

# 0. Inicio



fichas guía

física térmica

## III. Máquinas Térmicas

(use los comandos de su visor pdf para navegar las fichas)

# 1. segunda ley: necesidad



¿Porqué necesitamos una segunda ley?

*La conservación de la energía (primera ley) pone límites a los procesos posibles, pero existen muchos procesos que la cumplen y no tienen lugar.*

- Estos procesos tienen lugar espontáneamente en una dirección pero no en la dirección opuesta. La segunda ley nos permite distinguir en qué dirección tiene lugar un proceso espontáneamente.
- Es la única ley física que realiza una afirmación sobre el sentido de la flecha del tiempo. Sus fundamentos son estadísticos y es una de las leyes más generales de la física, con respecto a su rango de aplicación.

por más detalles consultar:

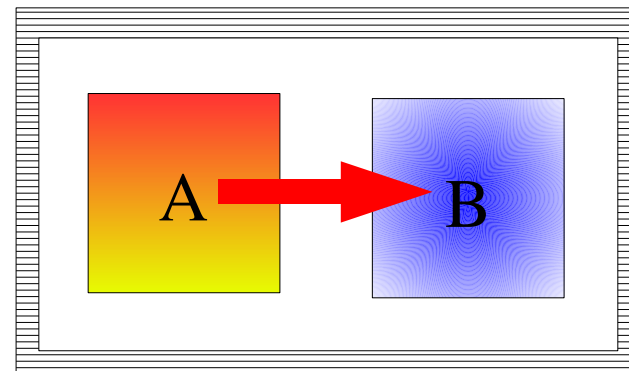
[notas sobre segunda ley](#) ó [módulo de Termodinámica Estadística](#)

## 2a. segunda ley: un primer ejemplo



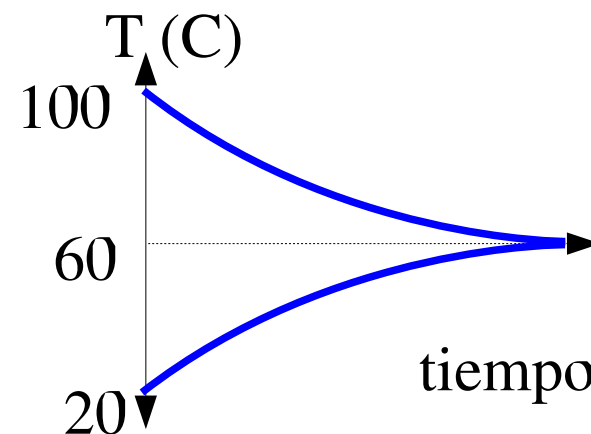
Transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperatura

Dos bloques idénticos (masa  $m$ , calor específico  $c$ ) intercambian calor en un recinto aislado. Inicialmente,  $T_A > T_B$  y al final se equilibran en una temperatura común  $T$ .



primera ley: 
$$\Delta U_{A+B} = mc(2T - T_A - T_B) = 0 \Rightarrow T = \frac{1}{2}(T_A + T_B)$$

el proceso tiene lugar espontánea y gradualmente:



[sigue]

## 2b. segunda ley: un primer ejemplo

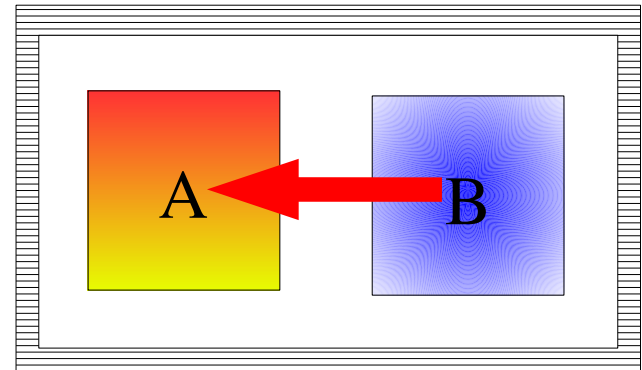
### proceso en reversa



Si, inicialmente,  $T_A = T_B = T$  y se transfiere calor de modo que al final  $T_A > T_B$ .

de nuevo, la primera ley vincula las temperaturas

$$\Delta U_{A+B} = mc(T_A + T_B - 2T) = 0$$



nada en esta expresión impide que el proceso ocurra en la dirección indicada.

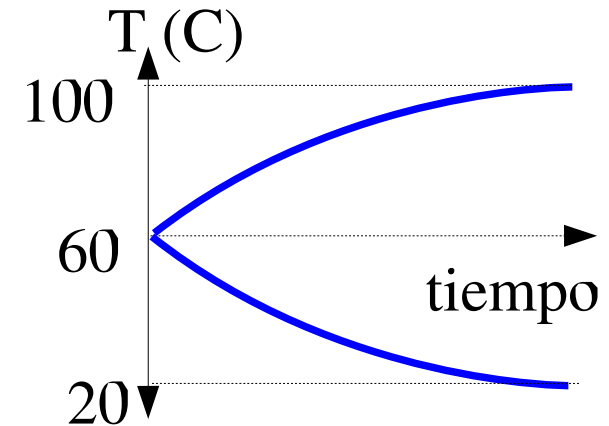
[sigue]

## 2c. segunda ley: un primer ejemplo



proceso en reversa

Sin embargo, este proceso no tiene lugar espontáneamente.



La experiencia indica que **ES IMPOSIBLE** que el proceso en reversa tenga lugar espontáneamente.

Aunque se podría forzar la transferencia con el auxilio de una **bomba de calor**.

# 3. máquina térmica

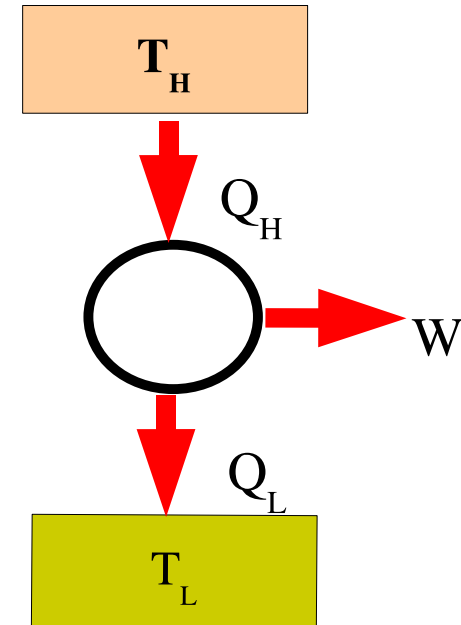
## ● notación:

en este contexto, los símbolos para calor  $Q$  y trabajo  $W$  representan cantidades positivas (\*) correspondientes al intercambio entre reservas térmicas y una sustancia que recorre un ciclo. Las temperaturas alta y baja se indican por  $T_H$  y  $T_L$  respectivamente.

