

TERMODINÁMICA y FÍSICA ESTADÍSTICA I

Tema 5 - LAS MÁQUINAS TÉRMICAS Y EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Transformación de trabajo en calor y viceversa. Ciclo de Otto. Ciclo de Diesel. Ciclo de Rankine. Ciclo de Stirling. Refrigeradores. Enunciados de Kelvin-Planck y de Clausius del segundo principio de la termodinámica. Reversibilidad e irreversibilidad. Ciclo de Carnot. Teorema de Carnot. Escala termodinámica de temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA:

- Zemansky, Capítulos 6 y 7

The logo for Cartagena99 features the text "Cartagena99" in a stylized, green, serif font. The "99" is slightly larger and more prominent. Below the text is a horizontal orange bar with a slight gradient, and the entire logo is set against a light blue background with a subtle wave pattern.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Transformación de trabajo en calor y viceversa

$$\Delta U = Q + W \Rightarrow \text{si } U = \text{constante, } W = -Q$$

- * procesos donde $W \rightarrow Q$, pueden ser indefinidos
- * procesos donde $Q \rightarrow W$, no puede utilizarse indefinidamente pues implican un cambio de estado del sistema

→ CICLOS TÉRMICOS ($\Delta U=0$)



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$-W$: trabajo realizado por el sistema

Motores térmicos

$$|Q_c| > |Q_f| \Rightarrow W < 0$$

Se define RENDIMIENTO TÉRMICO:

$$\eta = \frac{\text{trabajo _ producido}}{\text{calor _ absorbido}} = \frac{|W|}{|Q_c|}$$



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$-W$: trabajo realizado por el sistema

Motores térmicos

$$\Delta U = 0 = Q + W \Rightarrow |Q_c| - |Q_f| = |W|$$



$$\eta = \frac{|W|}{|Q_c|} = \frac{|Q_c| - |Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \eta$$

Si $Q_f = 0$, el rendimiento sería ¡¡ $\eta = 100\%$!! ???

MOTORES
TÉRMICOS

• Combustión externa

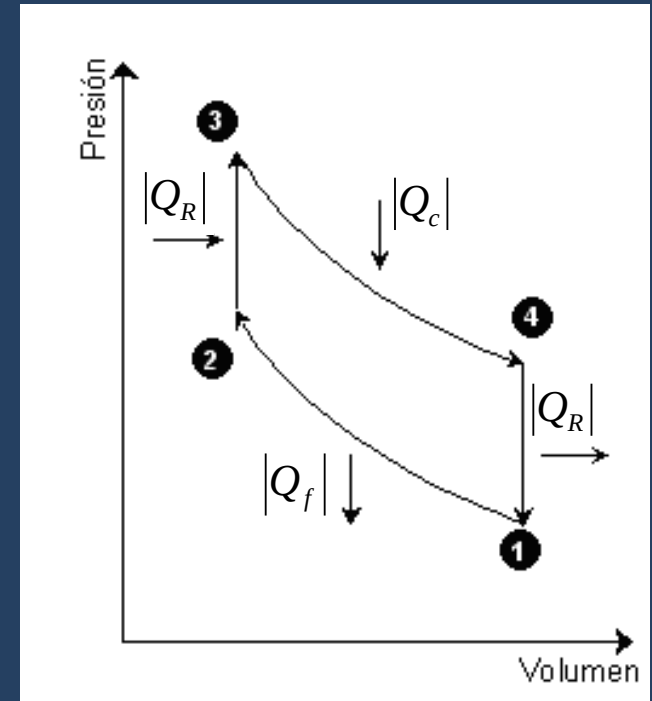
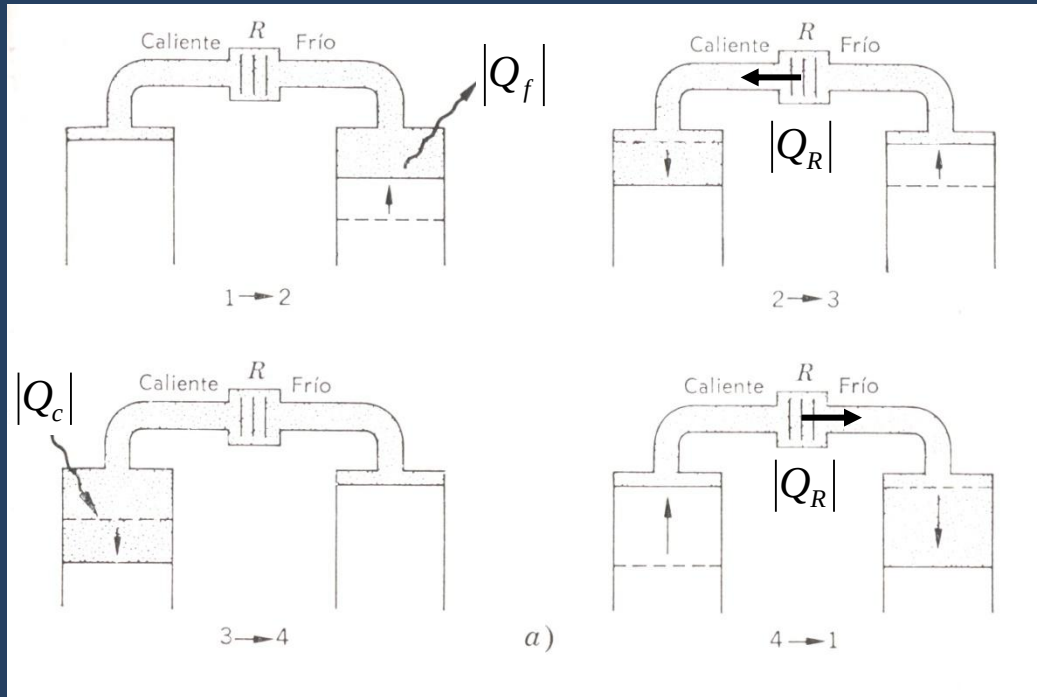
- Motor de Stirling
- Máquina de vapor (ciclo Rankine)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Motores térmicos: Motor de Stirling

