

Bloque III: Termodinámica

Tema 4. Termodinámica: fundamentos

- 4.1. Sistemas termodinámicos. Clasificación
- 4.2. Coordenadas termodinámicas: variables, funciones y ecuaciones de estado
- 4.3. Equilibrio térmico y temperatura. Principio cero
- 4.4. Termometría. Propiedades termométricas. Escalas de temperatura

Tema 5. Termodinámica: primer principio

- 5.1. Concepto de calor. Capacidad calorífica y calor latente
- 5.2. Trabajo termodinámico. Procesos cuasiestáticos
- 5.3. Primer principio de la termodinámica. Energía interna
- 5.4. Gases ideales. Ecuación de estado. Procesos fundamentales con un gas ideal
- 5.5. Entalpía

Tema 6. Termodinámica: segundo principio

- 6.1. Motor térmico. Rendimiento. Enunciado de Kelvin-Planck del segundo principio.
- 6.2. Máquina frigorífica. Eficiencia. Enunciado de Clausius del segundo principio.
- 6.3. Procesos reversibles e irreversibles
- 6.4. Ciclo de Carnot. Teorema de Carnot. Temperatura absoluta. Tercer principio

Tema 7. Entropía

- 7.1. Concepto de entropía. Entropía de un gas ideal
- 7.2. Cambios de entropía en diferentes procesos
- 7.3. Entropía y probabilidad

- Física Universitaria, Vol. 1; SEARS, F. F., ZEMANSKY, M. W., YOUNG, H. D y FREEDMAN, R. A. Capítulo 20.
- Física para Ciencias e Ingeniería, Vol. 1; SERWAY, R. A. y JEWET, J. W. Capítulo 22.
- Física para la Ciencia y la Tecnología, Vol.1; TIPLER, P. A. Y MOSCA, G. Capítulo 19.

TEMA 6. Termodinámica: segundo principio

¿en algún proceso, natural o artificial, se producirá un flujo de calor desde un sistema frío a uno caliente?



Calidad de la energía

El primer principio establece la relación que guardan el trabajo, el calor y la energía interna de un sistema

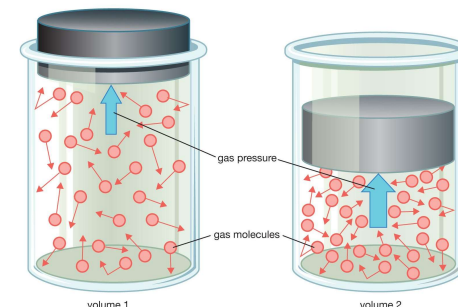
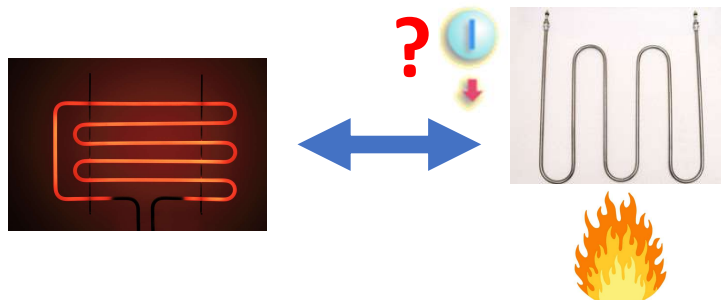
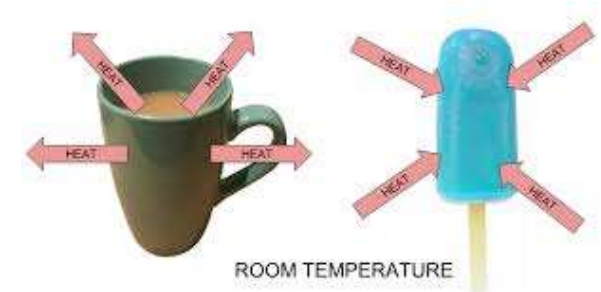
$$\Delta U = Q - W$$

Primer principio no diferencia entre calor y trabajo. Sólo nos dice que la energía interna se conserva.

No dice en qué sentido se dan los intercambios de energía

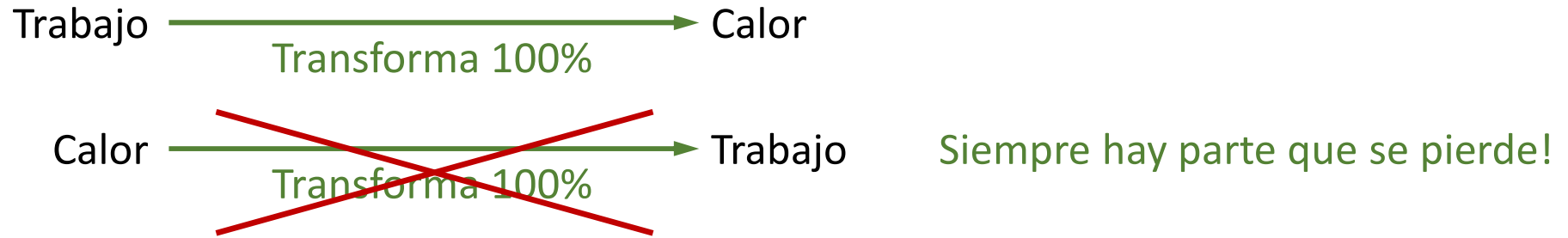
Limitaciones:

- No explica por qué el calor se transfiere de los cuerpos calientes a los fríos, o por qué los gases se expansionan de altas presiones a bajas.
- No explica por qué no se puede convertir toda una cantidad de calor en trabajo, aunque esté autorizado por el primer principio.



Calidad de la energía

El **segundo principio** nos dice que el **calor** es una energía de “**menor calidad**” que el trabajo



¡Pero en una isoterma el calor que absorbe un sistema es igual al trabajo que realiza!

Y es cierto, pero para poder aprovechar ese trabajo, el sistema debe poder hacer el proceso repetidamente: debe realizar un ciclo

En un ciclo, va a haber momentos en los que el sistema absorba calor, y otros en los que pierda calor:

$$Q_{\text{ciclo}} = Q_{\text{absorbido}} + Q_{\text{ced}} = Q_{\text{absorbido}} - |Q_{\text{cedido}}|$$

El segundo principio nos dice que es **imposible no perder calor** en un ciclo donde se produce trabajo

son formas diferentes de decir lo mismo

Máquinas térmicas

Una **máquina térmica** es aquel sistema que evoluciona cíclicamente y en el que hay una conversión entre calor y trabajo.

- No hay variación de energía interna

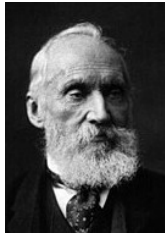


$$\Delta U = 0$$

Tipos de máquinas térmicas:

- Motores térmicos:** Sistemas que evolucionan cíclicamente convirtiendo calor en trabajo.

W. Thomson, **lord Kelvin** (1824-1907) físico inglés, primer científico en la Cámara de los Lores, descubrió el cero absoluto y el efecto Thomson

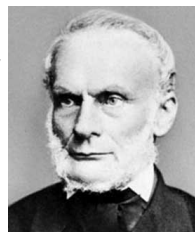


M.K.E.L. **Planck** (1858-1947) físico alemán, fundador de la teoría cuántica (p. Nobel) tesis doctoral sobre el 2º ppio, calculó la energía de un fotón y la radiación de un cuerpo negro

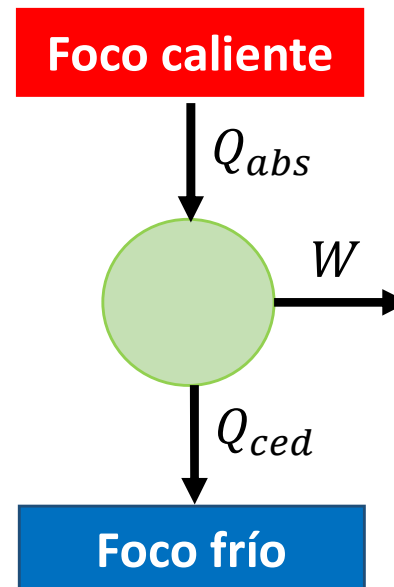


- Máquinas frigoríficas:** Sistemas que evolucionan cíclicamente consumiendo trabajo y transfiriendo calor de un foco frío a un foco caliente.