(\*) en otras palabras, en éste contexto no usaremos la convención de signos.

## ● máquina termica:

un dispositivo que opera en un ciclo y produce trabajo a partir de fuentes de calor a diferentes temperaturas.



## 4. eficiencia térmica

### ● **eficiencia térmica:**

Es la razón entre utilidad y costo. Para una máquina térmica la utilidad es el trabajo  $W = Q_H - Q_L$  y el costo es el calor  $Q_H$  de la fuente a  $T_H$ , por lo que

$$\eta_T = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

observe que  $\eta_T \in [0, 1]$ , por definición.

la segunda ley establece un límite termodinámico a la eficiencia térmica.

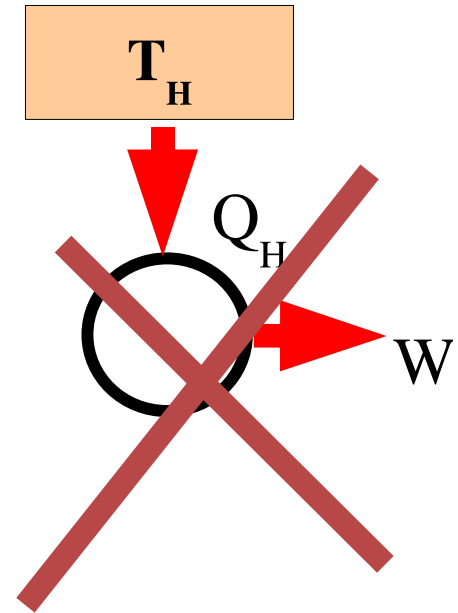
la máxima eficiencia posible no es 1.

# 5. enunciado de Kelvin-Planck

*No existe una máquina térmica que opere con eficiencia térmica 1.*

$$\eta_T = 1 \Rightarrow W = Q_H > 0$$

es imposible, si la operación es cíclica.

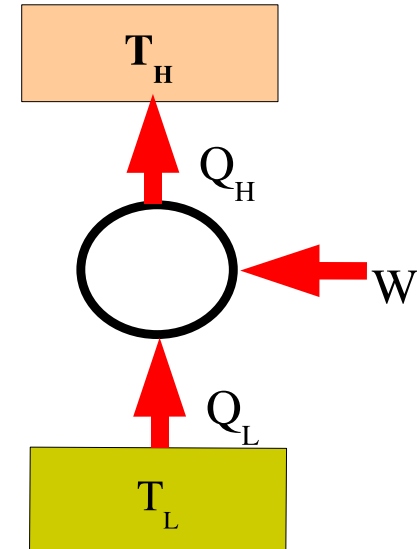


es necesario que la máquina libere calor a la fuente de baja,  
es decir  $\eta_T < 1$ .



# 6a. bomba de calor

una máquina térmica operada en reversa es una **bomba de calor**. Consume trabajo y transfiere calor de una fuente de baja a una de alta.



Su eficiencia se mide a través del coeficiente de performance (COP),

$$COP_B = \frac{Q_H}{W} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

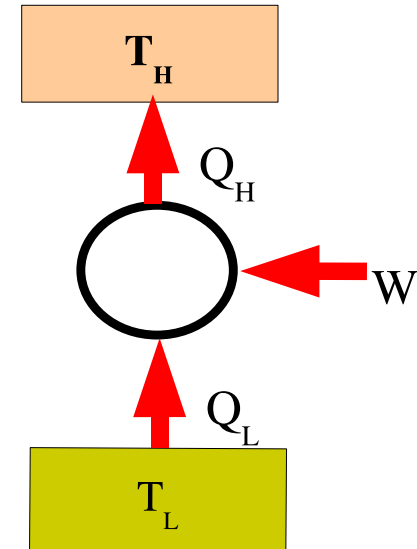
no es estrictamente una eficiencia ya que  $COP_B \geq 1$ .

# 6b. Refrigerador

El ciclo anterior se puede considerar como un refrigerador,

en cuyo caso, la utilidad es el calor  $Q_L$  extraído de la fuente de baja,

$$COP_R = \frac{Q_L}{W} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$



evidentemente,  $COP_B$  y  $COP_R$  no son independientes, sino que

$$COP_B - COP_R = 1$$

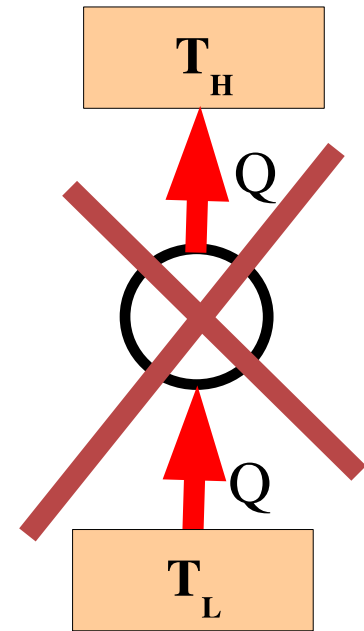
# 7. enunciado de Clausius

*No existe una bomba de calor que opere con  $COP_B = \infty$ .*

$$COP_B = \infty \Rightarrow Q_H = Q_L$$

es imposible, si la operación es cíclica.

es necesario que la bomba consuma algo de trabajo,  
es decir  $COP_B$  finito.



# 8. equivalencia de los enunciados



*Ambos postulados son negaciones lógicas, por lo que no se pueden probar correctos. Se podría encontrar un contraejemplo para mostrar que son incorrectos, pero nadie lo ha hecho aún.*

Los postulados son equivalentes. Esto se prueba por *reductio ad absurdum*, suponiendo falso uno de ellos y mostrando que esto implica que el otro también lo es.

