

VI. Segunda ley de la termodinámica

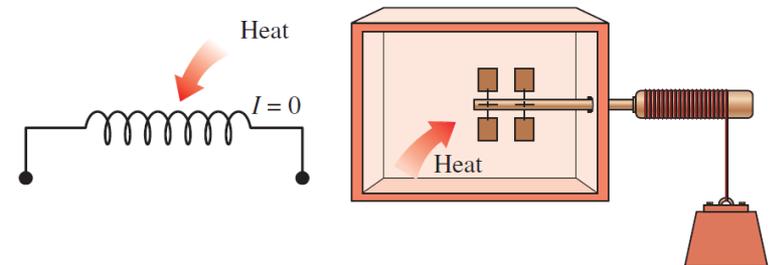
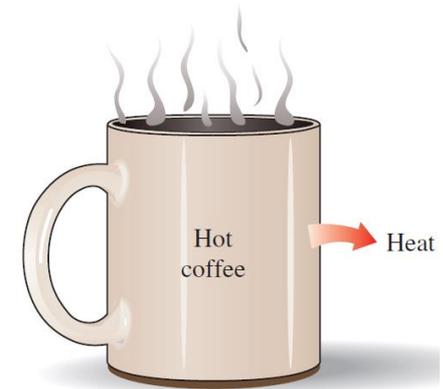
Objetivos:

1. Introducir la segunda ley de la termodinámica.
2. Identificar los procesos validos como aquellos que satisfacen tanto la primera ley como la segunda ley de la termodinámica.
3. Discutir fuentes y sumideros de energía térmica, procesos reversibles e irreversibles, máquinas de calor, refrigeradores, y bombas de calor.
4. Describir los postulados de Kelvin-Planck y de Clausius con respecto a la segunda ley de la termodinámica.
5. Discutir el concepto de máquinas de movimiento perpetuo.
6. Aplicar la segunda ley de la termodinámica a ciclos y dispositivos cíclicos.
7. Describir el ciclo de Carnot.
8. Determinar expresiones para las eficiencias térmicas y los coeficientes de desempeño de ciertos dispositivos reversibles.

1. Introducción a la segunda ley de la termodinámica.

Satisfacer la primera ley no garantiza que un proceso en realidad se lleve a cabo. Un proceso no puede ocurrir a menos que se satisfaga tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica.

Los procesos reales ocurren en una determinada dirección y no en dirección inversa. La primera ley no coloca restricciones con respecto a en qué dirección se dará un proceso.

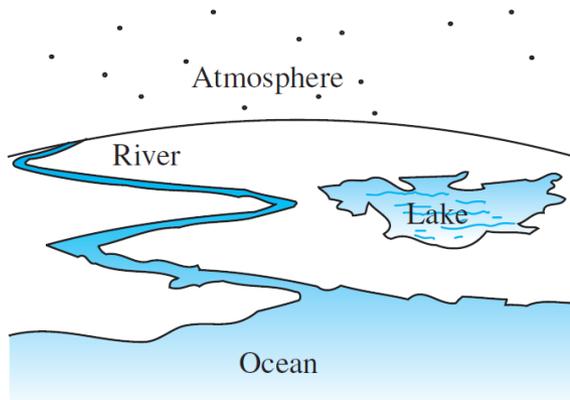


La violación de la segunda ley se puede detectar fácilmente a partir de una propiedad llamada *entropía*.

VI. Segunda ley de la termodinámica

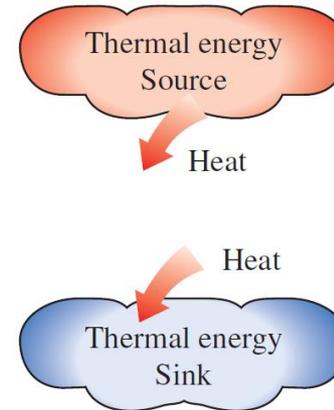
2. Reservorios (fuentes y sumideros) de energía térmica

Un *reservorio de energía térmica* es un cuerpo idealizado con una capacidad de energía térmica ($masa \times calor\ específico$) relativamente grande que puede suplir o absorber cantidades finitas de calor sin que se dé ningún cambio en su temperatura. Ejemplos incluyen: océanos, lagos, ríos, aire atmosférico, o cualquier otro cuerpo físico cuya capacidad de energía térmica sea relativamente grande en comparación a la cantidad de energía que suplir o absorbe.



