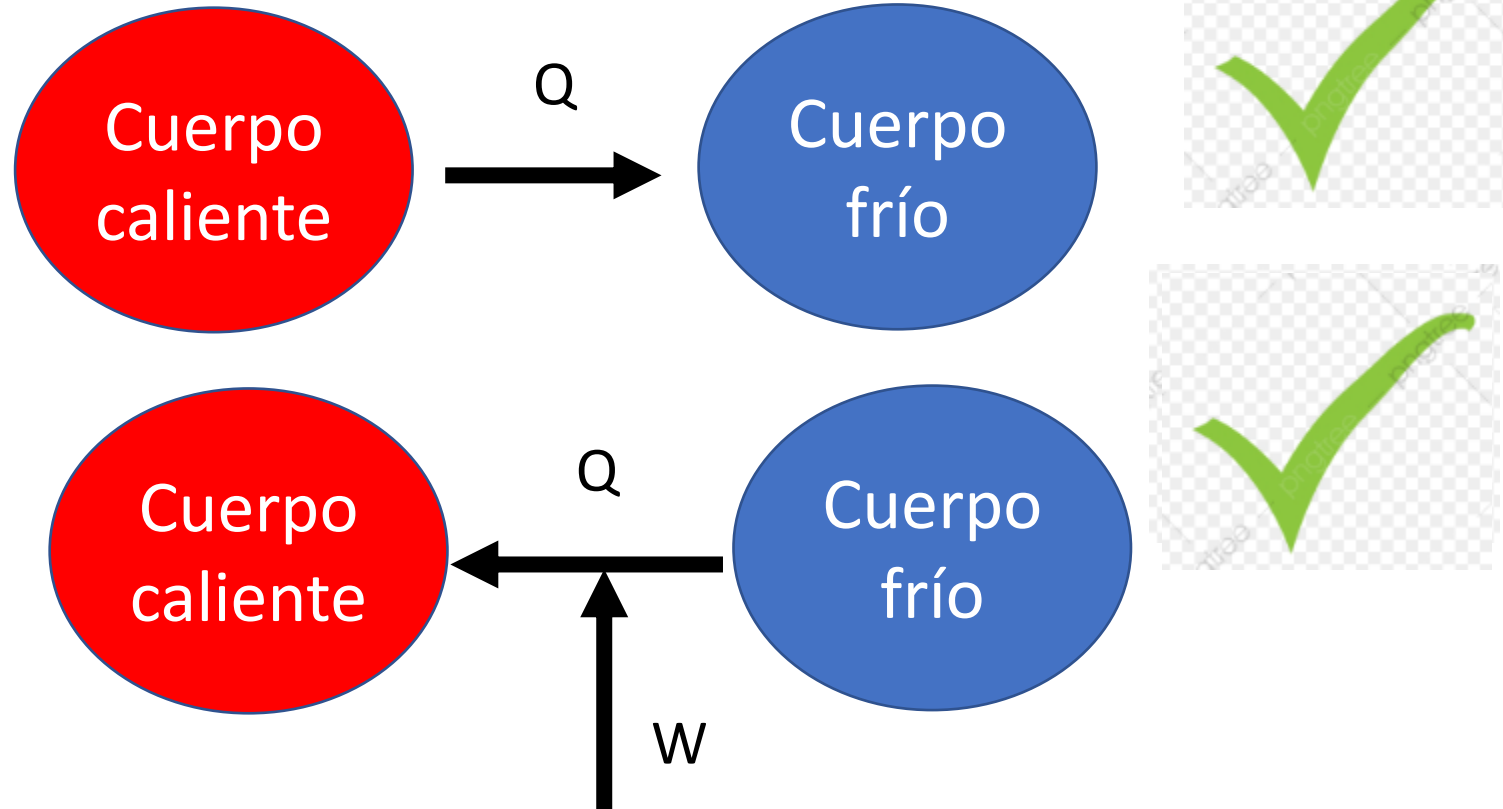
## 1er ley

No se puede crear o destruir energía

## 2da ley