Esquemáticamente:

$$\mathbf{A)} \quad \nexists \text{ Kelvin-Planck} \implies \nexists \text{ Clausius}$$

$$\mathbf{B)} \quad \nexists \text{ Clausius} \implies \nexists \text{ Kelvin-Planck}$$

# 8a. equivalencia

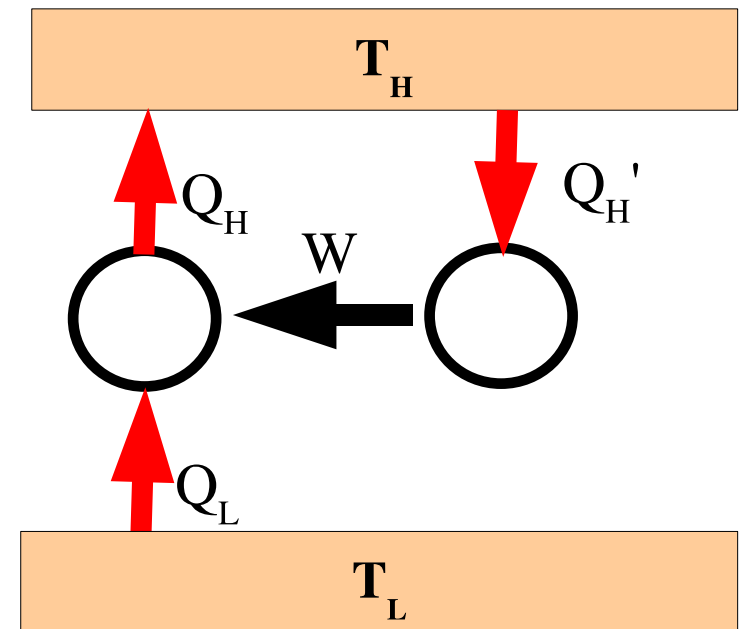
$\nexists$  Kelvin-Planck  $\Rightarrow$   $\nexists$  Clausius

Si existe una máquina térmica con  $\eta_T = 1$ , una bomba de calor puede ser alimentada por esta máquina y el dispositivo conjunto operaría sin consumir trabajo, violando el postulado de Clausius.

usando  $Q'_H = W$ , la primera ley muestra que el dispositivo conjunto opera cíclicamente transfiriendo en cada ciclo una cantidad de calor

$$Q_L > 0$$

de la fuente de baja a la de alta  
sin consumir trabajo.



## 8b. equivalencia

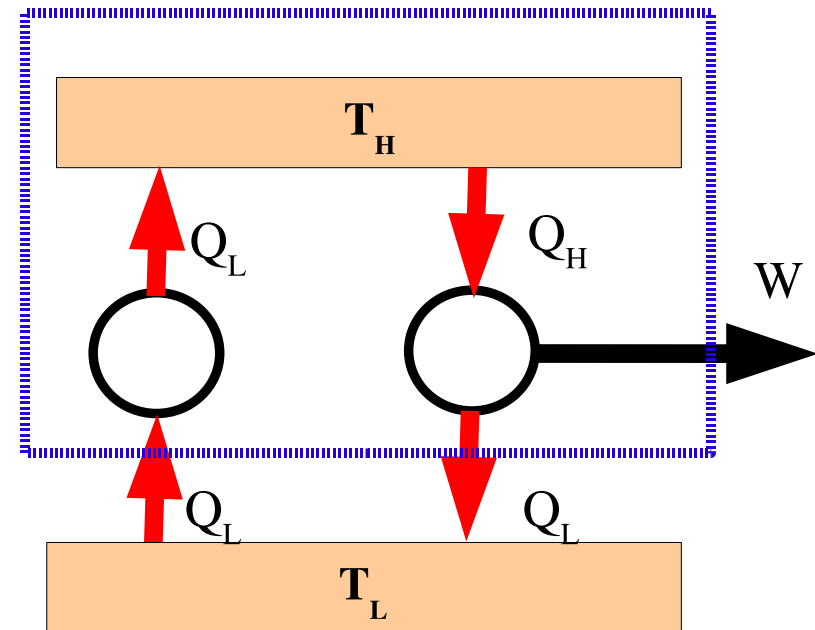
$\nexists$  Clausius  $\Rightarrow$   $\nexists$  Kelvin-Planck

Si existe una bomba de calor que no consume trabajo, se puede usar para devolver a la reserva de alta el calor que una máquina térmica vierte a la reserva de baja. El dispositivo conjunto generaría trabajo a partir de una sola fuente de calor, violando el postulado de Kelvin-Planck.

la primera ley muestra que el dispositivo conjunto opera cíclicamente produciendo un trabajo positivo

$$W = Q_H - Q_L > 0$$

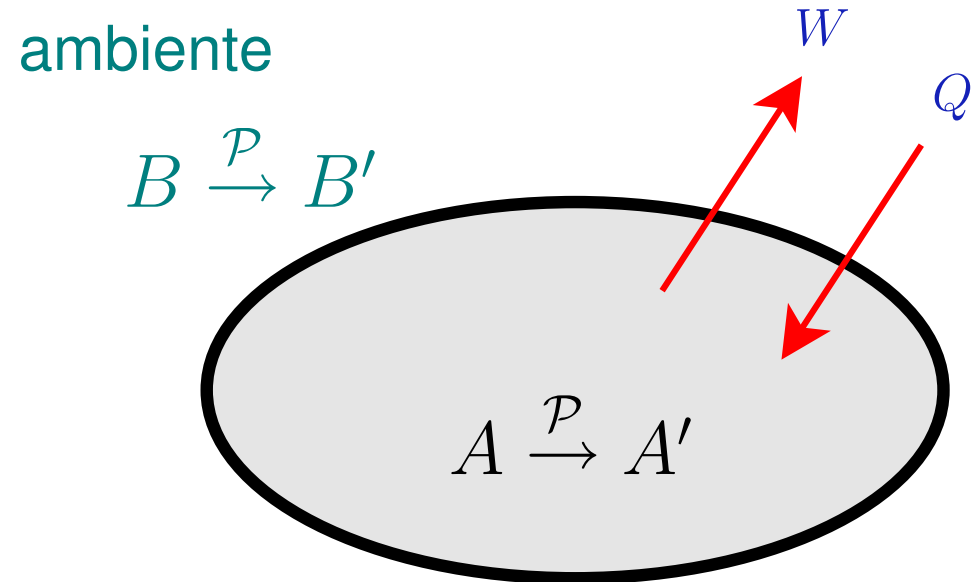
en cada ciclo, sin intercambiar calor con la reserva a  $T_L$  al cabo de un ciclo.