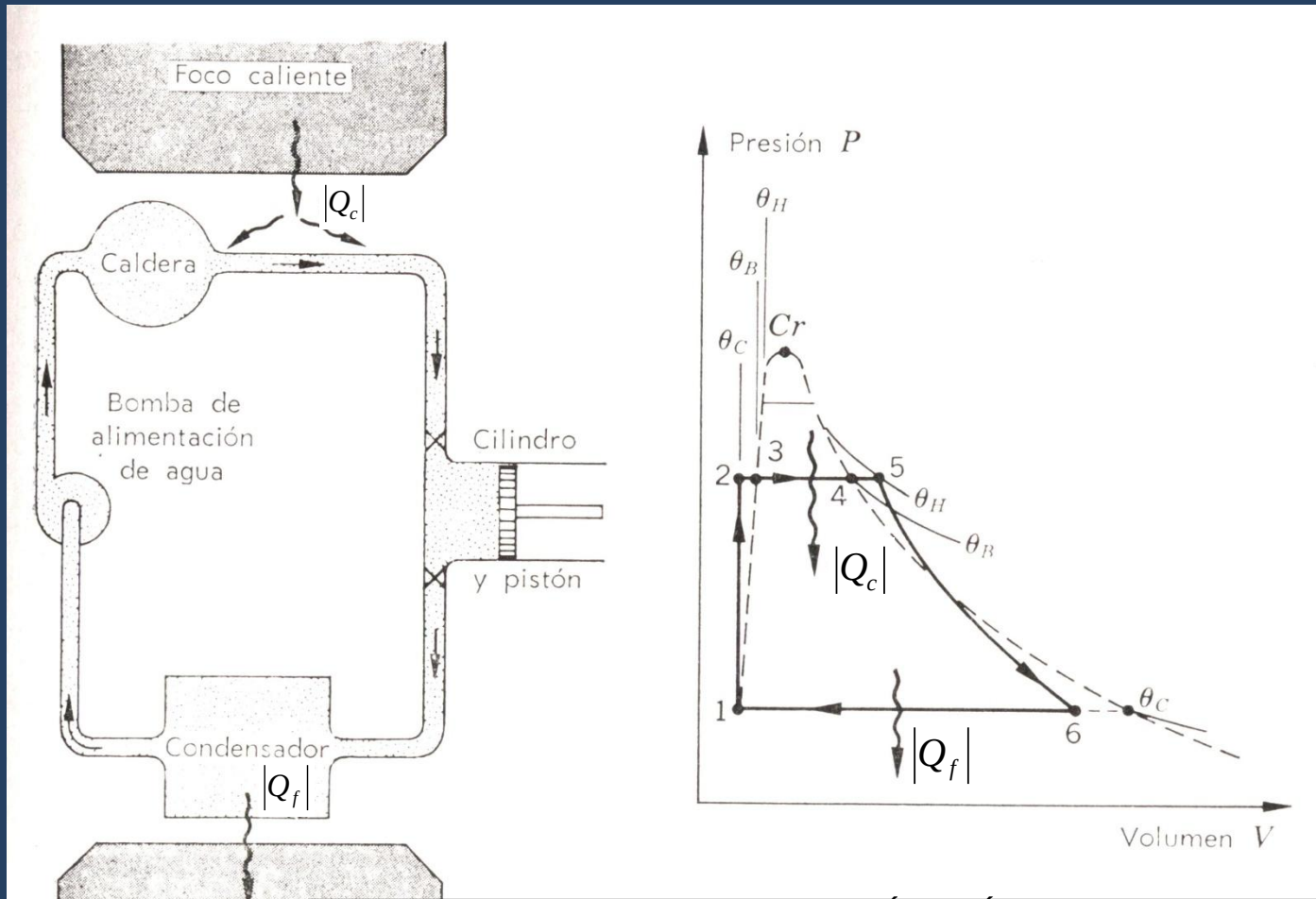


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Motores térmicos: Máquina de vapor



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Motores térmicos de combustión interna

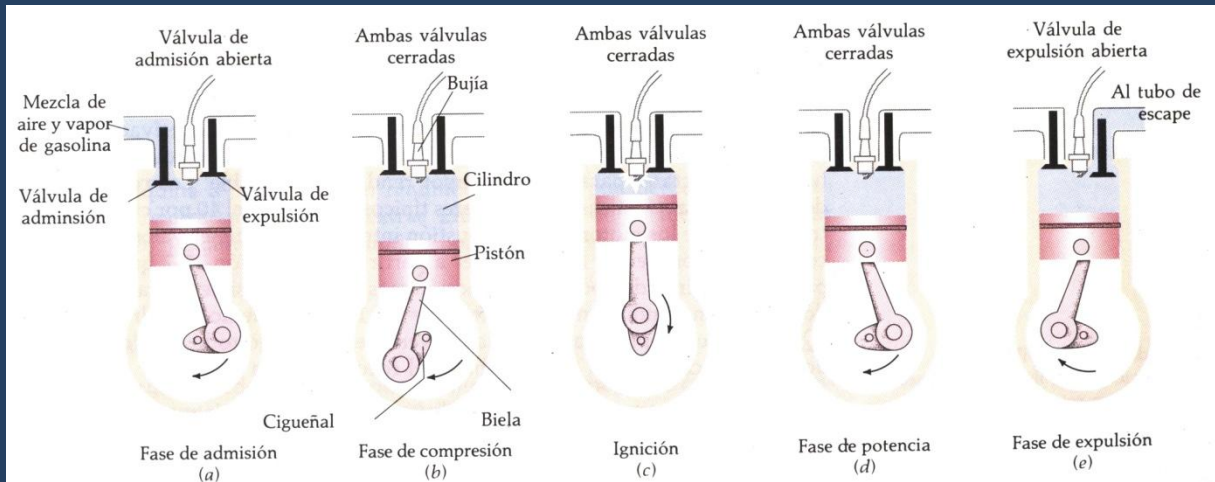
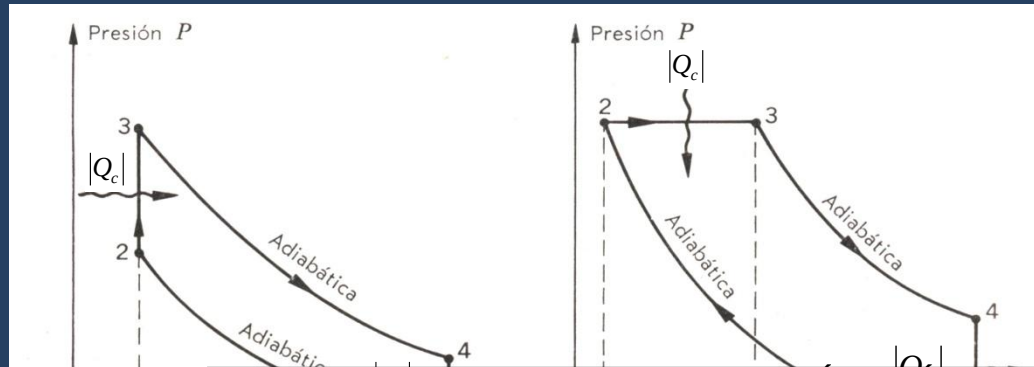


Figura 17-3 Motor de combustión interna. En (a), cuando el pistón desciende entra en la cámara de combustión una mezcla de aire y vapor de gasolina. El pistón entonces asciende en (b), comprimiendo el gas para su ignición en (c).

Los gases calientes se expansionan, empujando el pistón hacia abajo en (d), fase de potencia. En (e), el pistón asciende nuevamente y expulsa los gases de la combustión. Entonces se repite el ciclo.