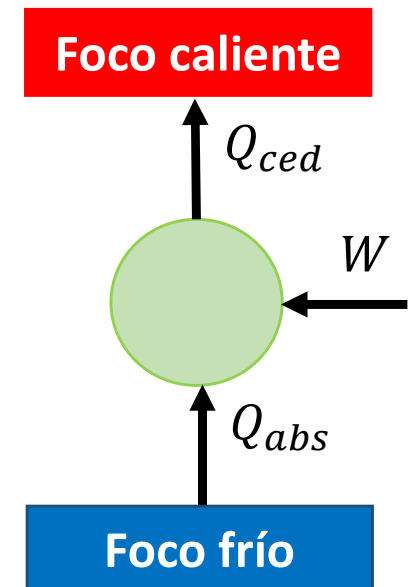
R.J.E. **Clausius** (1822-1888) físico y matemático alemán, estudió las transiciones de fase, introdujo el concepto de entropía y de recorrido libre medio de una partícula



Motores térmicos



Máquinas frigoríficas



Foco térmico: sistema que es capaz de intercambiar calor sin que varíe su temperatura

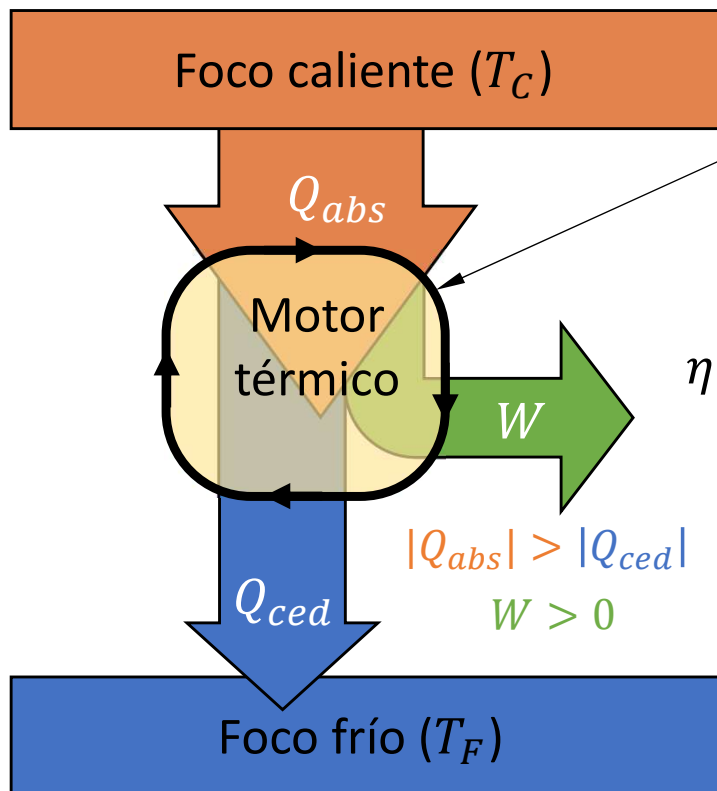
- **Bomba de calor:** es igual que una máquina frigorífica pero su objetivo se centra en calentar el foco caliente.

Motor térmico

Sistema que proporciona trabajo a partir de una fuente de calor, realizando un ciclo termodinámico : cíclicamente **toma calor** de un **foco caliente** y **cede calor** a un **foco frío**, y que **realiza un trabajo**

Foco térmico: Sistema que **intercambia calor**, pero **sin cambiar su temperatura**

Ej.: Grandes extensiones (atmósfera, mar,...) o sistemas en cambio de fase



Q_{ced} : energía de deshecho

$$\Delta U = Q - W = 0 \rightarrow W = Q_{ciclo} = Q_{abs} - |Q_{ced}|$$

Ciclo termodinámico

Rendimiento de un motor térmico:

$$\eta = \frac{\text{lo que obtengo}}{\text{lo que doy}} = \frac{W}{Q_{abs}} = \frac{Q_{abs} - |Q_{ced}|}{Q_{abs}} = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{Q_{abs}}$$

Para que el rendimiento sea del 100%, $Q_{ced} = 0$

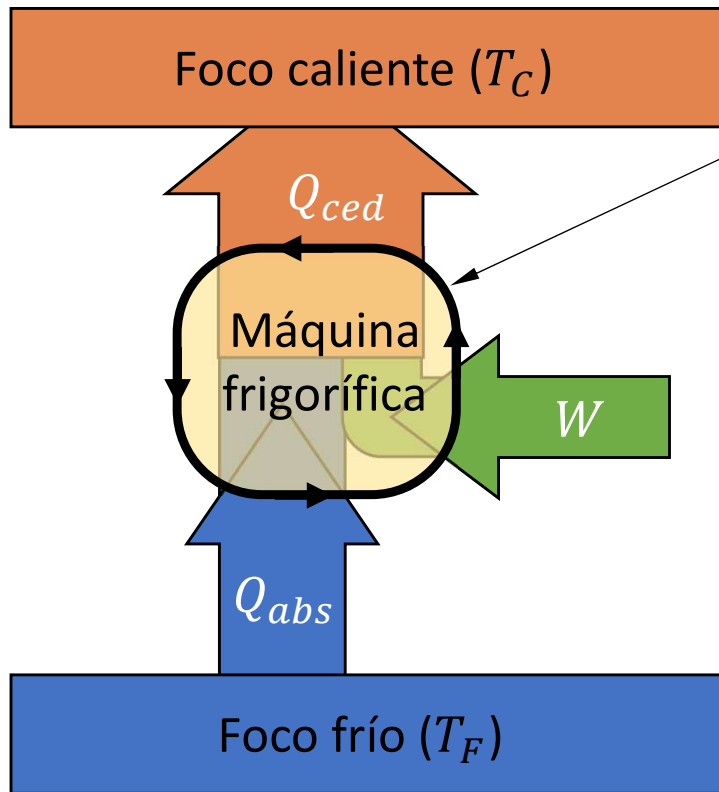
Pero eso lo prohíbe el **segundo principio**, en la **formulación de Kelvin-Planck:**

“No es posible un proceso cíclico donde únicamente se absorba calor de un foco y se convierta íntegramente en trabajo”

$$\rightarrow \eta < 1 \quad Q_{ced} > 0$$

Máquina frigorífica

Sistema que cíclicamente **toma calor** de un **foco frío** y **cede calor** a un **foco caliente**, y donde **se realiza un trabajo sobre el sistema**



$$\Delta U = Q - W = 0 \rightarrow W = Q_{\text{ciclo}} = Q_{\text{abs}} - |Q_{\text{ced}}|$$

Ciclo termodinámico

Atención: $|Q_{\text{ced}}| > Q_{\text{abs}} \rightarrow W < 0$

Refrigerador: Máquina para extraer calor del foco frío

$$\text{Eficiencia: } \varepsilon = \frac{\text{lo que obtengo}}{\text{lo que doy}} = \frac{Q_{\text{abs}}}{|W|} \quad \varepsilon > 1$$

Bomba de calor: Máquina para ceder calor al foco caliente

$$\text{Eficiencia: } \varepsilon_{BC} = \frac{\text{lo que obtengo}}{\text{lo que doy}} = \frac{|Q_{\text{ced}}|}{|W|} \quad \varepsilon > 1$$

Para que el rendimiento sea máximo (∞), $W = 0$

Pero eso lo prohíbe el **segundo principio**, en la **formulación de Clausius**:

“No es posible un proceso cíclico donde únicamente se transfiera calor de un cuerpo frío a otro más caliente”

Para eso hay que aportar trabajo al sistema $\rightarrow |W| > 0 \quad \varepsilon \neq \infty$