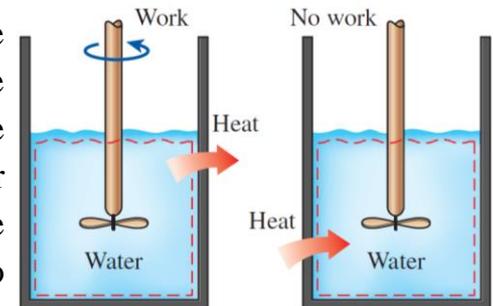
Una *fente* es un reservorio que supe energía en forma de calor.

Un *sumidero* es un reservorio que absorbe energía en forma de calor.



3. Máquinas de calor.

El trabajo se puede convertir fácilmente en otras formas de energía, pero convertir otras formas de energía en trabajo no es fácil.

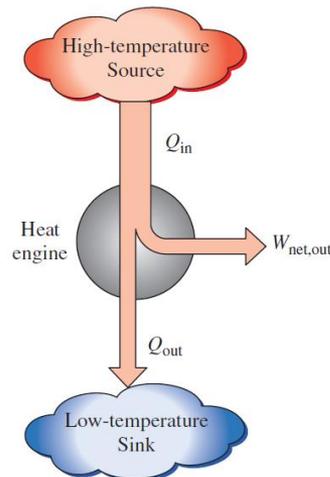


VI. Segunda ley de la termodinámica

3. Máquinas de calor.

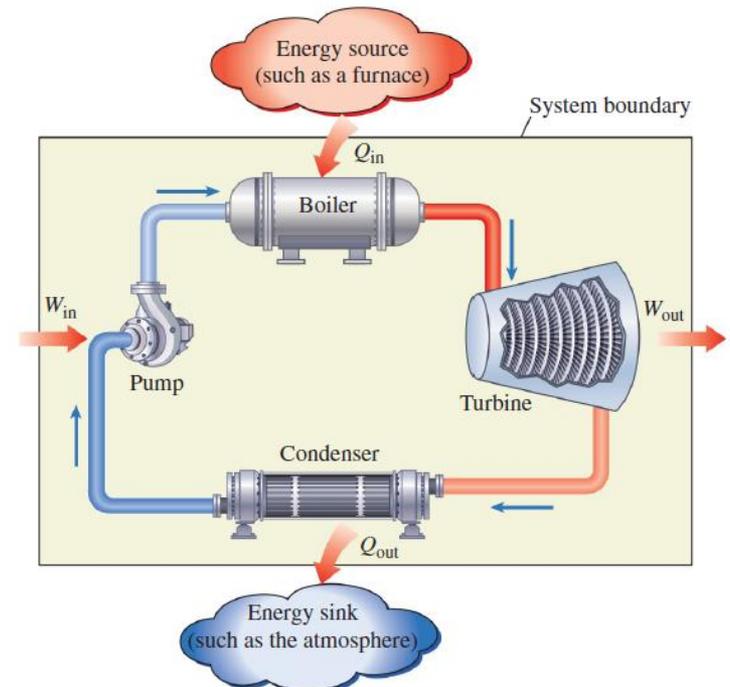
Una *máquina de calor* es un dispositivo para parcialmente convertir calor en trabajo. Las máquinas de calor pueden diferir considerablemente unas de otras, pero pueden ser caracterizadas por lo siguiente:

- Reciben calor de una fuente a alta temperatura.
- Convierten parte de este calor en trabajo.
- Rechazan el calor residual a un sumidero a baja temperatura.
- Operan en un ciclo.



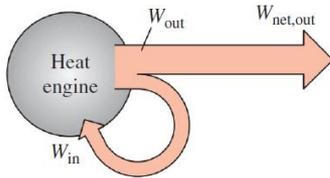
Las máquinas de calor y otros dispositivos cíclicos suelen involucrar un fluido sobre el cuál se dan las interacciones de calor durante el ciclo. A este fluido se le conoce como *fluido de trabajo*.

Un ejemplo de una máquina de calor lo constituye una planta de vapor.