# 9a. Proceso Reversible

Sea un proceso  $\mathcal{P} : A \rightarrow A'$  que lleva una masa de control de un estado de equilibrio  $A$  a otro  $A'$ . Durante el proceso, se intercambia calor  $Q$  y trabajo  $W$  con **el ambiente** que pasa de un estado  $B$  a otro  $B'$ .

El proceso  $\mathcal{P}$  es **reversible** si existe otro proceso  $\mathcal{P}^{-1}$  que lleva a la masa de control de  $A' \rightarrow A$  **y al ambiente** de  $B' \rightarrow B$ .

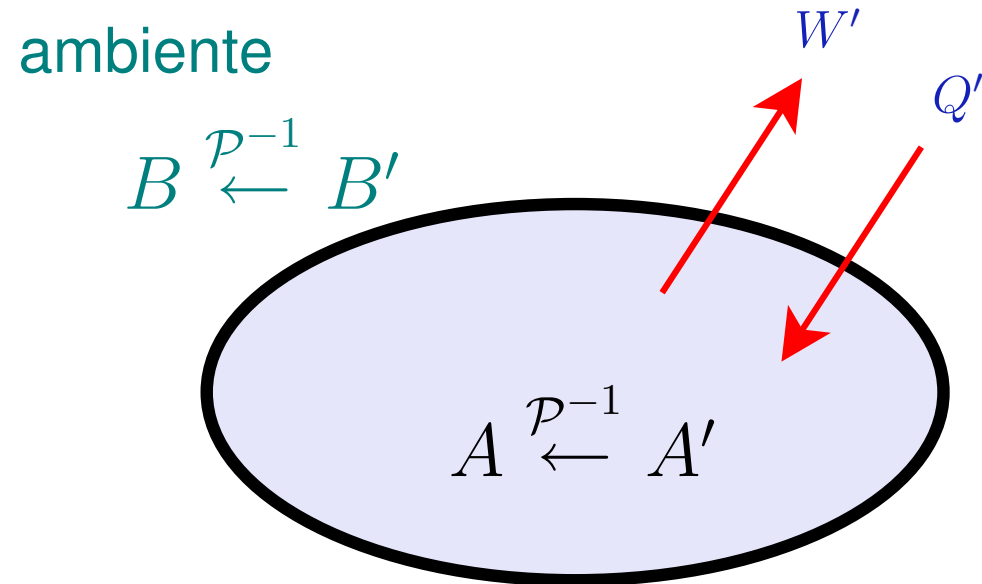


[sigue]

## 9b. Proceso Reversible

Sea un proceso  $\mathcal{P} : A \rightarrow A'$  que lleva una masa de control de un estado de equilibrio  $A$  a otro  $A'$ . Durante el proceso, se intercambia calor  $Q$  y trabajo  $W$  con **el ambiente** que pasa de un estado  $B$  a otro  $B'$ .

El proceso  $\mathcal{P}$  es **reversible** si existe otro proceso  $\mathcal{P}^{-1}$  que lleva a la masa de control de  $A' \rightarrow A$  **y al ambiente** de  $B' \rightarrow B$ .



El proceso  $\mathcal{P}^{-1}$  es imposible si viola la primera o la segunda ley de la termodinámica. Por ejemplo, la **transferencia de calor** es irreversible.

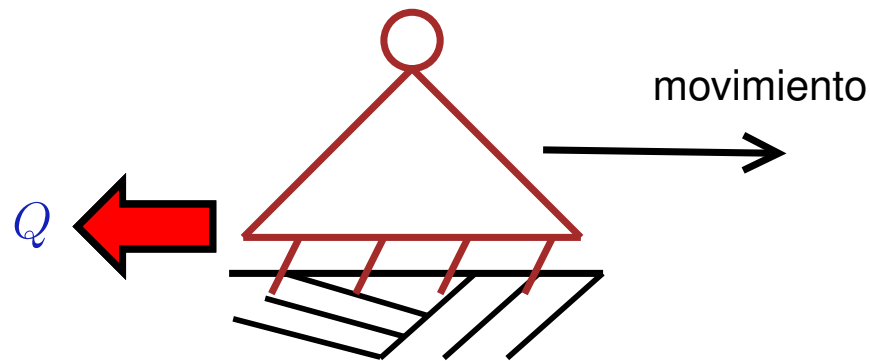


# 10. Procesos irreversibles:



## fricción

En las superficies rugosas de dos sólidos en contacto mecánico y en movimiento relativo se genera una diferencia de temperatura con el ambiente que causa una transferencia de calor al ambiente.



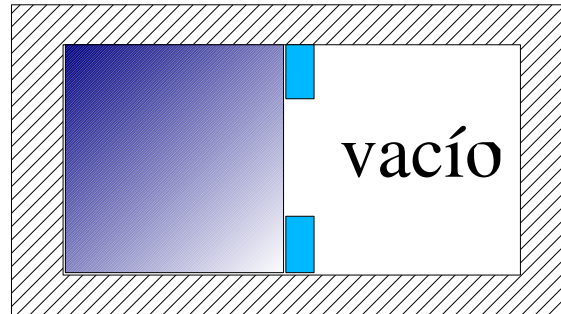
Algo similar ocurre cuando un fluido viscoso fluye por un ducto.

# 11a. Procesos irreversibles



## expansión libre

Gas en un recinto aislado. El recinto a la derecha está evacuado.



Al romperse los topes, el gas se expande libremente hasta ocupar todo el recinto. El ambiente (lo externo al volumen de control que contiene el gas al final) no cambia su estado en el proceso.

