

Tema 3

SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Segundo principio de la Termodinámica. Introducción

Con frecuencia, se recomienda que no derrochemos energía. Pero de acuerdo con el primer principio de la termodinámica, la energía se conserva siempre. Entonces, ¿que significa conservar la energía, si la cantidad total de energía del universo no cambia con independencia de lo que hagamos? El primer principio de la termodinámica no lo explica todo. La energía se conserva siempre, pero algunas formas de energía son más útiles que otras. La posibilidad o imposibilidad de conseguir energía que esté en condiciones de ser utilizada es el punto central del segundo principio de la termodinámica. Científicos e ingenieros están constantemente tratando de mejorar el rendimiento de las máquinas térmicas (dispositivos que transforman el calor en trabajo). En la industria eléctrica, los ingenieros se esfuerzan por lograr rendimientos más altos en la transformación en trabajo útil de la energía térmica liberada por la combustión de carbón, petróleo u otros combustibles fósiles y de la obtenida por la fisión de uranio y plutonio.

Así mismo hay ciertos procesos que son espontáneos e irreversibles. Por ejemplo, si consideramos dos sistemas a diferentes temperaturas, según hemos visto en los temas anteriores, se produce un paso de calor del sistema de mayor temperatura hacia el sistema con menor temperatura y este proceso será, por tanto, espontáneo. Sin embargo, el proceso es irreversible puesto que ese calor no pasaría de forma espontánea desde el sistema con menor temperatura al sistema con mayor temperatura.

En este capítulo, examinamos el segundo principio de la termodinámica y su relación con las máquinas térmicas y los refrigeradores. Así mismo, consideramos una máquina térmica ideal, la máquina de Carnot. La irreversibilidad y la entropía también se analizan en cuanto se relacionan con la disponibilidad de la energía, el desorden y la probabilidad.

Tema 1

Principio cero de la termodinámica. 

- Definición de temperatura.
- Ecuación de estado de un gas ideal.
- Relación entre la temperatura (variable de estado macroscópica) con la energía promedio a nivel microscópico de las moléculas que componen el sistema.

Tema 2

Calor = transferencia de energía entre diferentes cuerpos o diferentes zonas de un mismo cuerpo que se encuentran a distintas temperaturas.

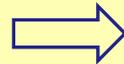
Primer principio de la termodinámica.
(conservación de la energía)



- Definición de energía interna como función de estado.
- Trabajo y calor funciones de proceso.

Tema 3

Segundo principio de la termodinámica.



- Eficiencia en la transformación de un tipo de energía en otra.
- Máquinas Térmicas.
- Definición de entropía.

ESQUEMA DE DESARROLLO

- 1.- Introducción.
- 2.- Máquinas térmicas y el segundo principio de la termodinámica.
- 3.- Ciclo y teorema de Carnot. La máquina de Carnot.
- 4.- Escala termodinámica de temperaturas.
- 5.- Entropía. Irreversibilidad y desorden.

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Un ejemplo cotidiano de la conversión de trabajo en calor es el movimiento con rozamiento. Por ejemplo, supongamos que empleamos dos minutos en empujar un bloque en cualquier dirección sobre la superficie de una mesa siguiendo un camino cerrado que deja al bloque en su posición inicial. Supongamos también que el sistema bloque-mesa está inicialmente en equilibrio térmico con su entorno. El trabajo que realizamos sobre el sistema se convierte en energía interna del sistema, y esto da como resultado que el sistema bloque-mesa se caliente. En consecuencia, el sistema ya no está en equilibrio con el medio. Sin embargo, el sistema cederá energía en forma de calor al medio hasta que vuelva a estar en equilibrio térmico con él. Como los estados inicial y final del sistema son el mismo, según el primer principio de la termodinámica, la energía transmitida al medio en forma de calor debe ser igual al trabajo que hemos realizado sobre el sistema. El proceso inverso no ocurre nunca, es decir, un bloque y una mesa no se enfriarán nunca espontáneamente para convertir su energía interna en energía cinética que ponga en movimiento el bloque sobre la mesa. Sin embargo, si este sorprendente fenómeno se verificara, no violaría el primer principio de la termodinámica, ni ninguna otra ley física de las que hemos estudiado hasta ahora. Sin embargo, si violaría el segundo principio de la termodinámica. Existe, pues, una falta de simetría en los papeles que desempeñan el calor y el trabajo que no resulta evidente a partir del primer principio. Esta falta de simetría está relacionada con el hecho de que algunos procesos son **irreversibles**.

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

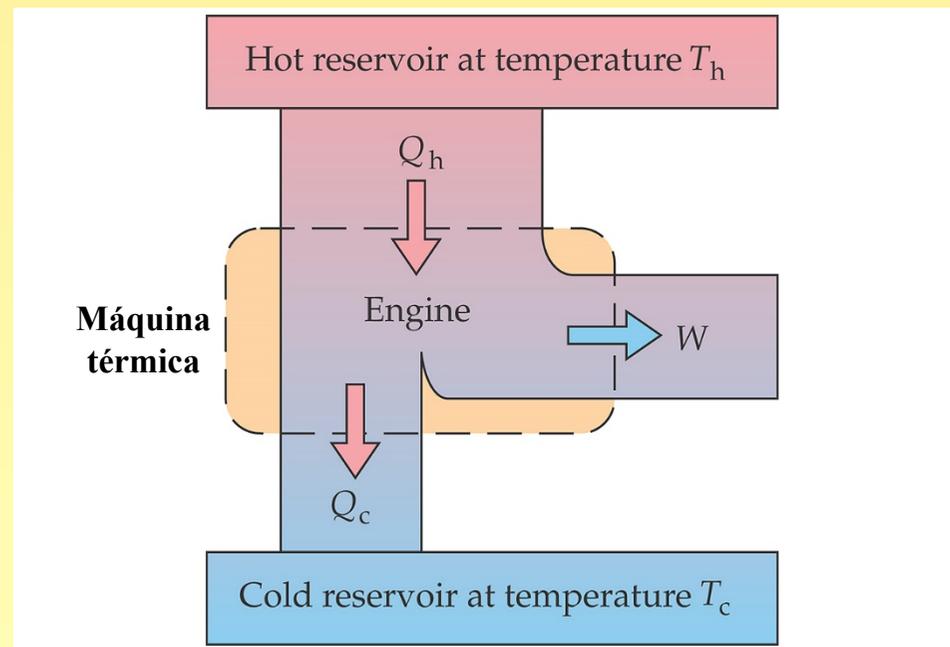
Existen muchos otros procesos irreversibles, aparentemente muy diferentes unos de otros, pero todos relacionados con el segundo principio. Por ejemplo, la conducción de calor es un proceso irreversible. Si colocamos un cuerpo caliente en contacto con otro frío, el calor fluirá del cuerpo caliente al cuerpo frío hasta que estén a la misma temperatura. Sin embargo, el proceso inverso no se presenta nunca. Dos cuerpos en contacto a la misma temperatura, permanecen a la misma temperatura. El calor no fluye de uno al otro, haciendo que uno de ellos se enfríe cada vez más mientras que el otro cada vez se calienta más. Este hecho experimental nos ofrece otro enunciado del segundo principio de la termodinámica.

En este tema, más adelante, demostraremos que los enunciados de Kelvin y de Clausius del segundo principio son equivalentes.

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

El estudio del rendimiento de las máquinas térmicas dio origen a los primeros enunciados claros del segundo principio de la termodinámica.

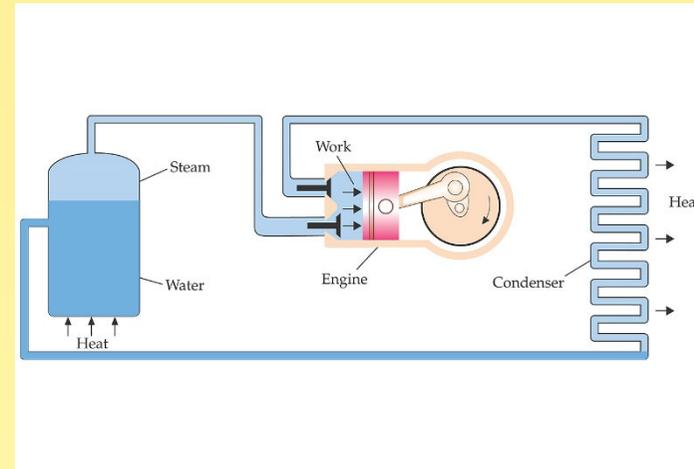
Máquina Térmica: Una máquina térmica es un dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.



Todas ellas contienen una sustancia de trabajo encargada de absorber y ceder calor, y realizar el trabajo.

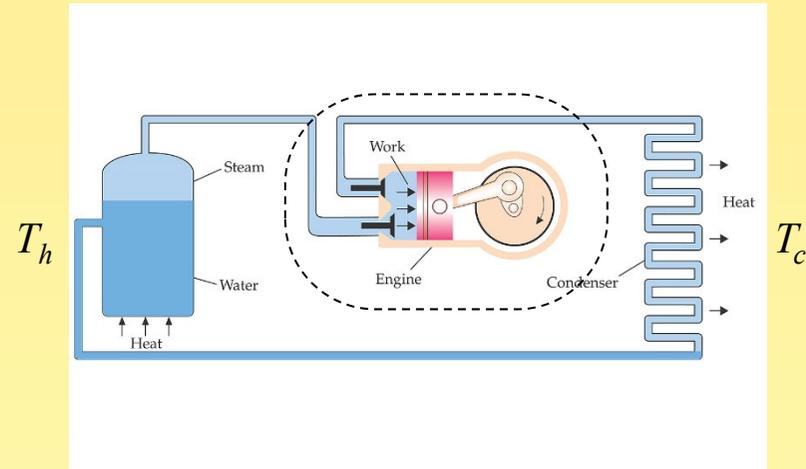
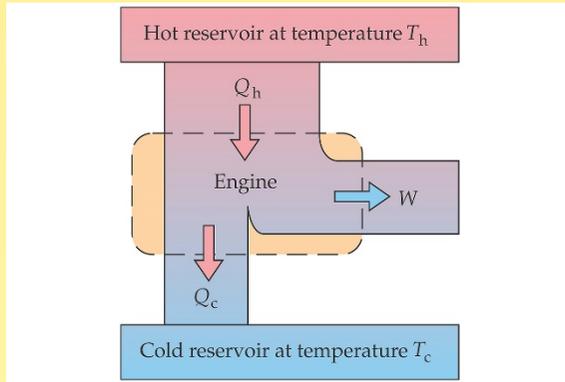
Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



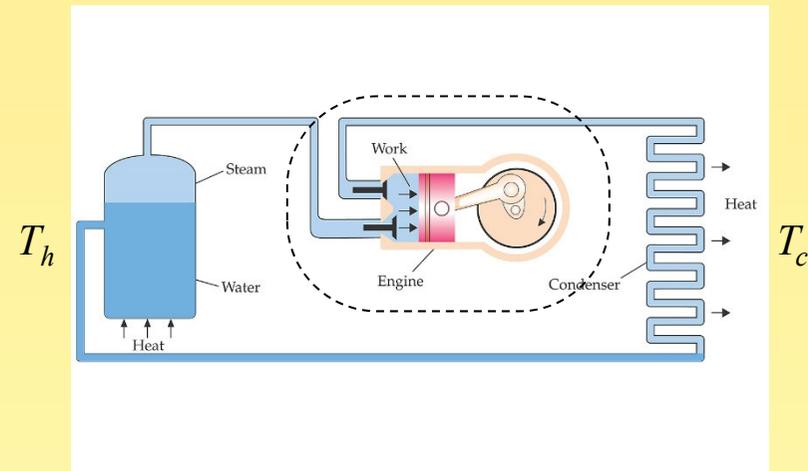
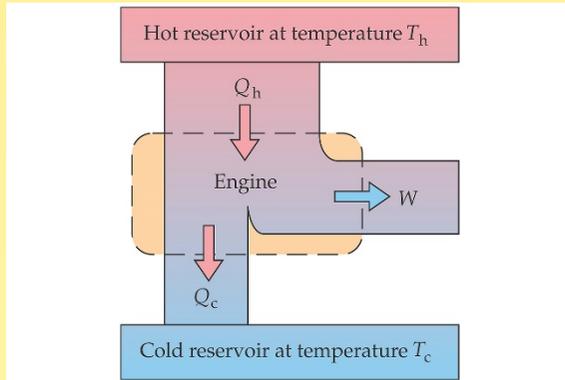
Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor

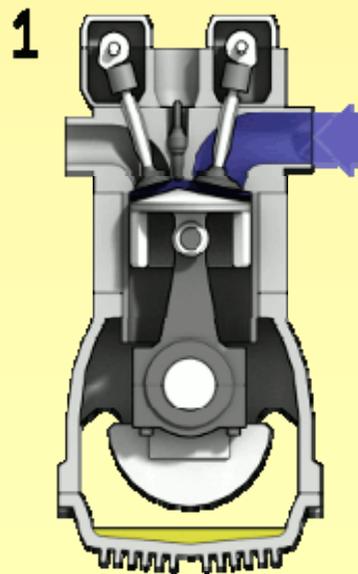


Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor

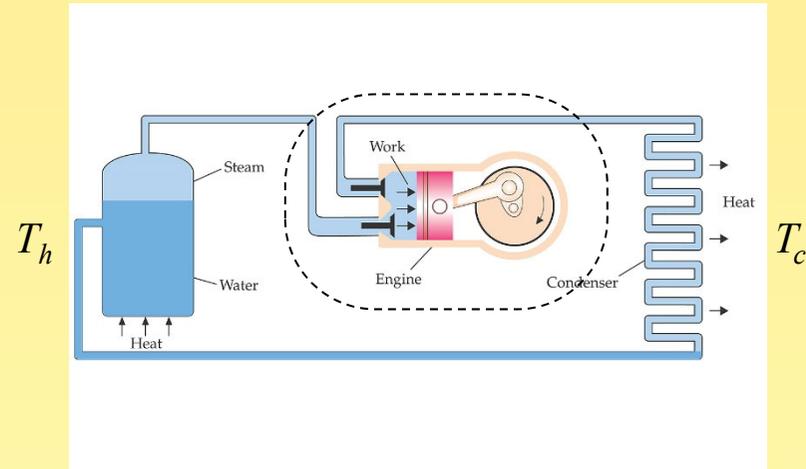
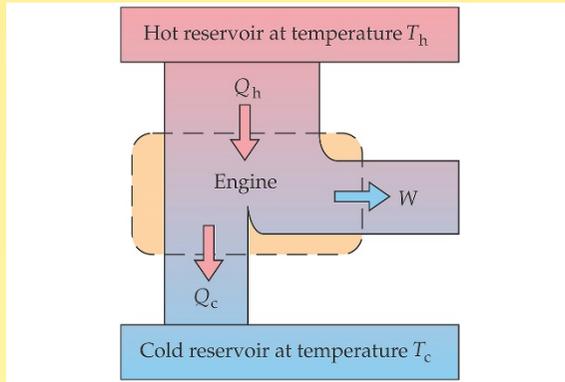


Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.

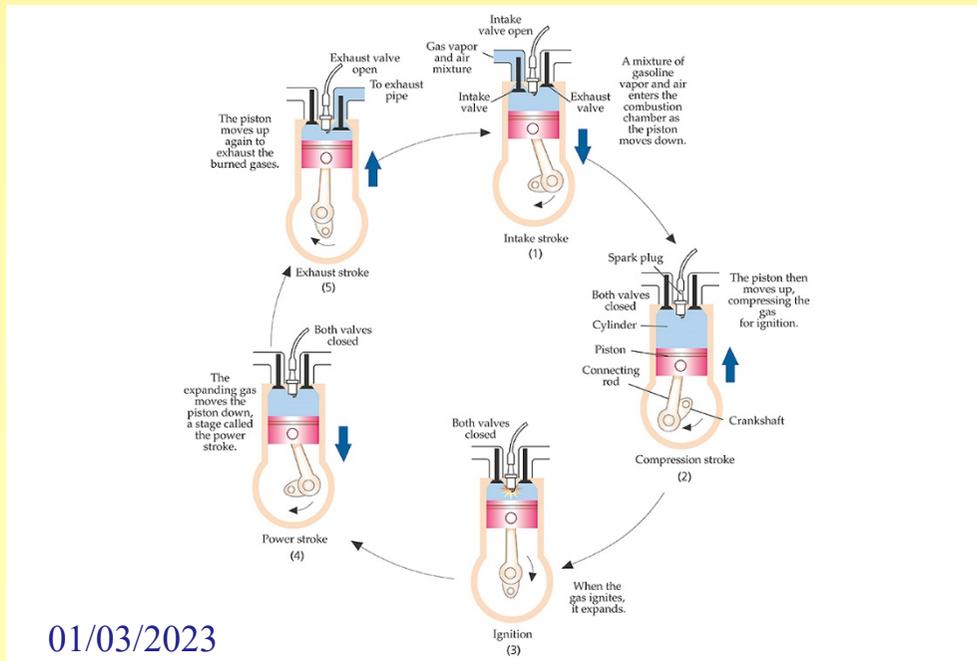


Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



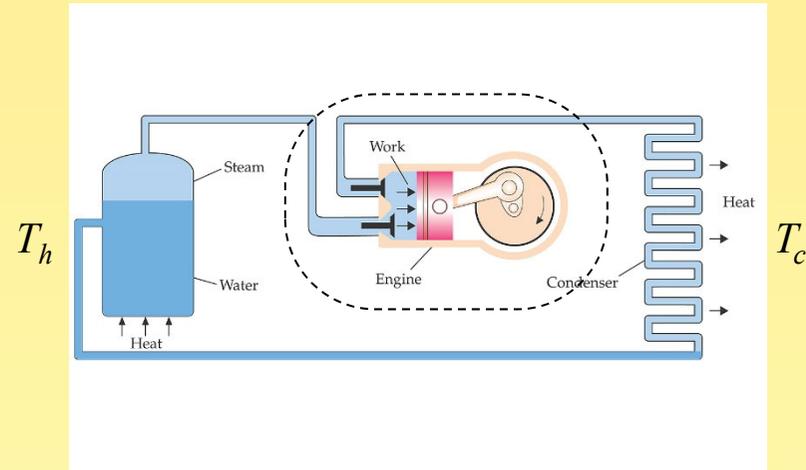
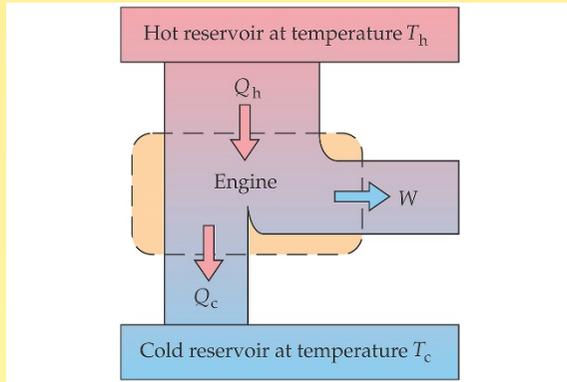
Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.



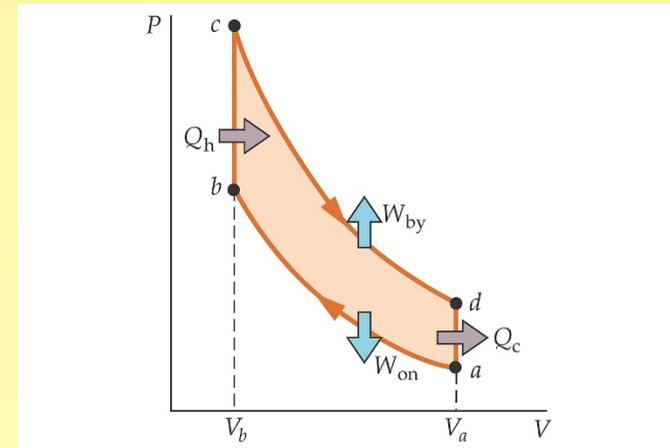
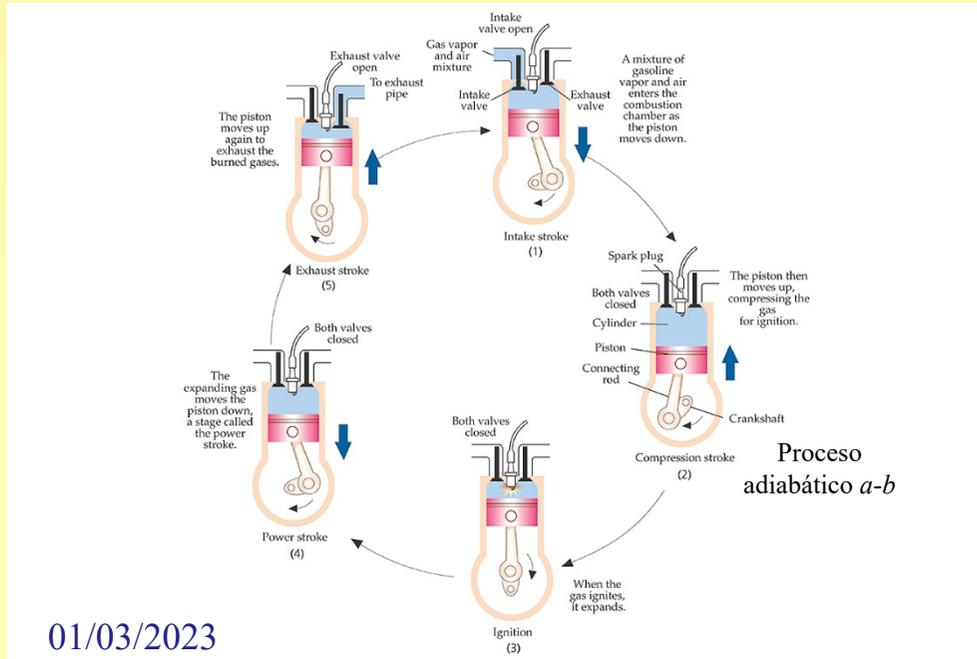
01/03/2023

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.

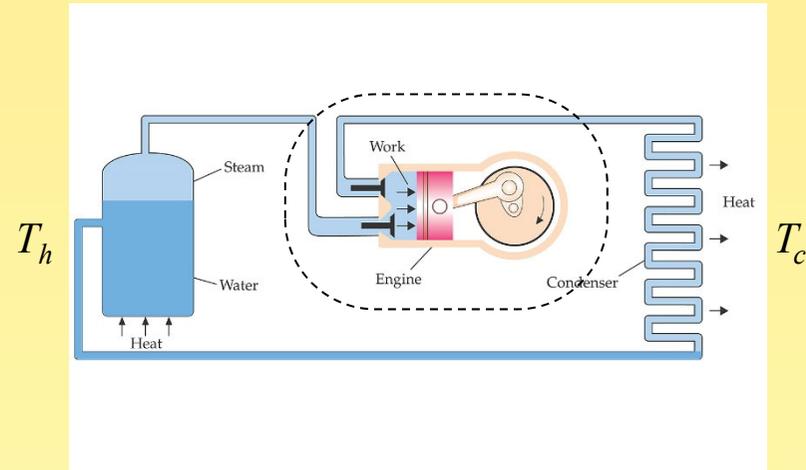
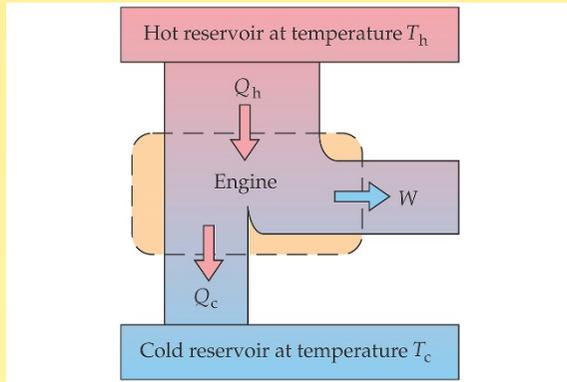


Ciclo de Otto correspondiente a una máquina de combustión interna. La mezcla de aire-gasolina entra en *a* y se comprime adiabáticamente hasta *b*. Entonces se calienta (por combustión) a volumen constante hasta *c*. La fase de potencia está representada por la expansión adiabática desde *c* a *d*. El enfriamiento a volumen constante desde *d* a *a* representa la expulsión de los gases quemados y la admisión de una nueva mezcla de aire-gasolina.

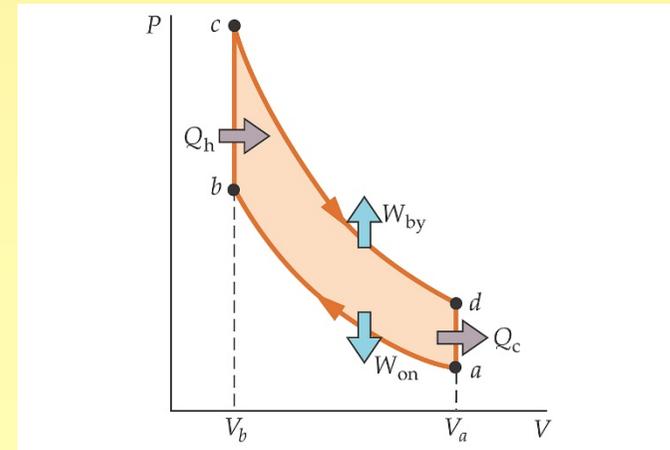
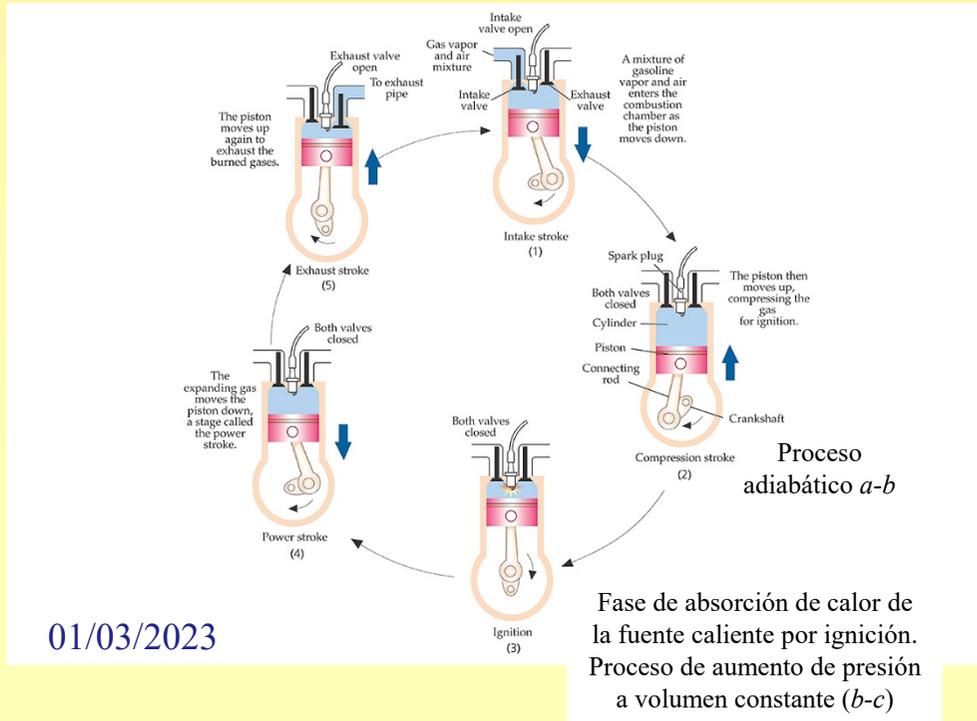
01/03/2023

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.