VI. Segunda ley de la termodinámica

3. Máquinas de calor.



$$W_{neto} = W_{salida} - W_{entrada} \quad [\text{kJ}]$$

$$W_{neto} = Q_{entrada} - Q_{salida} \quad [\text{kJ}]$$

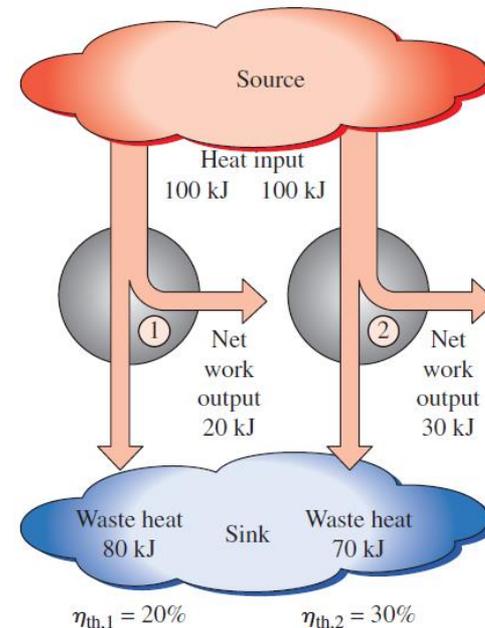
Eficiencia térmica

Q_{salida} representa la cantidad de energía desechada para poder completar el ciclo y nunca es cero, por lo tanto el trabajo neto de salida siempre será menor a la cantidad de calor de entrada.

En las máquinas de calor, se desea el trabajo neto y lo que se paga es el calor suministrado al fluido. Consecuentemente la eficiencia térmica $\eta_{térmica}$ estaría dada por:

$$\eta_{térmica} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$$

$$\eta_{térmica} = 1 - \frac{Q_{salida}}{Q_{entrada}}$$

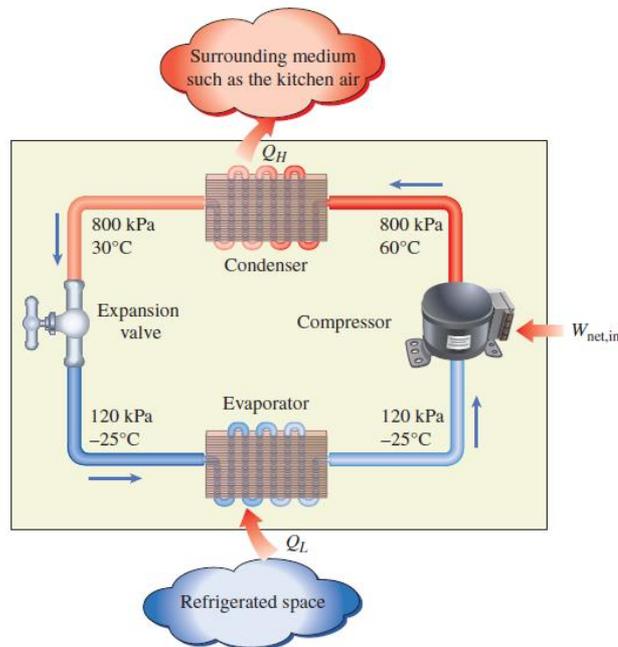


La *eficiencia térmica* es una medida de cuan eficientemente una máquina de calor convierte el calor que recibe en trabajo.

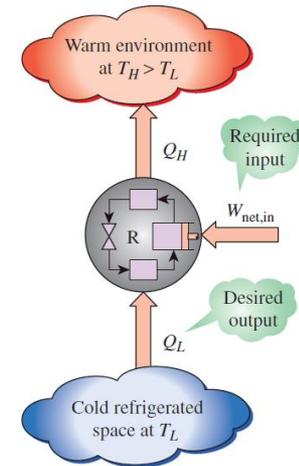
VI. Segunda ley de la termodinámica

4. Refrigeradores y bombas de calor.

Un *refrigerador* es un dispositivo que permite la transferencia de calor de un medio que se encuentra a baja temperatura hacia un medio que está a mayor temperatura.



Los refrigeradores son dispositivos cíclicos y el fluido de trabajo en un ciclo de refrigeración se conoce como refrigerante. El ciclo de refrigeración más común es el de compresión de vapor.



Coefficiente de desempeño (COP)

El coeficiente de desempeño de un refrigerador es análogo a la eficiencia de una máquina de calor.

$$COP = \frac{\text{Lo que quiero}}{\text{Lo que necesito}}$$

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{neto}}$$

Y en vista de que $W_{neto} = Q_H - Q_L$:

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

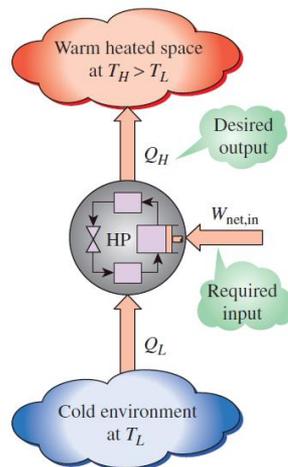
VI. Segunda ley de la termodinámica

4. Refrigeradores y bombas de calor.

A diferencia de la eficiencia el COP_R puede ser mayor que la unidad, ya que Q_L puede ser mayor que W_{neto} .