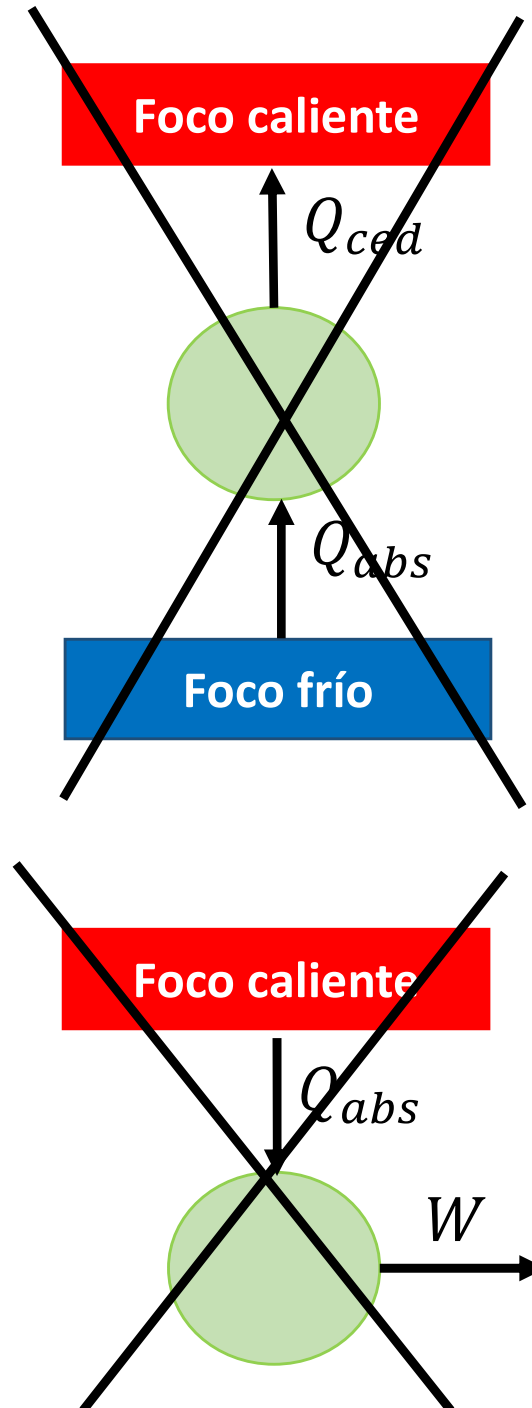
Equivalencia de enunciados del segundo principio

• Enunciado de Clausius:

“No puede existir una máquina frigorífica de funcionamiento cíclico que haga pasar calor de un foco frío a uno caliente sin aporte de trabajo exterior.”

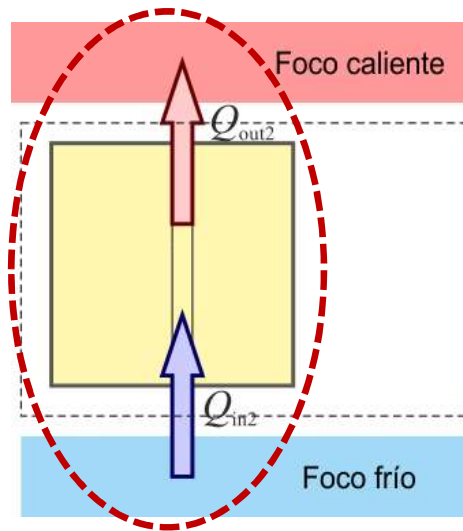
• Enunciado de Kelvin-Planck:

“No puede existir un motor de funcionamiento cíclico que produzca trabajo intercambiando calor con un solo foco térmico.”



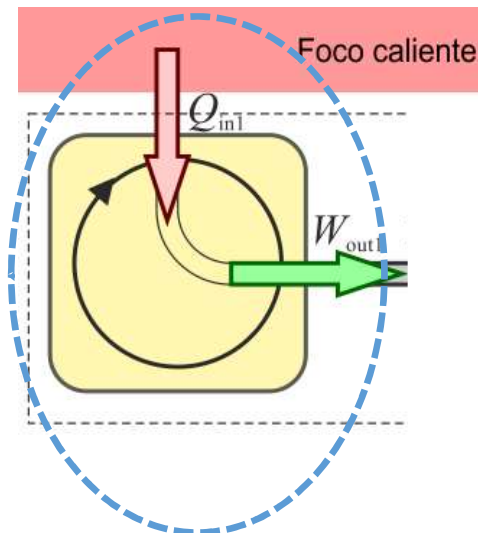
Equivalencia de enunciados del segundo principio

Si **no se cumple Clausius** \Rightarrow **No se cumple Kelvin-Planck**



El conjunto de una máquina que transfiera calor de un foco frío a un foco caliente (Clausius) combinado con un motor térmico resulta en una máquina que absorbe calor y lo transforma íntegramente en trabajo (Kelvin-Planck).
¡¡imposible!!

Si **no se cumple Kelvin-Planck** \Rightarrow **No se cumple Clausius**



El conjunto de un motor que transforma todo el calor absorbido en trabajo (Kelvin-Planck) y una máquina frigorífica resulta en una máquina que absorbe calor de un foco frío y lo cede a un foco caliente sin que se aporte trabajo (Clausius).
¡¡imposible!!

Por lo tanto, son equivalentes: **Kelvin-Planck** \longleftrightarrow **Clausius**

Procesos irreversibles

Procesos en la naturaleza se dan en un sentido y no en otro

Flecha del tiempo



Rotura o deformación

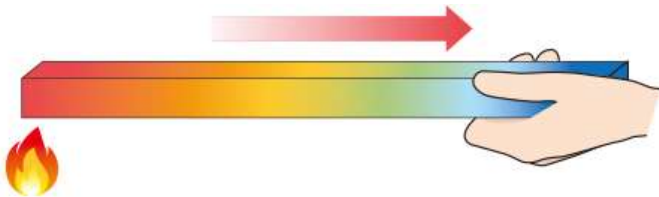


Aumento del desorden

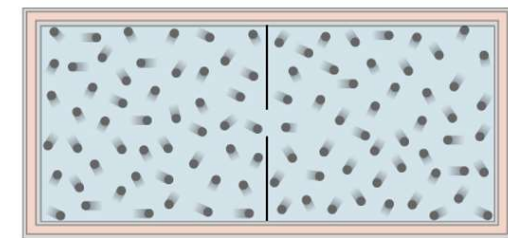
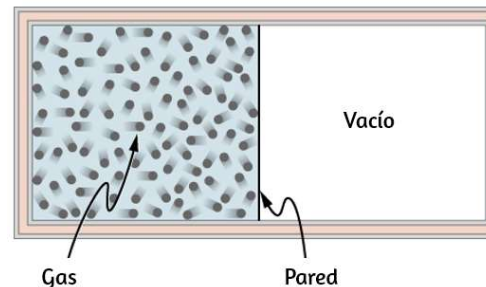


Pérdidas por rozamiento
(energía mecánica se disipa en forma de calor)

Ejemplos de termodinámica:
Diferencia de temperaturas
(calor va del cuerpo caliente al frío)



Difusión / expansión de gas en el vacío



El gas llena el contenedor

El **primer principio** **no dice nada** sobre esta dirección preferente

El **segundo principio** de la termodinámica **explica por qué** con el tiempo los sistemas evolucionan en un sentido y no en otro:

“El desorden del universo siempre aumenta”

“El calor va siempre del cuerpo caliente al frío”

Frases equivalentes al segundo principio

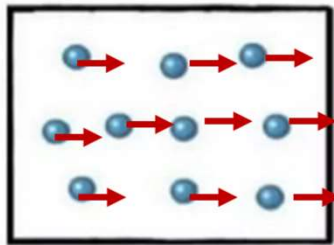
Procesos irreversibles

Proceso que, una vez transcurrido, podría regresar al estado inicial a costa de una “compensación que modifica el estado del entorno

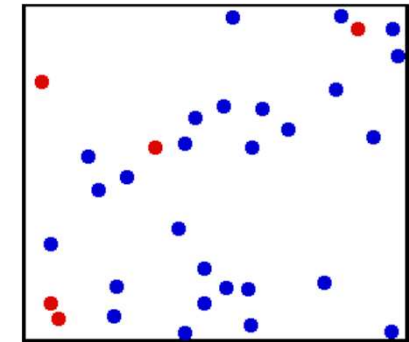
→ *Factores de irreversibilidad: mecánicos, químicos y térmicos*

Hay una relación entre la dirección de un proceso termodinámico y el grado de desorden o aleatoriedad del estado resultante.