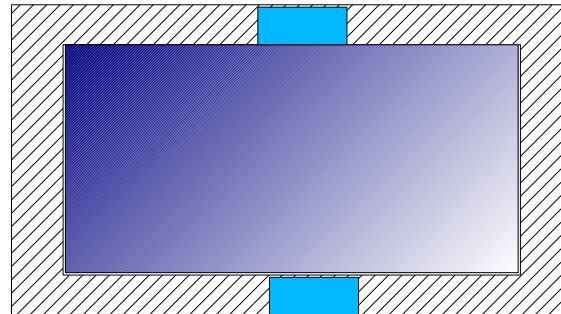
[sigue]

# 11b. Procesos irreversibles



## expansión libre

Gas en un recinto aislado. El recinto a la derecha está evacuado.



Para comprimir el gas a su estado inicial, un agente externo debe realizar el trabajo necesario contra la presión del gas y eso es una alteración del ambiente.

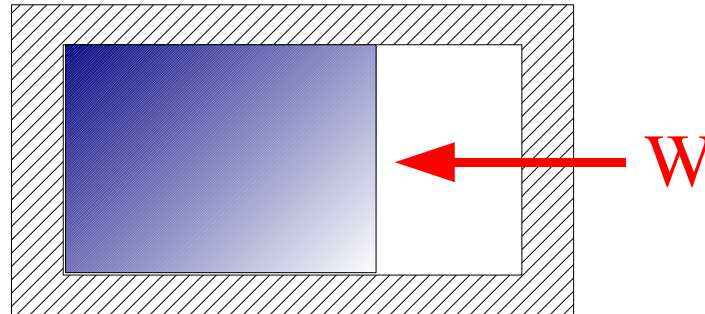
[sigue]

# 11c. Procesos irreversibles



## expansión libre

Gas en un recinto aislado. El recinto a la derecha está evacuado.

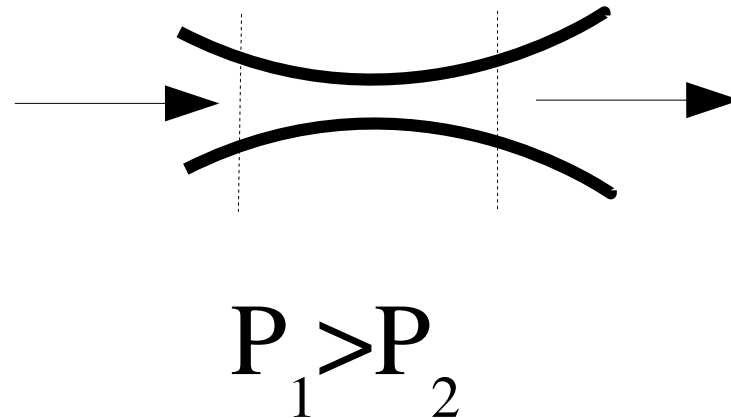


Para comprimir el gas a su estado inicial, un agente externo debe realizar el trabajo necesario contra la presión del gas y eso es una alteración del ambiente.

# 12. Procesos irreversibles



## estrangulamiento



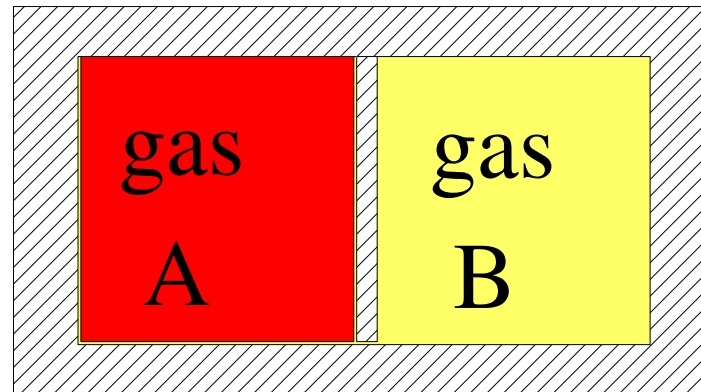
El fluido pasa espontáneamente por la restricción en la dirección de mayor a menor presión. Para que pase en la dirección opuesta sería necesario que un agente externo realice trabajo forzándolo y alterando el ambiente.

# 13a. Procesos irreversibles



mezcla

Dos gases diferentes A y B en un recinto aislado, separados por un tabique.



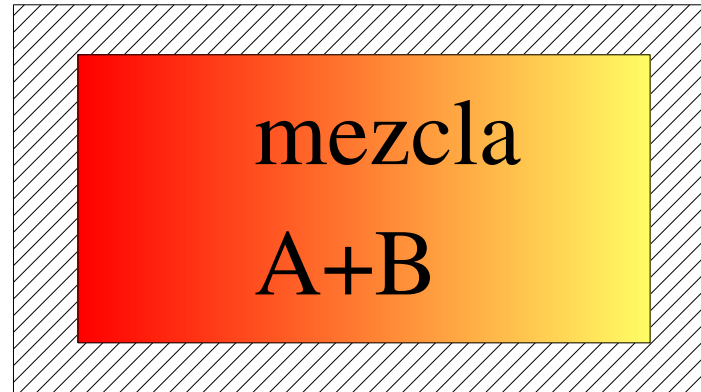
Al romperse el tabique, los gases se mezclan sin que el ambiente cambie de estado en el proceso.

[sigue]

# 13b. Procesos irreversibles



mezcla



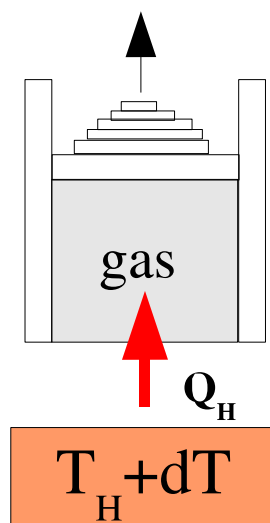
Al romperse el tabique, los gases se mezclan sin que el ambiente cambie de estado en el proceso.

Para volver a separar los gases se requiere algún proceso de separación (centrífuga, químico u otros) que requiere trabajo o reacciones químicas con el ambiente. Esto altera el ambiente.