Motor de gasolina
(Ciclo Otto)



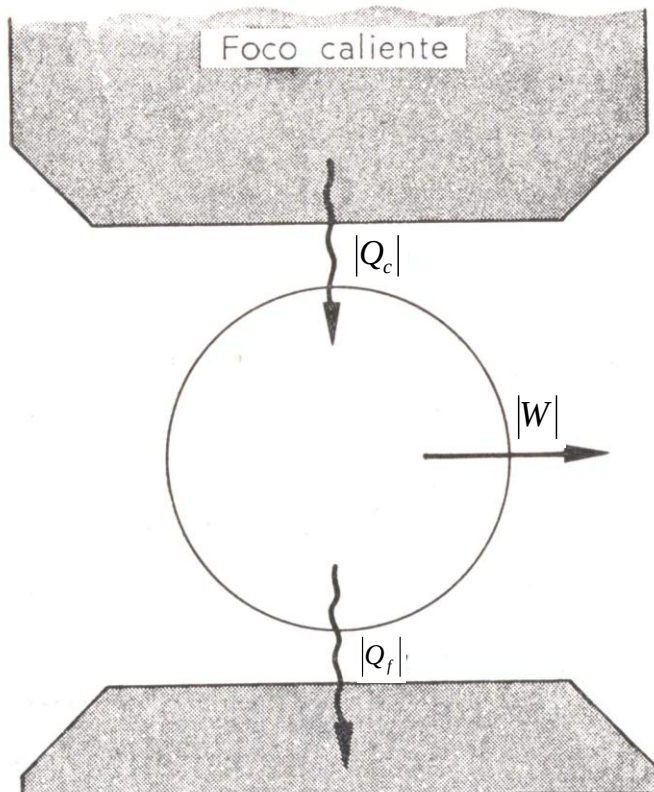
Motor Diesel

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Enunciado de Kelvin-Planck del 2º Principio de la Termodinámica



No es posible un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor de una fuente y la conversión de calor en trabajo

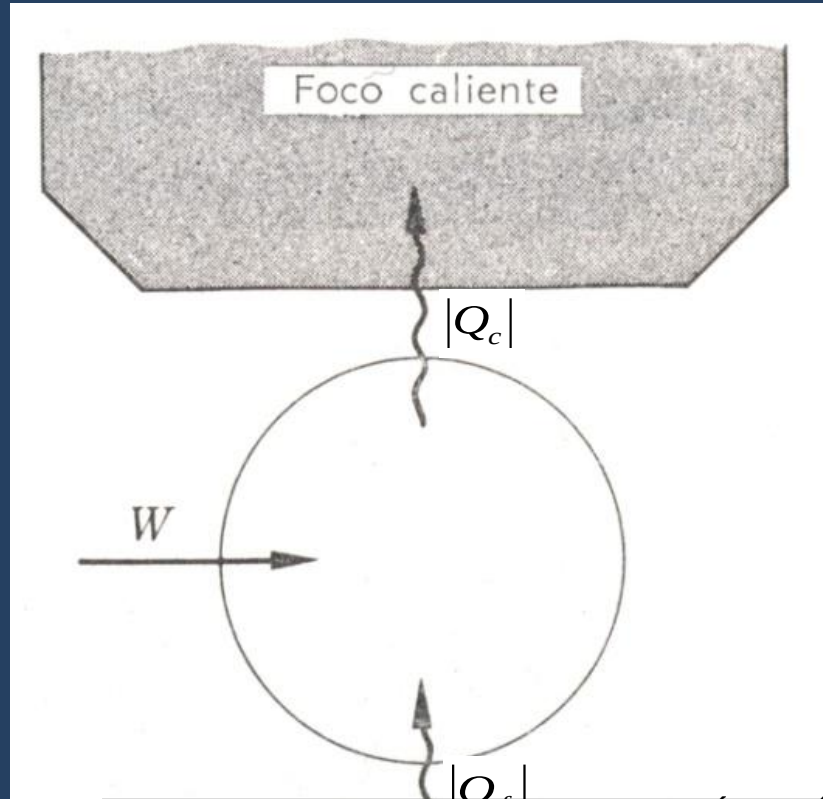
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Frigoríficos