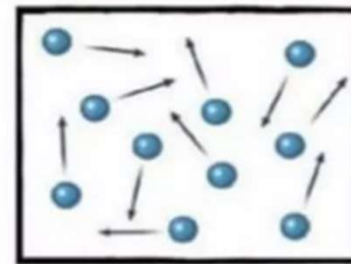
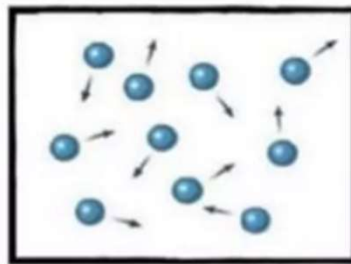
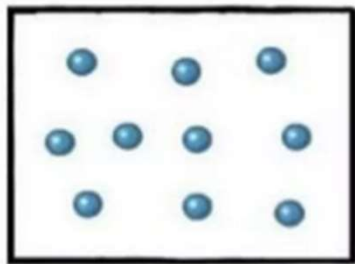
Ej:



La energía cinética de un cuerpo es energía asociada a movimientos organizados y coordinados de las moléculas que forman el cuerpo



Por otro lado...



La transferencia de calor supone cambios de energía en **movimiento molecular desordenado**

Aumento de temperatura

La conversión de energía mecánica en energía térmica implica un aumento de la aleatoriedad o desorden del sistema...

... ese aumento de aleatoriedad **no** se puede revertir al 100%

Procesos reversibles

aquellos que, al finalizar, tanto el sistema como el medio ambiente pueden ser reintegrados a sus estados iniciales sin ocasionar ningún cambio en el resto del universo.

Los que no son irreversibles

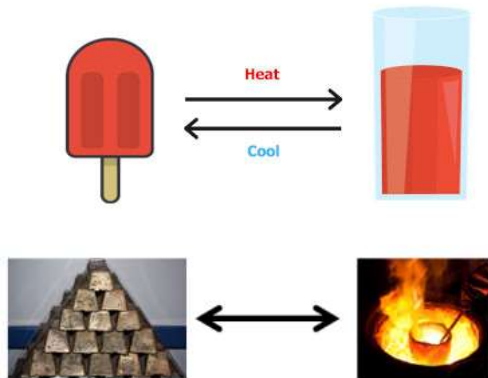
No se intercambia calor \longrightarrow Adiabáticos

Si se intercambia, se hace sin \longrightarrow Isotermos
diferencia de temperatura

No implica efectos disipativos

Cuasiestático

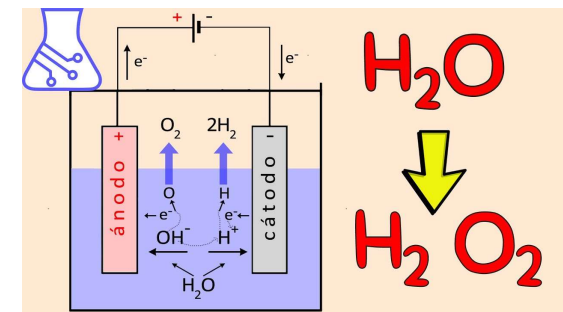
En realidad, todos los procesos naturales son irreversibles. Los reversibles son una idealización, un modelo con el que trabajar



cambio de fase



disolución de sal en agua



reacción química del agua

Ciclo de Carnot

¿cuál es el rendimiento máximo de una máquina que nunca tendrá el 100%?

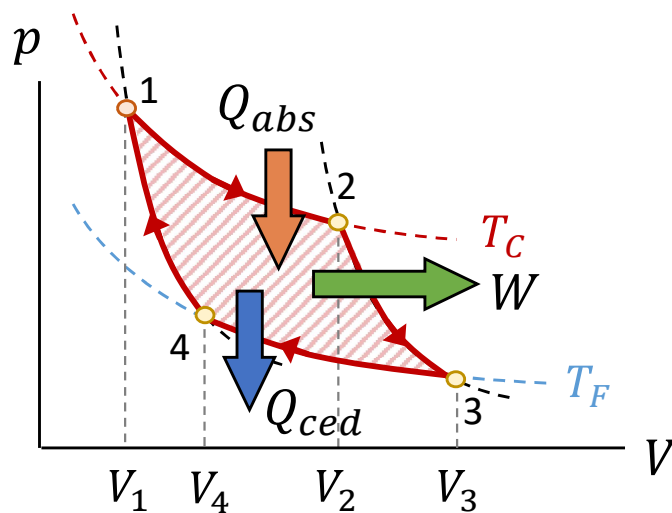
Ciclo ideal reversible hecho con adiabáticas e isothermas (procesos reversibles)

→ la conversión de calor en trabajo es un proceso irreversible

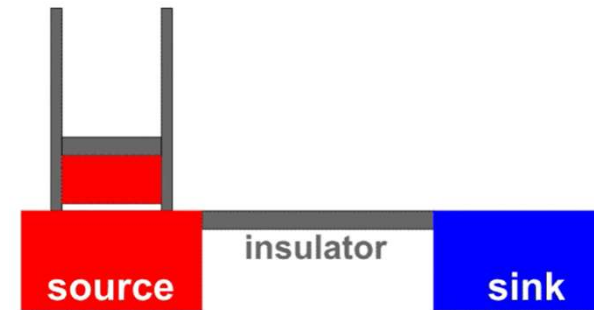
Una **máquina reversible** es una que puede operar en ambos sentidos, esto es, tanto como un motor como un refrigerador: *convertir Q en W con la máxima eficiencia posible*



N. L. S. Carnot
(1796 – 1832) ingeniero y físico francés, fundador de la termodinámica, inventor de los motores térmicos



- 1 → 2 Expansión isoterma (Q_{abs})
- 2 → 3 Expansión adiabática
- 3 → 4 Compresión isoterma (Q_{ced})
- 4 → 1 Compresión adiabática



Teorema de Carnot: Ninguna máquina térmica que funcione entre dos focos de temperatura puede tener mayor rendimiento que una reversible que trabaje entre esos mismos focos.

Corolario: Cualquier máquina reversible que trabaje entre los mismos focos, tiene el mismo rendimiento.

Ciclo de Carnot en un gas ideal

1 → 2 Expansión isoterma

$$\begin{cases} \Delta U_{12} = 0 \\ Q_{12} = Q_{abs} = W_{12} = \int_1^2 p dV = nRT_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \end{cases}$$

2 → 3 Expansión adiabática

$$\begin{cases} Q_{23} = 0 \\ W_{23} = -\Delta U_{23} = -C_v(T_F - T_C) \end{cases}$$

3 → 4 Compresión isoterma

$$\begin{cases} \Delta U_{34} = 0 \\ Q_{34} = Q_{ced} = W_{34} = \int_3^4 p dV = nRT_F \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \end{cases}$$

4 → 1 Compresión adiabática

$$\begin{cases} Q_{41} = 0 \\ W_{41} = -\Delta U_{41} = -C_v(T_C - T_F) \end{cases}$$

Trabajo neto realizado por el ciclo:

$$W = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = nRT_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + nRT_F \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

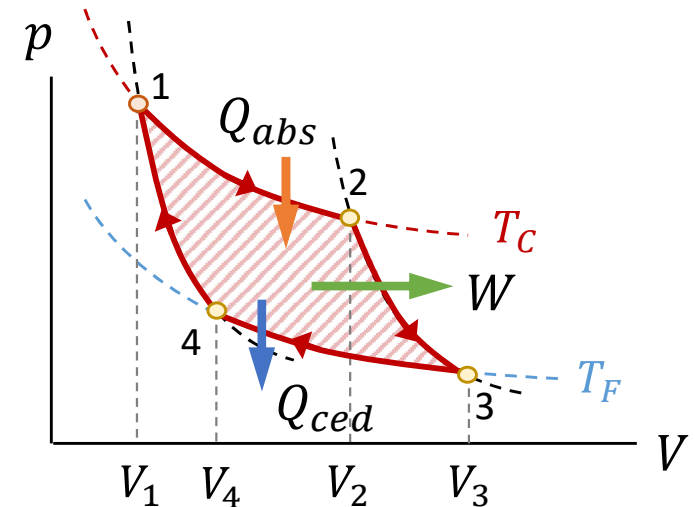
Rendimiento de un motor de Carnot

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = \frac{nRT_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + nRT_F \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{nRT_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = 1 + \frac{T_F \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{T_C \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

