

Física I

Apuntes de Clase 11

MII 2024

Procesos reversibles e irreversibles.
Màquinas Tèrmicas. Ciclo de Carnot.
Rendimiento. Enunciados del Segundo principio. Teorema de Carnot.

Susana Conconi

■ Procesos reversibles e irreversibles

Puede observarse que:

- Todos los procesos que se realizan **espontaneamente** ocurren en **una dirección**. Nunca siguen por si mismos la dirección contraria.

- Los procesos **espontaneos** en una dirección son **irreversibles**, *seguirán su curso una vez iniciados.. No es posible hacerlos retroceder introduciendo un pequeño cambio en su entorno..*

El **Primer Principio** no “distingue” entre trabajo y calor, son “equivalentes” en cuanto a procesos.

No permite predecir la **direccionalidad** de los procesos.

No indica si el proceso ocurrirá **espontáneamente** o no.

Es el **Segundo Principio de la Termodinámica** el que determina la dirección preferida de los procesos irreversibles de la naturaleza

Maria Susana Conconi

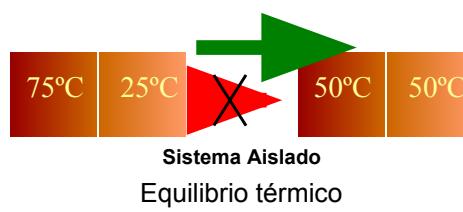
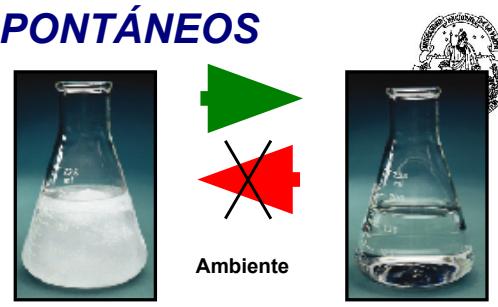
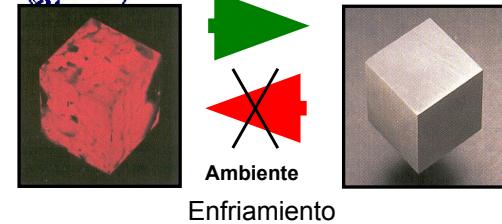
La taza se enfriá por si sola, pero no puede calentarse por si misma!

A presión y temperatrua ambiente un bloque de hielo se derrite pero no puede congelarse el agua espontaneamente

Dos gases pueden mezclarse espontaneamente pero no pueden volver a su estado inicial separados.

Un gas puede expandirse contra el vacío pero no puede espontaneamente comprimirse y ocupar solo una porción de un recipiente

PROCESOS ESPONTÁNEOS



Procesos irreversibles

- Rozamiento viscoso de un líquido.
- Deformación plástica de un sólido.
- Expansión de un gas contra el vacío.
- Rotura de un sólido.
- Pérdida de calor.
- Difusión de un cuerpo en otro.

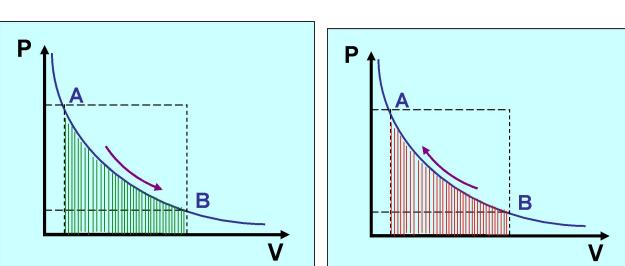
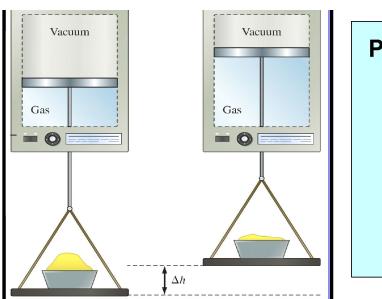
Procesos espontáneos: Son aquellos que tienen lugar sin intervención externa. Se llevan a cabo en un sentido definido.