$$|Q_c| > |Q_f| \Rightarrow W > 0$$

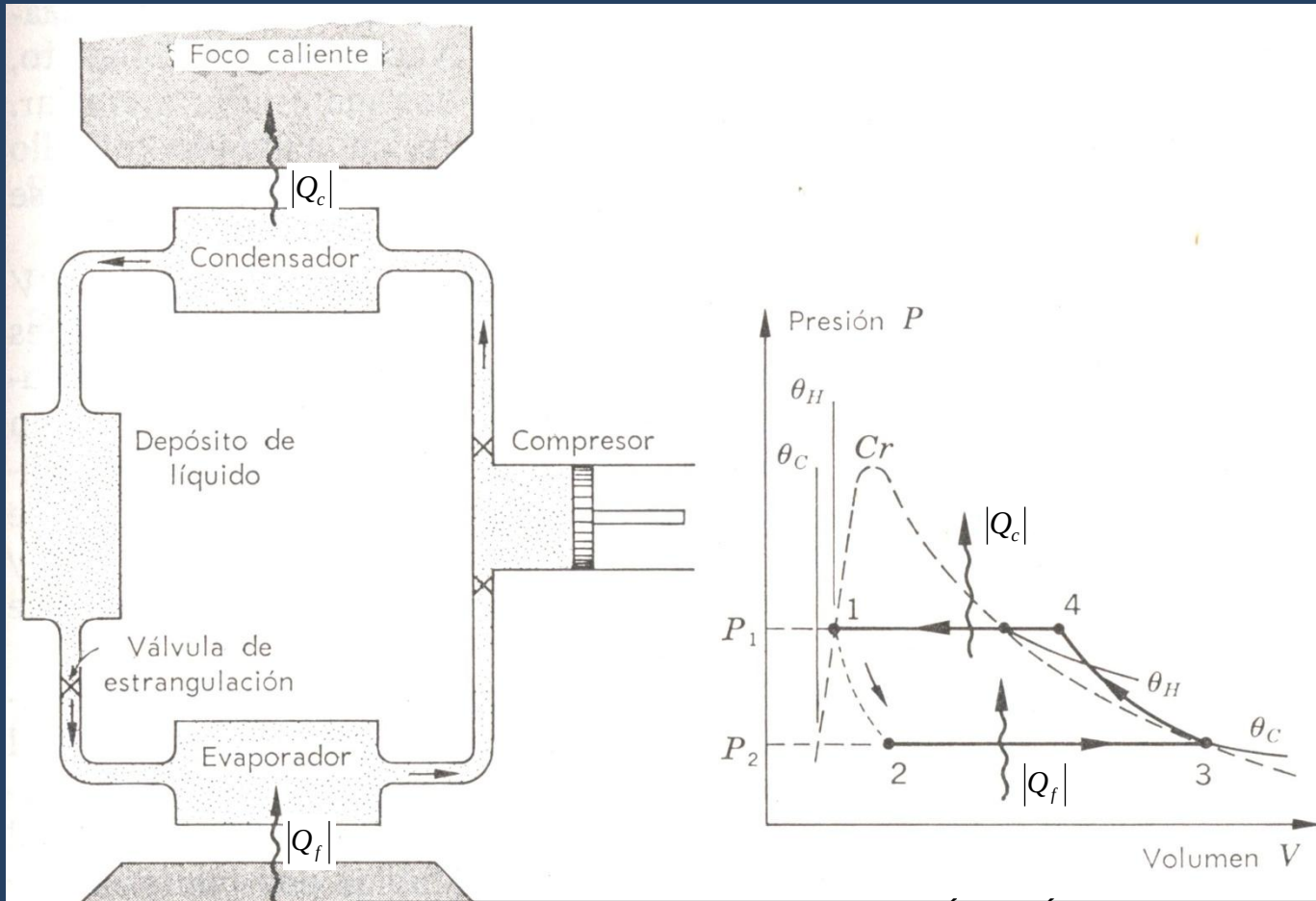


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Frigoríficos



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Frigoríficos

Se define EFICIENCIA de un FRIGORÍFICO:

$$\omega = \frac{\text{calor _extraído _del _foco _frío}}{\text{trabajo _realizado _sobre _el _refrigerante}} = \frac{|Q_f|}{|W|}$$

$$\Delta U = 0 = Q + W \Rightarrow |Q_c| - |Q_f| = |W|$$



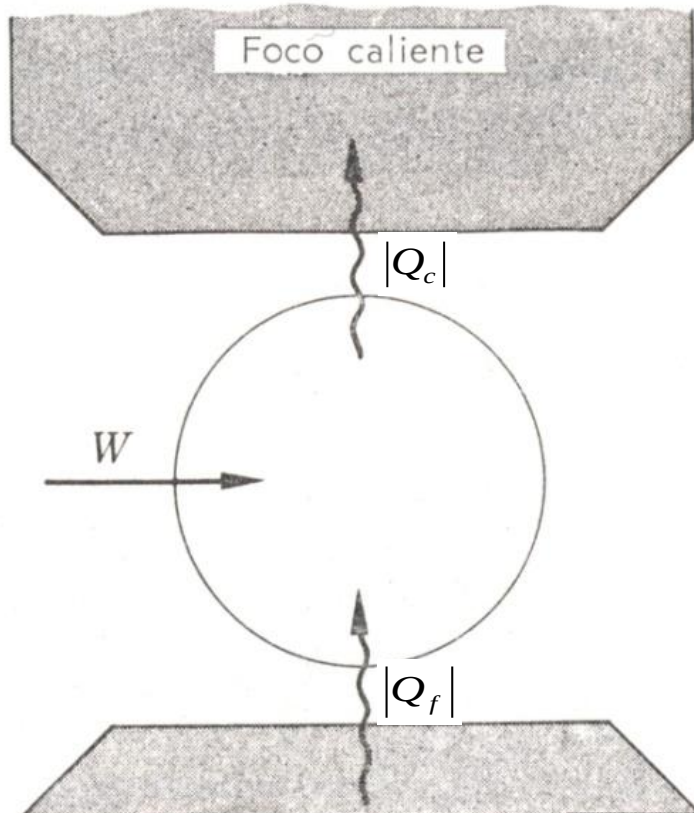
$$\omega = \frac{|Q_f|}{|W|} = \frac{|Q_c| - |W|}{|W|} = \frac{|Q_c|}{|W|} - 1 = \omega$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Enunciado de Clausius del 2º Principio de la Termodinámica



No es posible un proceso cuyo único resultado sea la transferencia de calor desde un cuerpo frío a uno caliente

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Equivalencia de los enunciados de Kelvin-Planck y de Clausius del 2º Principio de la Termodinámica

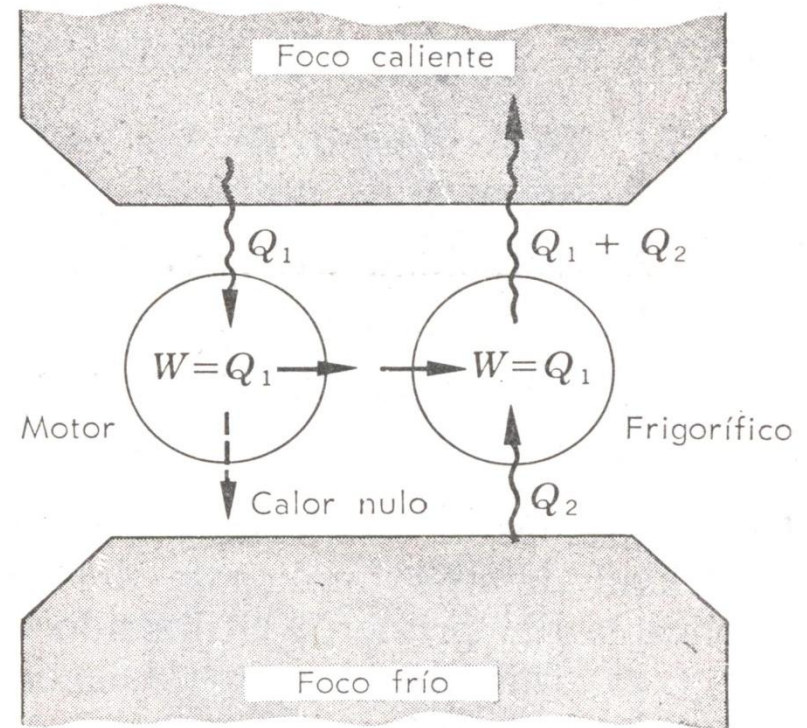
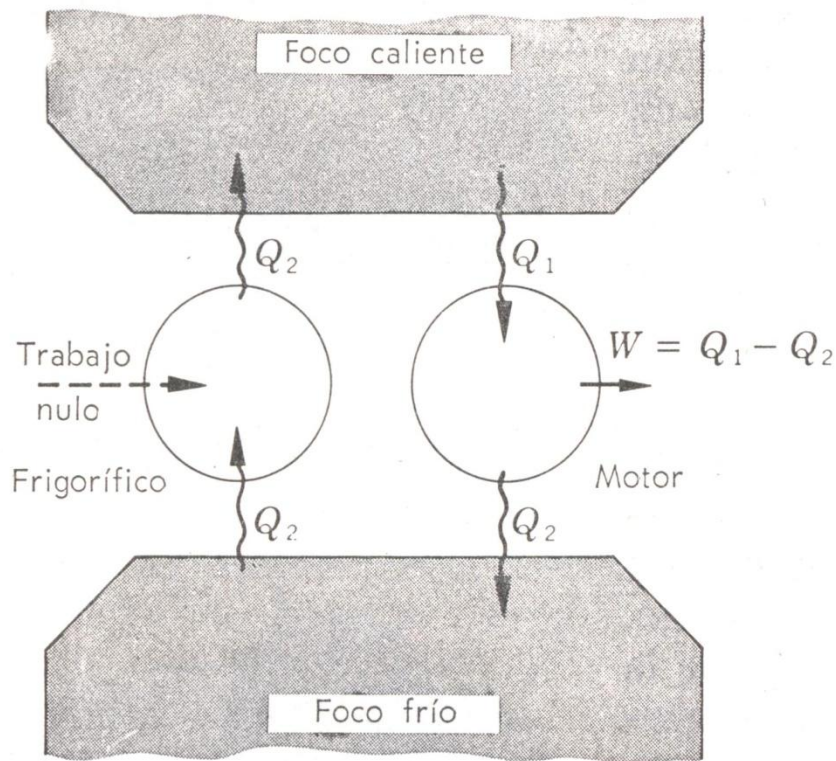