Ecuación adiabática

$$\left. \begin{aligned} T_C V_2^{\gamma-1} &= T_F V_3^{\gamma-1} \\ T_C V_1^{\gamma-1} &= T_F V_4^{\gamma-1} \end{aligned} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

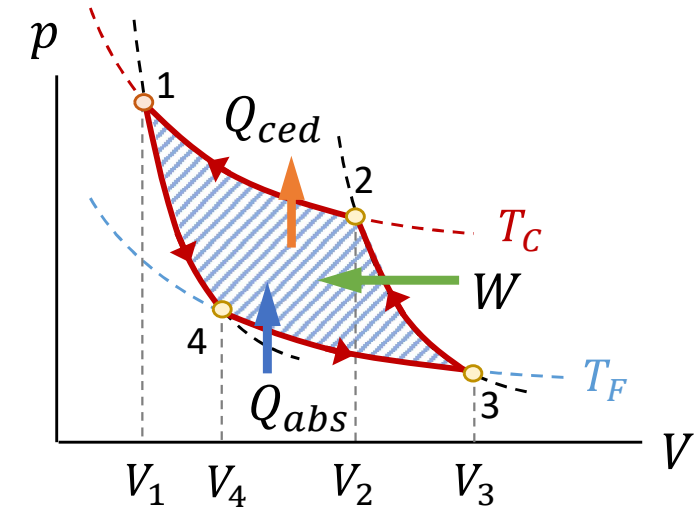


Ciclo de Carnot: máquina frigorífica

Cuando se recorre el ciclo en el sentido contrario (antihorario en diagrama p - V)

El signo de todos los calores, trabajos y diferencias de energía interna es **el contrario**

Lo que antes era calor absorbido, ahora es cedido (y viceversa)



Eficiencia de un **refrigerador** de Carnot

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{|W|} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Eficiencia de una **bomba de calor** de Carnot

$$\varepsilon_{BC} = \frac{|Q_{ced}|}{|W|} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Teorema de Carnot

El **teorema de Carnot** es un enunciado alternativo del Segundo principio de la termodinámica, que se formula a partir de la comparación entre máquinas reversibles e irreversibles

Teorema I: “El motor térmico de mayor rendimiento que puede funcionar entre dos focos térmicos es el de Carnot.”

$$\eta < \eta^{rev}$$

Teorema II: “Todos los motores de Carnot que funcionan entre los dos mismos focos térmicos tienen el mismo rendimiento.”

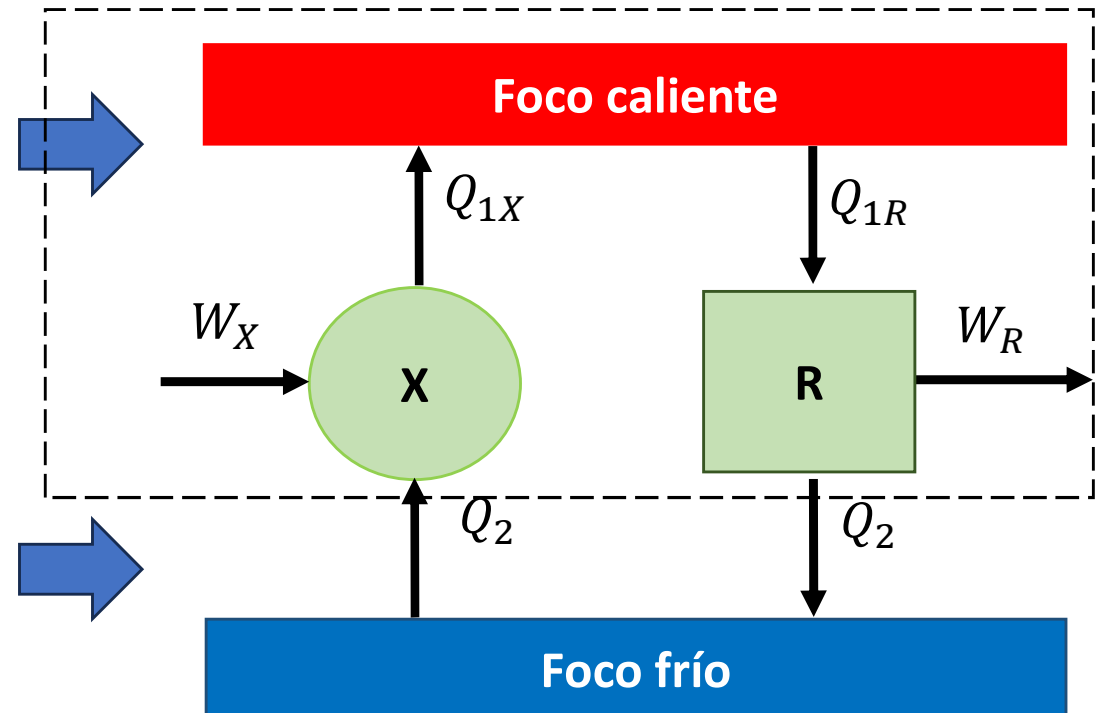
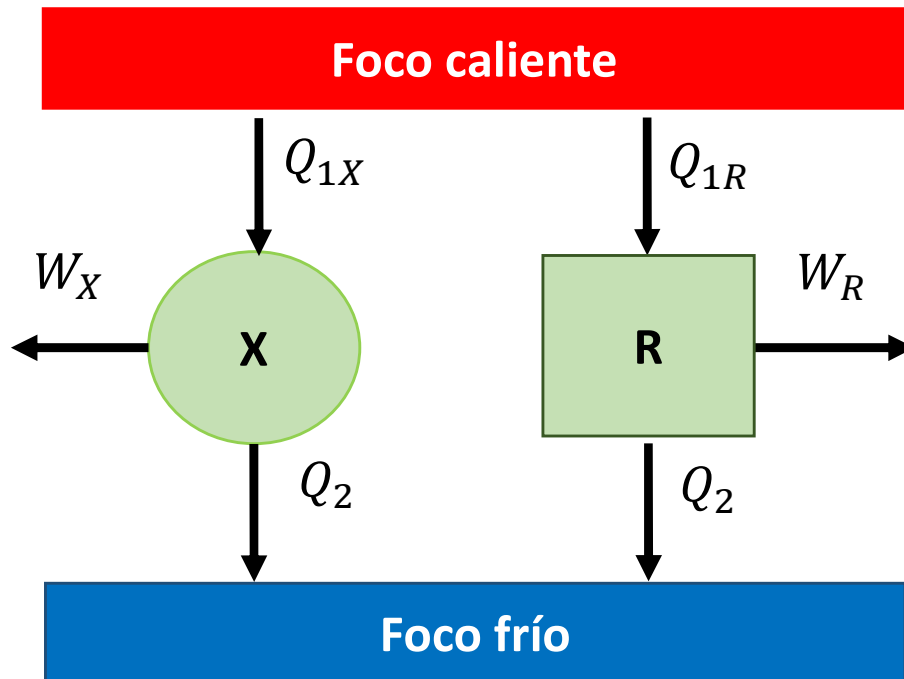
$$\eta^{rev} = \eta^{rev}$$

Demostración del teorema I de Carnot

Dos motores X y R, trabajando entre los mismos focos $T_1 > T_2$. Se ajusta Q_2 para que sea igual en ambos

$$W(X) = Q_{1X} - Q_2 \rightarrow \eta(X) = 1 - \frac{Q_2}{Q_{1X}}$$

$$W(R) = Q_{1R} - Q_2 \rightarrow \eta(R) = 1 - \frac{Q_2}{Q_{1R}}$$



Si el motor X es reversible (de Carnot), al hacerlo funcionar como máquina frigorífica, el sistema conjunto intercambia calor con sólo un foco