Bombas de calor

Otros dispositivos que transfieren calor de un medio de baja temperatura a otro de alta temperatura son las bombas de calor. Las bombas de calor operan en el mismo ciclo que los refrigeradores solo que difieren en sus objetivos.



En el caso de la bomba de calor, su coeficiente de desempeño COP puede ser definido como:

$$COP_{BC} = \frac{Q_H}{W_{neto}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

$$COP_{BC} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

Una comparación entre el COP de un refrigerador y el de una bomba de calor revela que:

$$COP_R = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{1}{COP_R} + 1$$

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{1 + COP_R}{COP_R}$$

$$COP_{BC} = \frac{1}{1 - \left(\frac{Q_L}{Q_H}\right)}$$

$$COP_{BC} = \frac{1}{1 - \left(\frac{COP_R}{1 + COP_R}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1 + COP_R - COP_R}{1 + COP_R}\right)}$$

$$COP_{BC} = 1 + COP_R$$

VI. Segunda ley de la termodinámica

4. Refrigeradores y bombas de calor.

Consecuentemente para valores fijos de calor de entrada y de salida en un ciclo, si el $COP_R > 1$, COP_{BC} también será mayor a la unidad.

Desempeño de refrigeradores, aires acondicionados, y bombas de calor

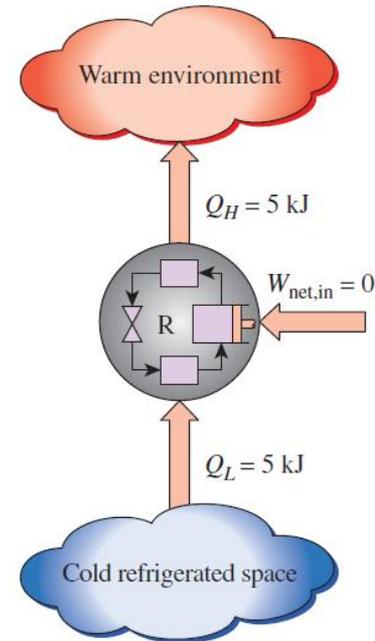
El desempeño de un aire acondicionado y de una bomba de calor es expresado con frecuencia en términos de la razón de eficiencia de energía (EER).

$$EER = 3.412COP_R$$

Postulado de la segunda ley de Clausius

Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo y que no produzca otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a uno de mayor temperatura.

Este postulado tiene que ver con la segunda ley y los refrigeradores en tanto que el de Kelvin-Planck tiene que ver con las máquinas de calor. Ambos postulados son equivalentes (vea el final de la sección 6.4 de su libro de texto).



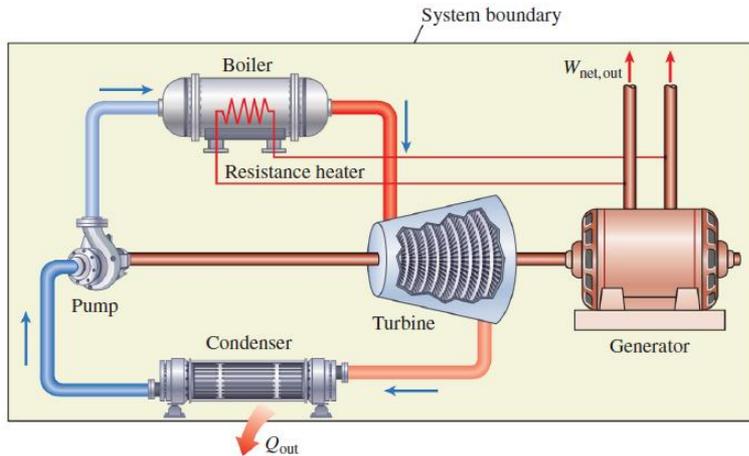
5. Máquinas de movimiento perpetuo.

Una *máquina de movimiento perpetuo* es aquella que viola alguna de las leyes de la termodinámica.