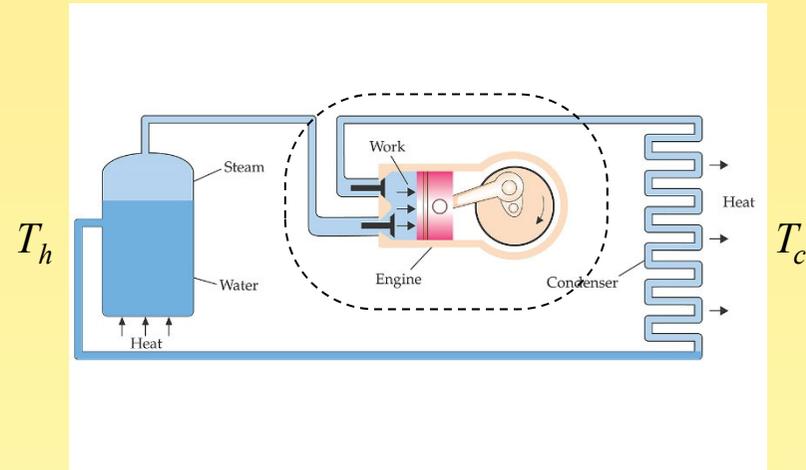
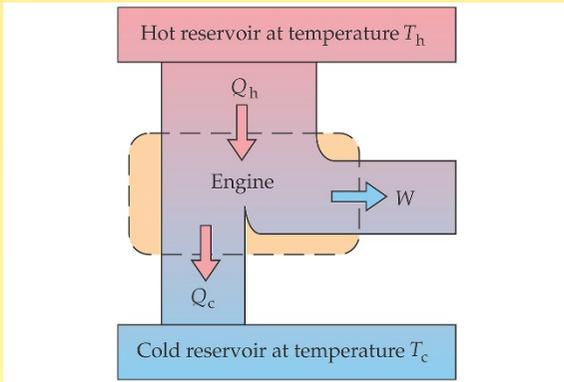


Ciclo de Otto correspondiente a una máquina de combustión interna. La mezcla de aire-gasolina entra en a y se comprime adiabáticamente hasta b . Entonces se calienta (por combustión) a volumen constante hasta c . La fase de potencia está representada por la expansión adiabática desde c a d . El enfriamiento a volumen constante desde d a a representa la expulsión de los gases quemados y la admisión de una nueva mezcla de aire-gasolina.

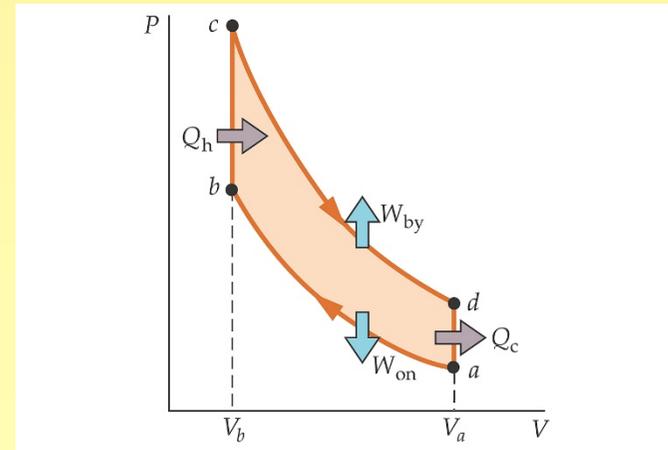
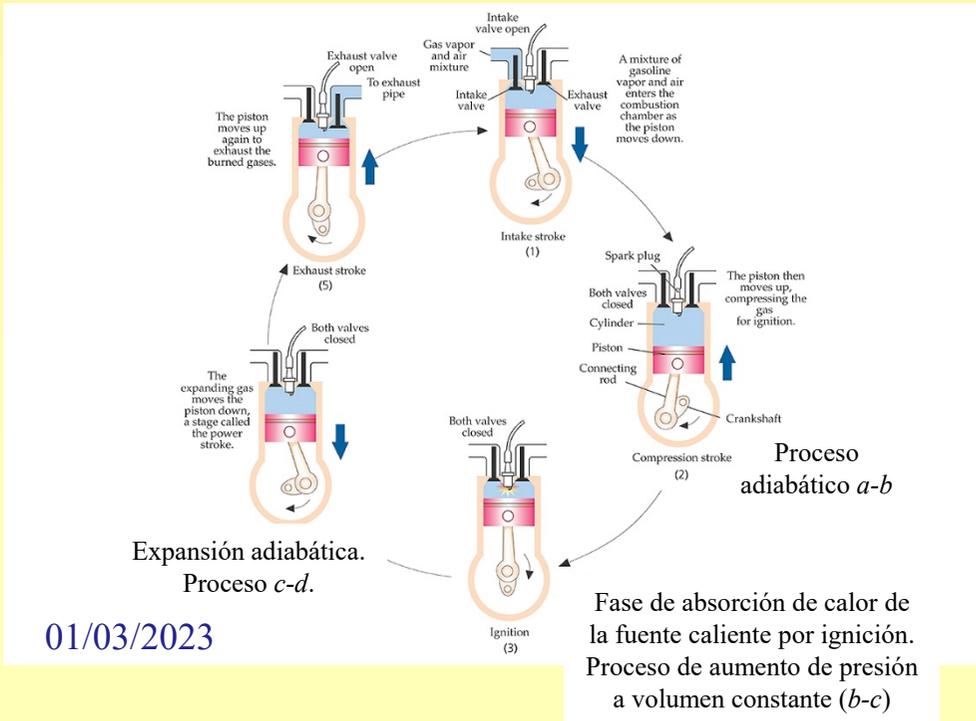
01/03/2023

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



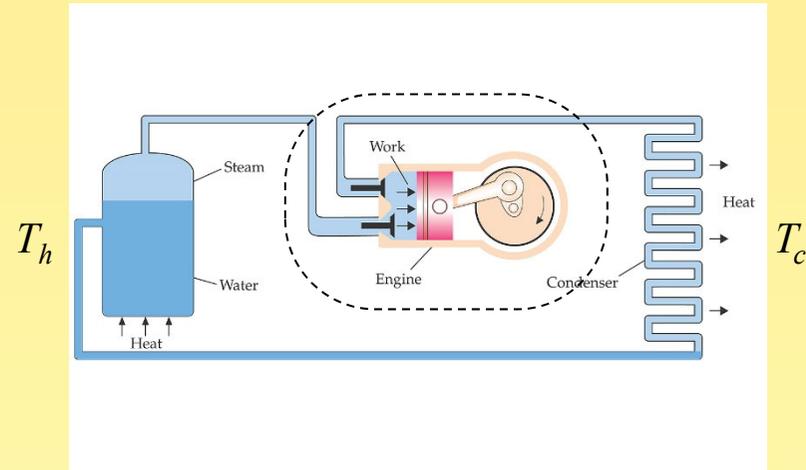
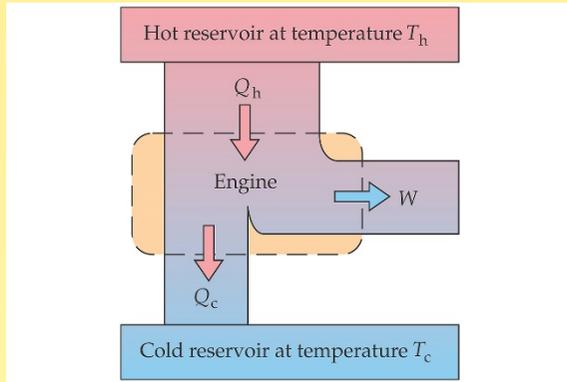
Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.



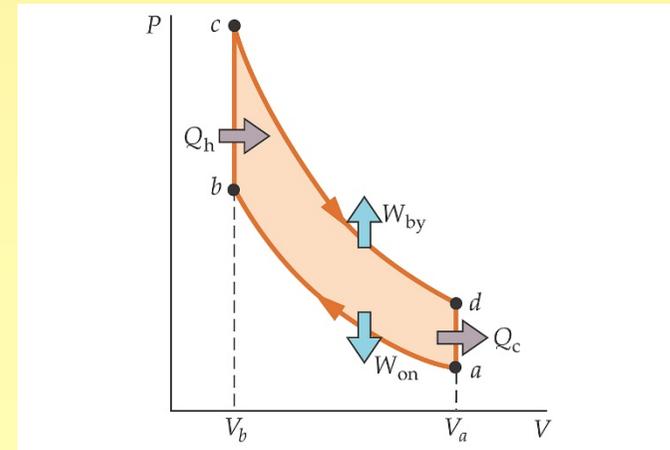
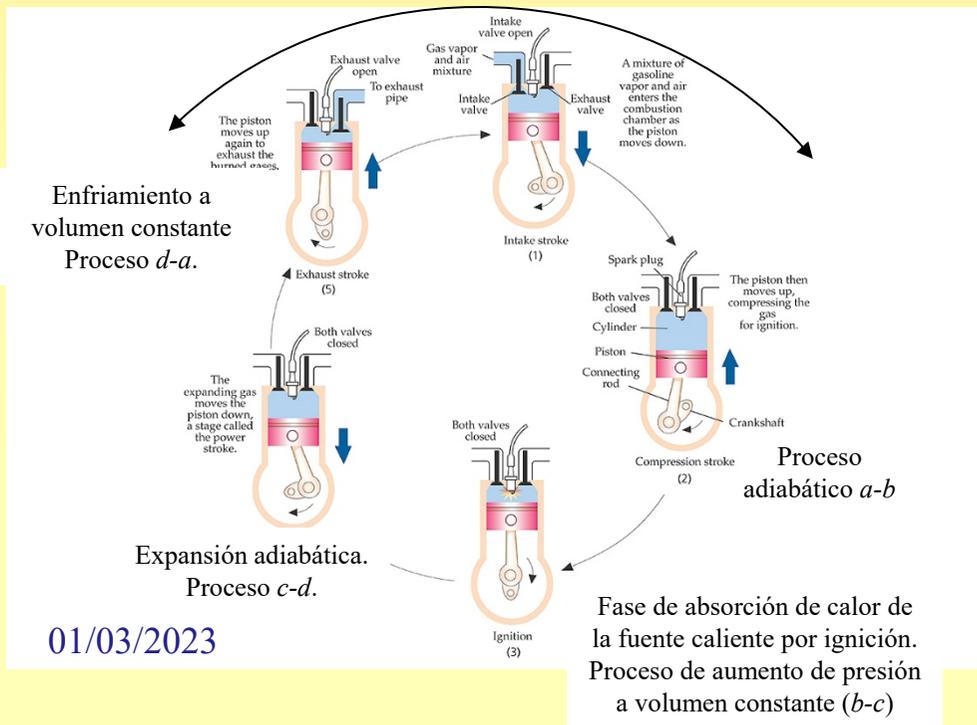
Ciclo de Otto correspondiente a una máquina de combustión interna. La mezcla de aire-gasolina entra en a y se comprime adiabáticamente hasta b . Entonces se calienta (por combustión) a volumen constante hasta c . La fase de potencia esta representada por la expansión adiabática desde c a d . El enfriamiento a volumen constante desde d a a representa la expulsión de los gases quemados y la admisión de una nueva mezcla de aire-gasolina.

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.

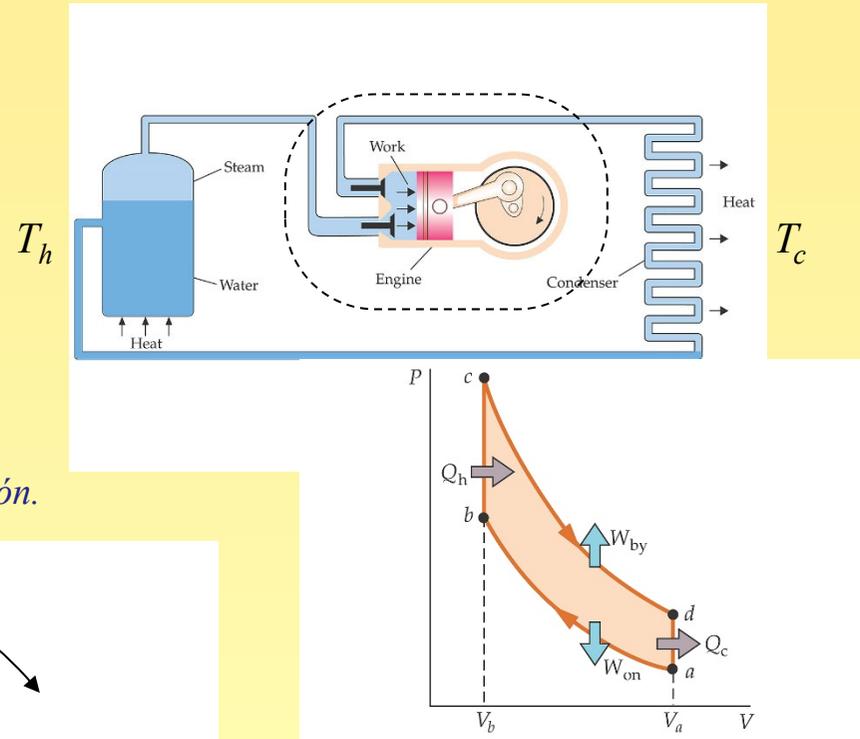
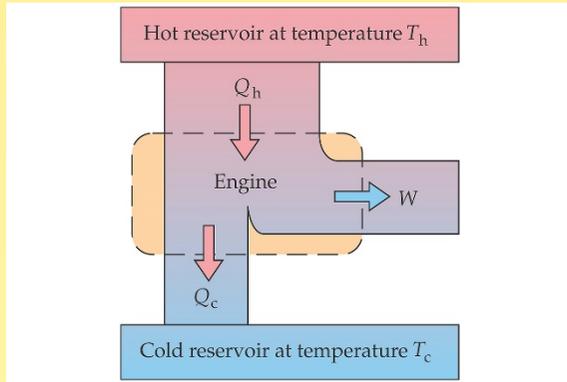


Ciclo de Otto correspondiente a una máquina de combustión interna. La mezcla de aire-gasolina entra en *a* y se comprime adiabáticamente hasta *b*. Entonces se calienta (por combustión) a volumen constante hasta *c*. La fase de potencia está representada por la expansión adiabática desde *c* a *d*. El enfriamiento a volumen constante desde *d* a *a* representa la expulsión de los gases quemados y la admisión de una nueva mezcla de aire-gasolina.

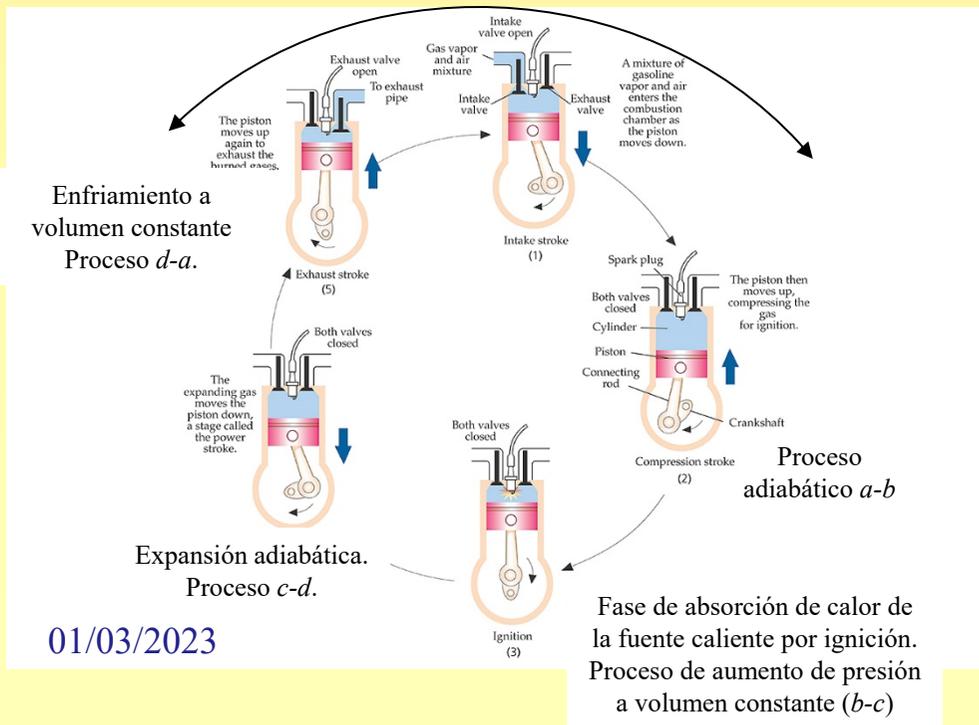
01/03/2023

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

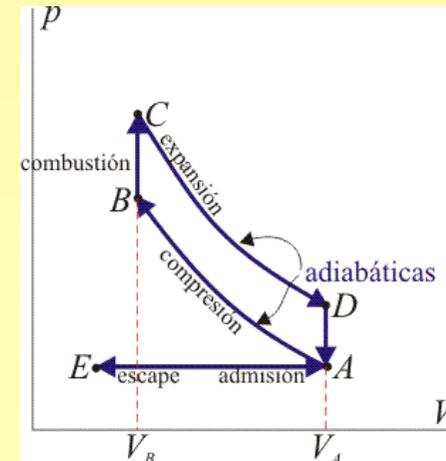
Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.

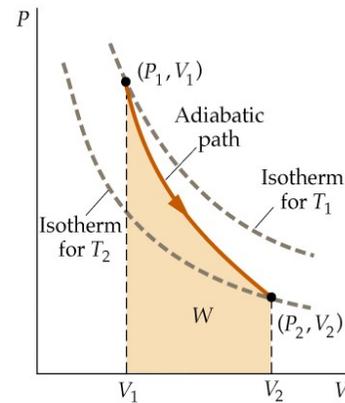
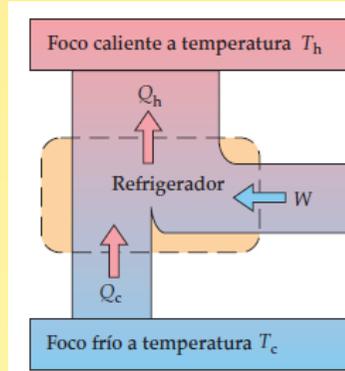


En realidad un diagrama PV más fiel del proceso sería.



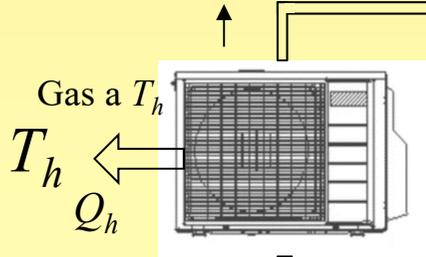
Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de aire acondicionado.



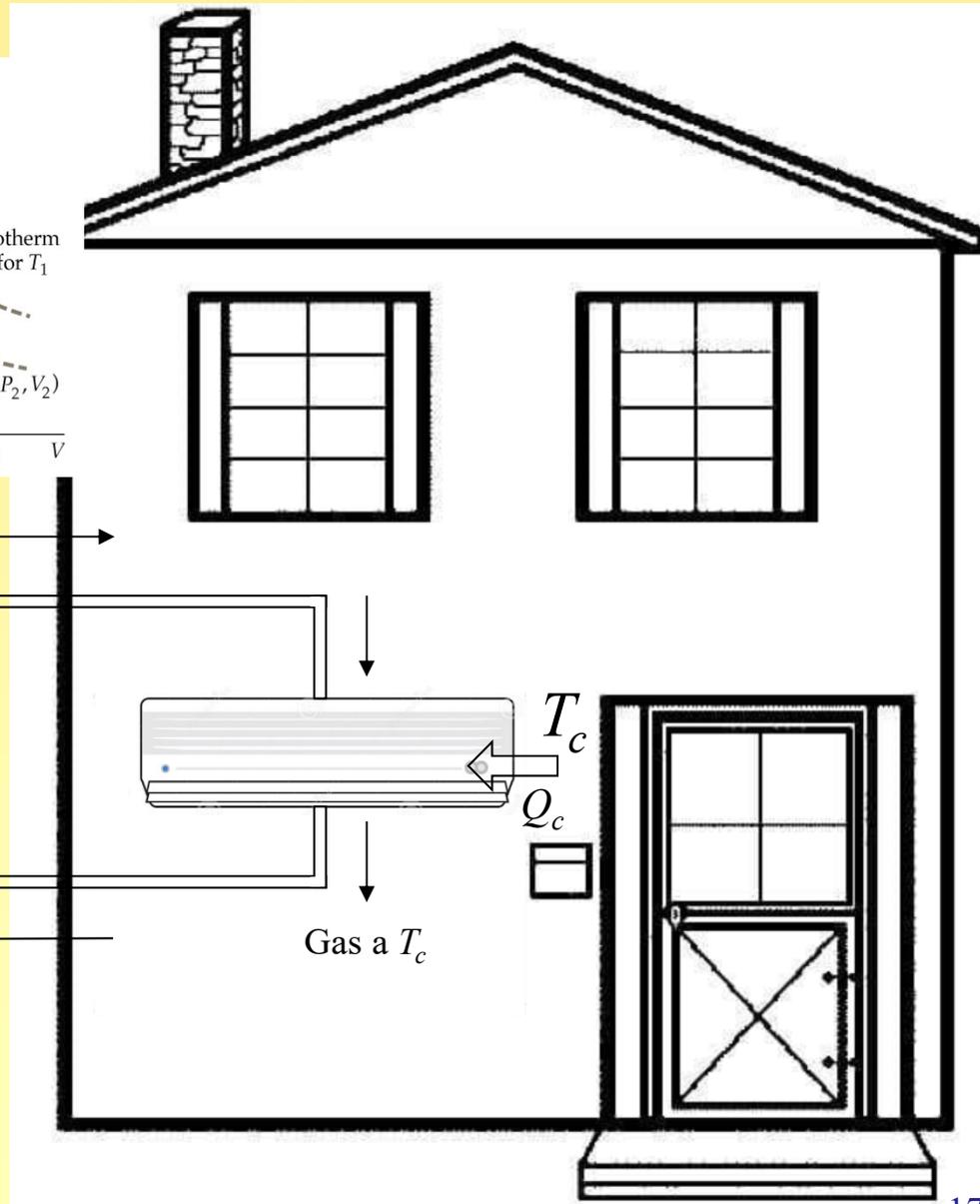
Descompresión del gas

Disminución de su temperatura a $T_l < T_c$



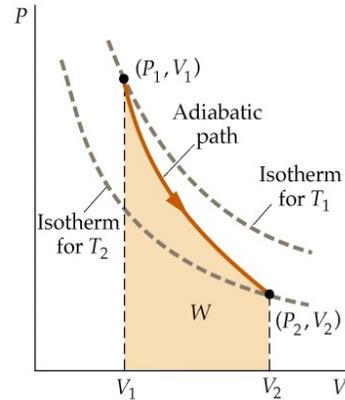
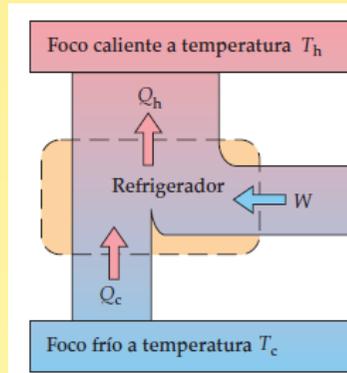
Compresión del gas

Aumento de su temperatura a $T_f > T_h$



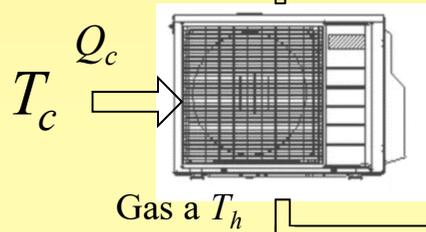
Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplos de máquinas térmicas: Bomba de calor.