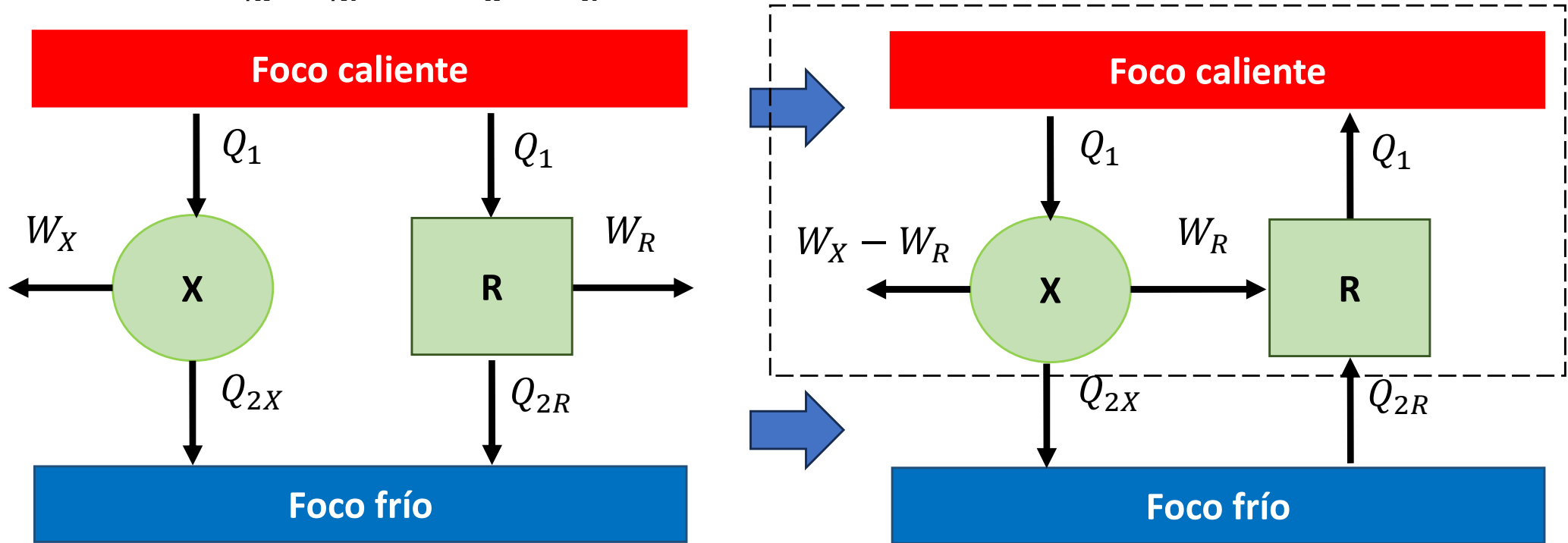
$$W(R) - W(X) \leq 0 \quad Q_{1R} - Q_{1X} \leq 0 ; Q_{1R} \leq Q_{1X}$$

$$\frac{Q_2}{Q_{1R}} \geq \frac{Q_2}{Q_{1X}} \rightarrow \eta(X) \geq \eta(R)$$

Demostración del teorema II de Carnot

Dos motores X y R, trabajando entre los mismos focos $T_1 > T_2$. Se ajusta Q_1 para que sea igual en ambos

Hipótesis: $\eta_X > \eta_R \rightarrow W_X > W_R$



Si invierto la máquina (R) reversible para extraer calor del foco frío, necesitaría suministrarse un W_R desde el motor X, por lo que el motor X realizaría un trabajo $W_X - W_R$. El motor formado por X y R sería reversible y según el sentido en que funcione:

$$W(R) - W(X) \leq 0$$

$$W(X) - W(R) \leq 0$$



$$W(R) = W(X)$$



$$\eta_R = \eta_X$$

El sistema equivaldría a considerar solo la parte dentro del recuadro donde el sistema intercambia calor con solo un foco: todo el calor realizaría un trabajo incumpliendo el enunciado de Kelvin-Planck

Temperatura absoluta

Se usa el ciclo de Carnot para definir la escala absoluta de temperatura

Rendimiento independiente de la sustancia de trabajo $\eta = 1 - \frac{|Q_{ced}|}{|Q_{abs}|} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$

Escala de temperatura independiente de la sustancia del ciclo $\Rightarrow \frac{|Q_{ced}|}{|Q_{abs}|} = \frac{T_F}{T_C}$
escala absoluta

→ Temperatura de referencia: punto triple del agua 273.16K

Punto cero absoluto de la escala de Kelvin: el sistema tiene su mínima energía interna total (cinética + potencial)

Tercer principio de la termodinámica (postulado de Nerst): es imposible alcanzar el cero absoluto en un número finito de pasos termodinámicos

Si $T_F = 0K \rightarrow$ rendimiento de Carnot $\eta = 100\% \rightarrow$ prohibido por el enunciado de Planck del segundo principio

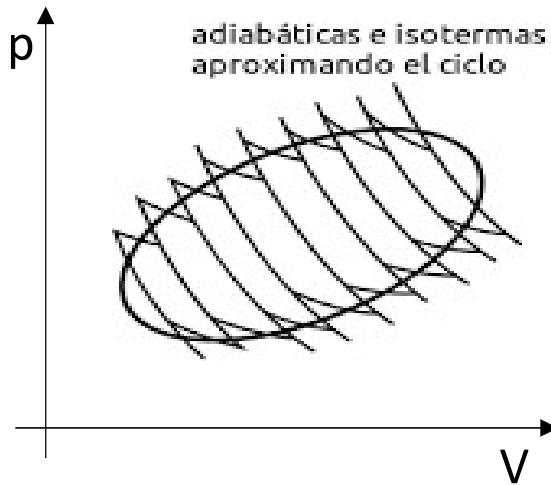
Al llegar a 0K cualquier proceso de un sistema físico se detiene



W. Ostwald (1866-1932) físico y químico alemán, p. Nobel por sus teorías de cálculo de afinidad química → teorema del calor y entropía, inventó la lámpara IR y un piano eléctrico (Siemens)

Desigualdad de Clausius

Todo proceso reversible cíclico puede verse como un conjunto infinito de ciclos de Carnot infinitamente pequeños:

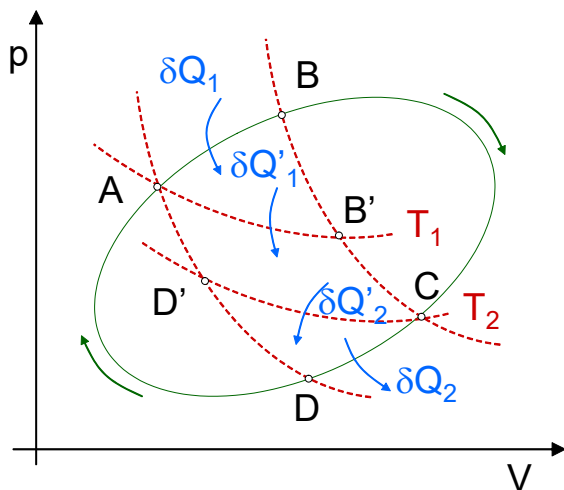


- Para un ciclo de Carnot se cumple $\frac{Q_{abs}}{T_{max}} - \frac{|Q_{ced}|}{T_{min}} = 0 \rightarrow \sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$

- En el ciclo ABB'A: $\delta Q_1 - \delta Q'_1 = \delta W$ Cuando B→A: $\delta Q_1 = \delta Q'_1$

- Para el ciclo de Carnot AB'CD'A: $\frac{\delta Q'_1}{T_1} - \frac{\delta Q'_2}{T_2} = 0$