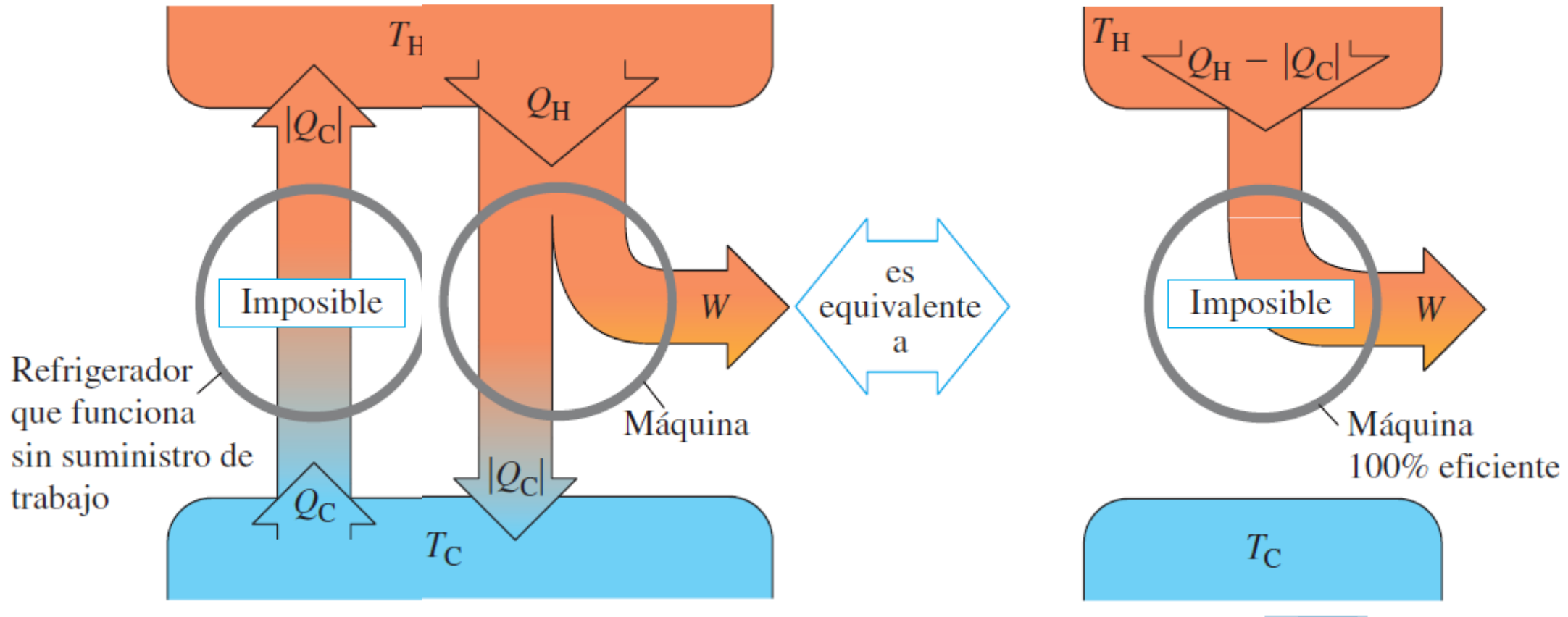
La disponibilidad de la energía y las formas en que puede usarse y convertirse tiene un límite