FIG. 7-11. Demostración de que $-K \supset -C$.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Reversibilidad e Irreversibilidad

Proceso REVERSIBLE: Aquél que ocurre de tal modo que, al finalizar el mismo, tanto el sistema como su entorno inmediato pueden recuperar sus estados iniciales sin ocasionar ningún cambio en el resto del “universo”. (Un proceso que no cumple estos requisitos se dice que es **irreversible**).

→ ¡Como consecuencia del Segundo Principio de la Termodinámica, todos los procesos naturales (espontáneos) son irreversibles!

Tipos
de

- Irreversibilidad MECÁNICA (externa/interna)

- Irreversibilidad TÉRMICA (externa/interna)

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Irreversibilidad MECÁNICA

- Irreversibilidad mecánica externa

→ PROCESOS DISIPATIVOS:

- viscosidad
- rozamiento
- inelasticidad
- resistencia eléctrica
- histéresis magnética

Transformación isoterma de trabajo
en energía interna de un foco de calor

Transformación adiabática de trabajo
en energía interna de un sistema

SISTEMA

$$\Delta U = 0$$

W

$$\Delta U = W$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

NO es posible volver reversiblemente al estado inicial sin violar el enunciado de K-P del 2º principio

Irreversibilidad MECÁNICA

- Irreversibilidad mecánica interna

→ Procesos que implican la transformación de la energía interna de un sistema en energía mecánica (como resultado de una inestabilidad mecánica) que después se transforma en energía interna nuevamente:

- expansión libre de un gas ideal
- estrangulación de un gas al atravesar un tabique poroso
- desaparición de una película de jabón después de pinchada

The logo for Cartagena99, featuring the text "Cartagena99" in a stylized font with a blue and orange gradient background.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Irreversibilidad TÉRMICA

- Irreversibilidad térmica externa

→ Transferencia de calor entre un sistema y un foco térmico debido a una diferencia finita de temperatura:

- conducción o radiación de calor de un sistema caliente a otro más frío
- conducción o radiación de calor a través de un sistema (invariable) de un foco más caliente a otro más frío

- Irreversibilidad térmica interna

→ Transferencia de calor entre partes de un mismo sistema a causa de la no uniformidad de la temperatura

The logo for Cartagena99 features the text "Cartagena99" in a stylized, green, serif font. The "99" is slightly larger and more prominent. Below the text is a horizontal orange bar with a slight gradient, and the entire logo is set against a light blue background with a subtle wave pattern.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Irreversibilidad QUÍMICA

→ La mayoría de los procesos que ocurren en la Naturaleza implican un cambio espontáneo de composición química, estructura interna, densidad, orden cristalino, etc., y son **irreversibles**:

- reacciones químicas
- mezcla de dos sustancias distintas (líquidos, difusión de dos gases...)
- solidificación de un líquido sobrenfriado
- condensación de un vapor sobresaturado
- disolución de un sólido en agua
- ósmosis
- ...

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, dark green font. The '99' is slightly larger and more prominent. Below the text is a horizontal orange bar with a slight gradient, and the entire logo is set against a light blue background with a subtle wave pattern.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Condiciones para la REVERSIBILIDAD

→ Para que un proceso sea **reversible** tienen que evitarse las características de los procesos naturales espontáneos, que son siempre irreversibles, realizándose **cuasi-estáticamente** y **sin efectos disipativos** (abstracción ideal).

Los procesos **irreversibles** tienen alguna de las siguientes características:

1) No hay equilibrio termodinámico

- no equilibrio mecánico
- no equilibrio térmico
- no equilibrio químico

2) Existen efectos disipativos

- viscosidad

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

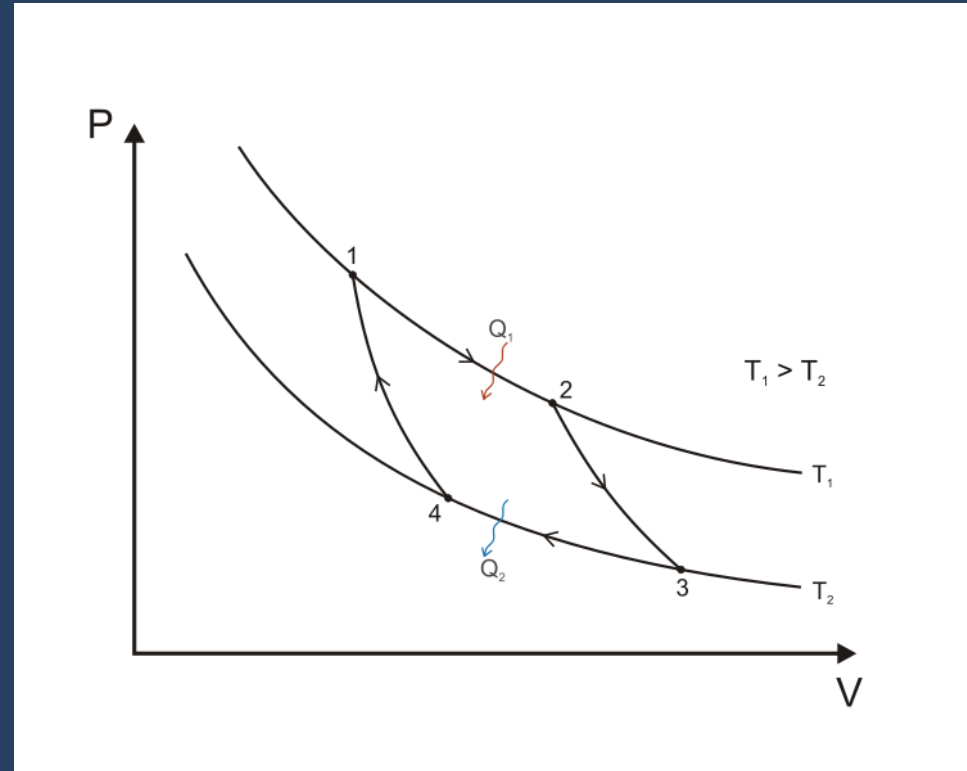
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Inductancia Magnética

El Ciclo de CARNOT



Nicolas L. Sadi Carnot
«Sur la puissance motrice du feu» (1824)