- Cuando B→A: $\frac{\delta Q_1}{T_1} - \frac{\delta Q_2}{T_2} = 0$



Si sumamos para todos los ciclos infinitamente pequeños $\oint \frac{dQ}{T} = 0$

- Si el ciclo fuera irreversible $\oint \frac{dQ}{T} < 0$

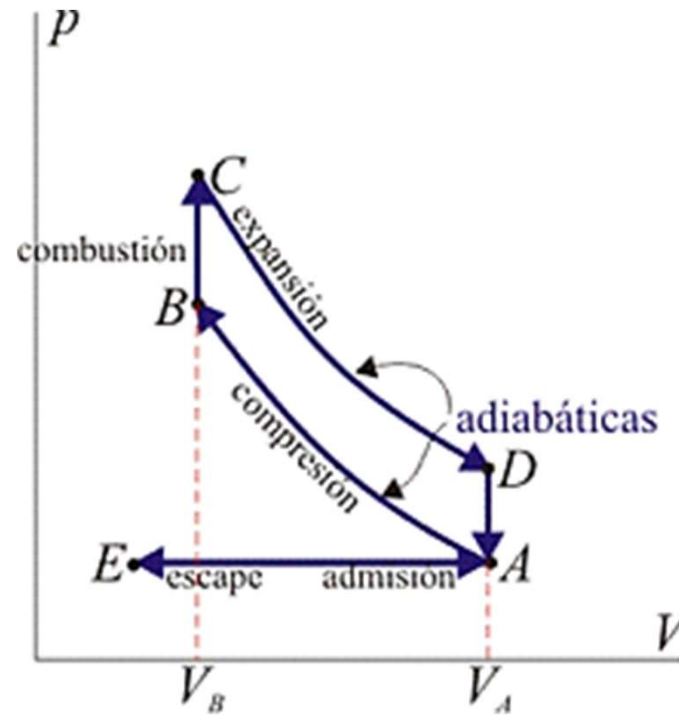
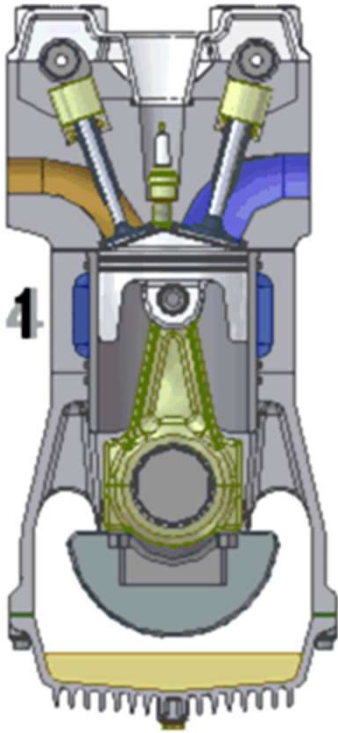
habría pérdidas de calor por los efectos disipativos de la irreversibilidad

- En general

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

Desigualdad de Clausius

Ciclo de Otto y ciclo Diesel

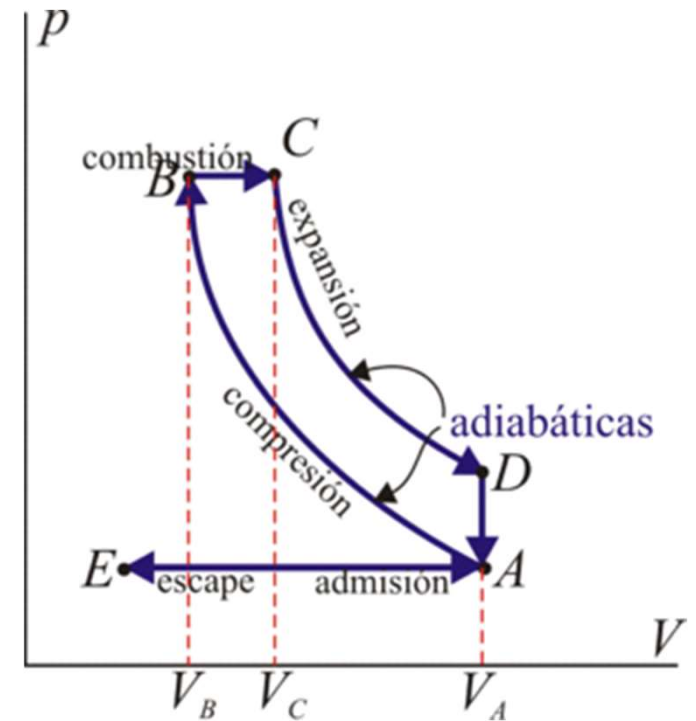


Ciclo de Otto

motores de combustión interna



N.A. Otto (1832-1891)
ingeniero alemán creador
del motor de benzina de 4
tiempos, padre del
cofundador de BMW

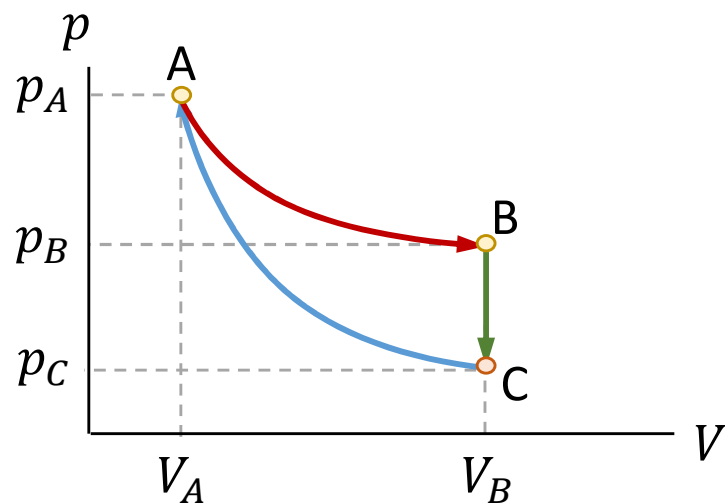


Ciclo Diesel

motor de combustión interna basado
en la autoignición del combustible

R.C.K. Diesel (1858-1913)
ingeniero franco-alemán
inventor del diesel y del
motor de combustión de
alto rendimiento (26%)

EJEMPLO: Rendimiento de un ciclo



Gas perfecto diatómico

$$pV = nRT$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

$$C_V = \frac{5}{2}nR \quad C_p = \frac{7}{2}nR$$

	p	V	T
A	p_A	V_A	T_A
B	$\frac{p_A}{3}$	$3V_A$	T_A
C	$0,215p_A$	$3V_A$	$0,644T_A$

A → B Isotermo B → C Isócoro C → A Adiabático

$$T_A = \frac{p_A V_A}{nR}$$

$$T_B = T_A$$

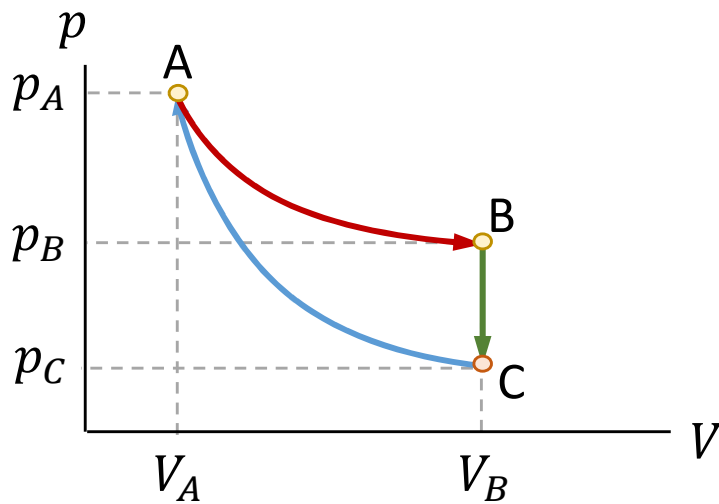
$$p_B = \frac{nRT_B}{V_B} = \frac{nR}{V_B} \frac{p_A V_A}{nR} = p_A \frac{V_A}{3V_A} = \frac{p_A}{3}$$

Ecuación adiabática:

$$pV^\gamma = cte \rightarrow p_A V_A^\gamma = p_C V_C^\gamma \rightarrow p_C = p_A \frac{V_A^\gamma}{V_C^\gamma} = p_A \left(\frac{V_A}{3V_A} \right)^\gamma = \frac{p_A}{3^\gamma} = 0,215p_A$$

$$T_C = \frac{p_C V_C}{nR} = \frac{0,215p_A 3V_A}{nR} = 0,644 \frac{p_A V_A}{nR} = 0,644T_A$$