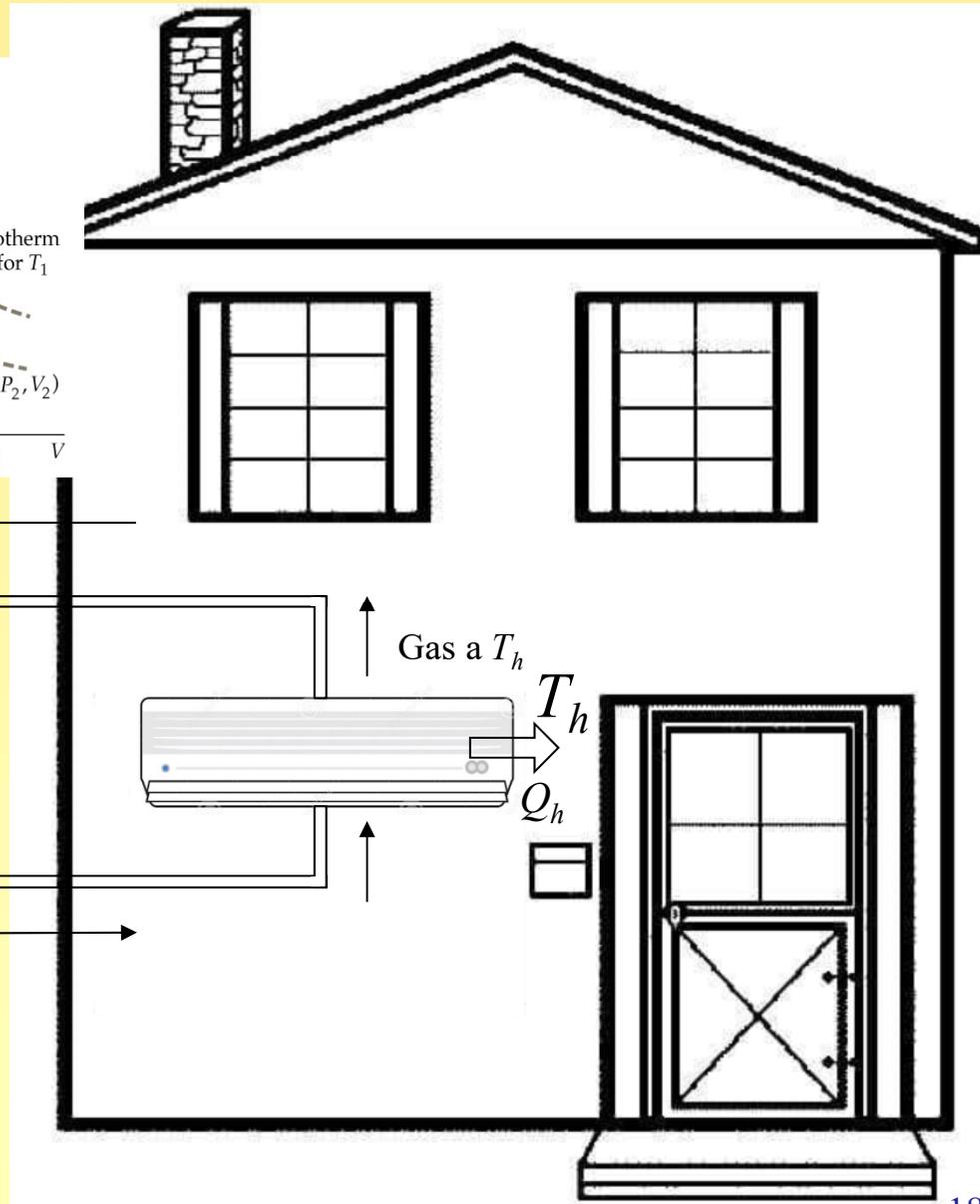
Descompresión del gas

Disminución de su temperatura a $T_l < T_c$



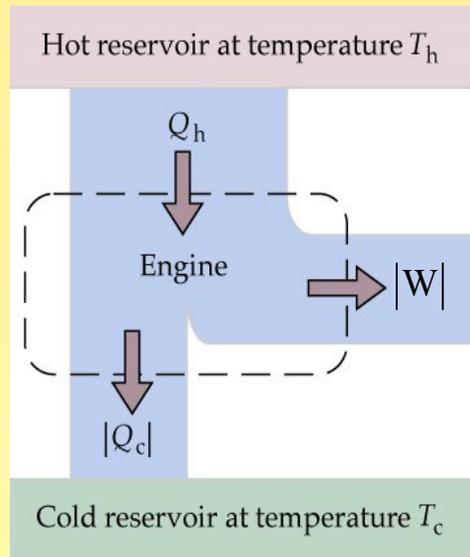
Compresión del gas

Aumento de su temperatura a $T_f > T_h$

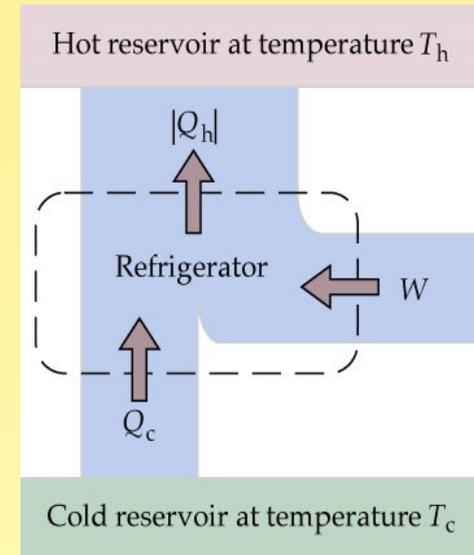


Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Tipos de máquinas térmicas.



Motor térmico



Frigorífico o bomba de calor

De forma básica existen tres tipos de máquinas térmicas:

1. Motores térmicos: en los que se trata de maximizar el trabajo extraído de la máquina frente al calor absorbido de la fuente caliente.
2. Máquinas Frigoríficas: en las que se trata de maximizar el calor absorbido de la fuente fría frente al trabajo utilizado.
3. Bombas de calor: en las que se trata de maximizar el calor cedido a la fuente caliente frente al trabajo utilizado.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio térmico entre sí.*



Dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

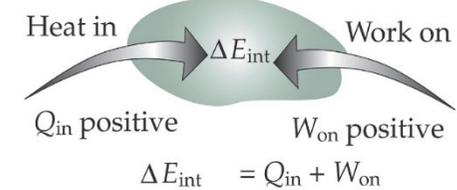
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio térmico entre sí. \Rightarrow Dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Lev de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema mas el trabajo realizado sobre el sistema. \Rightarrow Existencia de una función de estado que llamamos energía interna.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{int} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{int} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{int} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{int} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2}R; \quad c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V / R	c'_P / R	$\frac{c'_P - c'_V}{R}$
Monoatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

Capacidades caloríficas:

Sólidos y líquidos

$$Q = nc' \Delta T$$

Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}; \quad C_P = C_V + P \frac{dV}{dT}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

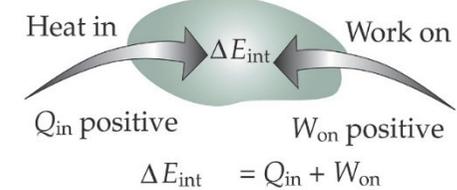
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio térmico entre sí. \Rightarrow Dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema mas el trabajo realizado sobre el sistema. \Rightarrow Existencia de una función de estado que llamamos energía interna.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

Capacidades caloríficas: *Sólidos y líquidos* $Q = nc' \Delta T$ *Gases:* $C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}$; $C_P = C_V + P \frac{dV}{dT}$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2} R; \quad c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V / R	c'_P / R	$\frac{c'_P - c'_V}{R}$
Monoatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica:

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica
No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

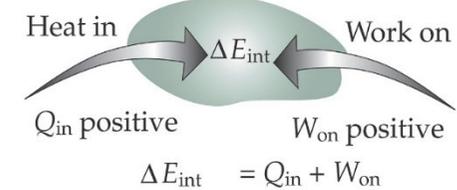
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio térmico entre sí. \Rightarrow Dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema mas el trabajo realizado sobre el sistema. \Rightarrow Existencia de una función de estado que llamamos energía interna.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2}R; \quad c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V / R	c'_P / R	(c'_P - c'_V) / R
Monoatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}$; $C_P = C_V + P \frac{dV}{dT}$

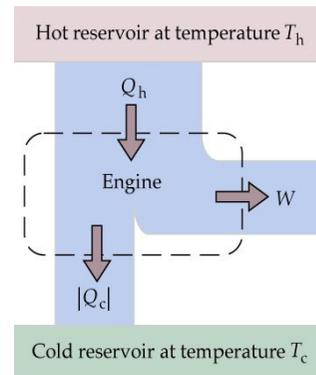
TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica:

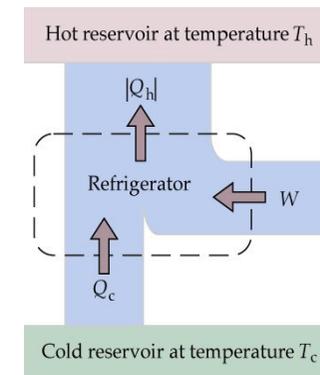
Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica
No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas:



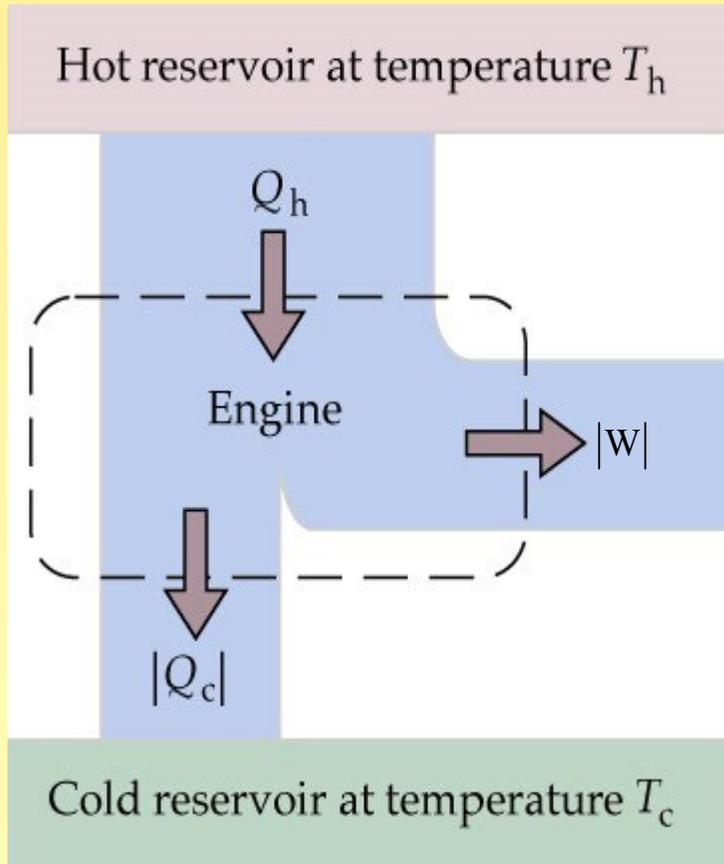
Motores



Frigoríficos y bombas de calor

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Motor Térmico.



Aplicación del Primer Principio de la Termodinámica.

La variación de energía interna en un ciclo es cero y por tanto

$$Q = Q_h - |Q_c| = \Delta E_{\text{int}} - W = |W|$$

$$W < 0$$

Rendimiento del motor térmico.

$$\varepsilon = \frac{|W|}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \Rightarrow \varepsilon < 1$$

$$\varepsilon_{\%} = 100 \left(1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \right) \Rightarrow \varepsilon < 100\%$$

Enunciado de Kelvin

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de la máquina térmica

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

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplo.- Una máquina térmica absorbe 200 J de calor de un foco caliente, realiza trabajo y cede 160 J a un foco frío. ¿Cuál es su rendimiento?

Ejemplo.- Una máquina térmica absorbe 200 J de calor de un foco caliente, realiza trabajo y cede 160 J a un foco frío. ¿Cuál es su rendimiento?

1. Puesto que se absorbe calor de la fuente caliente y se cede calor a la fuente fría estamos hablando de un motor térmico.
2. Utilizando el Primer Principio de la Termodinámica llegamos a que:

Ejemplo.- Una máquina térmica absorbe 200 J de calor de un foco caliente, realiza trabajo y cede 160 J a un foco frío. ¿Cuál es su rendimiento?

1. Puesto que se absorbe calor de la fuente caliente y se cede calor a la fuente fría estamos hablando de un motor térmico.
2. Utilizando el Primer Principio de la Termodinámica llegamos a que:

$$|W| = |Q| = Q_h - |Q_c| = 40$$

Ejemplo.- Una máquina térmica absorbe 200 J de calor de un foco caliente, realiza trabajo y cede 160 J a un foco frío. ¿Cuál es su rendimiento?

1. Puesto que se absorbe calor de la fuente caliente y se cede calor a la fuente fría estamos hablando de un motor térmico.
2. Utilizando el Primer Principio de la Termodinámica llegamos a que:

$$|W| = |Q| = Q_h - |Q_c| = 40$$

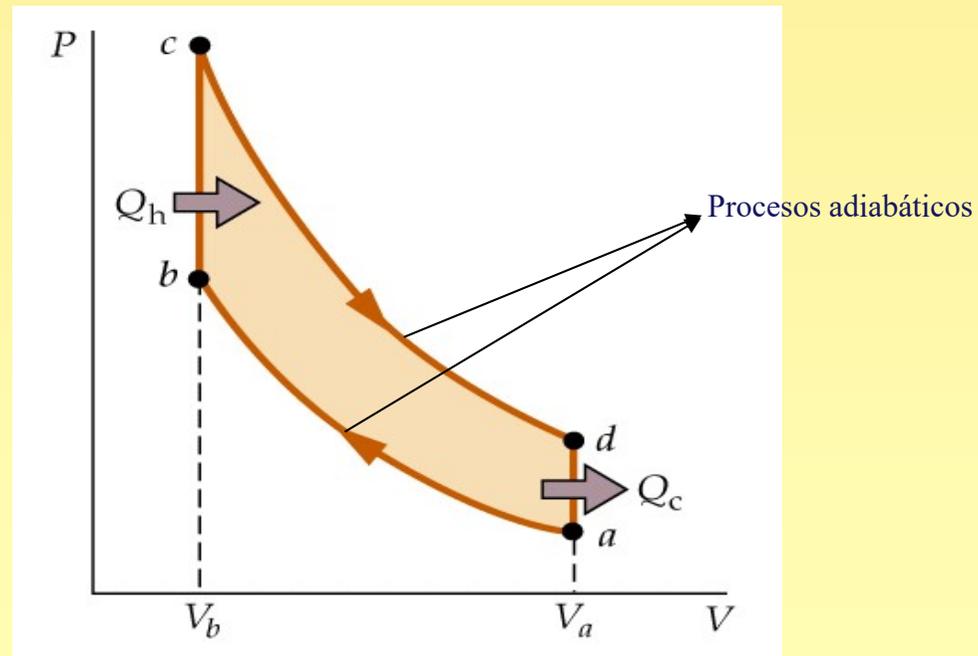
3. Por definición, el rendimiento es:

$$\varepsilon = \frac{40}{200} = 0.2 \Rightarrow \varepsilon_{\%} = 20\%$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Ejemplo.- (a).- Determinar el rendimiento del ciclo de Otto indicado en la figura.

(b).- Expresar la respuesta en función del cociente de volúmenes $V_d/V_b = V_d/V_c$.

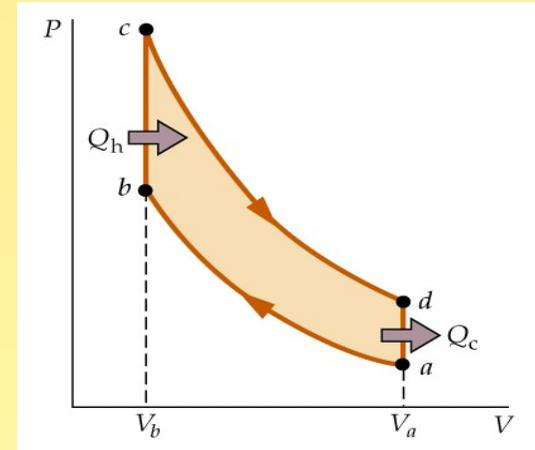


Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

- Ejemplo.-** (a).- Determinar el rendimiento del ciclo de Otto indicado en la figura.
(b).- Expresar la respuesta en función del cociente de volúmenes $V_d/V_b = V_d/V_c$.

1. El calor se absorbe y se cede en los procesos a volumen constante y es igual a la variación de la energía interna

$$\left. \begin{aligned} Q_{bc} &= \frac{g}{2} nR(T_c - T_b) > 0 \\ Q_{da} &= \frac{g}{2} nR(T_a - T_d) < 0 \end{aligned} \right| \Rightarrow \varepsilon = 1 - \frac{|Q_{da}|}{Q_{bc}} = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b}$$



Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

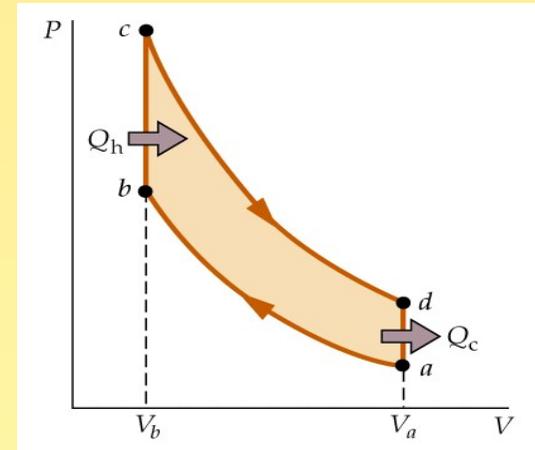
- Ejemplo.-** (a).- Determinar el rendimiento del ciclo de Otto indicado en la figura.
 (b).- Expresar la respuesta en función del cociente de volúmenes $V_d/V_b = V_d/V_c$.

1. El calor se absorbe y se cede en los procesos a volumen constante y es igual a la variación de la energía interna

$$\left. \begin{aligned} Q_{bc} &= \frac{g}{2} nR(T_c - T_b) > 0 \\ Q_{da} &= \frac{g}{2} nR(T_a - T_d) < 0 \end{aligned} \right| \Rightarrow \varepsilon = 1 - \frac{|Q_{da}|}{Q_{bc}} = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b}$$

2. Por otro lado, sabemos que por ser a-b y c-d procesos adiabáticos:

$$\left. \begin{aligned} T_a V_a^{\gamma-1} &= T_b V_b^{\gamma-1} \\ T_c V_c^{\gamma-1} &= T_d V_d^{\gamma-1} \end{aligned} \right| \Rightarrow \left. \begin{aligned} T_b &= T_a \left(\frac{V_a}{V_b} \right)^{\gamma-1} \\ T_c &= T_d \left(\frac{V_d}{V_c} \right)^{\gamma-1} \end{aligned} \right| \Rightarrow \frac{T_b}{T_c} = \frac{T_a}{T_d}$$



Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

- Ejemplo.-** (a).- Determinar el rendimiento del ciclo de Otto indicado en la figura.
 (b).- Expresar la respuesta en función del cociente de volúmenes $V_d/V_b = V_d/V_c$.

1. El calor se absorbe y se cede en los procesos a volumen constante y es igual a la variación de la energía interna

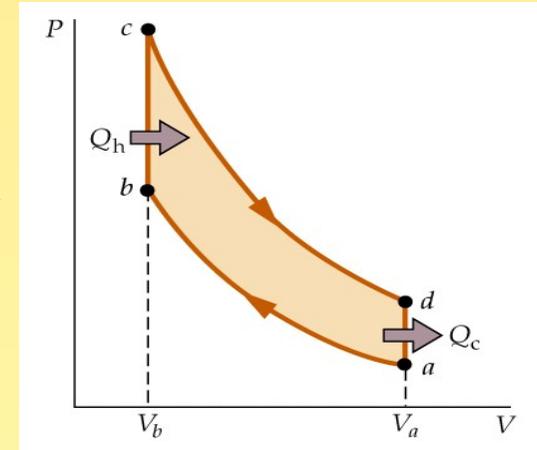
$$\left. \begin{aligned} Q_{bc} &= \frac{g}{2} nR(T_c - T_b) > 0 \\ Q_{da} &= \frac{g}{2} nR(T_a - T_d) < 0 \end{aligned} \right| \Rightarrow \varepsilon = 1 - \frac{|Q_{da}|}{Q_{bc}} = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b}$$

2. Por otro lado, sabemos que por ser a-b y c-d procesos adiabáticos:

$$\left. \begin{aligned} T_a V_a^{\gamma-1} &= T_b V_b^{\gamma-1} \\ T_c V_c^{\gamma-1} &= T_d V_d^{\gamma-1} \end{aligned} \right| \Rightarrow \left. \begin{aligned} T_b &= T_a \left(\frac{V_a}{V_b} \right)^{\gamma-1} \\ T_c &= T_d \left(\frac{V_d}{V_c} \right)^{\gamma-1} \end{aligned} \right| \Rightarrow \frac{T_b}{T_c} = \frac{T_a}{T_d}$$

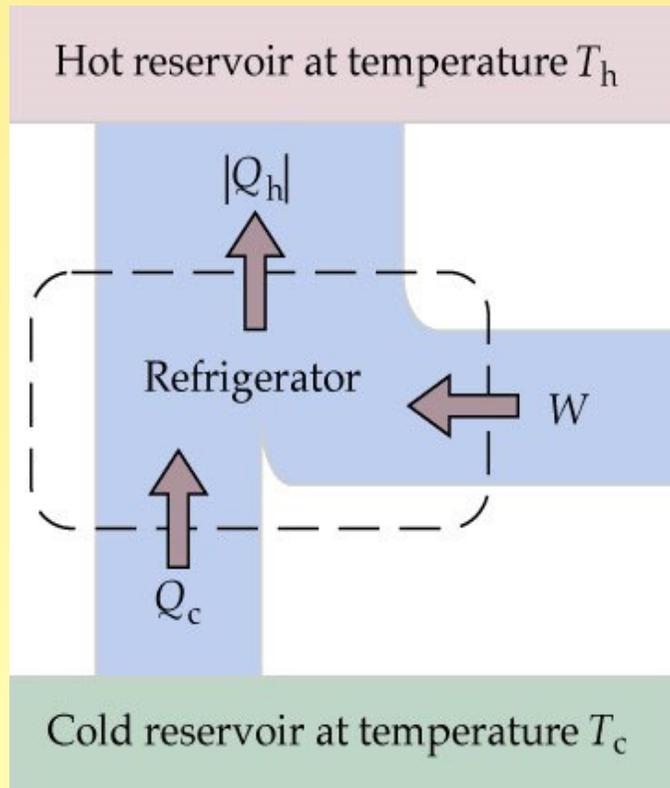
3. Utilizando este resultado en la expresión del punto 1 llegamos a:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{T_c} \frac{T_d - T_a}{1 - \frac{T_a}{T_d}} = 1 - \frac{T_d}{T_c} = 1 - \left(\frac{V_c}{V_d} \right)^{\gamma-1}$$



Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Refrigerador.



Aplicación del Primer Principio de la Termodinámica.

La variación de energía interna en un ciclo es cero y por tanto

$$Q = Q_c - |Q_h| = \Delta U - W = -W < 0$$

$$W > 0$$

$$0 < Q_c < |Q_h| \Rightarrow \frac{|Q_h|}{Q_c} > 1 \Rightarrow 0 < \frac{|Q_h|}{Q_c} - 1$$

Coefficiente de eficacia.

$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{|Q_h| - Q_c} = \frac{1}{\frac{|Q_h| - Q_c}{Q_c}} = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1} > 0$$

Enunciado de Clausius

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Enunciado del refrigerador

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

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Media hora antes de que empiecen a llegar los invitados nos damos cuenta de que hemos olvidado comprar cubitos de hielo para las bebidas. Rápidamente ponemos un litro de agua a 10 °C en la bandeja de los cubitos y la colocamos en el congelador. ¿Tendremos a tiempo el hielo para los invitados? En la etiqueta de especificaciones del refrigerador consta que el aparato tiene un coeficiente de eficiencia de 5,5 y una potencia de 550 W. Se estima que solo el 10% de la potencia se emplea en enfriar y congelar el del agua.

$$c_{\text{agua}}=4.18 \text{ KJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}); L_f=333.5 \text{ KJ/Kg}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Media hora antes de que empiecen a llegar los invitados nos damos cuenta de que hemos olvidado comprar cubitos de hielo para las bebidas. Rápidamente ponemos un litro de agua a 10 °C en la bandeja de los cubitos y la colocamos en el congelador. ¿Tendremos a tiempo el hielo para los invitados? En la etiqueta de especificaciones del refrigerador consta que el aparato tiene un coeficiente de eficiencia de 5,5 y una potencia de 550 W. Se estima que solo el 10% de la potencia se emplea en enfriar y congelar el del agua.

$$c_{\text{agua}}=4.18 \text{ KJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}); L_f=333.5 \text{ KJ/Kg}$$

1. El calor que es necesario extraer del agua para que se convierta en hielo será igual a:

$$|Q_c| = mc_{\text{agua}}\Delta T + mL_f = m(c_{\text{agua}}\Delta T + L_f) = 1 \text{ kg}(4.18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}) 10^{\circ}\text{K} + 333.5 \text{ kJ/kg}) = 375.3 \text{ kJ}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Media hora antes de que empiecen a llegar los invitados nos damos cuenta de que hemos olvidado comprar cubitos de hielo para las bebidas. Rápidamente ponemos un litro de agua a 10 °C en la bandeja de los cubitos y la colocamos en el congelador. ¿Tendremos a tiempo el hielo para los invitados? En la etiqueta de especificaciones del refrigerador consta que el aparato tiene un coeficiente de eficiencia de 5,5 y una potencia de 550 W. Se estima que solo el 10% de la potencia se emplea en enfriar y congelar el del agua.

$$c_{\text{agua}}=4.18 \text{ KJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}); L_f=333.5 \text{ KJ/Kg}$$

1. El calor que es necesario extraer del agua para que se convierta en hielo será igual a:

$$|Q_c| = mc_{\text{agua}}\Delta T + mL_f = m(c_{\text{agua}}\Delta T + L_f) = 1 \text{ kg}(4.18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}) 10^{\circ}\text{K} + 333.5 \text{ kJ/kg}) = 375.3 \text{ kJ}$$

2. Dado que la eficiencia de la máquina frigorífica es de 5.5 la cantidad de energía que tendremos que utilizar para extraer esa cantidad de calor será:

$$\eta = \frac{|Q_c|}{W} \Rightarrow W = \frac{|Q_c|}{\eta} = \frac{375.3 \text{ kJ}}{5.5} = 68.24 \text{ kJ}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Media hora antes de que empiecen a llegar los invitados nos damos cuenta de que hemos olvidado comprar cubitos de hielo para las bebidas. Rápidamente ponemos un litro de agua a 10 °C en la bandeja de los cubitos y la colocamos en el congelador. ¿Tendremos a tiempo el hielo para los invitados? En la etiqueta de especificaciones del refrigerador consta que el aparato tiene un coeficiente de eficiencia de 5,5 y una potencia de 550 W. Se estima que solo el 10% de la potencia se emplea en enfriar y congelar el del agua.

$$c_{\text{agua}}=4.18 \text{ KJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}); L_f=333.5 \text{ KJ/Kg}$$

1. El calor que es necesario extraer del agua para que se convierta en hielo será igual a:

$$|Q_c| = mc_{\text{agua}}\Delta T + mL_f = m(c_{\text{agua}}\Delta T + L_f) = 1 \text{ kg}(4.18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}) 10^{\circ}\text{K} + 333.5 \text{ kJ/kg}) = 375.3 \text{ kJ}$$

2. Dado que la eficiencia de la máquina frigorífica es de 5.5 la cantidad de energía que tendremos que utilizar para extraer esa cantidad de calor será:

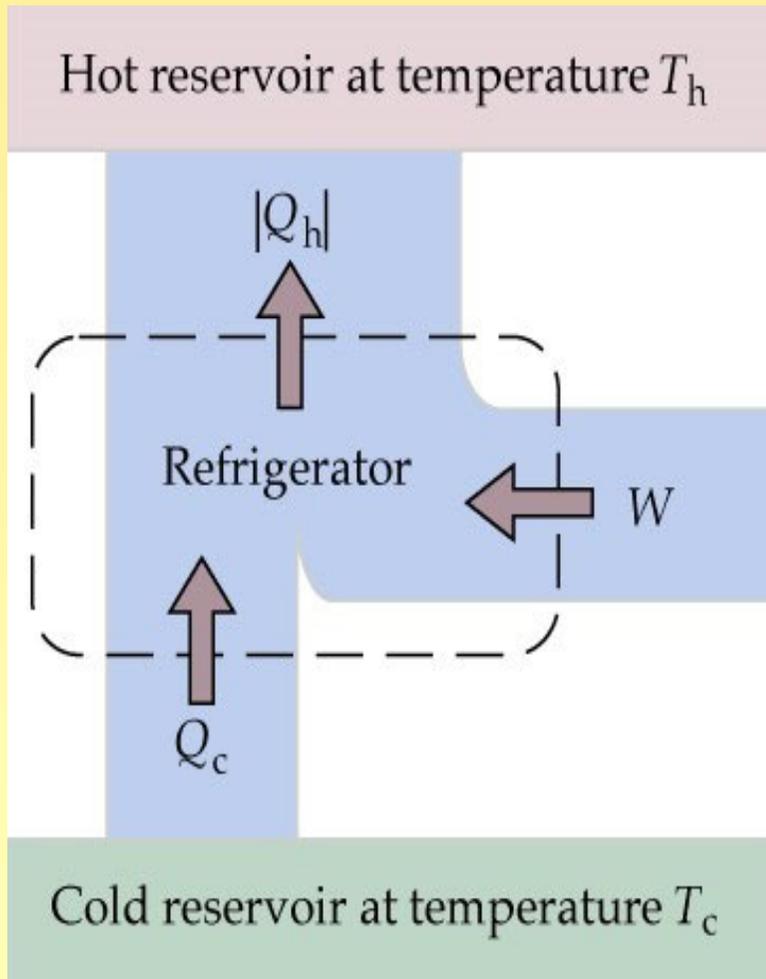
$$\eta = \frac{|Q_c|}{W} \Rightarrow W = \frac{|Q_c|}{\eta} = \frac{375.3 \text{ kJ}}{5.5} = 68.24 \text{ kJ}$$

3. Puesto que sólo se utiliza el 10% de la potencia consumida por el frigorífico para producir frío, el tiempo que tarda en generar el trabajo necesario para congelar el agua será:

$$\frac{10\cdot P}{100} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{100\cdot\Delta E}{10\cdot P} = \frac{100\cdot W}{10\cdot P} = \frac{10\cdot 68.24 \text{ kJ}}{550 \text{ J/s}} = 1240.66 \text{ s} = 20'40''$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas y el segundo principio de la Termodinámica.