1→2: expansión isoterma $T=T_1$, con absorción de calor Q_1

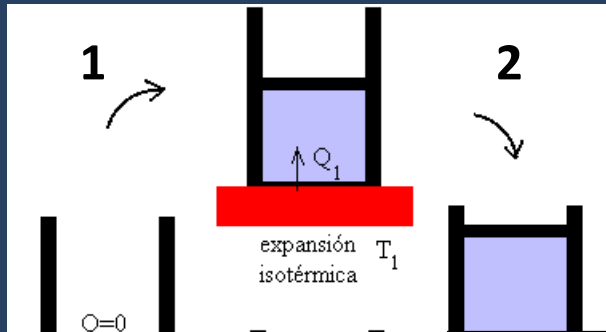
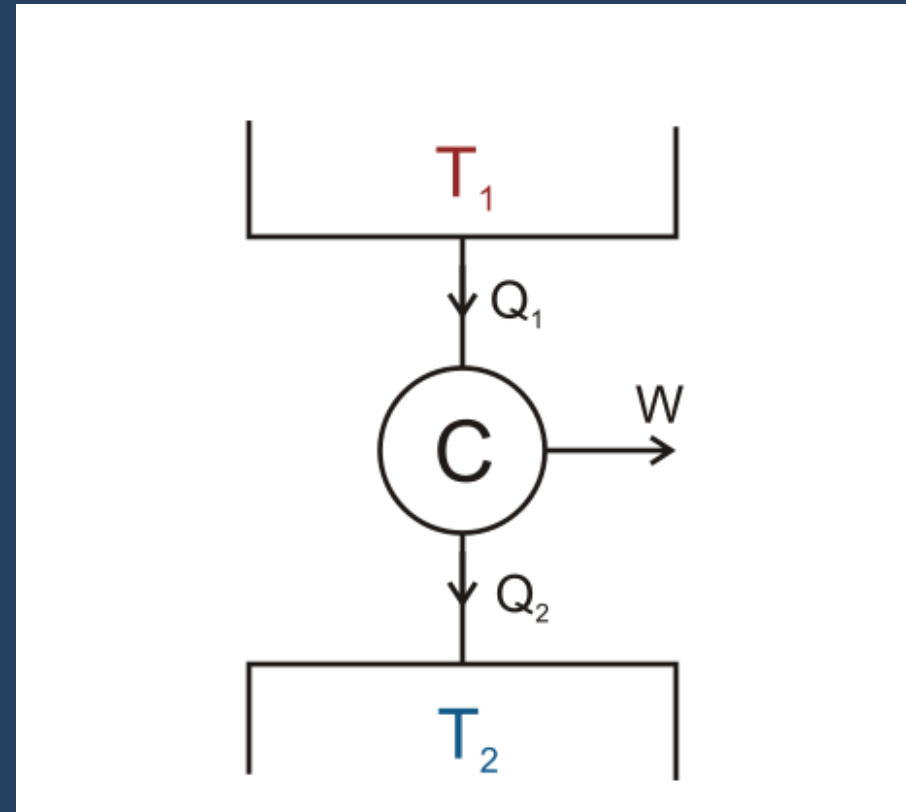
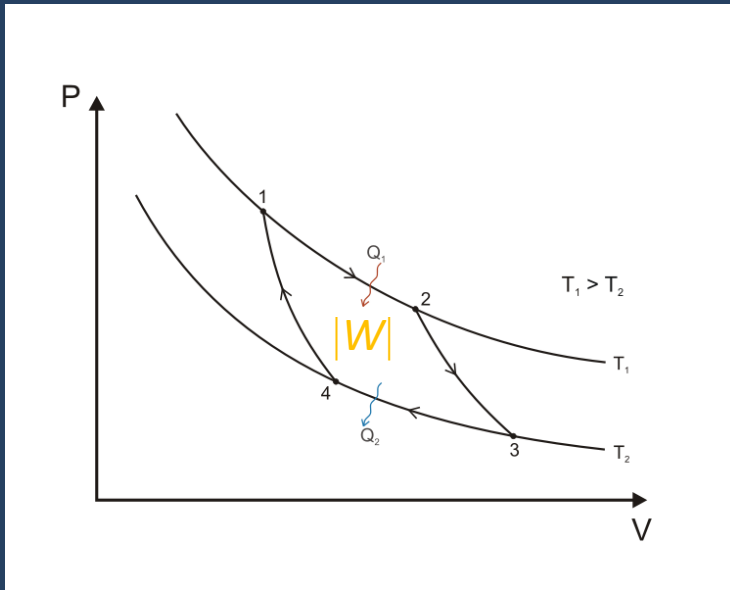
2→3: expansión adiabática con enfriamiento de T_1 a T_2