EJEMPLO: Rendimiento de un ciclo



Gas perfecto diatómico

$$pV = nRT$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

$$C_V = \frac{5}{2}nR \quad C_p = \frac{7}{2}nR$$

	p	V	T
A	p_A	V_A	T_A
B	$\frac{p_A}{3}$	$3V_A$	T_A
C	$0,215p_A$	$3V_A$	$0,644T_A$

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = ?$$

$$\Delta U = Q - W$$

A → B Isotermo

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

$$Q_{AB} = W_{AB} = \int_{V_A}^{V_B} p dV = nRT_A \ln \frac{V_B}{V_A} = p_A V_A \ln 3 = 1,099 p_A V_A$$

B → C Isócoro

$$W_{BC} = \int_{V_B}^{V_C} p dV = 0$$

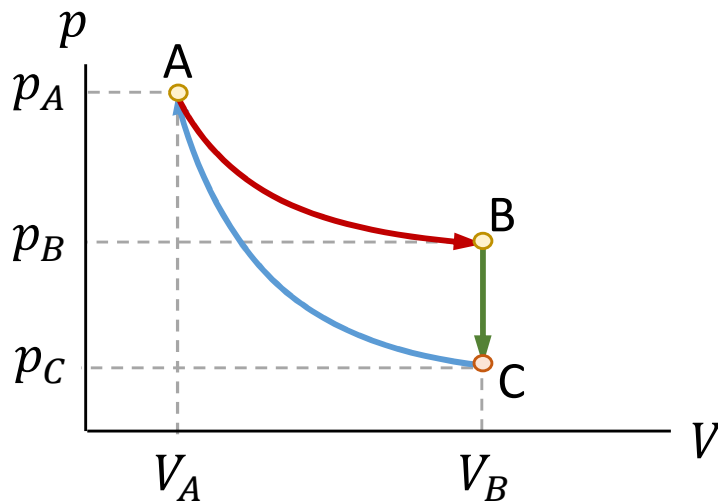
$$Q_{BC} = \Delta U_{BC} = C_V \Delta T = \frac{5}{2}nR(T_C - T_B) = \frac{5}{2}nR(0,644T_A - T_A) = -0,89nRT_A = -0,89p_A V_A$$

C → A Adiabático

$$Q_{CA} = 0$$

$$W_{CA} = -\Delta U_{CA} = C_V \Delta T = -\frac{5}{2}nR(T_A - T_C) = -\frac{5}{2}nR(T_A - 0,644T_A) = -0,89nRT_A = -0,89p_A V_A$$

EJEMPLO: Rendimiento de un ciclo



Gas perfecto diatómico

$$pV = nRT$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

$$C_V = \frac{5}{2}nR \quad C_p = \frac{7}{2}nR$$

	p	V	T
A	p_A	V_A	T_A
B	$\frac{p_A}{3}$	$3V_A$	T_A
C	$0,215p_A$	$3V_A$	$0,644T_A$

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}}$$

$$\Delta U = Q - W$$

$$W = W_{ABC} = W_{AB} + W_{BC} + W_{CA} = 1,099p_A V_A + 0 - 0,89p_A V_A = 0,209p_A V_A$$

$$Q_{abs} = (\text{Suma de los calores absorbidos, es decir, los positivos}) = Q_{AB} = 1,099p_A V_A$$

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = \frac{0,209p_A V_A}{1,099p_A V_A} = 0,19 = 19\%$$

Eficiencia como frigorífico?

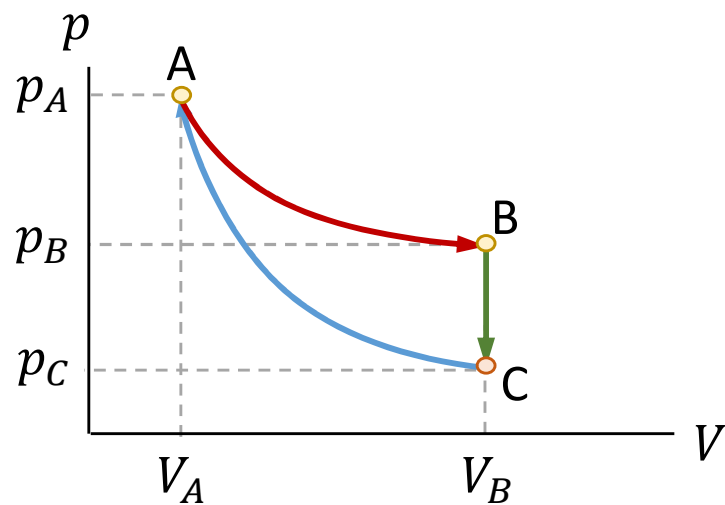
Si funciona como frigorífico, el ciclo se recorre en sentido contrario, y **todos los W , Q y ΔU cambian de signo!**

$$Q_{abs} = (\text{Suma de los calores positivos}) = Q_{CB} = 0,89p_A V_A$$

$$W = -1,099p_A V_A + 0 + 0,89p_A V_A = -0,209p_A V_A$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{|W|} = \frac{0,89p_A V_A}{0,209p_A V_A} = 4,26$$

EJEMPLO: Rendimiento de un ciclo



Gas perfecto diatómico

$$pV = nRT$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

$$C_V = \frac{5}{2}nR \quad C_p = \frac{7}{2}nR$$

	p	V	T
A	p_A	V_A	T_A
B	$\frac{p_A}{3}$	$3V_A$	T_A
C	$0,215p_A$	$3V_A$	$0,644T_A$

$$\Delta U = Q - W$$

Eficiencia como bomba de calor?

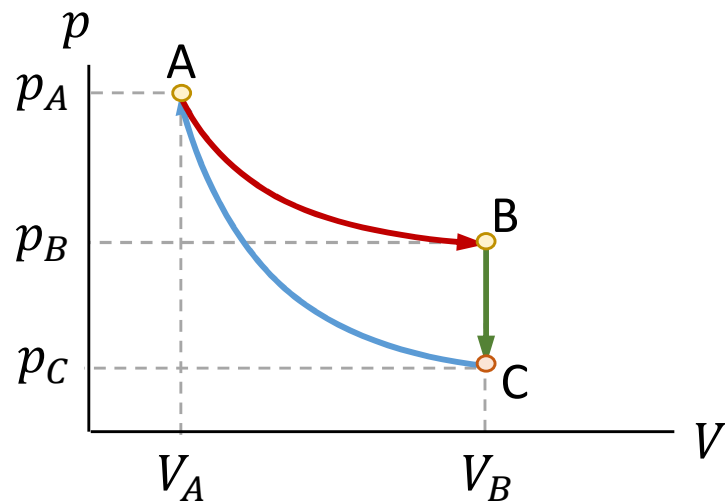
El ciclo también se recorre en sentido contrario, como en el caso del frigorífico

$$Q_{ced} = (\text{Suma de los calores negativos}) = Q_{BA} = -1,099p_A V_A$$

$$W = -1,099p_A V_A + 0 + 0,89p_A V_A = -0,209p_A V_A$$

$$\varepsilon_{BC} = \frac{|Q_{ced}|}{|W|} = \frac{1,099p_A V_A}{0,209p_A V_A} = 5,26$$

EJEMPLO: Rendimiento de un ciclo



Gas perfecto diatómico

$$pV = nRT$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

$$C_V = \frac{5}{2}nR \quad C_p = \frac{7}{2}nR$$

	p	V	T
A	p_A	V_A	T_A
B	$\frac{p_A}{3}$	$3V_A$	T_A
C	$0,215p_A$	$3V_A$	$0,644T_A$

$$\Delta U = Q - W$$

Comparación con Carnot?

Que funcionara entre las mismas temperaturas máxima (T_A) y mínima ($0,644T_A$)

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 1 - \frac{0,644T_A}{T_A} = 0,356 = 35,6\%$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{|W|} = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{0,644T_A}{T_A - 0,644T_A} = 1,81$$

$$\varepsilon_{BC} = \frac{|Q_{ced}|}{|W|} = \frac{T_C}{T_C - T_F} = \frac{T_A}{T_A - 0,644T_A} = 2,81$$