# Enunciado de la 2da. ley de la termodinámica (Clausius): Enunciado del refrigerador



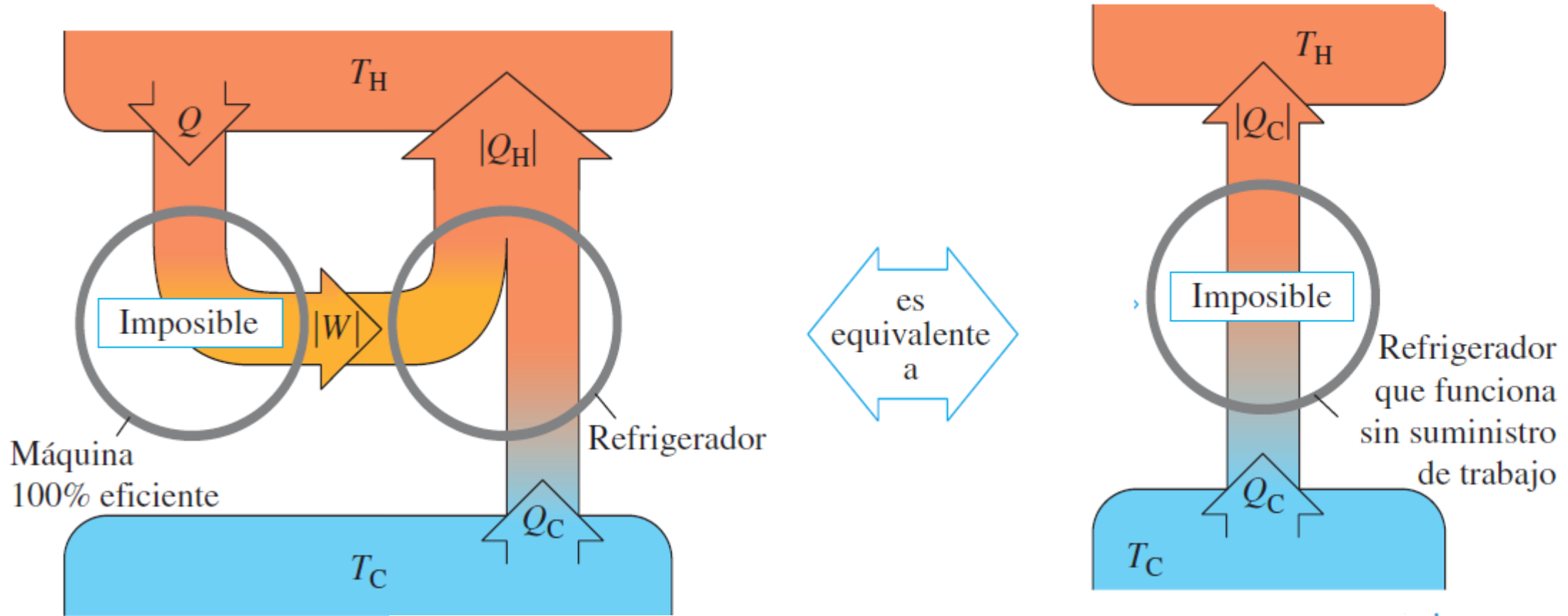
Es imposible que un proceso tenga como único resultado la transferencia de calor de un cuerpo más frío a uno más caliente.

# Equivalencia entre enunciados



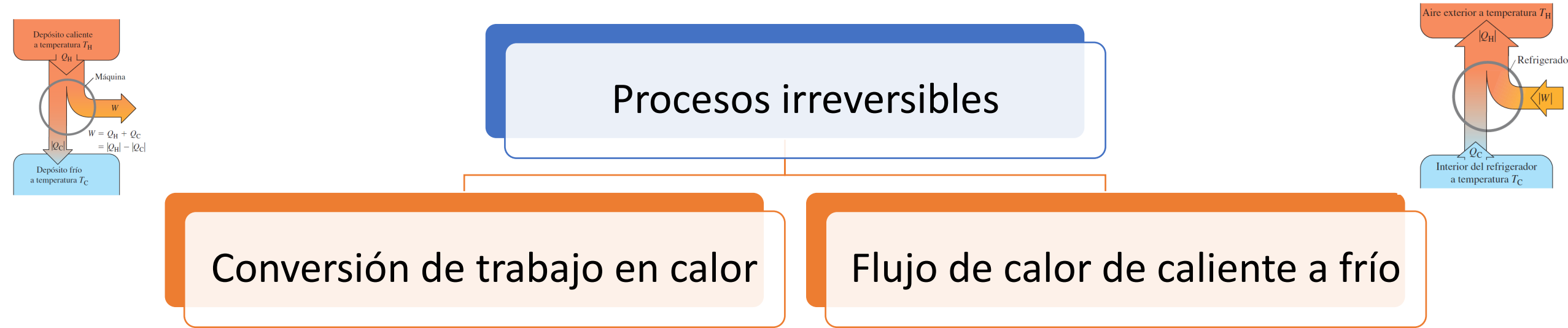
Máquina 100% eficiente, convirtiendo el calor  $Q_H - |Q_C|$  completamente en trabajo.

# Equivalencia entre enunciados



Refrigerador 100% eficiente, que transfiere el calor  $Q_C$  del depósito frío al caliente sin aporte de trabajo..