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

El Ciclo de CARNOT de un gas



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

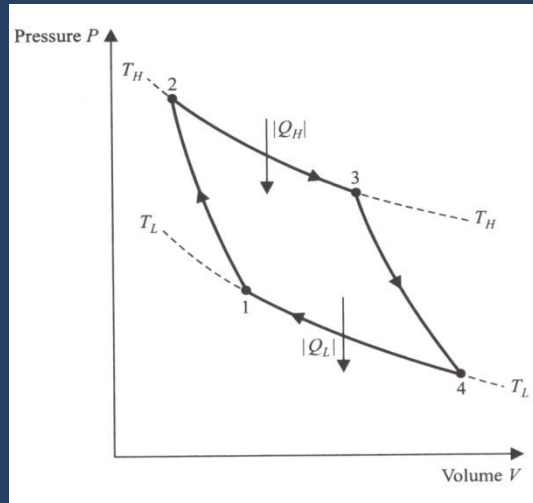
4

compresión T2 isotérmica

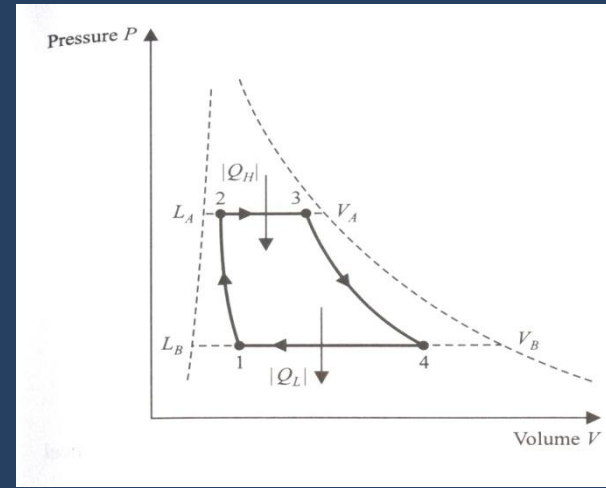
3

El Ciclo de CARNOT

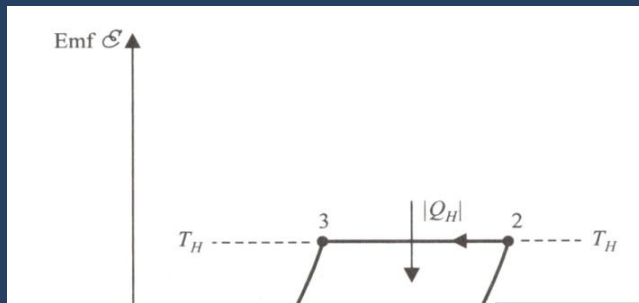
de un gas



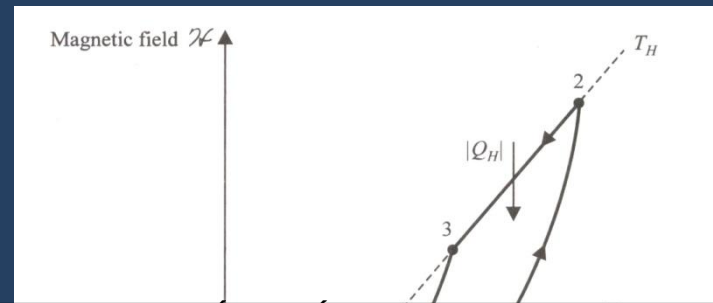
de una mezcla líquido-vapor



de una pila electroquímica



de una sustancia paramagnética



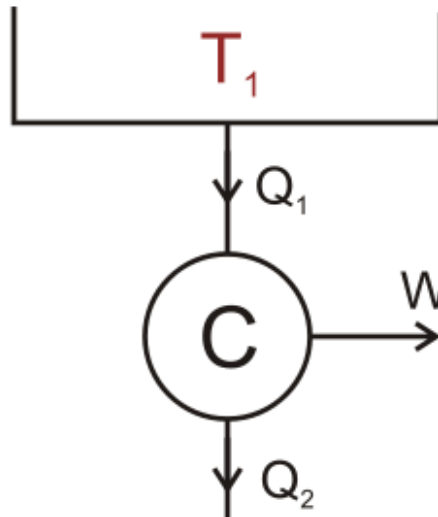
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Máquina de CARNOT

En general, una “máquina de Carnot” es cualquier motor térmico que funcione reversiblemente entre dos focos térmicos sin que se deba realizarse ningún trabajo neto sobre el sistema.

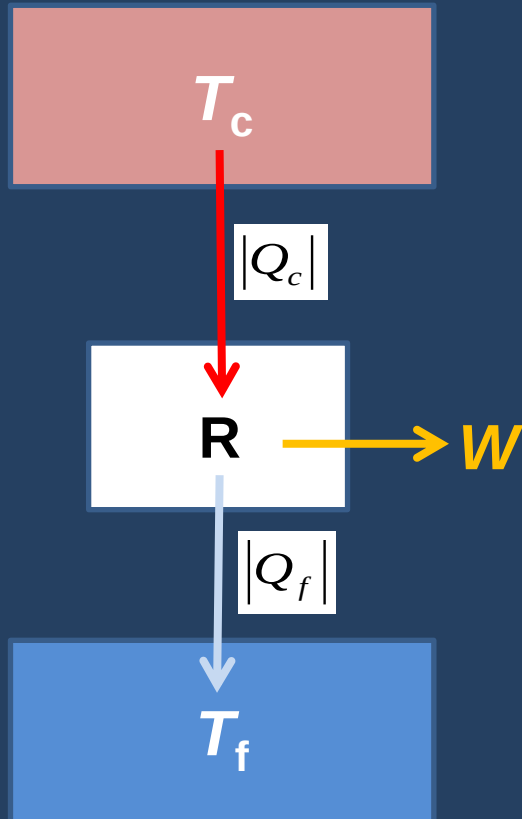


Cartagena99

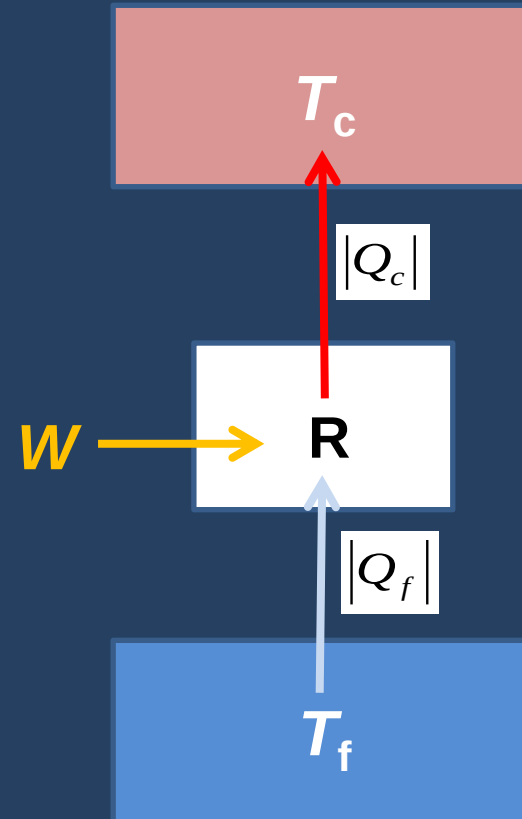
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Motor térmico de CARNOT



Frigorífico de CARNOT



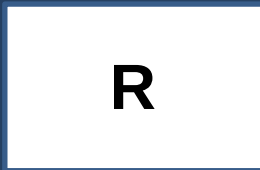
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Teorema de CARNOT

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible (o de Carnot) que trabaje entre ambos mismos focos: $\eta_i \leq \eta_R$



$$|Q_c|, |W|, |Q_f|=|Q_c|-|W|, \eta_R = |W| / |Q_c|$$

$$|Q_c|', |W|, |Q_f|'=|Q_c|'-|W|, \eta_i = |W| / |Q_c|'$$

Supongamos por un momento que $\eta_i > \eta_R$

Entonces:

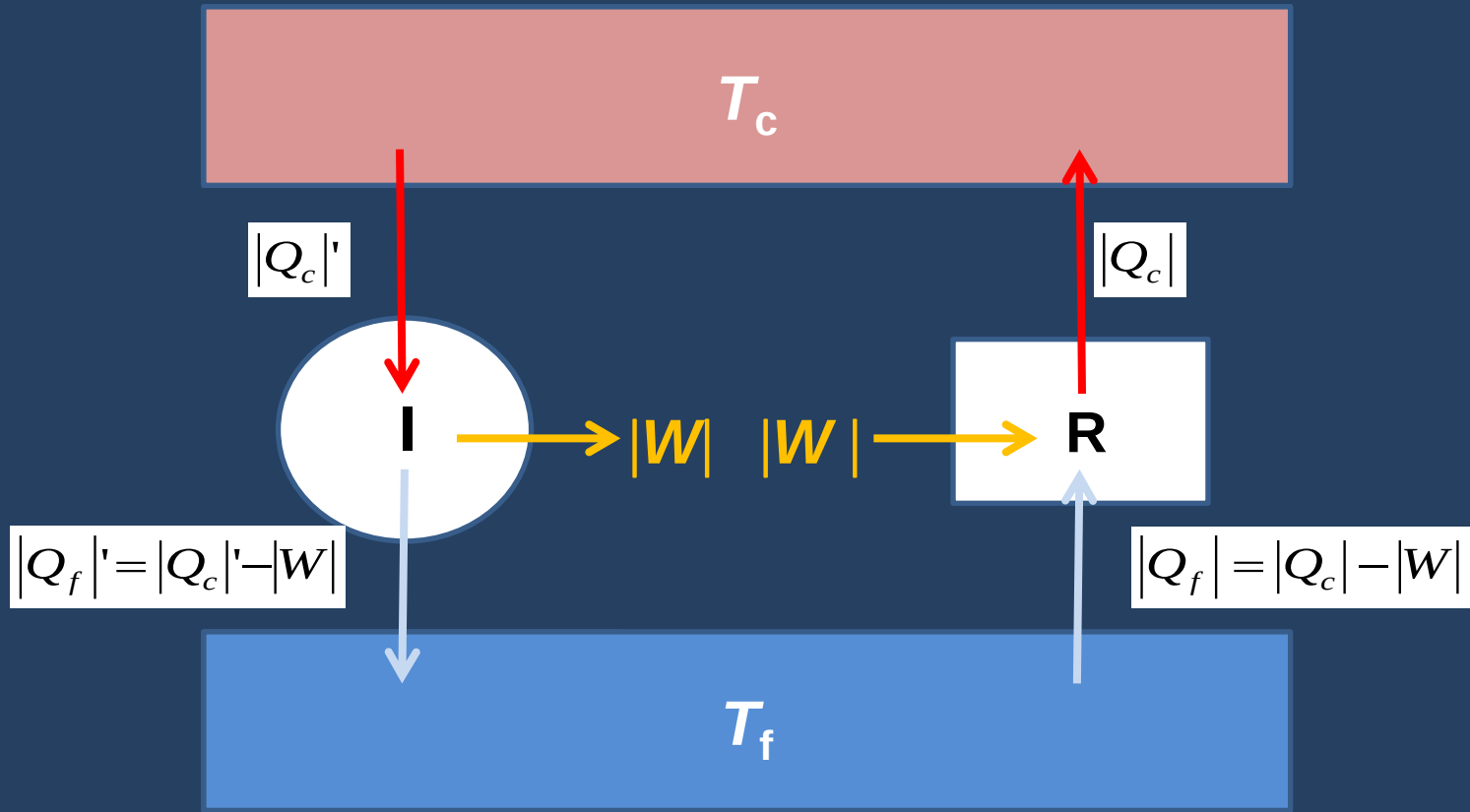
$$\frac{|W|}{|Q_c|} > \frac{|W|}{|Q_c|'} \Rightarrow |Q_c| > |Q_c|'$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Teorema de CARNOT



En total: $|W|_{\text{net}} = 0$ y se transfiere un calor $|Q_c|_{\text{net}} = |Q_c| - |Q_c|'$ desde el foco

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Teorema de CARNOT

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible (o de Carnot) que trabaje entre ambos mismos focos: $\eta_i \leq \eta_R$

Corolario del teorema de Carnot:

Todas las máquinas térmicas de Carnot que trabajen entre los dos mismos focos térmicos tienen exactamente el mismo rendimiento (máximo)

$$\eta_{R1} \leq \eta_{R2} , \eta_{R2} \leq \eta_{R1} \Rightarrow \eta_{R1} = \eta_{R2}$$

The logo for Cartagena99 features the text "Cartagena99" in a stylized, dark green font. The "99" is larger and more prominent. Below the text is a horizontal orange bar with a slight gradient.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Rendimiento de una máquina de Carnot

(Como el rendimiento de cualquier máquina de Carnot debe ser el mismo, calculémoslo con un gas ideal)

1→2: expansión isoterma $T=T_1$, con absorción de calor Q_1

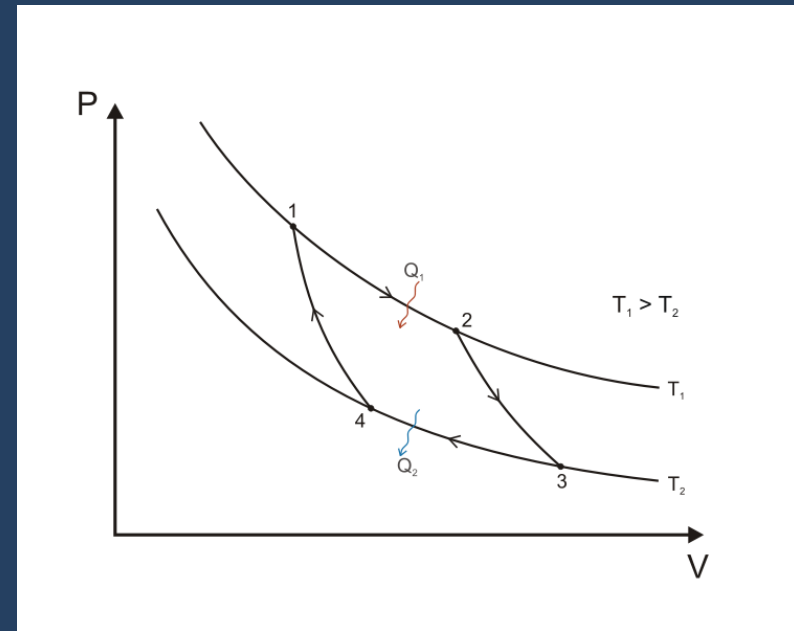
$$Q_c = -W = \int_1^2 P \cdot dV = \int_1^2 \frac{nRT_1}{V} \cdot dV = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

3→4: compresión isoterma $T=T_2$, con cesión de calor Q_2

$$Q_f = -W = \int_3^4 P \cdot dV = \int_3^4 \frac{nRT_2}{V} \cdot dV = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0$$

2→3: expansión adiabática con enfriamiento de T_1 a T_2

4→1: compresión adiabática con calentamiento de T_2 a T_1



$$PV^\gamma = cte. \Rightarrow TV^{\gamma-1} = cte.$$

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

$$T_1 V_4^{\gamma-1} = T_2 V_1^{\gamma-1}$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

(V₁) (V₄) (V₁) (V₄)

Rendimiento de una máquina de Carnot



$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{nRT_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}}{nRT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_2}{T_1} \equiv \frac{T_f}{T_c}$$

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

!!!

$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$T > 0 \Rightarrow |Q| > 0 \Rightarrow \eta < 1$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Equivalencia entre las escalas Kelvin y termodinámica de temperaturas

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

El cociente de dos temperaturas en la escala termodinámica es el mismo que hay entre los valores absolutos de los calores cedidos y absorbidos, respectivamente, por una máquina de Carnot que opera entre dichas temperaturas –¡que es independiente de la sustancia de trabajo!–.

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

+ $T_{\text{pt agua}} = 273.16 \text{ K}$ establecen una

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70