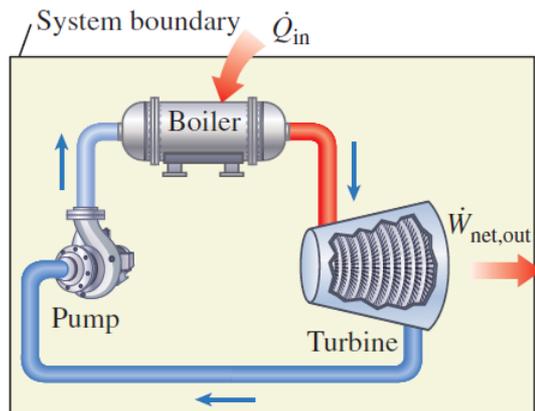
Un dispositivo que viola la primera ley de la termodinámica (al crear energía) es llamado una máquina de movimiento perpetuo de primer tipo (PMM1).

VI. Segunda ley de la termodinámica

5. Máquinas de movimiento perpetuo.

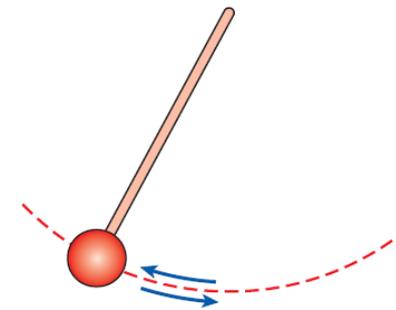


Un dispositivo que viola la segunda ley es llamado una máquina de movimiento perpetuo de segundo tipo (PMM2).



6. Procesos reversibles e irreversibles.

Un *proceso reversible* es definido como un proceso que se puede revertir sin dejar ningún rastro en los alrededores. Es decir tanto el sistema como sus alrededores regresan a su estado inicial al final del proceso reversible.



(a) Frictionless pendulum



(b) Quasi-equilibrium expansion and compression of a gas

Un *proceso irreversible* es aquel que no es reversible. Todos los procesos reales son irreversibles.

VI. Segunda ley de la termodinámica

6. Procesos reversibles e irreversibles.

¿Por qué se estudian los procesos reversibles?

-Son fáciles de analizar.

-Sirven como modelos idealizados, los cuales pueden ser comparados con procesos reales.

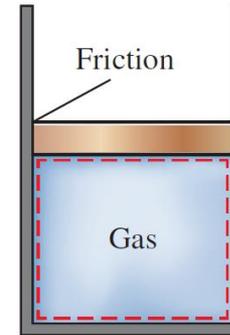
El concepto de proceso reversible lleva a la definición de la eficiencia de segunda ley para procesos reales; la cual permite saber que tan cercano es el proceso real al correspondiente proceso reversible. Entre mejor sea el diseño, menor es el número de irreversibilidades.

Irreversibilidades

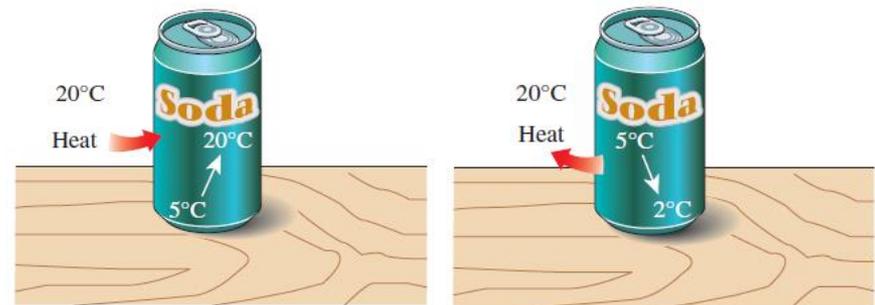
Las *irreversibilidades* son factores que causan que un proceso sea irreversible.

-Fricción. Es una irreversibilidad asociada al movimiento de cuerpos.

-Expansión no restringida de un gas. Cuando un gas no es restringido y se expande el gas llenará completamente el recipiente.



-Transferencia de calor.



(a) An irreversible heat transfer process

(b) An impossible heat transfer process

VI. Segunda ley de la termodinámica

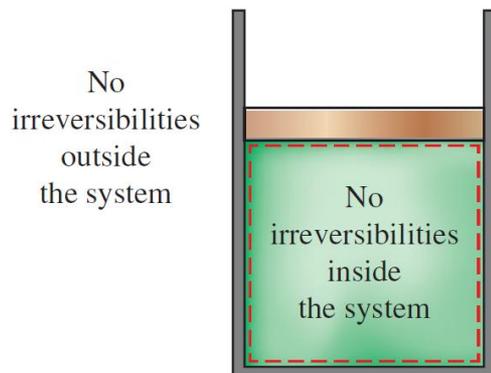
6. Procesos reversibles e irreversibles.