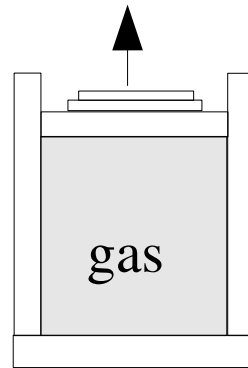
# 14a. Ciclo de Carnot

El ciclo de Carnot, el paradigma de los ciclos reversibles, se realiza en cuatro etapas, dos adiabáticas y dos isotermas.

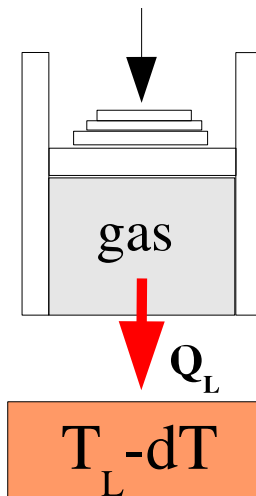
En una implementación posible del ciclo se usa un gas en un cilindro ajustado por un pistón.



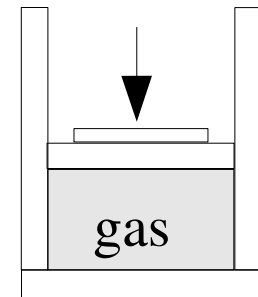
1 - 2  
expansión  
isoterma



2 - 3  
expansión  
adiabática



3 - 4  
compresión  
isoterma



4 - 1  
compresión  
adiabática

[sigue]

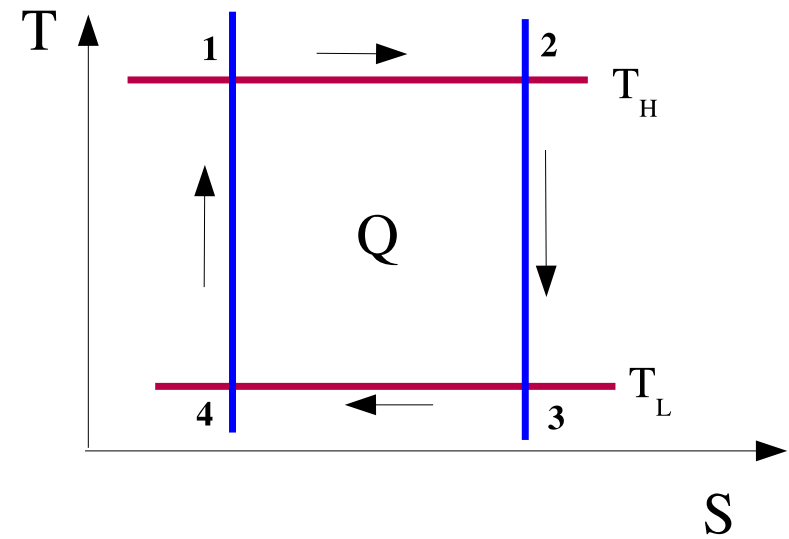
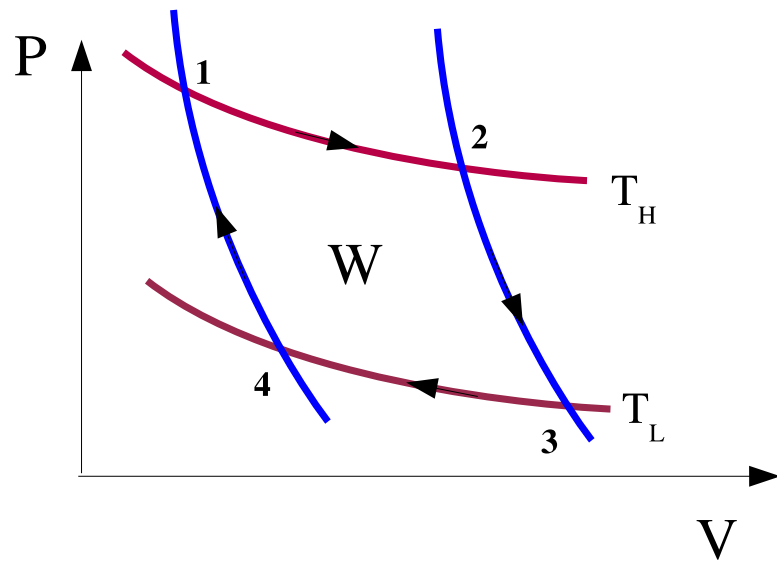


# 14b. Ciclo de Carnot



## diagramas

En un diagrama T-s las isothermas aparecen horizontales y las isentrópicas verticales,



El área encerrada es el trabajo neto

$$W = \oint P dV$$

El área encerrada es el calor neto

$$Q = \oint T dS$$

# 15. eficiencia de Carnot

La **desigualdad de Clausius**

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

se aplica trivialmente al ciclo de Carnot, donde implica que

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

condición válida para cualquier **máquina térmica reversible**. Los **corolarios de Carnot** demuestran que **eficiencia térmica** de Carnot

$$\eta_C = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

es la máxima posible y es la de cualquier **ciclo reversible**.

# 15a. Bomba de calor reversible

Por la misma condición de reversibilidad,

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

cualquier **bomba de calor** internamente reversible opera con el COP máximo,

$$COP_{B,rev} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

y, si es un **refrigerador**,

$$COP_{R,rev} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

Estos son los límites termodinámicos impuestos por la segunda ley para transferir calor en contra del gradiente de temperatura.

# 16a. primer corolario de Carnot



No existe una máquina térmica con eficiencia superior a la eficiencia de Carnot,  $\eta_C$ .