Bomba de calor.



Aplicación del Primer Principio de la Termodinámica.

La variación de energía interna en un ciclo es cero y por tanto

$$Q = Q_c - |Q_h| = \Delta U - W = -W \quad \left| \begin{array}{l} \\ W > 0 \end{array} \right. \Rightarrow |Q_h| - Q_c = W \Rightarrow$$

$$W > 0 \Rightarrow |Q_h| - Q_c > 0 \Rightarrow 0 < Q_c < |Q_h| \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0 < \frac{Q_c}{|Q_h|} < 1 \Rightarrow -1 < \frac{Q_c}{|Q_h|} - 1 < 0 \Rightarrow$$

$$0 < 1 - \frac{Q_c}{|Q_h|} < 1$$

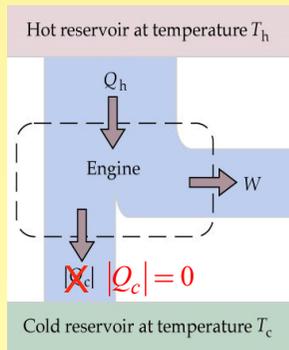
Coefficiente de eficacia.

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

Equivalencia entre los dos enunciados del segundo principio de la termodinámica.

Los dos enunciados anteriores (Kelvin y Clausius) del segundo principio de la termodinámica que parecen muy diferentes, son en realidad equivalentes. Puede demostrarse esta equivalencia comprobando que si se supone falso uno cualquiera de ellos, el otro debe ser también falso.

a).- Si suponemos falso el enunciado de Kelvin \implies Se podría construir un motor ideal.

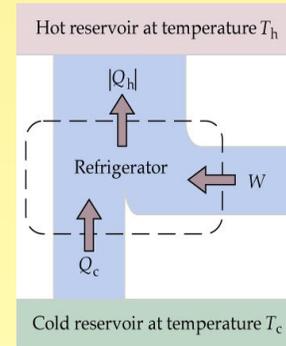


$$|Q_c| = 0$$

$$Q_h = |W| > 0$$

Motor ideal

Considerando un frigorífico real.

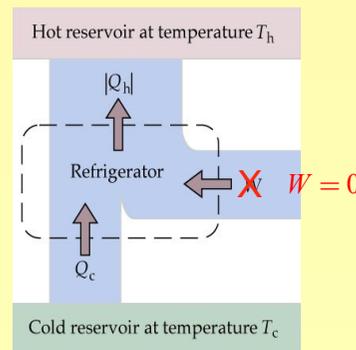


$$Q_h < 0$$

$$W > 0$$

Frigorífico real

Y uniendo este frigorífico real al motor ideal podríamos construir un frigorífico ideal



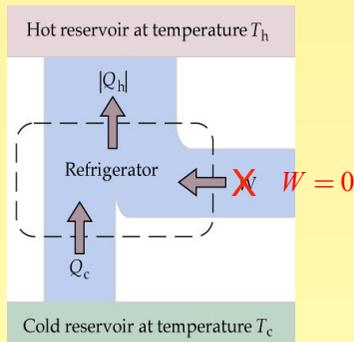
Frigorífico ideal

Por lo tanto el enunciado de Clausius también es necesariamente falso.

Equivalencia entre los dos enunciados del segundo principio de la termodinámica.

Los dos enunciados anteriores (Kelvin y Clausius) del segundo principio de la termodinámica que parecen muy diferentes, son en realidad equivalentes. Puede demostrarse esta equivalencia comprobando que si se supone falso uno cualquiera de ellos, el otro debe ser también falso.

b).- Si suponemos falso el enunciado de Clausius \Rightarrow Se podría construir un frigorífico ideal.

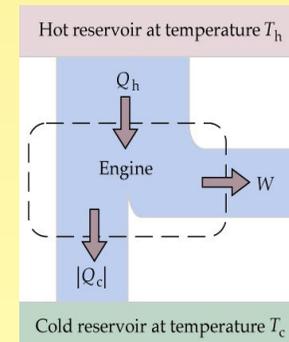


$$Q_c > 0$$

$$W = 0$$

Frigorífico ideal

Considerando un motor real.

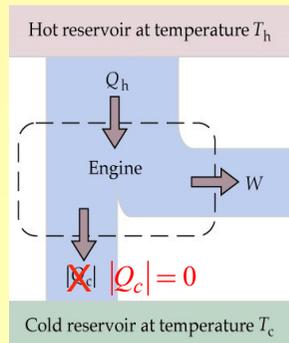


$$Q_c < 0$$

$$W < 0$$

Motor real

Y uniendo este motor real al frigorífico ideal podríamos construir un motor ideal



$$|Q_c| = 0$$

$$Q_h = W > 0$$

Motor ideal

Por lo tanto el enunciado de Kelvin también es necesariamente falso.

ESQUEMA DE DESARROLLO

- ~~1.- Introducción.~~
- ~~2.- Máquinas térmicas y el segundo principio de la termodinámica.~~
- 3.- Ciclo y teorema de Carnot. La máquina de Carnot.
- 4.- Escala termodinámica de temperaturas.
- 5.- Entropía. Irreversibilidad y desorden.

Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Hemos visto que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, es imposible que un motor térmico que funciona entre dos focos térmicos tenga un rendimiento del 100%. Entonces, ¿cuál es el rendimiento máximo posible para esta máquina? Esta cuestión fue contestada por un joven ingeniero francés en 1824, Sadi Carnot, antes de que se hubieran formulado ni el primer principio ni el segundo principio de la termodinámica. Carnot dedujo que una máquina reversible es la máquina más eficiente que puede operar entre dos focos térmicos determinados. Este resultado se conoce como el teorema de Carnot:

Enunciado del teorema de Carnot

*Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.*

Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Hemos visto que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, es imposible que un motor térmico que funciona entre dos focos térmicos tenga un rendimiento del 100%. Entonces, ¿cuál es el rendimiento máximo posible para esta máquina? Esta cuestión fue contestada por un joven ingeniero francés en 1824, Sadi Carnot, antes de que se hubieran formulado ni el primer principio ni el segundo principio de la termodinámica. Carnot dedujo que una máquina reversible es la máquina más eficiente que puede operar entre dos focos térmicos determinados. Este resultado se conoce como el teorema de Carnot:

Enunciado del teorema de Carnot

*Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.*

Máquina térmica reversible

*Máquina térmica reversible es aquella máquina térmica en la que todos los **procesos son reversibles***

Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Hemos visto que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, es imposible que un motor térmico que funciona entre dos focos térmicos tenga un rendimiento del 100%. Entonces, ¿cuál es el rendimiento máximo posible para esta máquina? Esta cuestión fue contestada por un joven ingeniero francés en 1824, Sadi Carnot, antes de que se hubieran formulado ni el primer principio ni el segundo principio de la termodinámica. Carnot dedujo que una máquina reversible es la máquina más eficiente que puede operar entre dos focos térmicos determinados. Este resultado se conoce como el teorema de Carnot:

Enunciado del teorema de Carnot

*Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.*

Máquina térmica reversible

*Máquina térmica reversible es aquella máquina térmica en la que todos los **procesos son reversibles***

Proceso reversible

Se dice que un proceso es reversible cuando se puede hacer que el sistema vuelva a su estado original, sin variación neta del sistema ni del medio

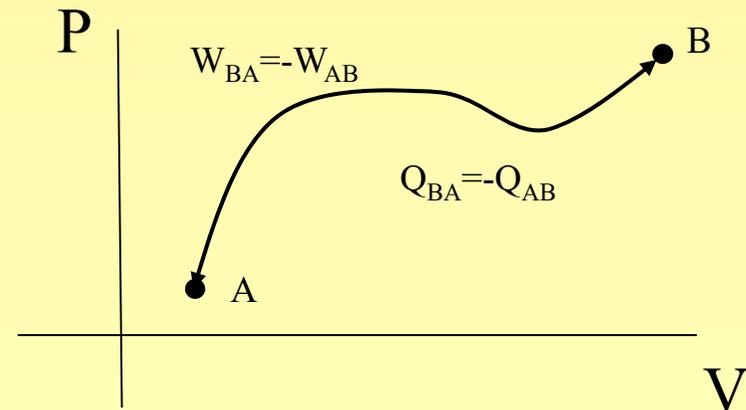
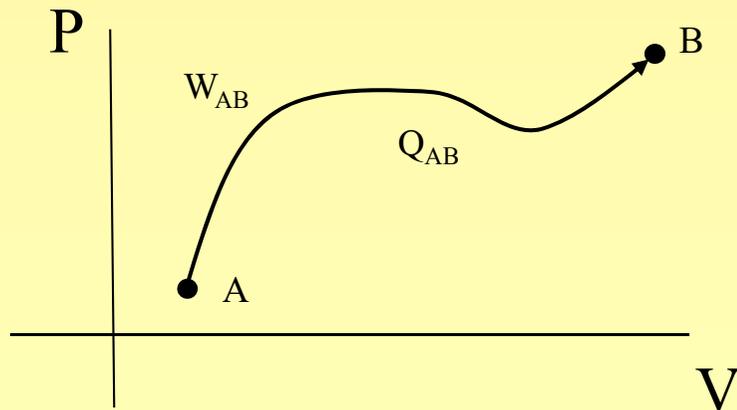
Procesos reversibles e irreversibles

Si no hay ninguna maquina que pueda tener un rendimiento mayor que la maquina de Carnot, se deduce que todas las maquinas reversibles que funcionen entre los dos mismos focos deben tener el mismo rendimiento. Este rendimiento, que se denomina rendimiento de Carnot, debe ser independiente de las sustancias de trabajo que empleen las maquinas y depende únicamente de la temperatura de los focos.

Examinemos lo que hace que un proceso sea reversible o irreversible.

Proceso reversible

Se dice que un proceso es reversible cuando se puede hacer que el sistema vuelva a su estado original, sin variación neta del sistema ni del medio



RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

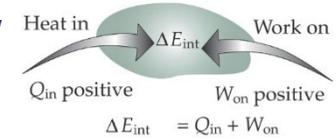
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

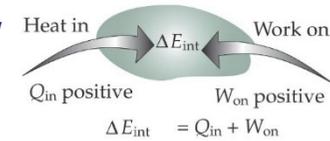
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

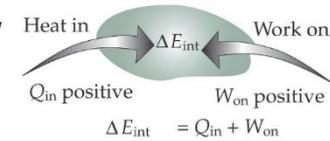
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

Capacidades caloríficas: *Sólidos y líquidos* $Q = nc'\Delta T$ *Gases:* $C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

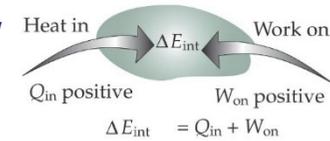
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobárico

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

$$C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}; C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2}R; c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V/R	c'_P/R	$\frac{c'_P - c'_V}{R}$
Monatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

Capacidades caloríficas:

Sólidos y líquidos

$$Q = nc'\Delta T$$

Gases:

$$C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}; C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

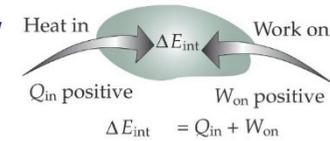
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{int} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{int} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$\Delta E_{int} = 0$$

$$Q = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{int} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

$$C_V = \frac{dE_{int}}{dT}; \quad C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2}R; \quad c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V/R	c'_P/R	$\frac{c'_P - c'_V}{R}$
Monatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

Capacidades caloríficas:

Sólidos y líquidos

$$Q = nc'\Delta T$$

Gases:

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica:

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

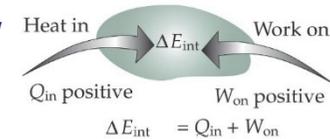
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

$$C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}; \quad C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2}R; \quad c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V/R	c'_P/R	$\frac{c'_P - c'_V}{R}$
Monatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

Capacidades caloríficas:

Sólidos y líquidos

$$Q = nc'\Delta T$$

Gases:

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica:

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

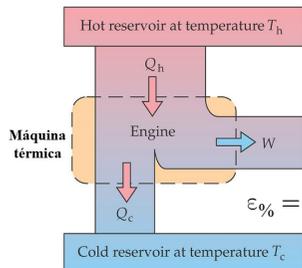
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Motor térmico

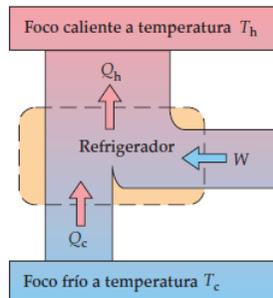


Rendimiento del motor térmico

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

$$\varepsilon_{\%} = 100 \left(1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \right) \Rightarrow \varepsilon < 100\%$$

Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

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

Eficiencia bomba calor

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

01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

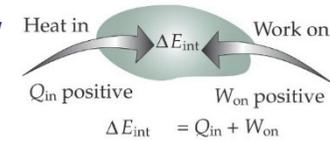
Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$

Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal:

proceso isocórico

$$W_{\text{sobre el gas}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

$$Q = \frac{gV_1}{2}(P_2 - P_1)$$

proceso isobaro

$$W_{\text{sobre el gas}} = -P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{gP}{2}(V_2 - V_1)$$

$$Q = \frac{(g+2)P}{2}(V_2 - V_1)$$

Proceso isotérmico

$$W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$Q = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Proceso adiabático

$$W_{\text{sobre el gas}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{g}{2}(P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$Q = 0$$

$$C_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT}; C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$$

Gases ideales:

$$c'_V = \frac{g}{2}R; c'_P - c'_V = R$$

Gas	g	c'_V/R	c'_P/R	c'_P - c'_V/R
Monoatómico	3	1.5	2.5	1
Diatómico	5	2.5	3.5	1
Poliatómico	6	3	4	1

Capacidades caloríficas:

Sólidos y líquidos

$$Q = nc'\Delta T$$

Gases:

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica:

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

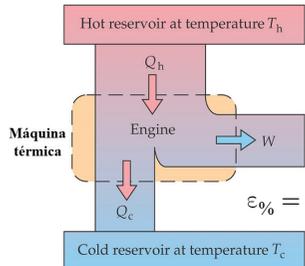
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Motor térmico



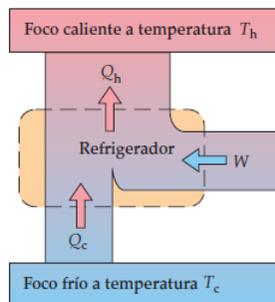
Rendimiento del motor térmico

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

$$\varepsilon_{\%} = 100 \left(1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \right) \Rightarrow \varepsilon < 100\%$$

01/03/2023

Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

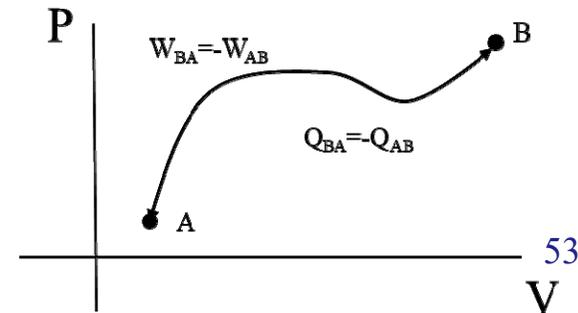
$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1}$$

Eficiencia bomba calor

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

Enunciado del teorema de Carnot

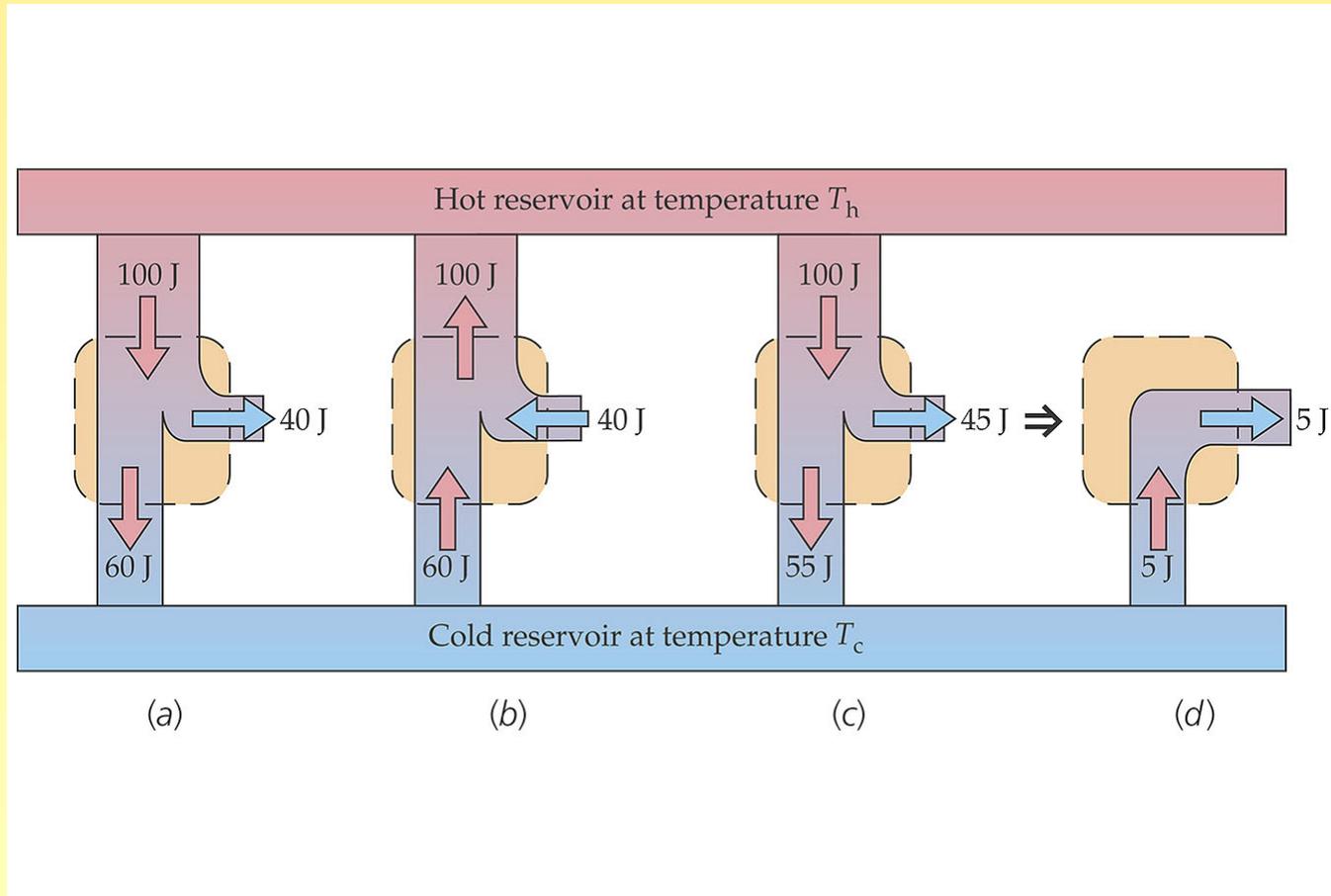
Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.



53
V

Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Demostración del teorema de Carnot



Procesos reversibles e irreversibles

Según esto tenemos los siguientes procesos irreversibles:

1. De acuerdo con el segundo principio, el calor fluye desde objetos calientes hasta objetos fríos y nunca en sentido inverso. Por lo tanto, la conducción de calor de un objeto caliente a uno frío no es reversible.
2. El rozamiento puede transformar trabajo en calor, pero nunca calor en trabajo. La conversión de trabajo en calor por medio del rozamiento no es reversible. El rozamiento y el resto de fuerzas disipativas transforman energía mecánica en energía térmica de manera irreversible.
3. Se presenta un tercer tipo de irreversibilidad cuando un sistema pasa a través de estados de no equilibrio, como, por ejemplo, cuando hay turbulencia en un gas o cuando un gas sufre una explosión. Para que un proceso sea reversible, debe poderse desplazar el sistema hacia el punto inicial en sentido inverso pasando a través de los mismos estados de equilibrio.

A partir de estas consideraciones y de los enunciados del segundo principio de la termodinámica, podemos indicar algunas condiciones que son necesarias para que un proceso sea reversible.

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Condiciones de reversibilidad

Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Todo proceso que viole alguna de las condiciones anteriores es irreversible. La mayoría de los procesos naturales son irreversibles. Para conseguir un proceso reversible, debe tenerse gran cuidado en eliminar el rozamiento y otras fuerzas disipativas y en hacer que el proceso sea cuasiestático. Como esto no puede conseguirse nunca por completo, un proceso reversible es una idealización parecida a la del movimiento sin rozamiento de los problemas de mecánica. Sin embargo, podemos hacer en la práctica que un proceso se aproxime mucho a la reversibilidad.

Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Todo proceso que viole alguna de las condiciones anteriores es irreversible. La mayoría de los procesos naturales son irreversibles. Para conseguir un proceso reversible, debe tenerse gran cuidado en eliminar el rozamiento y otras fuerzas disipativas y en hacer que el proceso sea cuasiestático. Como esto no puede conseguirse nunca por completo, un proceso reversible es una idealización parecida a la del movimiento sin rozamiento de los problemas de mecánica. Sin embargo, podemos hacer en la práctica que un proceso se aproxime mucho a la reversibilidad.

Ahora estamos en condiciones de comprender las características de un ciclo de Carnot, que es un ciclo reversible entre dos focos solamente. Como toda transferencia de calor debe realizarse isotérmicamente para que el proceso sea reversible, la absorción de calor del foco caliente debe realizarse de forma isoterma. El siguiente paso debe ser una expansión adiabática cuasi estática hasta la temperatura más baja del foco frío. A continuación, se cede calor isotérmicamente al foco frío. Finalmente, se produce una compresión adiabática cuasiestática hasta alcanzar la temperatura más alta del foco caliente. El ciclo de Carnot consta, pues, de los cuatro pasos reversibles siguientes:

Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.

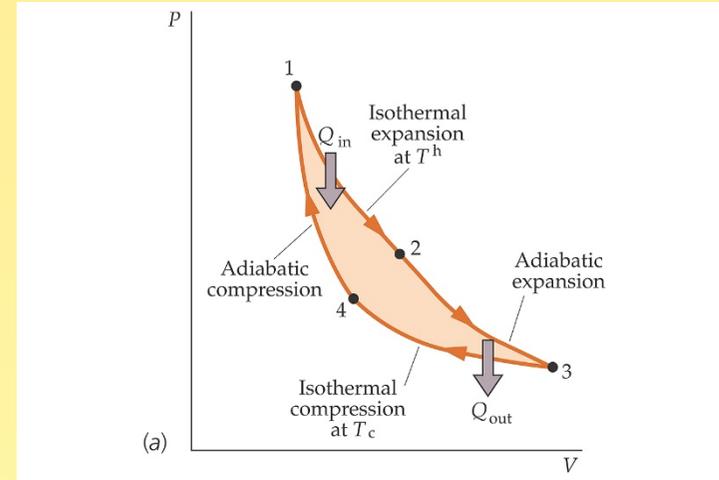
Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



Para calcular el rendimiento de una maquina de Carnot, elegimos como sustancia de trabajo un material de propiedades conocidas, un gas ideal, y calculamos explícitamente el trabajo realizado sobre ella a lo largo de un ciclo de Carnot. Como todos los ciclos de Carnot poseen el mismo rendimiento, independientemente de la sustancia de trabajo, nuestro resultado será valido de modo general.