Procesos internamente y externamente reversibles

Un proceso internamente reversible se da sino ocurren irreversibilidad dentro de las fronteras del sistema durante un proceso. Un proceso de cuasi-equilibrio es un ejemplo de un proceso internamente reversible.

Un proceso es llamado externamente reversible sino ocurren irreversibilidades fuera de las fronteras de un sistema durante un proceso.

Un proceso reversible debe ser tanto interna como externamente reversible.



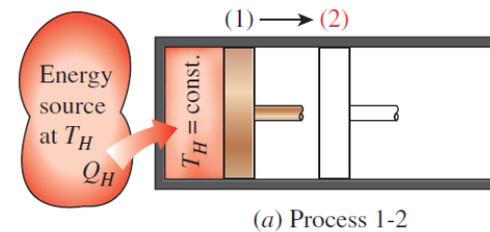
7. Ciclo de Carnot.

La eficiencia de un ciclo, puede ser maximizada cuando mucho al usar procesos reversibles.

Ciclos reversibles no puede ser logrados en la práctica ya que las irreversibilidades asociadas a cada proceso no pueden ser eliminadas. Sin embargo, un ciclo reversible provee un límite superior para un ciclo real.

El *ciclo de Carnot* es uno de los ciclos reversibles más conocidos.

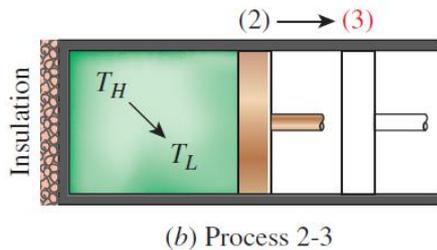
a. Expansión isotérmica reversible.



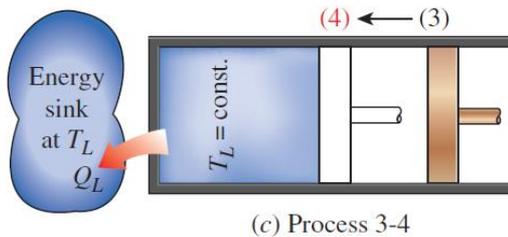
VI. Segunda ley de la termodinámica

7. Ciclo de Carnot.

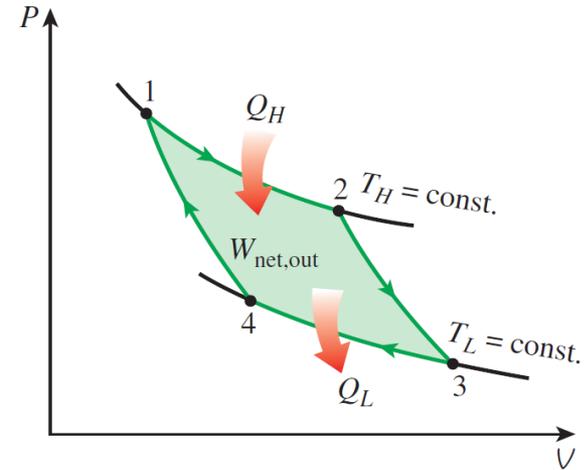
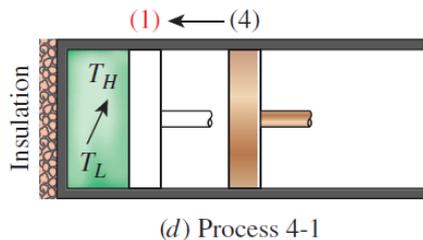
b. Expansión adiabática reversible.



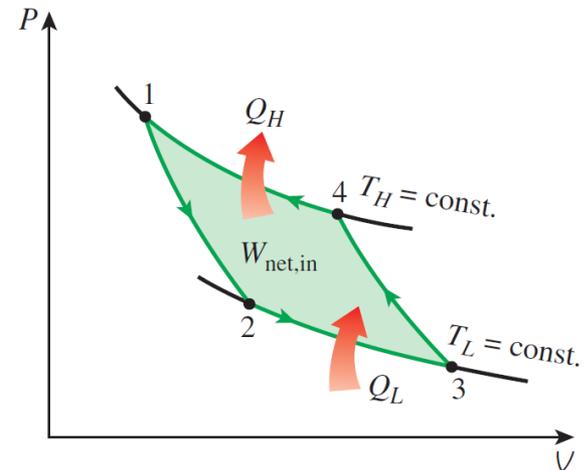
c. Compresión isotérmica reversible.



d. Compresión adiabática reversible.