# 2da. ley de la termodinámica: Dirección de procesos irreversibles



Los planteamientos de “máquina” y “refrigerador” de la segunda ley establecen que tales procesos solo pueden revertirse parcialmente.

Ejemplos:

- Los gases fluyen espontáneamente de una región de alta presión a una de baja presión
- Los gases y líquidos miscibles sin perturbación siempre tienden a mezclarse

La segunda ley de la termodinámica es una expresión del aspecto inherentemente **unidireccional** de estos y muchos otros procesos irreversibles..



# Ecuaciones

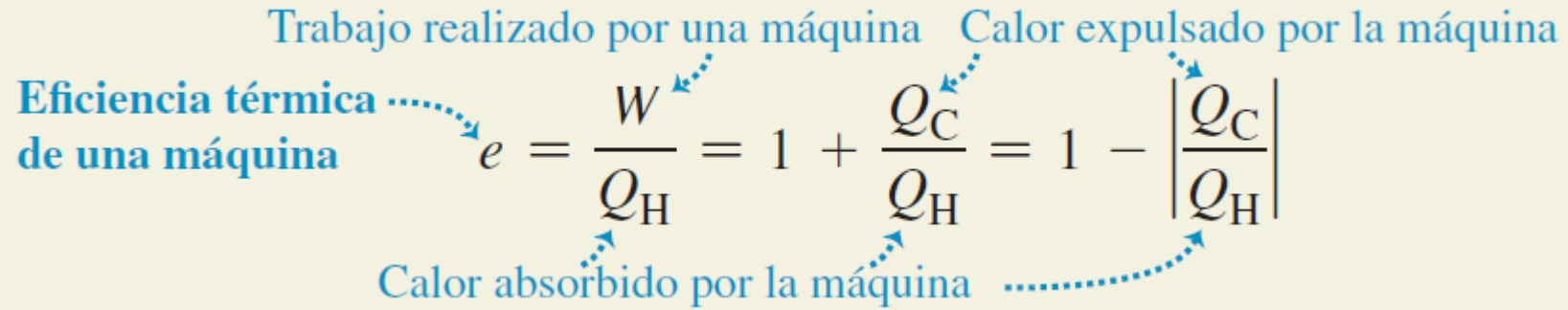
Trabajo realizado por una máquina

Calor expulsado por la máquina

**Eficiencia térmica de una máquina**

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \left| \frac{Q_C}{Q_H} \right|$$

Calor absorbido por la máquina



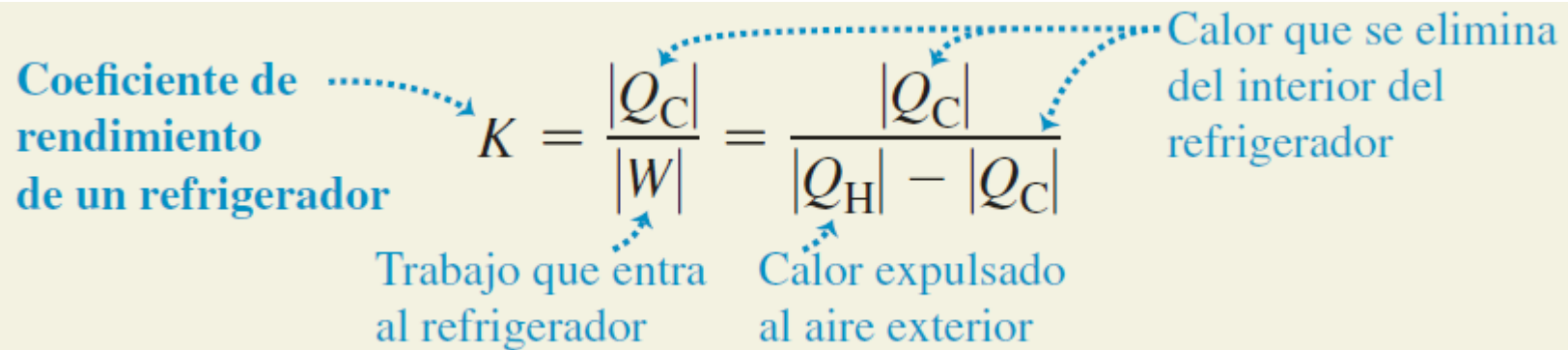
**Coeficiente de rendimiento de un refrigerador**