Si existiera una máquina térmica que opera entre  $T_L$  y  $T_H$  con eficiencia

$$\eta > \eta_C = 1 - T_L/T_H$$

produciría, a partir del mismo calor, más trabajo que una máquina de Carnot

$$W = \eta Q_H > \eta_C Q_H$$

[sigue]

# 16b. primer corolario de Carnot



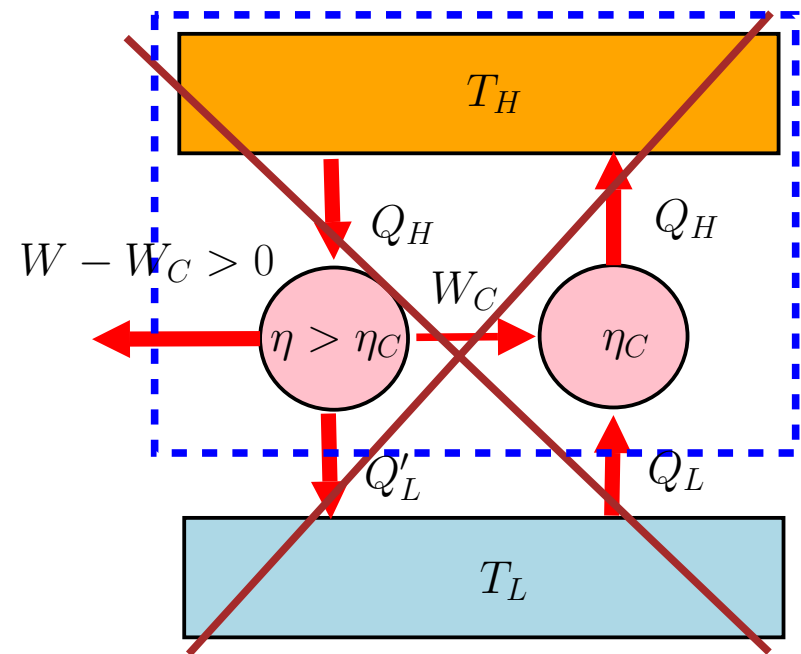
Una máquina de Carnot entre las mismas fuentes funcionando en reversa como bomba de calor, consume un trabajo  $W_C$  para reponer el calor  $Q_H$  en la reserva de alta.

La bomba de Carnot es alimentada por la máquina térmica con un sobrante de trabajo

$$W_C - W = (\eta_C - \eta_{rev})Q_H > 0.$$

El dispositivo azul viola la segunda ley, ya que genera trabajo a partir de una sola fuente de calor.

de modo que, para toda máquina térmica,  $\eta_T \leq \eta_C$



# 17a. segundo corolario de Carnot



Toda máquina reversible opera con la eficiencia de Carnot,  $\eta_C$ .

La eficiencia no puede ser mayor que la de Carnot por el primer corolario, de modo que

$$\eta_{rev} \leq \eta_C$$

Supongamos que existiera una máquina térmica reversible que opera entre  $T_L$  y  $T_H$  con una eficiencia menor que  $\eta_C$ : dicha máquina produciría un trabajo menor que el de la máquina de Carnot entre las mismas fuentes de calor.

$$W < W_C = \eta_C Q_H$$

[sigue]

# 17b. segundo corolario de Carnot



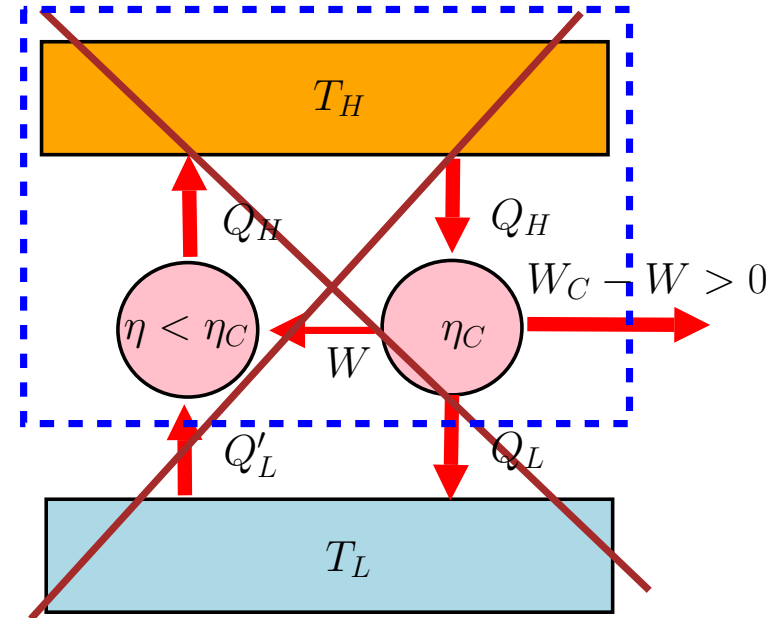
La máquina reversible puede ser operada como bomba de calor (consumiendo un trabajo  $W = \eta_{rev} Q_H$ ) para reponer el calor  $Q_H$  consumido por la máquina de Carnot.

La bomba es alimentada por la máquina de Carnot con un sobrante de trabajo

$$W_C - W = (\eta_C - \eta_{rev}) Q_H > 0.$$

El dispositivo azul viola la segunda ley, ya que genera trabajo a partir de una sola fuente de calor.

de modo que, para toda máquina reversible,  $\eta_{rev} = \eta_C$



# 18. máquinas térmicas reversibles



El **segundo corolario de Carnot**, establece que toda máquina térmica reversible opera con la **eficiencia de Carnot**,

$$\eta_{rev} = \eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

pero, dado que la **eficiencia térmica** de toda máquina térmica es

$\eta_T = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$  resulta que la condición

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H}$$

es satisfecha por cualquier máquina térmica reversible.



# 19. escala termodinámica de temperatura



- la condición

$$T = T_{ref} \frac{Q}{Q_{ref}}$$

satisfecha por los calores intercambiados por una máquina térmica reversible que opere entre  $T$  y un valor de referencia,  $T_{ref}$ , se puede usar para definir escalas de temperatura.

- dado que los calores son cantidades positivas, las temperaturas tienen igual signo, que por convención es positivo. La escala termodinámica no permite temperaturas negativas.
- Se puede tener **temperaturas cercanas a cero**, en la medida que  $Q \rightarrow 0$ .

[sigue]

# 19a. escala Kelvin

- la escala Kelvin usa el punto triple del agua como referencia,  
 $T_{ref} = 273.16,$

$$T_K = 273.16 \frac{Q}{Q_{PT}}$$

define la temperatura  $T$  a partir de los calores intercambiados por una máquina térmica reversible con una reserva a  $T$  y otra en equilibrio térmico con agua en su punto triple.