1. Proceso isoterma de absorción de calor $W_{1-2} = nRT \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$; $Q_{1-2} = -nRT_{12} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$
2. Expansión adiabática $W_{2-3} = \frac{P_3V_3 - P_2V_2}{\gamma - 1} = \frac{nR(T_{34} - T_{12})}{\gamma - 1}$; $Q_{2-3} = 0$
3. Proceso isoterma de cesión de calor $W_{3-4} = nRT_{34} \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)$; $Q_{3-4} = -nRT_{34} \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)$
4. Compresión adiabática $W_{4-1} = \frac{P_1V_1 - P_4V_4}{\gamma - 1} = \frac{nR(T_{12} - T_{34})}{\gamma - 1}$; $Q_{4-1} = 0$

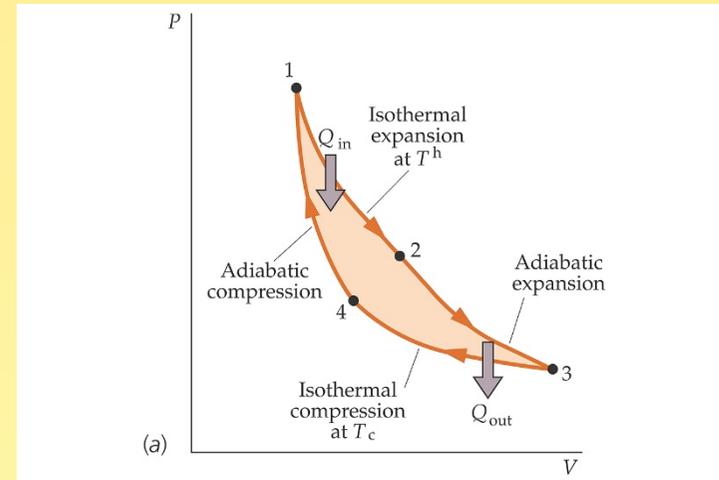
Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Pasos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



$$\text{Calor absorbido } Q_{\text{absorbido}} = Q_{1-2} = -nRT_{12} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = nRT_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{Calor cedido } Q_{\text{cedido}} = Q_{3-4} = -nRT_{34} \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) = nRT_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

$$\frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{nRT_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{nRT_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{T_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

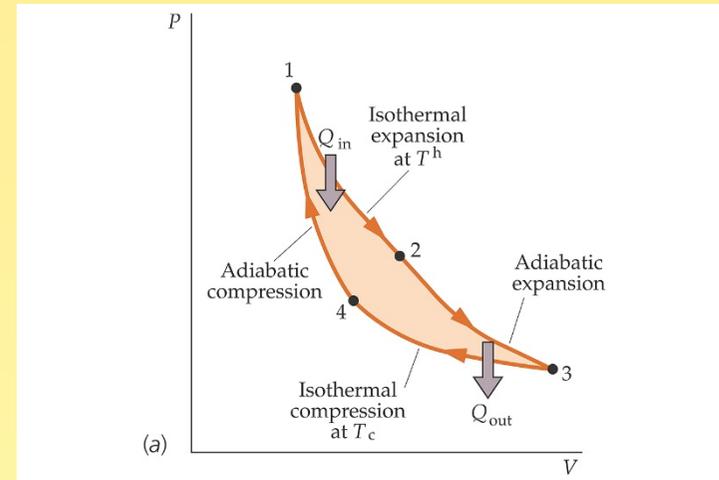
Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Pasos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



$$\text{Calor absorbido } Q_{\text{absorbido}} = Q_{1-2} = -nRT_{12} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = nRT_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{Calor cedido } Q_{\text{cedido}} = Q_{3-4} = -nRT_{34} \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) = nRT_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

$$\frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{nRT_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{nRT_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{T_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

$$\left. \begin{aligned} T_{12}V_2^{\gamma-1} &= T_{34}V_3^{\gamma-1} \\ T_{34}V_4^{\gamma-1} &= T_{12}V_1^{\gamma-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{T_{34}V_3^{\gamma-1}}{T_{34}V_4^{\gamma-1}} = \frac{T_{12}V_2^{\gamma-1}}{T_{12}V_1^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_3^{\gamma-1}}{V_4^{\gamma-1}} = \frac{V_2^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \Rightarrow \frac{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} = 1 \Rightarrow \frac{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{-\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-1}} = 1 \Rightarrow \frac{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = -1$$

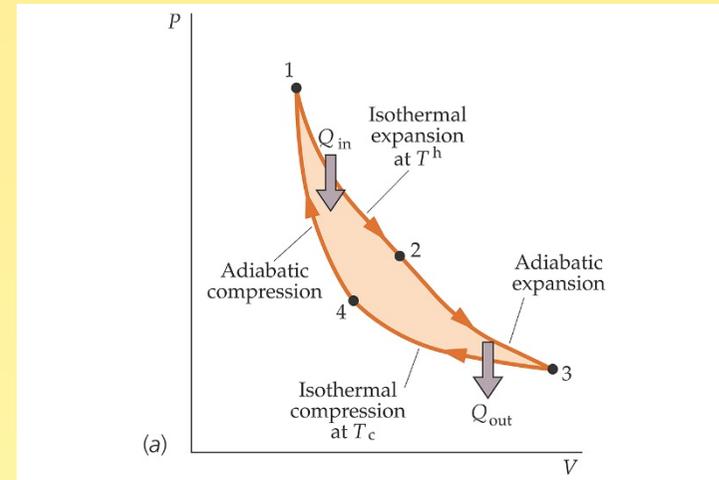
Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Pasos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



$$\text{Calor absorbido } Q_{\text{absorbido}} = Q_{1-2} = -nRT_{12} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = nRT_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{Calor cedido } Q_{\text{cedido}} = Q_{3-4} = -nRT_{34} \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) = nRT_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

$$\frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{nRT_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{nRT_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_{34} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{T_{12} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

$$\left. \begin{aligned} T_{12}V_2^{\gamma-1} &= T_{34}V_3^{\gamma-1} \\ T_{34}V_4^{\gamma-1} &= T_{12}V_1^{\gamma-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{T_{34}V_3^{\gamma-1}}{T_{34}V_4^{\gamma-1}} = \frac{T_{12}V_2^{\gamma-1}}{T_{12}V_1^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_3^{\gamma-1}}{V_4^{\gamma-1}} = \frac{V_2^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \Rightarrow \frac{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} = 1 \Rightarrow \frac{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{-\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-1}} = 1 \Rightarrow \frac{\ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = -1$$

$$\Rightarrow \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = -\frac{T_{34}}{T_{12}}$$

$\frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{T_{34}}{T_{12}}$
--

Procesos reversibles e irreversibles

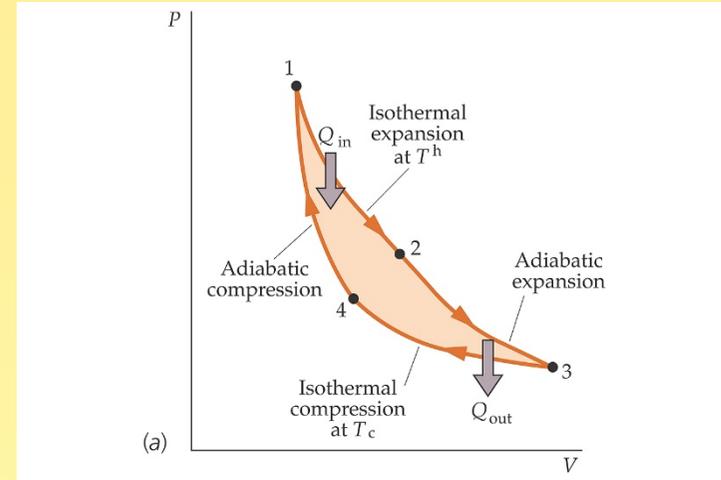
Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

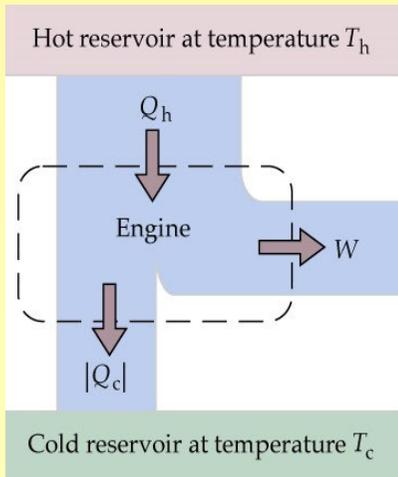
Pasos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.

$$\left| \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} \right| = \frac{T_{34}}{T_{12}}$$



Motor Térmico.



Máximo rendimiento del motor térmico.

$$\begin{aligned} \epsilon &= 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} < 1 \\ Q_h &= Q_{\text{absorbido}} \Rightarrow T_h = T_{12} \\ |Q_c| &= |Q_{\text{cedido}}| \Rightarrow T_c = T_{34} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \epsilon &= 1 - \frac{|Q_{\text{cedido}}|}{Q_{\text{absorbido}}} = 1 - \left| \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} \right| \\ \left| \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} \right| &= \frac{T_{34}}{T_{12}} = \frac{T_c}{T_h} \end{aligned} \Rightarrow \epsilon = 1 - \frac{T_c}{T_h} < 1$$

Ejemplo.- Una máquina consume 200 J de un foco caliente a 373 °K, realiza 48 J de trabajo y cede 152 J a un foco frío a 273 °K. ¿Cuánto trabajo se “pierde” por ciclo debido a la irreversibilidad?

Ejemplo.- Una máquina consume 200 J de un foco caliente a 373 °K, realiza 48 J de trabajo y cede 152 J a un foco frío a 273 °K. ¿Cuánto trabajo se “pierde” por ciclo debido a la irreversibilidad?

1. El máximo rendimiento de un motor térmico funcionando entre los focos comentados será:

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{273}{373} = \frac{373 - 273}{373} = \frac{100}{373} = 0.2681$$

2. Si dicho motor extrae 200 J del foco caliente el trabajo que nos daría sería:

$$\varepsilon = \frac{|W_{\max}|}{Q_h} \Rightarrow |W_{\max}| = \varepsilon Q_h = 0.2681 \cdot 200 \text{ J} = 53.62 \text{ J}$$

3. Por lo tanto, la cantidad de trabajo que se pierde en cada ciclo por irreversibilidad es:

$$W_{\text{Perdido}} = |W_{\max}| - |W| = (53.62 - 48) \text{ J} = 5.62 \text{ J}$$

Ejemplo.- Si se transmiten por conducción 200 J de calor de un foco térmico a 373 K, a otro a 273 K, sin máquina térmica entre los focos, como en el ejemplo anterior, ¿qué capacidad de producir trabajo se "pierde" en este proceso?

Ejemplo.- Si se transmiten por conducción 200 J de calor de un foco térmico a 373 K, a otro a 273 K, sin máquina térmica entre los focos, como en el ejemplo anterior, ¿qué capacidad de producir trabajo se "pierde" en este proceso?

1. El máximo rendimiento de un motor térmico funcionando entre los focos comentados será:

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{273}{373} = \frac{373 - 273}{373} = \frac{100}{373} = 0.2681$$

2. Si dicho motor extrae 200 J del foco caliente el trabajo que nos daría sería:

$$\varepsilon = \frac{|W_{\max}|}{Q_h} \Rightarrow |W_{\max}| = \varepsilon Q_h = 0.2681 \cdot 200 \text{ J} = 53.62 \text{ J}$$

3. Por lo tanto, la cantidad de trabajo que se pierde en cada ciclo por irreversibilidad es:

$$W_{\text{Perdido}} = |W_{\max}| - |W| = (53.62 - 0) \text{ J} = 53.62 \text{ J}$$

Ejemplo.- Una sociedad ofrece acciones para construir una central térmica diseñada de modo que absorbe 100 kW del foco caliente (800 K), cede 20 kW al foco frío (200 K) y suministra una potencia de 80 kW; ¿compraría acciones de esta sociedad?

Ejemplo.- Una sociedad ofrece acciones para construir una central térmica diseñada de modo que absorbe 100 kW del foco caliente (800 K), cede 20 kW al foco frío (200 K) y suministra una potencia de 80 kW; ¿compraría acciones de esta sociedad?

1. El máximo rendimiento de un motor térmico funcionando entre los focos comentados será:

$$\varepsilon_{\max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{200}{800} = \frac{800 - 200}{800} = \frac{600}{800} = 0.75$$

2. Por otro lado, con los datos que nos dan, el rendimiento de la central térmica sería:

$$\varepsilon = \frac{|W|}{Q_h} = \frac{80 \text{ kW}}{100 \text{ kW}} = 0.8$$

3. Por lo tanto, nos están intentando engañar puesto que en las anteriores condiciones no se puede conseguir un rendimiento del 80%.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

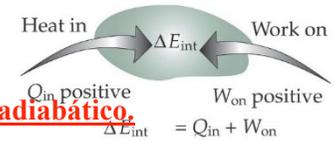
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: *Sólidos y líquidos* $Q = nc' \Delta T$ *Gases:* $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

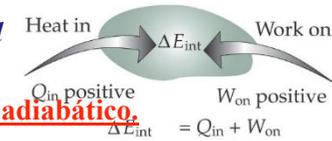
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: *Sólidos y líquidos* $Q = nc' \Delta T$ *Gases:* $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

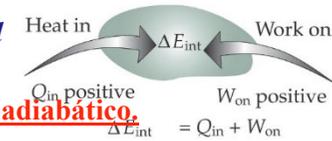
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

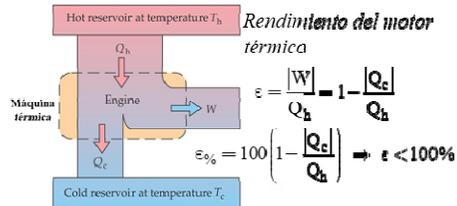
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

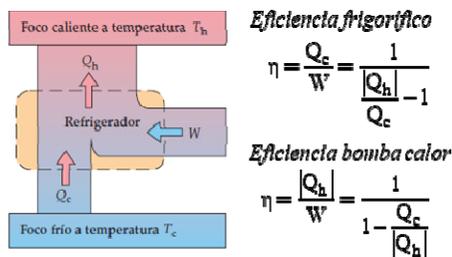
No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Motor térmico



Frigoríficos y bombas de calor



01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

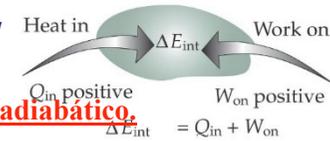
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

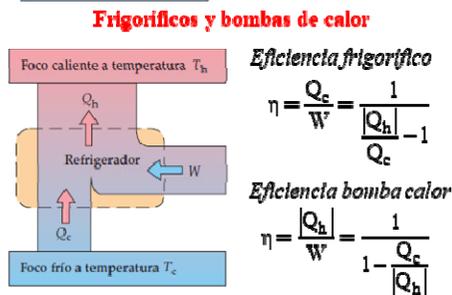
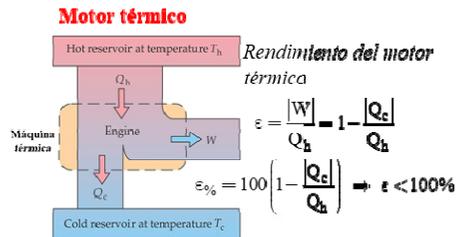
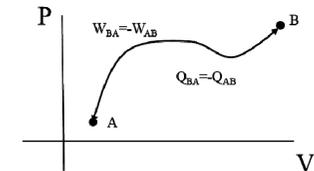
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.



RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

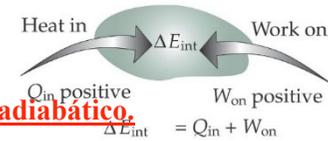
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

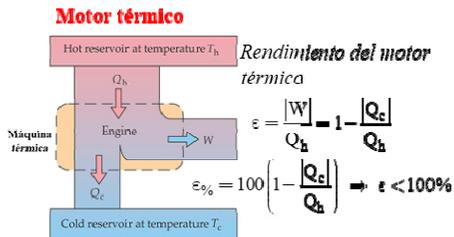
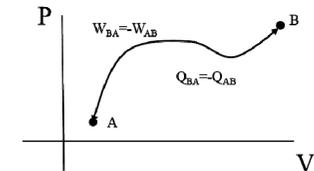
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Enunciado del teorema de Carnot

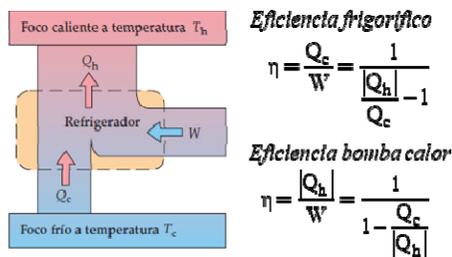
Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.



Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Frigoríficos y bombas de calor



01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

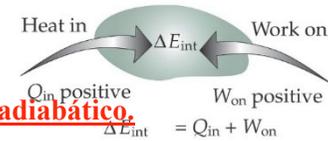
Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$

Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

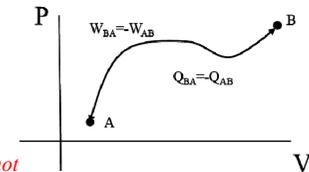
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

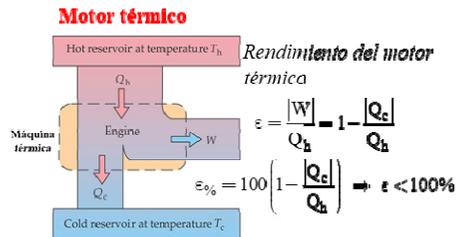
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

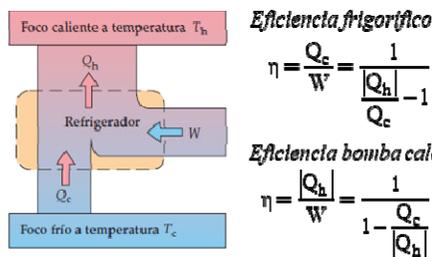


Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

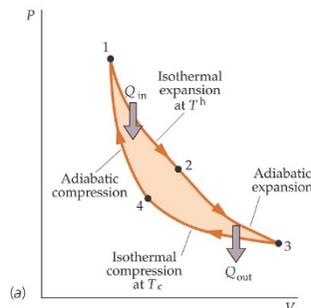
$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{\frac{Q_h}{Q_c} - 1}$$

Eficiencia bomba calor

$$\eta = \frac{Q_h}{W} = \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{Q_h}}$$

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).



01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

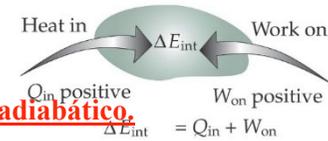
Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$

Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

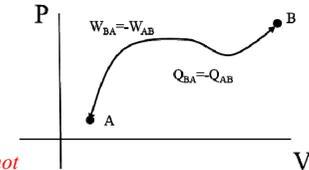
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

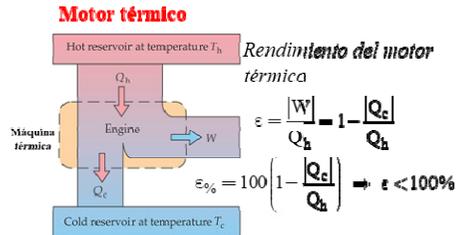
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

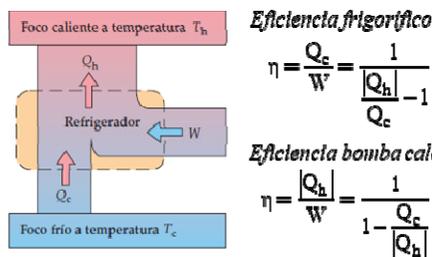


Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

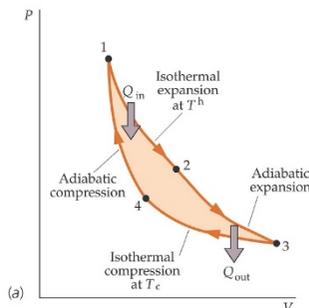
$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1}$$

Eficiencia bomba calor

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

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).



$$\frac{Q_{cedido}}{Q_{absorbido}} = -\frac{T_{34}}{T_{12}}$$

01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

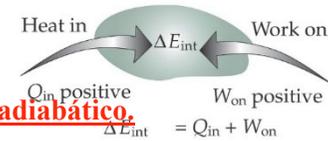
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

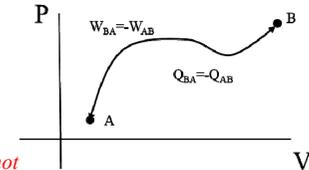
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

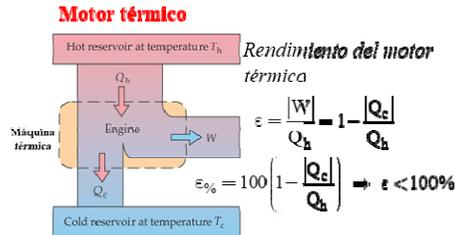
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

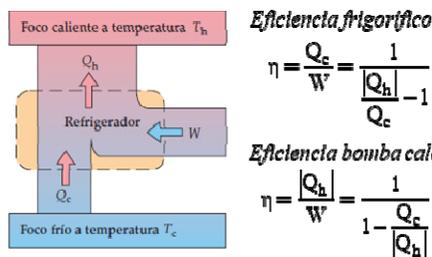


Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

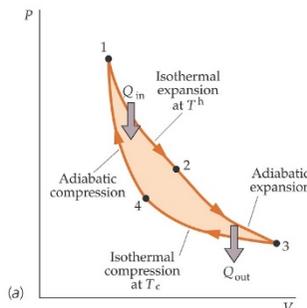
$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1}$$

Eficiencia bomba calor

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

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).



$$\frac{Q_{cedido}}{Q_{absorbido}} = -\frac{T_{34}}{T_{12}}$$

Máximo rendimiento de un motor térmico:

$$\epsilon_{max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h} < 1$$

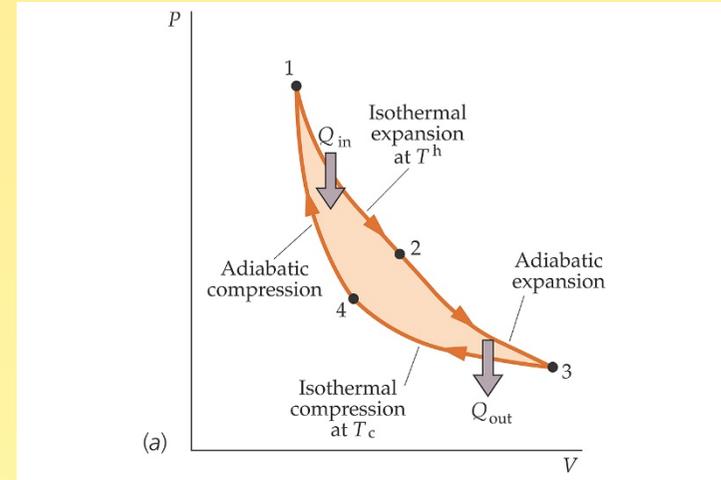
Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Pasos de un ciclo de Carnot

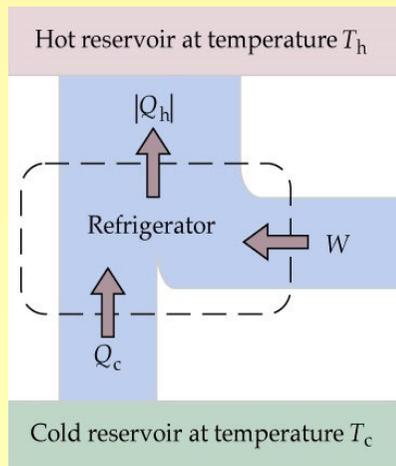
1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



$$\left| \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} \right| = \frac{T_{34}}{T_{12}}$$

Refrigerador

Máximo valor del coeficiente de eficacia.



$$\eta = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1}$$

$$|Q_h| = |Q_{\text{cedido}}| \Rightarrow T_h = T_{34}$$

$$Q_c = Q_{\text{absorbido}} \Rightarrow T_c = T_{12}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{1}{\frac{|Q_{\text{cedido}}|}{Q_{\text{absorbido}}} - 1} = \frac{1}{\frac{|Q_{\text{cedido}}|}{Q_{\text{absorbido}}} - 1}$$

$$\left| \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} \right| = \frac{T_h}{T_c}$$

$$\boxed{\eta = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} > 0}$$

Ejemplo.- Una máquina de vapor trabaja entre un foco térmico a $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ }^{\circ}\text{K}$ y un foco frío a $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ }^{\circ}\text{K}$.

(a).- ¿Cuál es el máximo rendimiento posible de esta máquina?

(b).- Si la máquina funciona en sentido inverso como un refrigerador, ¿cuál es su máximo coeficiente de eficacia?

Ejemplo.- Una máquina de vapor trabaja entre un foco térmico a $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ }^{\circ}\text{K}$ y un foco frío a $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ }^{\circ}\text{K}$.

(a).- ¿Cuál es el máximo rendimiento posible de esta máquina?

(b).- Si la máquina funciona en sentido inverso como un refrigerador, ¿cuál es su máximo coeficiente de eficacia?

1. Si funciona como motor térmico el máximo rendimiento vendrá dado por:

$$\varepsilon_{\max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{273}{373} = \frac{373 - 273}{373} = \frac{100}{373} = 0.268$$

2. Por otro lado, si funcionase como refrigerador la máxima eficiencia vendría dada:

$$\eta = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} = \frac{1}{\frac{373}{273} - 1} = \frac{273}{373 - 273} = \frac{273}{100} = 2.73$$

Ejemplo.- Una maquina de Carnot funciona entre dos focos térmicos como refrigerador. En cada ciclo, se absorben 100 J de calor del foco frio y se ceden 150 J de calor al foco caliente.

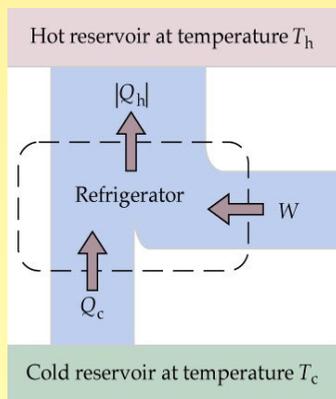
- (a) ¿Cuál es el rendimiento de una maquina de Carnot cuando funciona como motor térmico entre estos dos focos?
- (b) Demuéstrese que ninguna otra maquina que funciona como refrigerador entre estos focos puede tener un coeficiente de eficiencia mayor que 2.
-

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas. Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Ejemplo.- Una maquina de Carnot funciona entre dos focos térmicos como refrigerador. En cada ciclo, se absorben 100 J de calor del foco frio y se ceden 150 J de calor al foco caliente.