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

Trabajo que entra al refrigerador

Calor expulsado al aire exterior

Calor que se elimina del interior del refrigerador



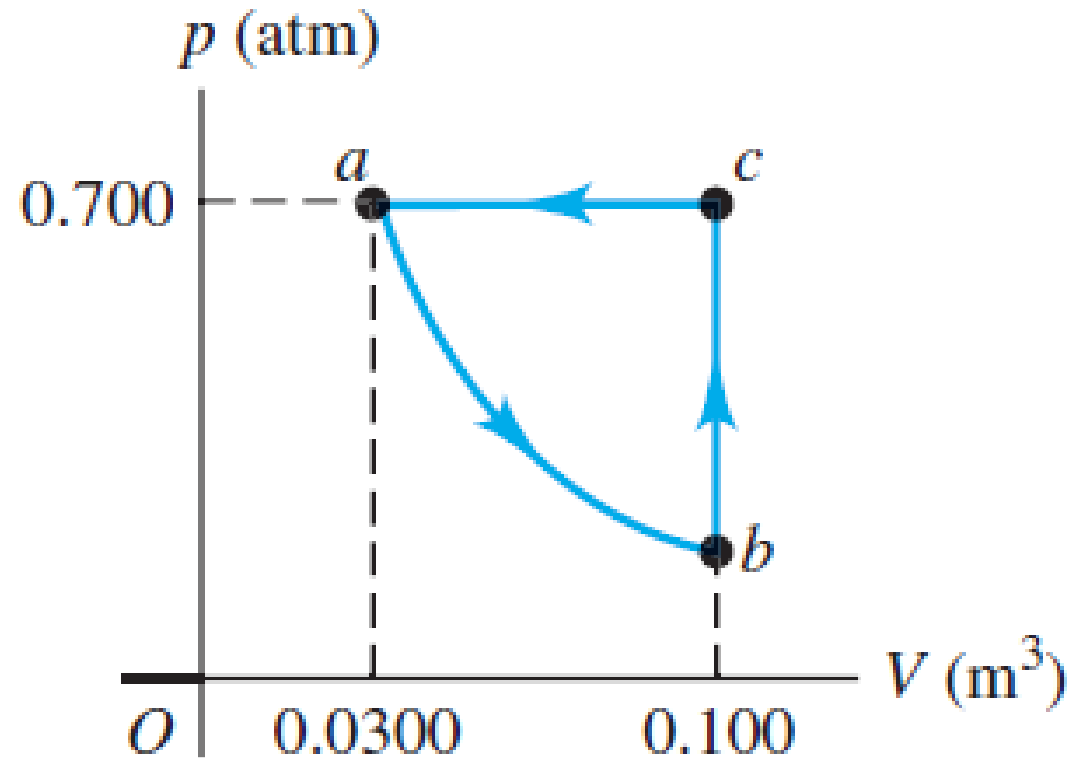
# Ejemplo 3

Una planta generadora de energía eléctrica de 1000 MW, alimentada con carbón, tiene una eficiencia térmica del 40%.

- a) ¿Cuál es la rapidez de suministro de calor a la planta?
- b) La planta quema carbón de piedra (antracita), que tiene un calor de combustión de  $2.65 \times 10^7 \text{ J/kg}$ . ¿Cuanto carbón consume la planta al día, si opera de manera continua?
- c) ¿Con que rapidez se cede calor hacia el deposito frio, que es un rio cercano?
- d) La temperatura del rio es de  $18.0^\circ\text{C}$  antes de llegar a la planta de energía y de  $18.5^\circ\text{C}$  después de que recibe el calor de desecho de la planta. Calcule la rapidez de flujo del rio en metros cúbicos por segundo.

## Ejemplo 4

El diagrama  $pV$  en la **figura** muestra el ciclo para un refrigerador que opera en 0.850 moles de  $H_2$ . Suponga que el gas se puede tratar como ideal. El proceso  $ab$  es isotérmico. Calcule el coeficiente de rendimiento de este refrigerador



GRACIAS