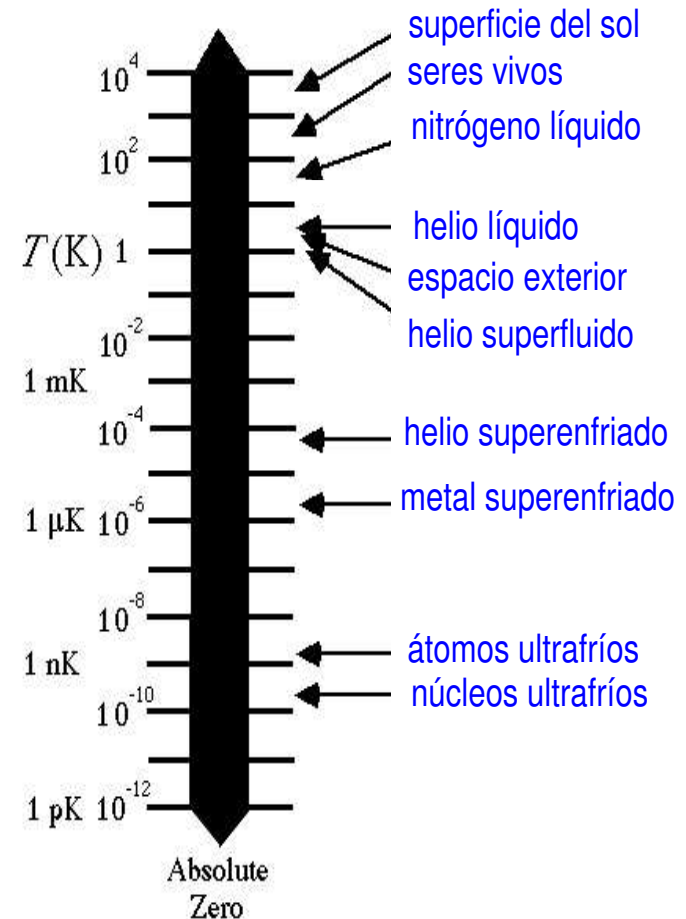
- el grado Kelvin (K) es igual al grado Celsius ( $^{\circ}C$ ), y es 1/100 del intervalo entre el **punto de hielo (cp-8c)** ( $0^{\circ}C$ ) y el **punto de vapor (cp-8c)** del agua. Dado que la temperatura del punto triple difiere en  $0.01^{\circ}$  de la del punto de hielo la relación entre grado C y grado K es

$$T_C = T_K - 273.15$$

[sigue]

# 19b. el cero absoluto

- el límite  $Q \rightarrow 0$  define la temperatura del **cero absoluto**.
- no existe un sistema físico con  $T = 0$ , ya que violaría la Segunda Ley. Pero se puede aproximar a éste punto tanto como se quiera.
- experimentalmente se alcanzan temperaturas de unos pocos nano Kelvin ( $10^{-9}$  K) ultraenfriando unos pocos ( $\sim 2000$ ) átomos de Rubidio con técnicas magneto-ópticas.

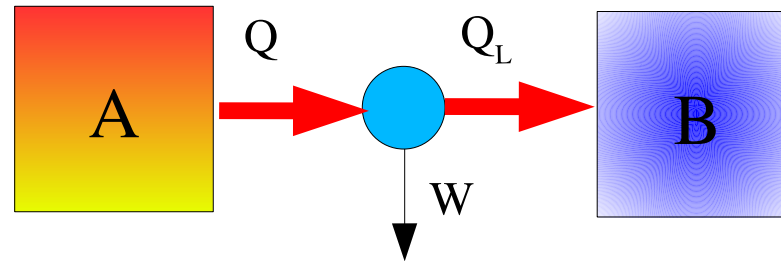


temperaturas características de diversos sistemas físicos.

# 20a. transferencia de calor reversible



¿Se puede transferir cierta cantidad de calor  $Q$  reversiblemente a través de una diferencia de temperatura finita?



No basta con acoplar las dos fuentes usando una máquina reversible, ya que forzosamente se pierde una parte del calor  $Q$  como trabajo,

$$W = Q - Q_L > 0,$$

Esto es así porque la máquina es reversible y al ser operada como bomba debe consumir trabajo (o violaría la segunda ley).

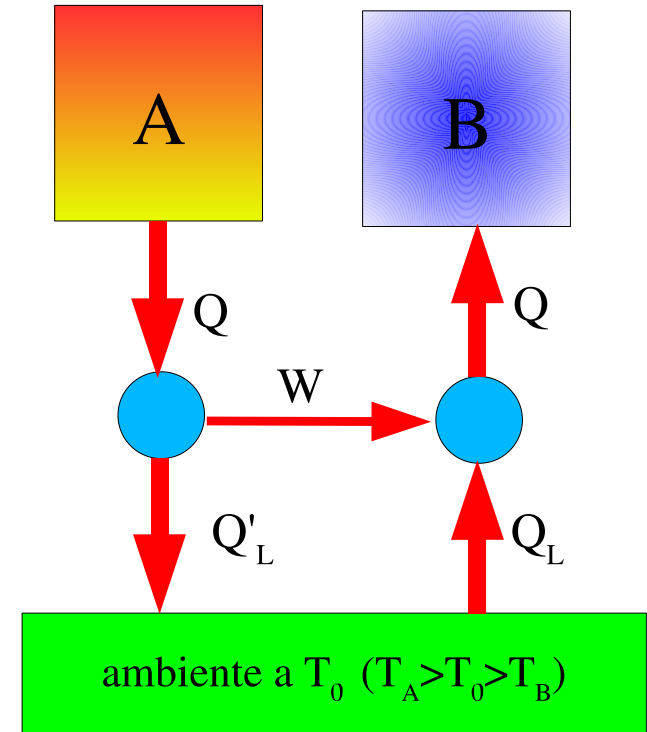
[sigue]

# 20b. transferencia de calor reversible



Este esquema usa una fuente de calor de temperatura intermedia como auxiliar para transferir reversiblemente una cantidad de calor  $Q$ .

¿Puede mostrar que si  $T_0 = \sqrt{T_A T_B}$  el ambiente entrega todo el calor que recibe?



Sin embargo, la temperatura ambiente no puede elegirse.

La transferencia de calor es reversible aunque  $T_0 < \sqrt{T_A T_B}$  en cuyo caso, el proceso podría generar trabajo, entregando calor al ambiente.