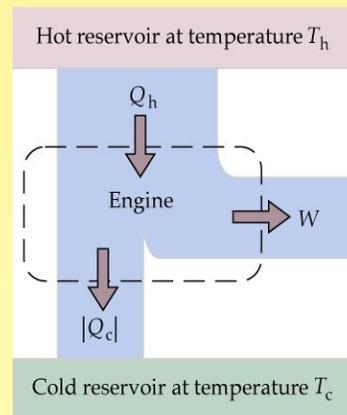
- (a) ¿Cuál es el rendimiento de una maquina de Carnot cuando funciona como motor térmico entre estos dos focos?
- (b) Demuéstrese que ninguna otra maquina que funciona como refrigerador entre estos focos puede tener un coeficiente de eficiencia mayor que 2.

Como frigorífico tenemos:



$$|Q_h| = 150 \text{ J}$$
$$Q_c = 100 \text{ J}$$
$$W = 50 \text{ J}$$

Si trabajase como un motor



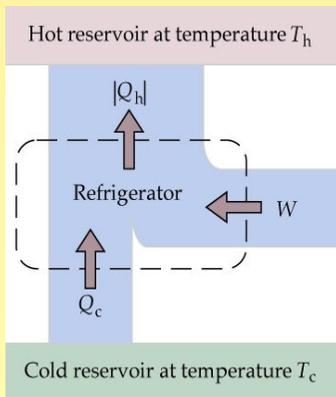
$$Q_h = 150 \text{ J}$$
$$|Q_c| = 100 \text{ J}$$
$$|W| = 50 \text{ J}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas. Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Ejemplo.- Una maquina de Carnot funciona entre dos focos térmicos como refrigerador. En cada ciclo, se absorben 100 J de calor del foco frio y se ceden 150 J de calor al foco caliente.

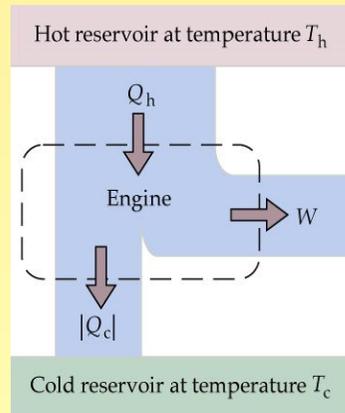
- (a) ¿Cuál es el rendimiento de una maquina de Carnot cuando funciona como motor térmico entre estos dos focos?
(b) Demuéstrese que ninguna otra maquina que funciona como refrigerador entre estos focos puede tener un coeficiente de eficiencia mayor que 2.

Como frigorífico tenemos:



$$\begin{aligned} |Q_h| &= 150 \text{ J} \\ Q_c &= 100 \text{ J} \\ W &= 50 \text{ J} \end{aligned}$$

Si trabajase como un motor



$$\begin{aligned} Q_h &= 150 \text{ J} \\ |Q_c| &= 100 \text{ J} \\ |W| &= 50 \text{ J} \end{aligned}$$

El rendimiento del motor sería

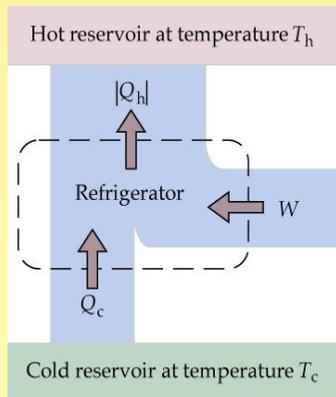
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{|W|}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = \\ &= 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{50}{150} = 0.333 \\ \varepsilon_{\%} &= 33.33\% \end{aligned}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas. Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Ejemplo.- Una maquina de Carnot funciona entre dos focos térmicos como refrigerador. En cada ciclo, se absorben 100 J de calor del foco frio y se ceden 150 J de calor al foco caliente.

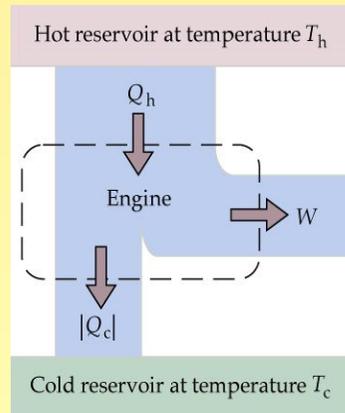
- (a) ¿Cuál es el rendimiento de una maquina de Carnot cuando funciona como motor térmico entre estos dos focos?
 (b) Demuéstrese que ninguna otra maquina que funciona como refrigerador entre estos focos puede tener un coeficiente de eficiencia mayor que 2.

Como frigorífico tenemos:



$$\begin{aligned} |Q_h| &= 150\text{ J} \\ Q_c &= 100\text{ J} \\ W &= 50\text{ J} \end{aligned}$$

Si trabajase como un motor



$$\begin{aligned} Q_h &= 150\text{ J} \\ |Q_c| &= 100\text{ J} \\ |W| &= 50\text{ J} \end{aligned}$$

El rendimiento del motor sería

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{|W|}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = \\ &= 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{50}{150} = 0.333 \\ \varepsilon_{\%} &= 33.33\% \end{aligned}$$

El máximo coeficiente de eficacia sería

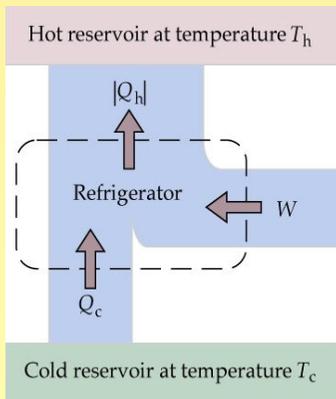
$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{|Q_h| - Q_c} = \frac{1}{\frac{|Q_h| - Q_c}{Q_c}} = \\ &= \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1} = \frac{1}{\frac{150}{100} - 1} = \frac{100}{150 - 100} = 2 \end{aligned}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas. Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Ejemplo.- Una maquina de Carnot funciona entre dos focos térmicos como refrigerador. En cada ciclo, se absorben 100 J de calor del foco frio y se ceden 150 J de calor al foco caliente.

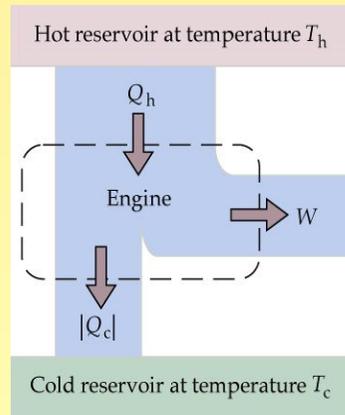
- (a) ¿Cuál es el rendimiento de una maquina de Carnot cuando funciona como motor térmico entre estos dos focos?
 (b) Demuéstrese que ninguna otra maquina que funciona como refrigerador entre estos focos puede tener un coeficiente de eficiencia mayor que 2.

Como frigorífico tenemos:



$$\begin{aligned} |Q_h| &= 150 \text{ J} \\ Q_c &= 100 \text{ J} \\ W &= 50 \text{ J} \end{aligned}$$

Si trabajase como un motor



$$\begin{aligned} Q_h &= 150 \text{ J} \\ |Q_c| &= 100 \text{ J} \\ |W| &= 50 \text{ J} \end{aligned}$$

El rendimiento del motor sería

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{|W|}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = \\ &= 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{50}{150} = 0.333 \\ \varepsilon_{\%} &= 33.33\% \end{aligned}$$

El máximo coeficiente de eficacia sería

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{|Q_h| - Q_c} = \frac{1}{|Q_h| - Q_c} = \\ &= \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1} = \frac{1}{\frac{150}{100} - 1} = \frac{100}{150 - 100} = 2 \end{aligned}$$

La relación entre las temperaturas interior exterior tiene que ser necesariamente igual a:

$$\eta = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} = 2 \Rightarrow \frac{T_h}{T_c} = \frac{1}{2} + 1 = \frac{3}{2}$$

Segundo principio de la Termodinámica. Máquinas térmicas. Ciclo y Teorema de Carnot. La máquina de Carnot.

Una maquina de Carnot opera entre dos focos térmicos a temperaturas $T_h = 300 \text{ K}$ y $T_c = 77 \text{ K}$.

- (a) ¿Cual es su rendimiento?
 - (b) Si absorbe 100 J de calor del foco caliente durante cada ciclo, ¿cuánto trabajo realiza?
 - (c) ¿Cuánto calor cede al foco frío durante cada ciclo?
 - (d) ¿Cuál es el coeficiente de eficiencia de la máquina cuando funciona como refrigerador entre estos dos focos?
-

Una maquina de Carnot opera entre dos focos térmicos a temperaturas $T_h = 300 \text{ K}$ y $T_c = 77 \text{ K}$.

- (a) ¿Cual es su rendimiento?
- (b) Si absorbe 100 J de calor del foco caliente durante cada ciclo, ¿cuánto trabajo realiza?
- (c) ¿Cuánto calor cede al foco frío durante cada ciclo?
- (d) ¿Cuál es el coeficiente de eficiencia de la máquina cuando funciona como refrigerador entre estos dos focos?

Motor Térmico.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 - \frac{T_c}{T_h} \\ T_h &= 300 \text{ }^\circ\text{K} \\ T_c &= 77 \text{ }^\circ\text{K} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = 1 - \frac{77}{300} = \frac{300 - 77}{300} = \frac{223}{300} = 0.743 \quad \Rightarrow$$
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{|W|}{Q_h} \Rightarrow |W| = \varepsilon Q_h = 0.743 \cdot 100 \text{ J} = 74.3 \text{ J} \\ Q_c &= Q_h - |W| \Rightarrow Q_c = (100 - 74.3) \text{ J} = 25.7 \text{ J} \end{aligned}$$

Frigorífico.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} \\ T_h &= 300 \text{ }^\circ\text{K} \\ T_c &= 77 \text{ }^\circ\text{K} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{1}{\frac{300}{77} - 1} = \frac{77}{300 - 77} = \frac{77}{223} = 0.3453$$

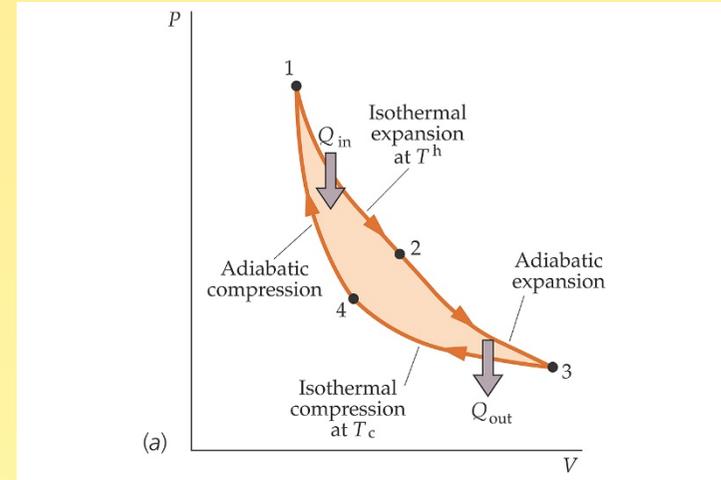
Procesos reversibles e irreversibles

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

Pasos de un ciclo de Carnot

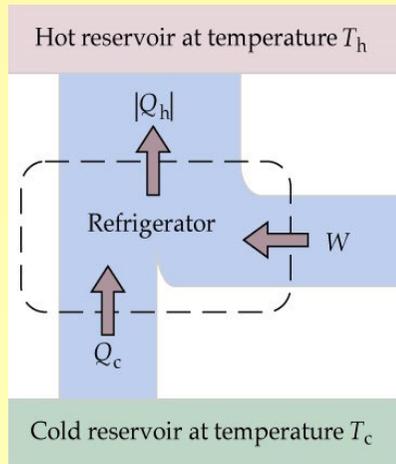
1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura mas baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



$$\left| \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{absorbido}}} \right| = \frac{T_{34}}{T_{12}}$$

Bomba de calor

Máximo valor del coeficiente de eficacia.



$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{|Q_h|}}$$

$$|Q_h| = |Q_{\text{cedido}}| \Rightarrow T_h = T_{34}$$

$$Q_c = Q_{\text{absorbido}} \Rightarrow T_c = T_{12}$$



$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{Q_{\text{absorbido}}}{|Q_{\text{cedido}}|}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{\text{absorbido}}}{Q_{\text{cedido}}}}$$

$$\frac{Q_{\text{absorbido}}}{|Q_{\text{cedido}}|} = \frac{T_c}{T_h}$$

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_h}} = \frac{T_h}{T_h - T_c} > 1$$

Ejemplo.- ¿Cuál es el mejor sistema de calefacción que podemos utilizar para calentar la casa?

Ejemplo.- ¿Cuál es el mejor sistema de calefacción que podemos utilizar para calentar la casa?

$$\eta^{\text{ideal}} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{298}{298 - 278} = \frac{298}{20} = 14.9 \Rightarrow \eta^{\text{ideal}} = \frac{|Q_h|}{W} \Rightarrow |Q_h| = \eta^{\text{ideal}} \cdot W = 14.9 \cdot W$$

$$\eta^{\text{real}} \approx 5 - 8 \text{ o incluso mayores}$$

Ejemplo.- ¿Cuál es el mejor sistema de calefacción que podemos utilizar para calentar la casa?

$$\eta^{\text{ideal}} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{298}{298 - 278} = \frac{298}{20} = 14.9 \Rightarrow \eta^{\text{ideal}} = \frac{|Q_h|}{W} \Rightarrow |Q_h| = \eta^{\text{ideal}} \cdot W = 14.9 \cdot W$$

$\eta^{\text{real}} \approx 5 - 8$ o incluso mayores

Fuente energética	Energía por cantidad de combustible	Precio del combustible	Tipo de máquina (eficiencia)	Precio del kwh de energía térmica
Gasoil	10 Kwh/l	1 €/l	Caldera gasoil (0.92)	$\frac{1 \text{ €/l} \cdot 0.9}{10 \text{ Kwh/l}} = 0.9 \text{ €/kwh}$
Gas	8.5 Kwh/m ³	0.95 €/m ³	Caldera de gas (0.96)	$\frac{0.95 \text{ €/l} \cdot 0.96}{8.5 \text{ Kwh/l}} = 0.12 \text{ €/kwh}$
Electricidad	-	0.24 €/Kwh	Brasero (1)	0.24 €/Kwh
			Bomba de calor (4)	$\frac{0.24 \text{ €/Kwh}}{4} = 0.06 \text{ €/kwh}$

Ejemplo.- Una bomba de calor ideal se utiliza para bombear calor desde el aire exterior a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el suministro de aire caliente para el sistema de calefacción de una casa, que está a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. La bomba se acciona mediante energía eléctrica. ¿Cuánto trabajo se necesita para bombear 1 kJ de calor dentro de la casa?

Ejemplo.- Una bomba de calor ideal se utiliza para bombear calor desde el aire exterior a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el suministro de aire caliente para el sistema de calefacción de una casa, que está a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. La bomba se acciona mediante energía eléctrica. ¿Cuánto trabajo se necesita para bombear 1 kJ de calor dentro de la casa?

1. Si la bomba es ideal funciona como una máquina de Carnot y su eficiencia vendrá dada:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_h}} = \frac{1}{1 - \frac{268}{313}} = \frac{313}{313 - 268} = \frac{313}{45} = 7.825$$

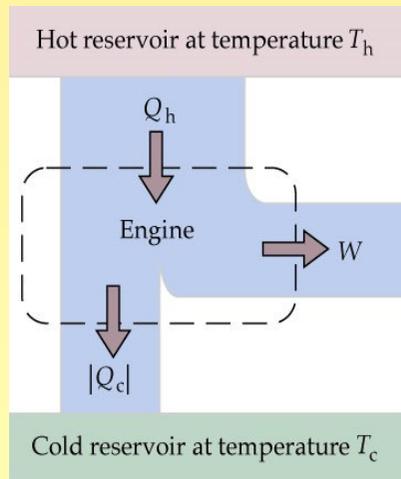
2. Por otro lado, tenemos que:

$$\eta = \frac{|Q_h|}{|W|} \Rightarrow |W| = \frac{|Q_h|}{\eta} = \frac{1\text{ kJ}}{7.825} = 0.128\text{ kJ} = 128\text{ J}$$

Resumiendo

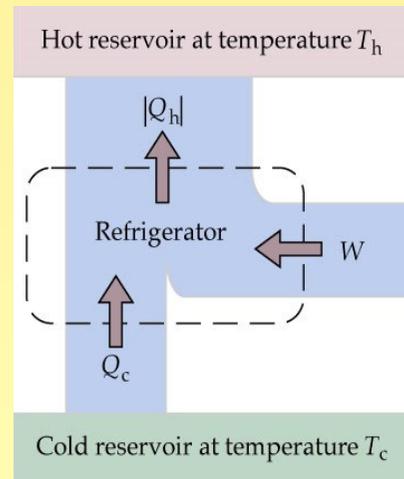
El máximo rendimiento de las diferentes máquinas térmicas se consigue mediante la utilización de una máquina de Carnot situada entre los dos focos de temperatura y viene dado por:

Motor Térmico.



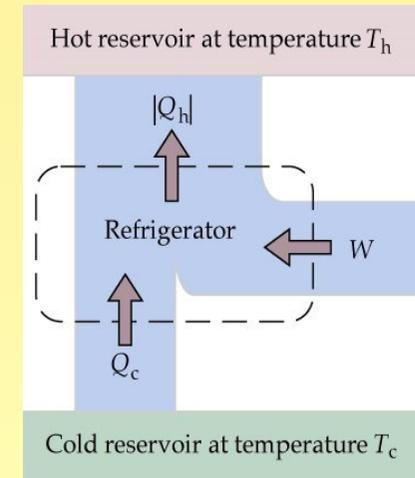
$$\epsilon_{\max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

Refrigerador



$$\eta_{\max} = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

Bomba de calor



$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_h}} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

ESQUEMA DE DESARROLLO

- ~~1.- Introducción.~~
- ~~2.- Máquinas térmicas y el segundo principio de la termodinámica.~~
- ~~3.- Ciclo y teorema de Carnot. La máquina de Carnot.~~
- 4.- Escala termodinámica de temperaturas.**
- 5.- Entropía. Irreversibilidad y desorden.

Escala térmica de temperaturas.

En el primer tema definimos la escala de temperaturas del gas ideal en función de las presiones de los gases a bajas densidades. Esta definición planteaba una dificultad práctica cuando estábamos interesados en medir temperaturas cercanas al cero absoluto.

Escala térmica de temperaturas.

En el primer tema definimos la escala de temperaturas del gas ideal en función de las presiones de los gases a bajas densidades. Esta definición planteaba una dificultad práctica cuando estábamos interesados en medir temperaturas cercanas al cero absoluto.

Como el rendimiento de Carnot depende sólo de las temperaturas de los dos focos térmicos, puede utilizarse para definir la relación entre las temperaturas de ambos focos, independientemente de las propiedades de las sustancias. Así, definiremos la relación de las temperaturas absolutas de los focos frío y caliente mediante

$$\frac{T_c}{T_h} = \frac{|Q_c|}{Q_h}$$

Así pues, para determinar la relación de temperaturas de los dos focos, disponemos una máquina reversible que funcione entre ellos y medimos el calor absorbido y cedido por cada uno de los focos durante un ciclo. La escala absoluta está completamente determinada por la ecuación y la elección de un punto fijo. Si el punto fijo se define igual a 273,16 °K para el punto triple del agua, la escala absoluta de temperaturas coincide con la escala de temperaturas del gas ideal en el intervalo de temperaturas en el cual puede utilizarse un termómetro de gases.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

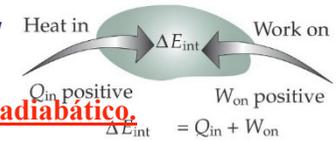
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: *Sólidos y líquidos* $Q = nc' \Delta T$ *Gases:* $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

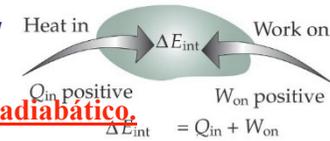
Principio cero de la termodinámica: *Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.*

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: *La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.*



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: *Sólidos y líquidos* $Q = nc' \Delta T$ *Gases:* $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

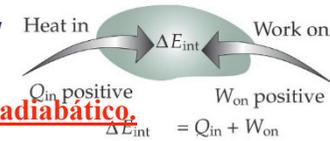
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

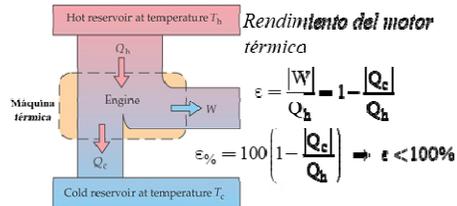
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

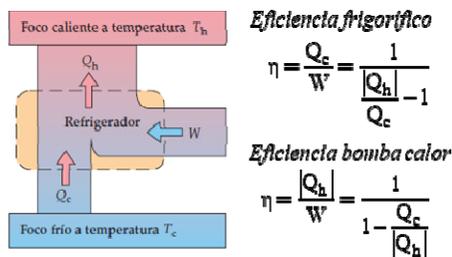
No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Motor térmico



Frigoríficos y bombas de calor



01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

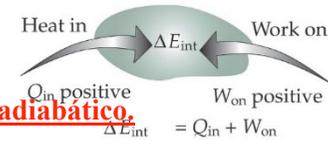
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

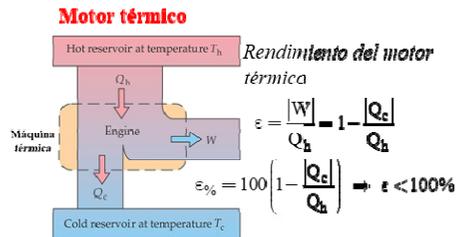
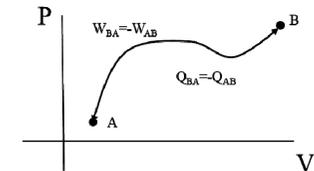
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

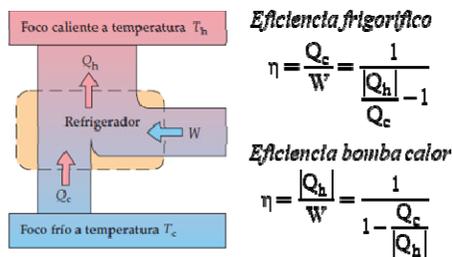
Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.



Frigoríficos y bombas de calor



01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

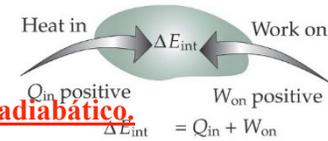
Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$ **Teoría cinética de los gases:** $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

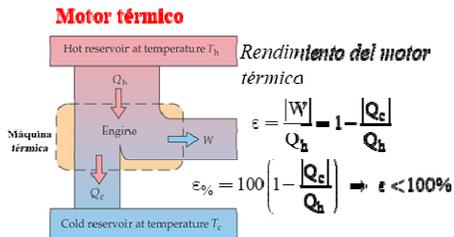
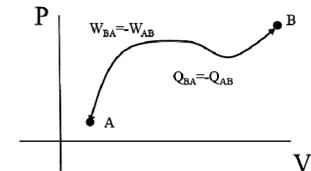
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

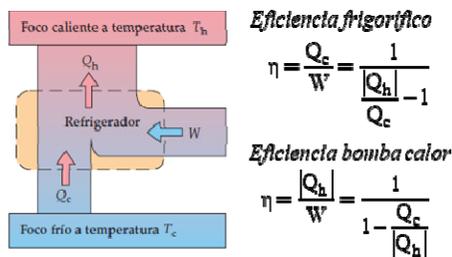
Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una **máquina reversible** que trabaje entre los dos mismos focos.



Frigoríficos y bombas de calor



Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

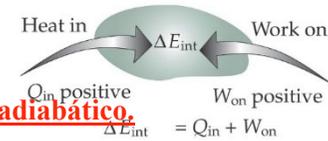
Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$

Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

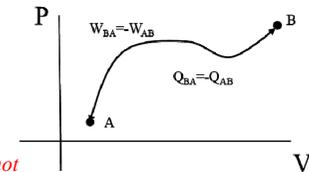
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

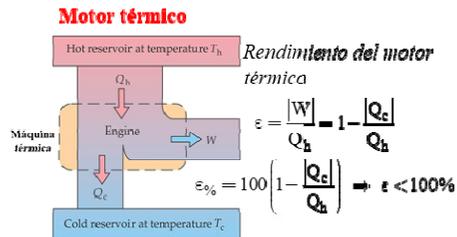
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

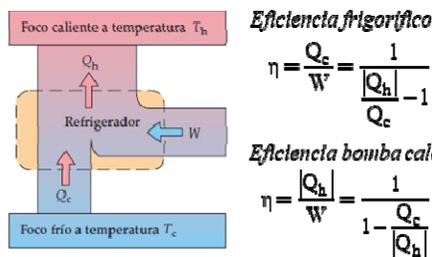


Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

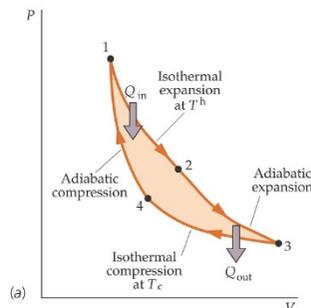
$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{\frac{Q_h}{Q_c} - 1}$$

Eficiencia bomba calor

$$\eta = \frac{Q_h}{W} = \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{Q_h}}$$

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).