Ciclo invertido de Carnot (ciclo de refrigeración).



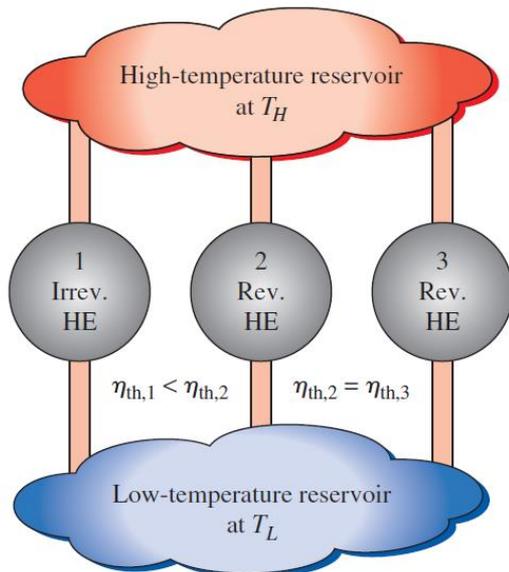
VI. Segunda ley de la termodinámica

8. Principios de Carnot.

Los principios de Carnot son dos conclusiones que se pueden hacer con respecto a las eficiencias térmicas de procesos reversibles e irreversibles:

-La eficiencia de una máquina de calor reversible es siempre inferior a la de una reversible operando entre los mismos dos reservorios.

-Las eficiencias de todas las máquinas reversibles que operan entre los mismos dos reservorios son iguales.

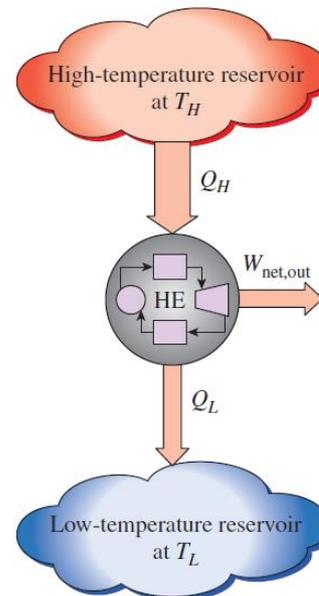


Al violar cualquiera de estos dos principios se viola la segunda ley (vea la sección 6.8 de su texto).

9. Máquina de calor de Carnot.

La máquina de calor hipotética que opera en un ciclo de Carnot reversible es llamada máquina de calor de Carnot.

La eficiencia térmica de cualquier máquina de calor, reversible o irreversible está dada por:



$$\eta_{t\acute{e}rmica} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

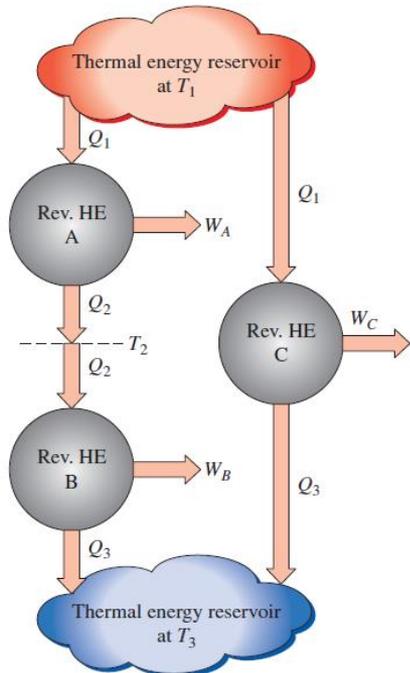
VI. Segunda ley de la termodinámica

9. Máquina de calor de Carnot.

Esta relación se puede expresar también en términos de las temperaturas de los reservorios, en el caso de ciclos reversibles.

$$\eta_{\text{térmica, rev}} = g(T_H, T_L), \quad \frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L)$$

Considere ahora las siguientes máquinas de calor reversibles.