01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

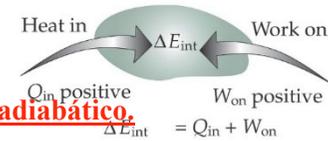
Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$

Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

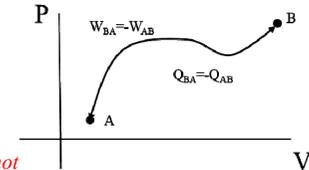
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

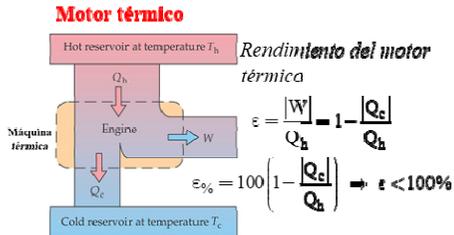
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

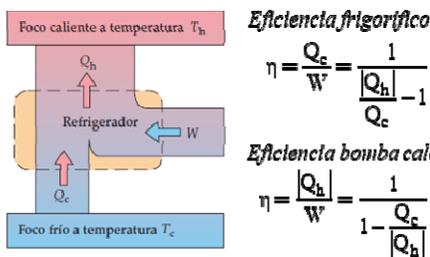


Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



Frigoríficos y bombas de calor



Eficiencia frigorífico

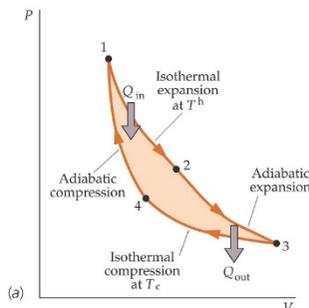
$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1}$$

Eficiencia bomba calor

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

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).



$$\frac{Q_{cedido}}{Q_{absorbido}} = -\frac{T_{34}}{T_{12}}$$

01/03/2023

RESUMEN DE CLASES ANTERIORES

TEMA 1

Principio cero de la termodinámica: Si dos objetos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

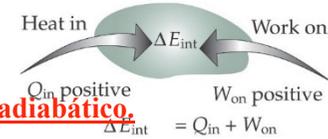
Ley de los gases ideales $PV = kNT = kN_A nT = RnT$

Teoría cinética de los gases: $E_{mecánica} = g \frac{kT}{2} \Rightarrow E_T = g \frac{NkT}{2} = g \frac{nN_A T}{2}$

TEMA 2

Calor: El calor es la transferencia de energía entre sistemas con diferentes temperaturas. Puede transferirse mediante radiación, conducción y convección.

Primer principio de la termodinámica: La variación de energía interna de un sistema es igual al calor transferido al sistema más el trabajo realizado sobre el sistema.



Trabajo, calor y variación de energía interna para un gas ideal para cuatro procesos: isocórico, isobaro, isotérmico y adiabático.

Capacidades caloríficas: Sólidos y líquidos $Q = nc' \Delta T$ Gases: $C_V = \frac{dE_{int}}{dT}$; $C_P = \frac{dQ}{dT} = C_V + P \frac{dV}{dT}$

TEMA 3

Segundo principio de la termodinámica: Varios enunciados.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

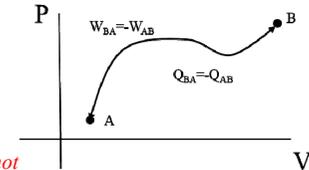
Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Máquinas térmicas: Dispositivo cíclico cuyo propósito es convertir calor en trabajo o viceversa, es decir, trabajo en calor.

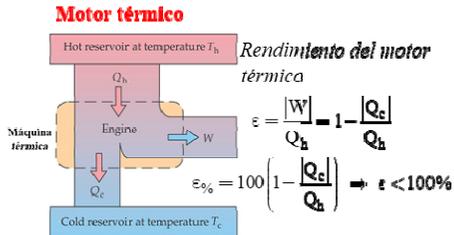
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

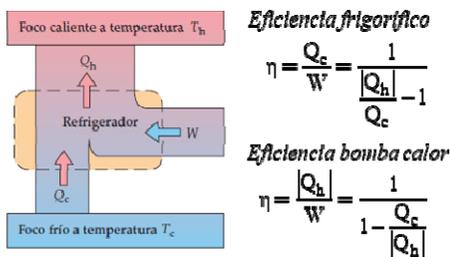


Procesos de un ciclo de Carnot

1. Una absorción isoterma y cuasiestática de calor de un foco caliente.
2. Una expansión adiabática y cuasiestática hasta una temperatura más baja.
3. Una cesión isoterma y cuasiestática de calor a un foco frío.
4. Una compresión adiabática y cuasiestática hasta el estado original.



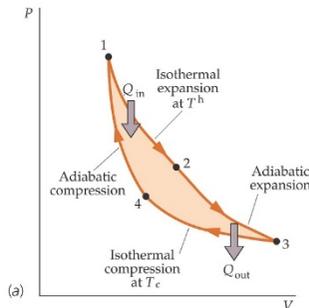
Frigoríficos y bombas de calor



01/03/2023

Condiciones de reversibilidad

1. La energía mecánica no se transforma en energía térmica por rozamiento, fuerzas viscosas u otras fuerzas disipativas.
2. La transferencia de energía en forma de calor solo puede ocurrir entre sistemas con una diferencia de temperatura infinitesimal.
3. El proceso debe ser cuasiestático, de modo que el sistema se encuentre siempre en un estado de equilibrio (o infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio).



$$\frac{Q_{cedido}}{Q_{absorbido}} = -\frac{T_{34}}{T_{12}}$$

Máximo rendimiento de un motor térmico:

$$\epsilon_{max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h} < 1$$

Máxima eficiencia de un frigorífico:

$$\eta_{max} = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} = \frac{T_c}{T_h - T_c} > 0$$

Máxima eficiencia de una bomba térmica:

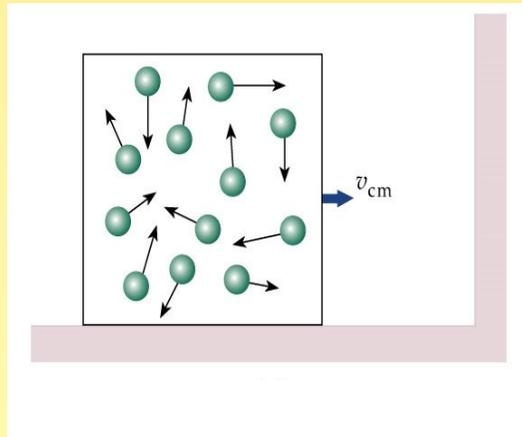
$$\eta_{max} = \frac{T_h}{T_h - T_c} > 0$$

ESQUEMA DE DESARROLLO

- ~~1.- Introducción.~~
- ~~2.- Máquinas térmicas y el segundo principio de la termodinámica.~~
- ~~3.- Ciclo y teorema de Carnot. La máquina de Carnot.~~
- ~~4.- Escala termodinámica de temperaturas.~~
- 5.- Entropía. Irreversibilidad y desorden.**

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Existen muchos procesos irreversibles que no pueden describirse por los enunciados de la maquina térmica o del refrigerador del segundo principio; por ejemplo, un vaso de cristal que cae al suelo y se rompe o un globo que revienta. Sin embargo, todos los procesos irreversibles tienen algo en común: el sistema más el medio que lo rodea tiende hacia un estado menos ordenado.

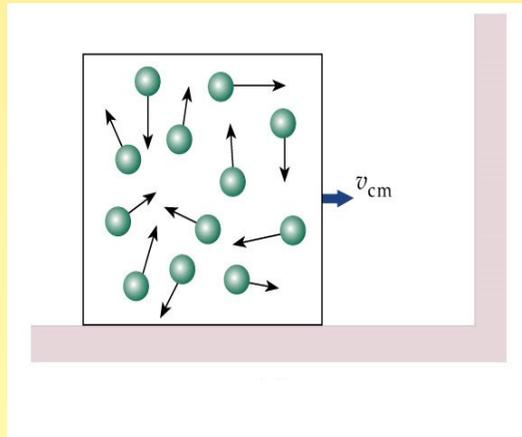


Consideremos una caja de masa despreciable que contiene un gas de masa M_T a una temperatura T que se está moviendo sobre una mesa sin rozamiento con velocidad v_{CM} . La energía cinética total del gas tiene dos componentes: la energía cinética asociada con el movimiento del centro de masas del gas, y la energía cinética del movimiento de las moléculas con respecto a su centro de masas.

$$E_c^{SP} = E_C^{CM} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i'^2}{2} = \frac{M_T v_{CM}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i'^2}{2}$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

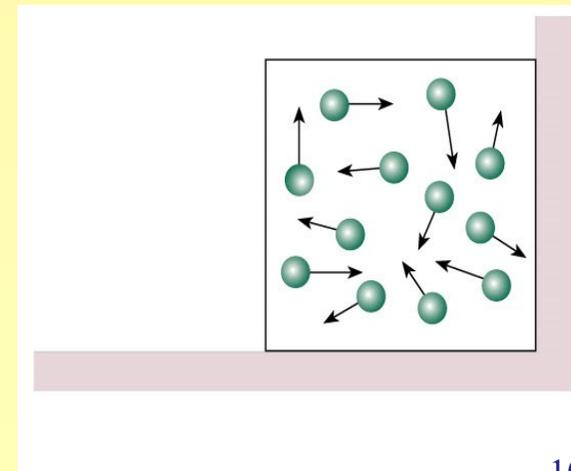
Existen muchos procesos irreversibles que no pueden describirse por los enunciados de la máquina térmica o del refrigerador del segundo principio; por ejemplo, un vaso de cristal que cae al suelo y se rompe o un globo que revienta. Sin embargo, todos los procesos irreversibles tienen algo en común: el sistema más el medio que lo rodea tiende hacia un estado menos ordenado.



Consideremos una caja de masa despreciable que contiene un gas de masa M_T a una temperatura T que se está moviendo sobre una mesa sin rozamiento con velocidad v_{CM} . La energía cinética total del gas tiene dos componentes: la energía cinética asociada con el movimiento del centro de masas del gas, y la energía cinética del movimiento de las moléculas con respecto a su centro de masas.

$$E_c^{SP} = E_C^{CM} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i'^2}{2} = \frac{M_T v_{CM}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i'^2}{2}$$

Supongamos ahora que la caja choca contra una pared fija y se detiene. Esta colisión inelástica es claramente un proceso irreversible. La energía mecánica ordenada del gas se convierte en energía interna aleatoria y la temperatura del gas se incrementa. Este tendrá la misma energía total, pero ahora toda ella estará asociada al movimiento aleatorio de sus moléculas respecto al centro de masas del sistema, que en esta situación se encuentra en reposo. Así pues, el gas ahora está menos ordenado (o más desordenado) y ha perdido algo de su capacidad para realizar trabajo.



Entropía, irreversibilidad, y desorden

Existe una función termodinámica denominada entropía S que es una medida del desorden del sistema. Como la presión P , el volumen V , la temperatura T y la energía interna E_{int} , la entropía S es una función de estado del sistema. Lo mismo que ocurre con la energía interna, lo importante son las variaciones de la entropía. La variación de entropía dS de un sistema cuando pasa de un estado a otro se define por la expresión:

$$dS = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$

donde el numerador dQ_{rev} es la energía en forma de calor que debe transferirse al sistema en un proceso reversible para llevarlo del estado inicial al estado final. Si se extrae calor del sistema, dQ_{rev} es negativo y también lo es la variación de entropía del mismo.

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Existe una función termodinámica denominada entropía S que es una medida del desorden del sistema. Como la presión P , el volumen V , la temperatura T y la energía interna E_{int} , la entropía S es una función de estado del sistema. Lo mismo que ocurre con la energía interna, lo importante son las variaciones de la entropía. La variación de entropía dS de un sistema cuando pasa de un estado a otro se define por la expresión:

$$dS = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$

donde el numerador dQ_{rev} es la energía en forma de calor que debe transferirse al sistema en un proceso reversible para llevarlo del estado inicial al estado final. Si se extrae calor del sistema, dQ_{rev} es negativo y también lo es la variación de entropía del mismo.

El término dQ_{rev} no significa que deba tener lugar una transferencia de calor reversible para que cambie la entropía de un sistema. Realmente existen muchos casos en los que varía la entropía de un sistema aun cuando no exista ninguna transferencia de calor, como por ejemplo en el caso del gas en una caja representado que acabamos de ver. La expresión de más arriba nos da simplemente un método para calcular la diferencia de entropía entre dos estados de un sistema. Como la entropía es una función de estado, la variación de entropía de un sistema cuando pasa de un estado a otro depende únicamente de los estados inicial y final del mismo y no del proceso según el cual se produce el cambio. Es decir, si S_1 es la entropía del sistema en el estado 1 y S_2 la entropía del sistema cuando se halla en el estado 2, entonces se calcula la diferencia de entropía $S_2 - S_1$ por medio de la integral para cualquier camino (proceso) reversible que lleva al sistema desde el estado 1 al estado 2.

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \text{ A través de cualquier camino reversible entre 1 y 2}$$

para cualquier camino reversible (proceso) que lleva al sistema desde el estado 1 al estado 2.

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Entropía de un gas ideal

Ilustraremos ahora que la entropía es una función de estado aún cuando la variación de calor hemos visto que es una función de proceso. Para ello vamos a considerar un proceso cuasiestático reversible arbitrario en el que un gas ideal absorbe una cantidad de calor dQ_{rev} . De acuerdo con el primer principio tendremos:

$$dE_{\text{int}} = dQ_{\text{rev}} + dW \Rightarrow C_v dT = dQ_{\text{rev}} - PdV \Rightarrow C_v dT = dQ_{\text{rev}} - nRT \frac{dV}{V}$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Entropía de un gas ideal

Ilustraremos ahora que la entropía es una función de estado aún cuando la variación de calor hemos visto que es una función de proceso. Para ello vamos a considerar un proceso cuasiestático reversible arbitrario en el que un gas ideal absorbe una cantidad de calor dQ_{rev} . De acuerdo con el primer principio tendremos:

$$dE_{\text{int}} = dQ_{\text{rev}} + dW \Rightarrow C_v dT = dQ_{\text{rev}} - PdV \Rightarrow C_v dT = dQ_{\text{rev}} - nRT \frac{dV}{V}$$

Si intentamos integrar la anterior expresión entre dos estados del sistema tenemos:

$$\int_1^2 C_v dT = \int_1^2 dQ_{\text{rev}} - \int_1^2 nRT \frac{dV}{V} \Rightarrow C_v \int_1^2 dT = \int_1^2 dQ_{\text{rev}} - nR \int_1^2 T \frac{dV}{V}$$

donde hemos utilizado que estamos hablando de un sistema cerrado y hemos supuesto que C_v es independiente de la temperatura.

Para poder hacer la última integral de la anterior expresión tenemos que conocer como depende la temperatura del volumen, es decir, el camino que seguimos para ir de 1 a 2. Esto nos lleva a que el trabajo es una función de proceso y necesariamente el calor también lo es como ya sabíamos del tema anterior.

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Entropía de un gas ideal

Ilustraremos ahora que la entropía es una función de estado aún cuando la variación de calor hemos visto que es una función de proceso. Para ello vamos a considerar un proceso cuasiestático reversible arbitrario en el que un gas ideal absorbe una cantidad de calor dQ_{rev} . De acuerdo con el primer principio tendremos:

$$dE_{\text{int}} = dQ_{\text{rev}} + dW \Rightarrow C_v dT = dQ_{\text{rev}} - PdV \Rightarrow C_v dT = dQ_{\text{rev}} - nRT \frac{dV}{V}$$

Si intentamos integrar la anterior expresión entre dos estados del sistema tenemos:

$$\int_1^2 C_v dT = \int_1^2 dQ_{\text{rev}} - \int_1^2 nRT \frac{dV}{V} \Rightarrow C_v \int_1^2 dT = \int_1^2 dQ_{\text{rev}} - nR \int_1^2 T \frac{dV}{V}$$

donde hemos utilizado que estamos hablando de un sistema cerrado y hemos supuesto que C_v es independiente de la temperatura.

Para poder hacer la última integral de la anterior expresión tenemos que conocer como depende la temperatura del volumen, es decir, el camino que seguimos para ir de 1 a 2. Esto nos lleva a que el trabajo es una función de proceso y necesariamente el calor también lo es como ya sabíamos del tema anterior.

Si dividimos la anterior expresión por T nos queda:

$$C_v \frac{dT}{T} = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} - nR \frac{dV}{V} \Rightarrow C_v \int_1^2 \frac{dT}{T} = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} - nR \int_1^2 \frac{dV}{V}$$

Donde, al igual que más arriba, hemos utilizado que estamos hablando de un sistema cerrado y hemos supuesto que C_v es independiente de la temperatura.

En este caso las integrales $\int_1^2 \frac{dT}{T}$ y $\int_1^2 \frac{dV}{V}$ son independientes del camino seguido para ir de 1 a 2 y además pueden calcularse llevando a:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + nR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Lo que demuestra que la entropía es una función de estado y no de proceso.

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

ΔS en la expansión isoterma de un gas ideal

Cuando un gas ideal experimenta una expansión isoterma, $T_2 = T_1$ y su variación de entropía es:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = 0 + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

La variación de entropía del gas es positiva porque V_2 es mayor que V_1 . Además, como hemos visto a lo largo de los últimos dos temas, en este proceso se transfiere al gas una cantidad de energía en forma de calor igual a menos el trabajo realizado por el gas

$$Q_{\text{rev}} = -W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Dado que la temperatura es constante en todo el proceso la variación de entropía del gas puede calcularse como:

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} = nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

ΔS en la expansión isoterma de un gas ideal

Cuando un gas ideal experimenta una expansión isoterma, $T_2 = T_1$ y su variación de entropía es:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = 0 + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

La variación de entropía del gas es positiva porque V_2 es mayor que V_1 . Además, como hemos visto a lo largo de los últimos dos temas, en este proceso se transfiere al gas una cantidad de energía en forma de calor igual a menos el trabajo realizado por el gas

$$Q_{\text{rev}} = -W_{\text{sobre el gas}} = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Dado que la temperatura es constante en todo el proceso la variación de entropía del gas puede calcularse como:

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} = nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Como la cantidad de calor que abandona el foco a la temperatura T es $-Q_{\text{rev}}$, la variación de entropía del foco es $-Q_{\text{rev}}/T$. La variación neta de entropía del gas más el foco es, por tanto, cero. Designaremos como “universo” al sistema que se estudia más el medio que le rodea. Este ejemplo ilustra un resultado general:

En un proceso reversible, la variación de entropía del universo es nula.

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

ΔS en un proceso a presión constante

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

En un proceso a presión constante la relación entre los volúmenes y las temperaturas inicial y final viene dada por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Utilizando la expresión obtenida anteriormente llegamos a:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_P \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

ΔS en un proceso a presión constante

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

En un proceso a presión constante la relación entre los volúmenes y las temperaturas inicial y final viene dada por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Utilizando la expresión obtenida anteriormente llegamos a:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_P \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

ΔS en un proceso a volumen constante

La variación de la entropía en un proceso a volumen constante viene dada por:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = C_v \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

ΔS en un proceso a presión constante

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

En un proceso a presión constante la relación entre los volúmenes y las temperaturas inicial y final viene dada por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Utilizando la expresión obtenida anteriormente llegamos a:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_P \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

ΔS en un proceso a volumen constante

La variación de la entropía en un proceso a volumen constante viene dada por:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = C_v \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

ΔS en un proceso adiabático

En un proceso adiabático la relación entre los volúmenes y las temperaturas inicial y final viene dada por:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = \frac{T_2}{T_1}$$

Utilizando la expresión obtenida anteriormente llegamos a:

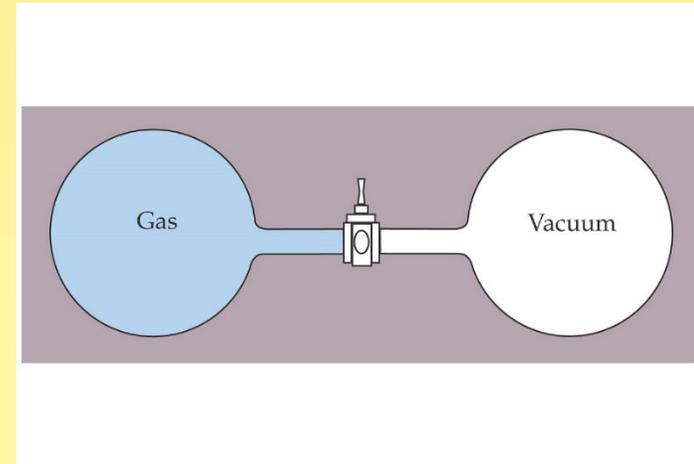
$$\Delta S = C_v \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = \left[\left(1 - \frac{c'_P}{c'_V}\right) n c'_V + nR \right] \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = n[(c'_V - c'_P) + R] \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 0$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

ΔS en la expansión libre de un gas ideal

Como hemos visto anteriormente, en la expansión libre de un gas ideal, un gas está inicialmente confinado en un compartimiento de un recinto, el cual está conectado por una válvula con otro compartimiento donde se ha hecho el vacío. Todo el sistema tiene paredes rígidas y está térmicamente aislado del medio, de modo que el calor no puede entrar ni salir, ni puede realizarse ningún tipo de trabajo sobre (o por) el sistema. Si la válvula se abre, el gas se precipita hacia el recinto vacío y finalmente el gas alcanza el equilibrio térmico consigo mismo. Como no se realiza ningún trabajo



y no se transfiere calor, la energía interna final del gas debe ser igual a su energía interna inicial. Si el gas es ideal, su energía interna depende solo de la temperatura T , de modo que la temperatura final T es igual a la inicial.

A primera vista podríamos pensar que no hay cambio de entropía del gas, ya que no hay transferencia de calor. Sin embargo, este razonamiento es falso porque este proceso no es reversible y, por lo tanto, no podemos utilizar para hallar la variación de entropía del gas mediante la expresión utilizada anteriormente

$$dS = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$

Sin embargo, los estados inicial y final del gas en la expansión libre son los mismos que los del gas en la expansión isoterma del ejemplo anterior. Como la variación de entropía del sistema en cualquier proceso depende únicamente de los estados inicial y final del sistema, la variación de entropía en la expansión libre es la misma que en el caso de la expansión isoterma, es decir:

$$\Delta S_{\text{gas}} = nR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

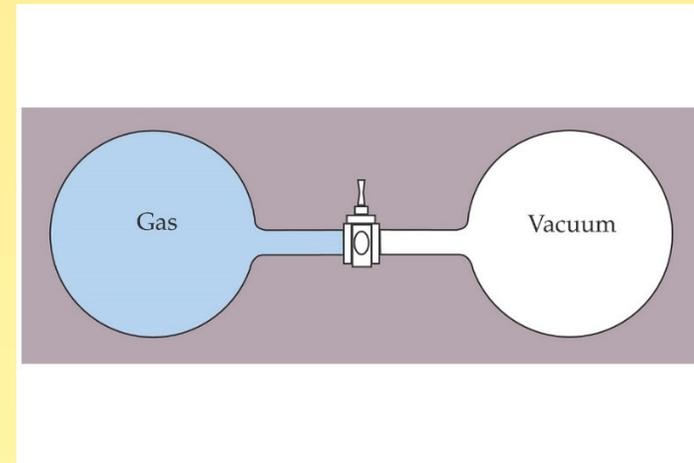
ΔS en la expansión libre de un gas ideal

Existe, no obstante, una diferencia fundamental entre este caso y el de la expansión isoterma analizado anteriormente. El medio externo en este caso no cambia y, por tanto, la variación de entropía del medio externo es cero. En definitiva, la variación del entropía del universo en este caso será igual a:

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{gas}} + \cancel{\Delta S_{\text{medio externo}}} = nR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Esto que hemos analizado aquí como un caso particular puede demostrarse que se trata de una propiedad general que puede enunciarse diciendo que:

En un proceso irreversible, la entropía del universo aumenta.



Entropía, irreversibilidad, y desorden

Cambios de entropía de un gas ideal en diversos procesos

ΔS en la expansión libre de un gas ideal

Existe, no obstante, una diferencia fundamental entre este caso y el de la expansión isoterma analizado anteriormente. El medio externo en este caso no cambia y, por tanto, la variación de entropía del medio externo es cero. En definitiva, la variación de entropía del universo en este caso será igual a:

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{gas}} + \cancel{\Delta S_{\text{medio externo}}} = nR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Esto que hemos analizado aquí como un caso particular puede demostrarse que se trata de una propiedad general que puede enunciarse diciendo que:

En un proceso irreversible, la entropía del universo aumenta.

Si el volumen final en la expansión libre fuese menor que el inicial, la entropía del universo disminuiría, pero esto no ocurre. Un gas no se contrae libremente por sí mismo hasta ocupar un volumen menor. Esto nos lleva a otro enunciado del segundo principio de la termodinámica:

Enunciado de la entropía del segundo principio de la termodinámica

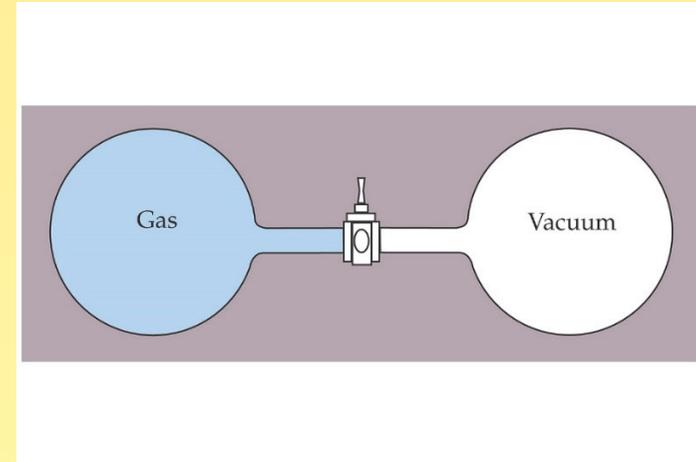
En cualquier proceso, la entropía del universo nunca disminuye.

Enunciado de Kelvin del segundo principio de la termodinámica

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Clausius del segundo principio de la termodinámica

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.



Entropía, irreversibilidad, y desorden

Entropía y disponibilidad de energía

Cuando tiene lugar un proceso irreversible, la energía se conserva, pero parte de la energía se “desperdicia”, en el sentido de que no es útil para realizar trabajo. Consideremos un bloque de masa m que cae al suelo. La variación de entropía del universo originada por este proceso es mgh/T . Cuando el bloque estaba a una altura h , se podría haber utilizado su energía potencial mgh para realizar trabajo útil. Después de la colisión inelástica del bloque con el suelo, esta energía deja de ser utilizable porque se ha transformado en energía interna desordenada del bloque y su medio.

La energía que ha dejado de ser útil es igual a $mgh = T\Delta S_{\text{universo}}$. Este resultado es general y puede expresarse diciendo que:

En un proceso irreversible, una cantidad de energía igual a $T\Delta S_{\text{universo}}$ resulta inútil para la realización de trabajo, siendo T la temperatura del foco más frío disponible.