$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2), \quad \frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3), \quad \frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$$

Considere ahora la identidad:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right) \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right)$$

$$f(T_1, T_3) = (f(T_1, T_2))(f(T_2, T_3))$$

Lo que hace evidente que el producto a la derecha debe ser únicamente función de T_1, T_3 . Esta condición se vería satisfecha si:

$$f(T_1, T_2) = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_2)}, \quad f(T_2, T_3) = \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_3)}$$

Sea $\phi(T) = T$ (propuesta de Lord Kelvin):

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3) = \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \left(\frac{T_2}{T_3}\right)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{T_1}{T_3}$$

VI. Segunda ley de la termodinámica

9. Máquina de calor de Carnot.

Lo cuál para la máquina de calor originalmente considerada daría:

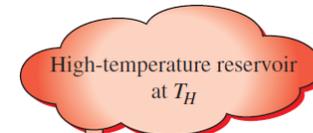
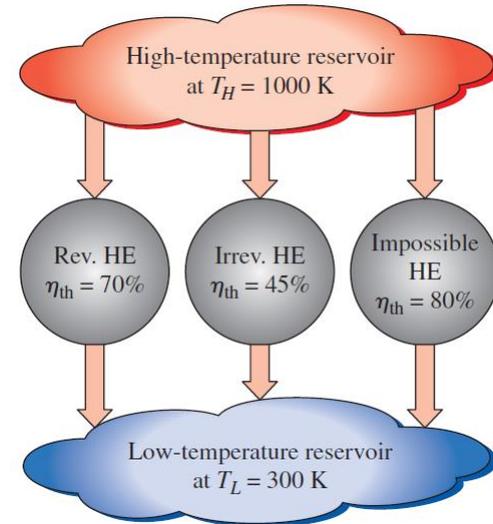
$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{rev} = \frac{T_H}{T_L}$$

$$\eta_{t\acute{e}rmica,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Esta eficiencia térmica es la más alta que puede alcanzar una máquina de calor operando entre dos reservorios de energía térmica a temperaturas T_L, T_H .

$$\eta_{t\acute{e}rmica} \begin{cases} < \eta_{t\acute{e}rmica,rev} & \text{máquina de calor irreversible} \\ = \eta_{t\acute{e}rmica,rev} & \text{máquina de calor reversible} \\ > \eta_{t\acute{e}rmica,rev} & \text{máquina de calor imposible} \end{cases}$$

De la ecuación de eficiencia térmica para una máquina de calor operando en un ciclo reversible se puede ver que la eficiencia se puede incrementar al aumentar la temperatura de la fuente (T_H) y al disminuir la temperatura del sumidero (T_L).



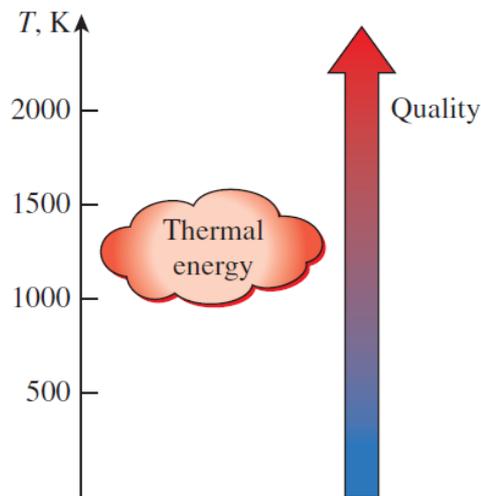
T_H, K	$\eta_{th}, \%$
925	67.2
800	62.1
700	56.7
500	39.4
350	13.4

VI. Segunda ley de la termodinámica

9. Máquina de calor de Carnot.

Calidad de la energía

La figura anterior demuestra que la energía tiene calidad así como cantidad. Es claro que entre mayor sea la temperatura de la fuente mayor cantidad de energía térmica puede ser convertida en trabajo. Por lo tanto, a mayor temperatura mayor calidad de la energía.



El trabajo es una forma de energía más valiosa que el calor y esta puede ser convertido totalmente en calor.

En tanto, solo una fracción del calor puede ser convertida en trabajo.

Tenga presente que la energía se conserva, y lo que no se conserva es la calidad de la energía. Desperdiciar energía es sinónimo de convertirla en una forma menos útil.

10. El refrigerador de Carnot y la bomba de calor

Los coeficientes de desempeño para ciclos reversibles están dados por:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}, \quad COP_{BC} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

Estos son los coeficientes de desempeño más altos que un refrigerador o una bomba de calor puede alcanzar al operar entre reservorios a temperaturas T_H, T_L .

$$COP_R \begin{cases} < COP_{R,rev} & \text{Refrigerador irreversible} \\ = COP_{R,rev} & \text{Refrigerador reversible} \\ > COP_{R,rev} & \text{Refrigerador imposible} \end{cases} \quad 15$$

VI. Segunda ley de la termodinámica

10. El refrigerador de Carnot y la bomba de calor