Para simplificar, llamaremos a la energía que resulta inútil para producir trabajo, “trabajo perdido”:

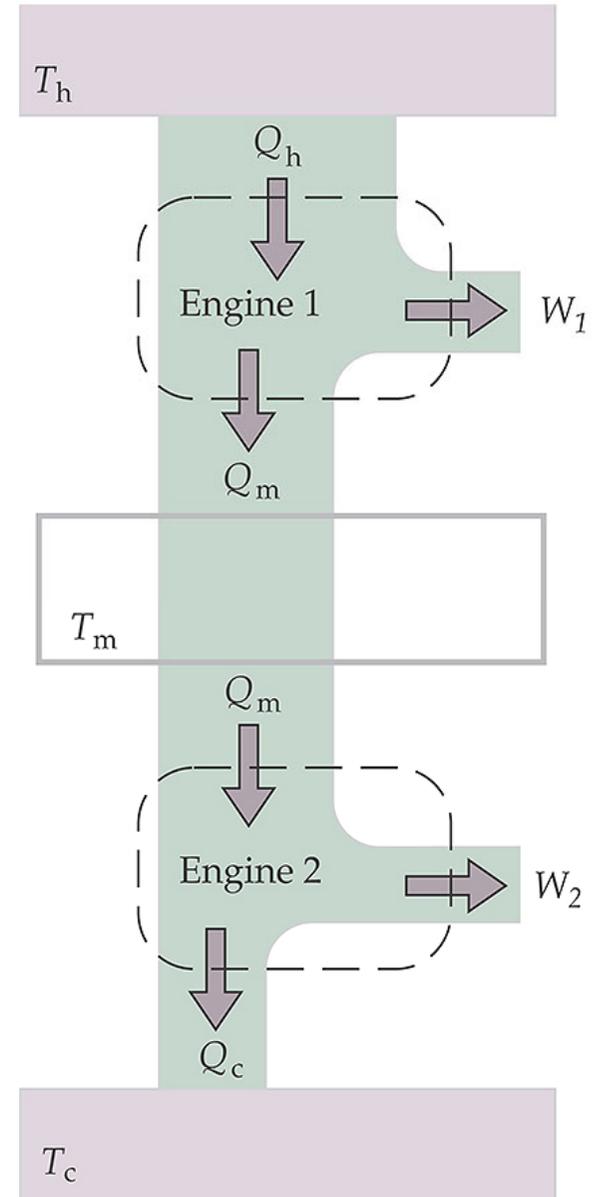
$$W_{\text{perdido}} = T\Delta S_{\text{universo}}$$

1. Supongamos que se conectan en “serie” dos máquinas térmicas de forma que el calor cedido por la primera se utiliza como calor absorbido por la segunda, como se indica en la figura. Los rendimientos de las maquinas son ε_1 y ε_2 , respectivamente. Demostrar que el rendimiento neto de la combinación viene dado por $\varepsilon_{\text{neto}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2$.

2. Supóngase que dos máquinas térmicas están conectadas en serie, de tal manera que el calor cedido por la primera maquina se utiliza como calor absorbido por la segunda, como se muestra en la figura. Supongamos que cada una de las máquinas es una máquina térmica ideal reversible. La maquina 1 funciona entre las temperaturas T_h y T_m , y la 2 entre T_m y T_c , siendo $T_h > T_m > T_c$. Demostrar que el rendimiento neto de la combinación de ambas maquinas viene dado

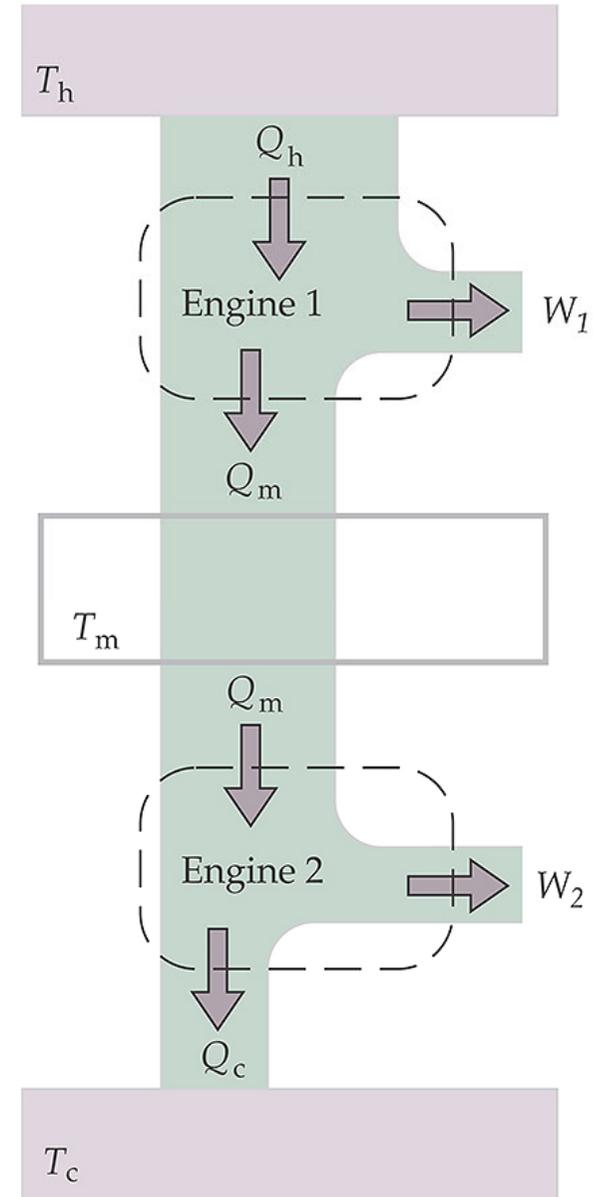
$$\varepsilon_{\text{neto}}^{\text{max}} = 1 - \frac{T_h}{T_c} = \frac{T_c - T_h}{T_c}$$

(Obsérvese que este resultado significa que dos maquinas térmicas reversibles en “serie” son equivalentes a una sola maquina reversible que funcione entre el foco más caliente y el más frío.)



1. Supongamos que se conectan en “serie” dos máquinas térmicas de forma que el calor cedido por la primera se utiliza como calor absorbido por la segunda, como se indica en la figura. Los rendimientos de las maquinas son ϵ_1 y ϵ_2 , respectivamente. Demostrar que el rendimiento neto de la combinación viene dado por $\epsilon_{\text{neto}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1\epsilon_2$.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{neto}} &= \frac{W_1 + W_2}{Q_h} = \frac{W_1}{Q_h} + \frac{W_2}{Q_h} = \epsilon_1 + \frac{W_2}{Q_h} + \frac{W_2}{Q_m} - \frac{W_2}{Q_m} = \\ &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \frac{W_2}{Q_h} - \frac{W_2}{Q_m} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + W_2 \left(\frac{1}{Q_h} - \frac{1}{Q_m} \right) = \\ &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + W_2 \frac{Q_m - Q_h}{Q_h Q_m} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - W_2 \frac{W_1}{Q_h Q_m} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2 \end{aligned}$$



2. Supóngase que dos máquinas térmicas están conectadas en serie, de tal manera que el calor cedido por la primera maquina se utiliza como calor absorbido por la segunda, como se muestra en la figura. Supongamos que cada una de las máquinas es una máquina térmica ideal reversible. La maquina 1 funciona entre las temperaturas T_h y T_m , y la 2 entre T_m y T_c , siendo $T_h > T_m > T_c$. Demostrar que el rendimiento neto de la combinación de ambas maquinas viene dado

$$\epsilon_{neto}^{max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

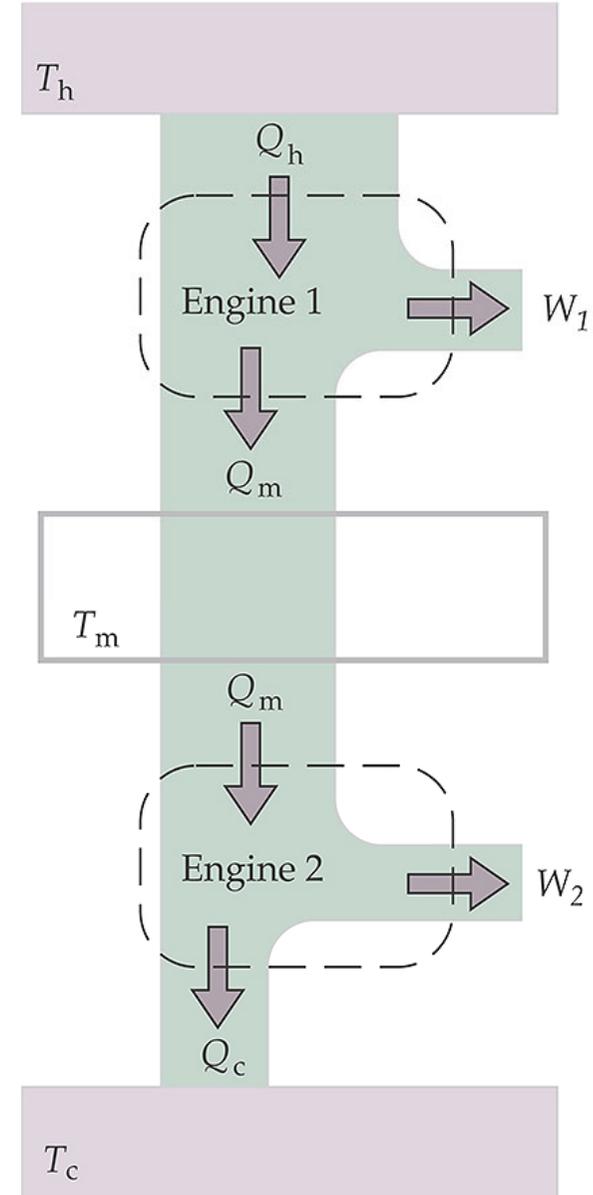
(Obsérvese que este resultado significa que dos maquinas térmicas reversibles en “serie” son equivalentes a una sola maquina reversible que funcione entre el foco más caliente y el más frío.)

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_{neto} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2 \\ \epsilon_1 = \frac{T_h - T_m}{T_h} \\ \epsilon_2 = \frac{T_m - T_c}{T_m} \end{array} \right\} \Rightarrow \epsilon_{neto} = \frac{T_h - T_m}{T_h} + \frac{T_m - T_c}{T_m} - \frac{T_h - T_m}{T_h} \frac{T_m - T_c}{T_m} =$$

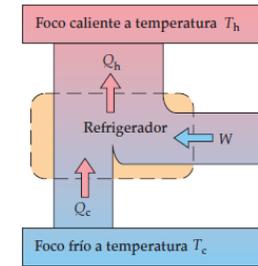
$$= \frac{T_h T_m - T_m^2 + T_h T_m - T_h T_c - (T_h - T_m)(T_m - T_c)}{T_h T_m} = \frac{T_h T_m - T_m^2 + T_h T_m - T_h T_c - T_h T_m + T_m T_c + T_h T_m - T_m^2 + T_m T_c}{T_h T_m} =$$

$$\epsilon_{neto} = \frac{T_h T_m - T_m^2 + T_h T_m - T_h T_c}{T_h T_m} - \frac{T_h T_m - T_h T_c - T_m^2 + T_m T_c}{T_h T_m} =$$

$$= \frac{\cancel{T_h T_m} - \cancel{T_m^2} + T_h T_m - \cancel{T_h T_c} - \cancel{T_h T_m} + \cancel{T_h T_c} + \cancel{T_m^2} - T_m T_c}{T_h T_m} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

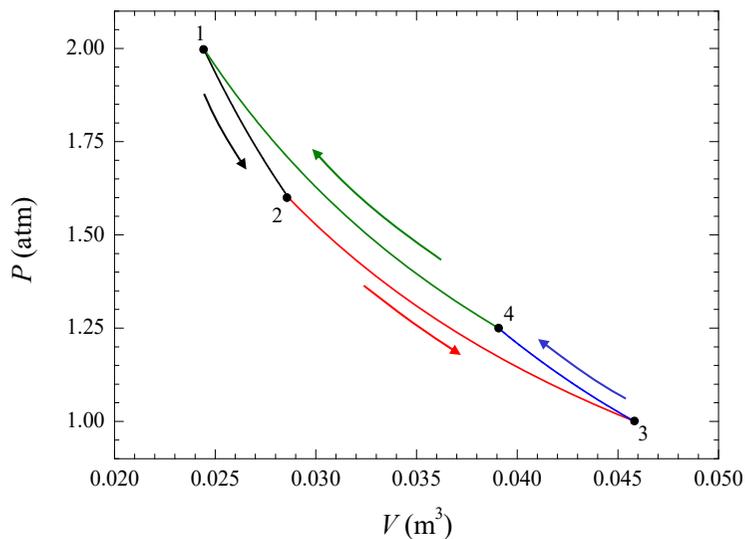


3. Una máquina de Carnot se utiliza como bomba de calor para mantener una casa a 27 °C, introduciendo en la misma $5 \cdot 10^6$ J (Q_h) cada hora, actuando el exterior como foco frío. La máquina funciona con 2 moles de gas ideal diatómico ($c_v = 5/2 R$). La presiones al inicio y al final del proceso de expansión adiabática son 2 y 1.6 atm, respectivamente; siendo la presión al final de la expansión isotérmica de 1 atm. Dibuje el ciclo en un diagrama P-V y calcule: a) los valores de todas las variables termodinámicas del ciclo ; b) los trabajos, calores, variaciones de energía interna y de entropía de cada proceso; c) la eficiencia de la máquina como bomba de calor (Q_h/W) y compárela con la eficiencia ideal. ¿A cuántos ciclos por minuto debe funcionar la máquina?



Para que una máquina funcione como bomba de calor tiene que ceder calor a la fuente caliente (a mayor temperatura) y absorber calor de la fuente fría (a menor temperatura) tal y como se muestra en la figura 1.

Por otro lado, el ciclo de Carnot, consta de dos procesos adiabáticos (curvas negra y azul en la figura) y dos procesos isotermos (curvas roja y verde en la figura). Por definición, en los dos procesos adiabáticos no hay transferencia de calor y, por tanto, la transferencia de calor en dicho ciclo tiene lugar en los procesos isotermos. De la ley de los gases ideales se deduce que la isoterma de color verde tiene



mayor temperatura que la isoterma de color rojo. Por lo tanto, para que el sistema funcione como una bomba, el calor tiene que ser positivo en la isoterma roja y negativo en la isoterma verde.

Por otro lado, en un proceso isotermo no varía la energía interna del gas por lo que, aplicando el primer principio de la termodinámica, el calor tiene que ser igual a menos el trabajo realizado por el gas.

$$Q^{\text{isotermo}} = -W = \int_{\text{inicial}}^{\text{final}} PdV = \int_{\text{inicial}}^{\text{final}} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \left(\frac{V^{\text{final}}}{V^{\text{inicial}}} \right)$$

Por lo tanto, en una isoterma, se produce una cesión de calor cuando hay una compresión del gas y una absorción de calor cuando hay una expansión del gas. De este razonamiento deducimos que el ciclo que tiene producirse en el sentido que muestran las flechas en la figura.

Del enunciado del problema tenemos que:

Punto	P (atm)	V (m ³)	T (°K)
1	2		300
2	1.6		
3	1		
4			300

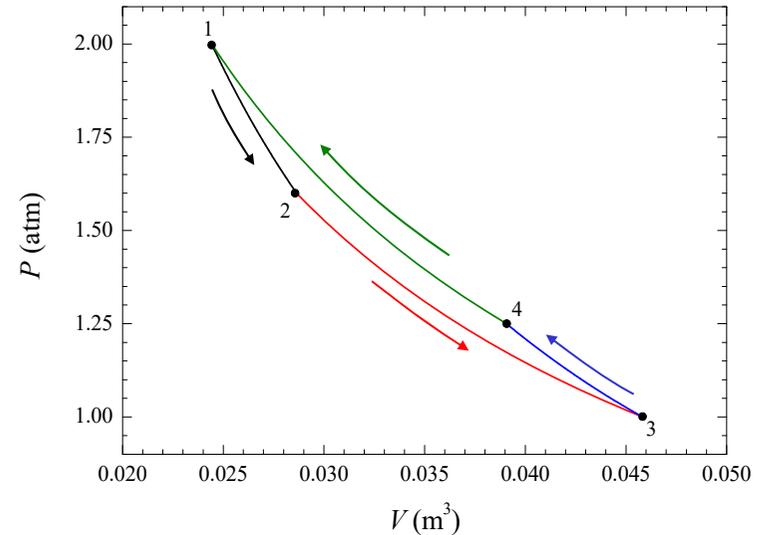
$$n = 2$$

$$c'_v = \frac{5}{2}R$$

$$c'_p = \frac{7}{2}R$$

$$E_{\text{int}} = \frac{5}{2}nRT$$

$$\gamma = \frac{c'_p}{c'_v} = \frac{7}{5}$$



Utilizando la ley de los gases ideales llegamos a:

$$P_1 V_1 = nRT_1 \Rightarrow V_1 = \frac{nRT_1}{P_1} = \frac{2 \cdot 8.314 \cdot 300}{2 \cdot 10^5} \text{ m}^3 = 0.02494 \text{ m}^3$$

Para el proceso adiabático 1-2 nos queda: $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \Rightarrow V_2^\gamma = \frac{P_1 V_1^\gamma}{P_2} \Rightarrow V_2 = \sqrt[\gamma]{\frac{P_1}{P_2}} V_1 = \sqrt[1.4]{\frac{2 \cdot 10^5}{1.6 \cdot 10^5}} \cdot 0.02494 \text{ m}^3 = 0.02925 \text{ m}^3$

Utilizando nuevamente la ley de los gases ideales: $P_2 V_2 = nRT_2 \Rightarrow T_2 = \frac{P_2 V_2}{nR} = \frac{1.6 \cdot 10^5 \cdot 0.02925}{2 \cdot 8.314} \text{ °K} = 281.45 \text{ °K} \Rightarrow T_3 = 281.45 \text{ °K}$

Para calcular V_3 volvemos a utilizar la ley de los gases ideales:

$$P_3 V_3 = nRT_3 \Rightarrow V_3 = \frac{nRT_3}{P_3} = \frac{2 \cdot 8.314 \cdot 281.45}{1 \cdot 10^5} \text{ m}^3 = 0.0468 \text{ m}^3$$

Finalmente, utilizamos la ley de los gases ideales:

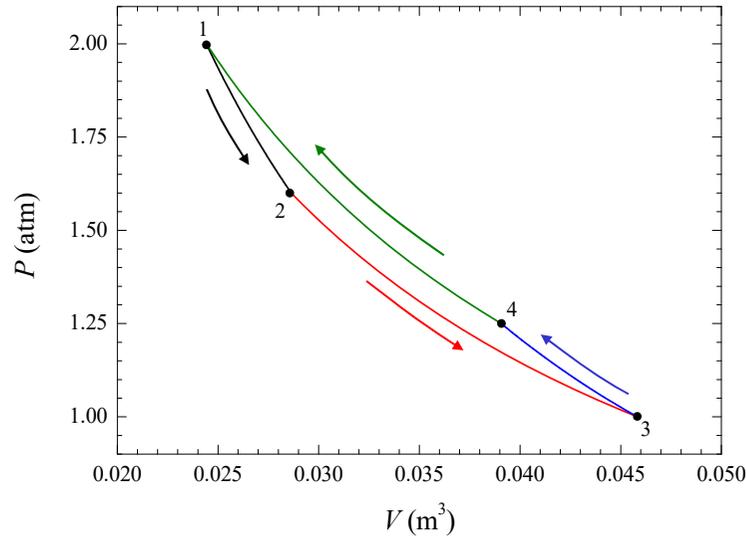
$$P_4 V_4 = nRT_4 \Rightarrow P_4 = \frac{nRT_4}{V_4} = \frac{2 \cdot 8.314 \cdot 300}{0.0399} \text{ Pa} = 1.25 \text{ atm}$$

Para calcular el volumen y la presión en el punto 4 utilizamos que el proceso 3-4 es adiabático

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1} \Rightarrow V_4 = \sqrt[\gamma-1]{\frac{T_3}{T_4}} V_3 = \sqrt[1.4-1]{\frac{281.45}{300}} \cdot 0.0468 \text{ m}^3 = 0.0399 \text{ m}^3$$

Con los últimos datos calculados la tabla nos quedaría como:

Punto	P (atm)	V (m ³)	T (°K)
1	2	0.02494	300
2	1.6	0.02925	281.45
3	1	0.0468	281.45
4	1.25	0.0399	300



Para calcular el calor, el trabajo y los incrementos de la energía interna y la entropía también utilizaremos una tabla de la cual conocemos inicialmente:

Proceso	Q (J)	W (J)	ΔE_{int} (J)	ΔS (J/°K)
1-2	0			
2-3			0	
3-4	0			
4-1			0	
Total			0	

En primer lugar, calcularemos la variación de energía interna y el trabajo en los procesos adiabáticos

$$\Delta E_{int}^{1-2} = \frac{5}{2} nR(T_2 - T_1) = \frac{5}{2} \cdot 28.314(281.45 - 300) \text{ J} = -771.12 \text{ J} = W^{1-2}$$

$$\Delta E_{int}^{3-4} = \frac{5}{2} nR(T_4 - T_3) = \frac{5}{2} \cdot 28.314(300 - 281.45) \text{ J} = 771.12 \text{ J} = W^{3-4}$$

01/03/2023

Valores de las variables termodinámicas:

$$n = 2$$

$$c'_V = \frac{5}{2} R$$

$$c'_P = \frac{7}{2} R$$

$$E_{int} = \frac{5}{2} nRT$$

$$\gamma = \frac{c'_P}{c'_V} = \frac{7}{5}$$

Punto	P (atm)	V (m³)	T (°K)
1	2	0.02494	300
2	1.6	0.02925	281.45
3	1	0.0468	281.45
4	1.25	0.0399	300

A continuación calculamos el trabajo y el calor de los procesos isotermos:

$$Q^{2-3} = -W^{2-3} = \int_{V_2}^{V_3} PdV = nRT_{23} \int_{V_2}^{V_3} \frac{dV}{V} = nRT_{23} \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) = 28.314 \cdot 281.45 \cdot \ln\left(\frac{0.0468}{0.02925}\right) \text{ J} = 2199.6 \text{ J}$$

$$Q^{4-1} = -W^{4-1} = \int_{V_4}^{V_1} PdV = nRT_{14} \int_{V_4}^{V_1} \frac{dV}{V} = nRT_{14} \ln\left(\frac{V_1}{V_4}\right) = 28.314 \cdot 300 \cdot \ln\left(\frac{0.02494}{0.0399}\right) \text{ J} = -2344 \text{ J}$$

Finalmente, la entropía en los procesos adiabáticos es cero mientras que en los procesos isotermos es igual a:

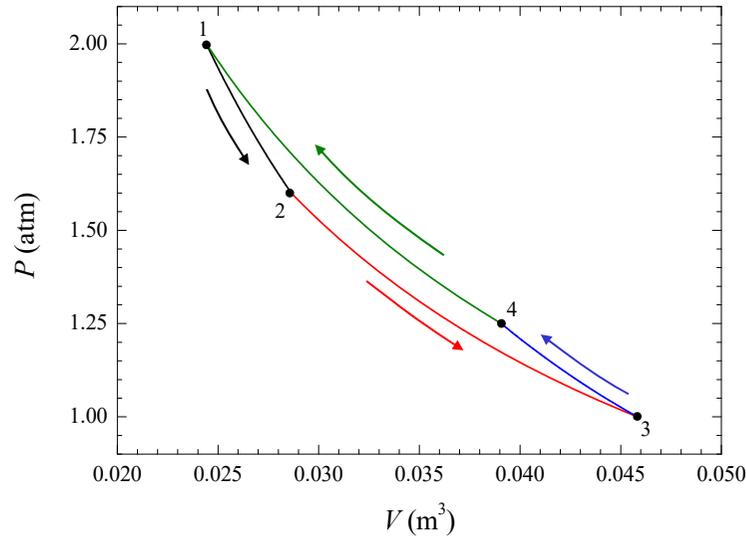
$$\Delta S^{2-3} = nR \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) = 28.314 \cdot \ln\left(\frac{0.0468}{0.02925}\right) \text{ J/°K} = 7.815 \text{ J/°K}$$

$$\Delta S^{4-1} = nR \ln\left(\frac{V_1}{V_4}\right) = 28.314 \cdot \ln\left(\frac{0.02494}{0.0399}\right) \text{ J/°K} = -7.814 \text{ J/°K}$$

Con estos datos tendríamos:

Proceso	Q (J)	W (J)	ΔE_{int} (J)	ΔS (J/°K)
1-2	0	-771.12	-771.12	0
2-3	2199.6	-2199.6	0	7.815
3-4	0	771.12	771.12	0
4-1	-2344	2344	0	-7.814
Total	-144.4	144.4	0	0

129



Valores del calor, el trabajo y los incrementos de la energía interna y la entropía:

Proceso	Q (J)	W (J)	ΔE_{int} (J)	ΔS (J/K)
1-2	0	-771.12	-771.12	0
2-3	2199.6	-2199.6	0	7.815
3-4	0	771.12	771.12	0
4-1	-2344	2344	0	-7.814
Total	-144.4	144.4	0	0

Por definición, la eficiencia de una bomba de calor es:

$$\eta = \frac{|Q_h|}{W}$$

donde Q_h y W son, respectivamente, es el calor cedido a la fuente caliente y el trabajo realizado por ciclo.

01/03/2023

Valores de las variables termodinámicas:

$$n = 2$$

$$c'_v = \frac{5}{2}R$$

$$c'_p = \frac{7}{2}R$$

$$E_{int} = \frac{5}{2}nRT$$

$$\gamma = \frac{c'_p}{c'_v} = \frac{7}{5}$$

Punto	P (atm)	V (m³)	T (°K)
1	2	0.02494	300
2	1.6	0.02925	281.45
3	1	0.0468	281.45
4	1.25	0.0399	300

En nuestro caso tendríamos:

$$|Q_h| = |Q^{4-1}| = 2344 \text{ J}$$

$$W = 144.4 \text{ J}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{2344}{144.4} = 16.23$$

Por otro lado, la máxima eficiencia de una bomba de calor viene dada por:

$$\eta^{\max} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{300}{300 - 281.45} = \frac{300}{18.55} = 16.17$$

Lógicamente tenía que habernos salido lo mismo. La pequeña diferencia viene dada por los decimales que hemos ido deprecando.

130