Maria Susana Conconi

Proceso Reversible:

• El sistema se encuentra siempre en equilibrio con sus inmediaciones. Los procesos directo e inverso siguen el mismo camino: Se puede devolver al sistema y a su entorno al estado inicial invirtiendo el camino exactamente.

- Está dado por una sucesión de estados de equilibrio.
- Puede invertirse por un cambio infinitesimal en las condiciones externas.
- Se realiza de manera infinitamente lenta.
- Es una idealización de los procesos quasi estáticos. Un comportamiento límite

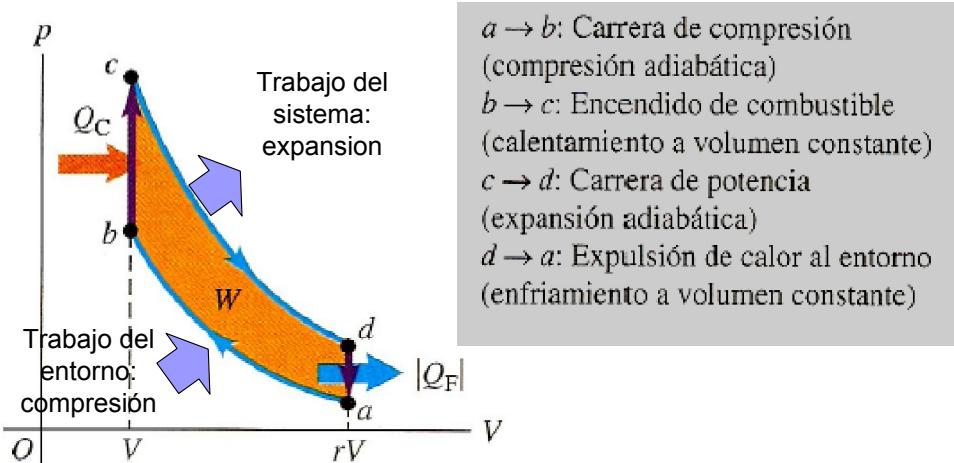


Máquinas térmicas – desarrollo histórico

- 1769, James Watt patentó la primera máquina de vapor.
- 1824, Sadi Carnot publicó “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego ...”
- 1850, Rudolf Clausius estableció su enunciado del Segundo Principio.
- 1851, Lord Kelvin propuso su enunciado del mismo principio.

Maria Susana Conconi

Ciclo de Otto

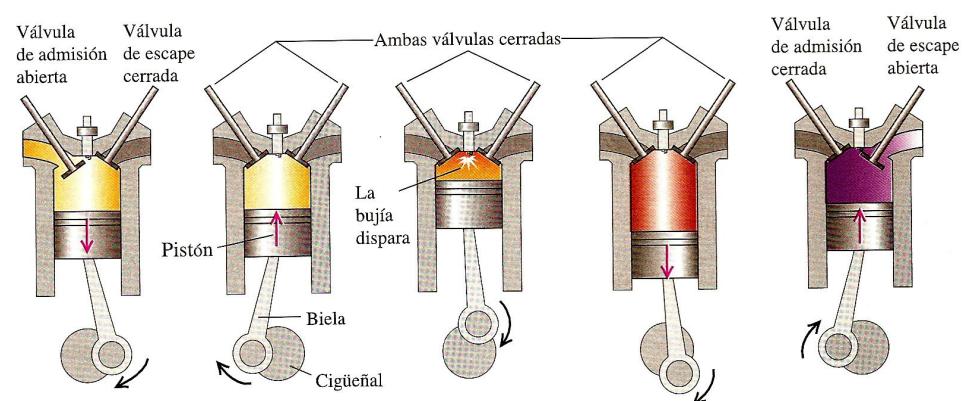


<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo2p/otto.html>

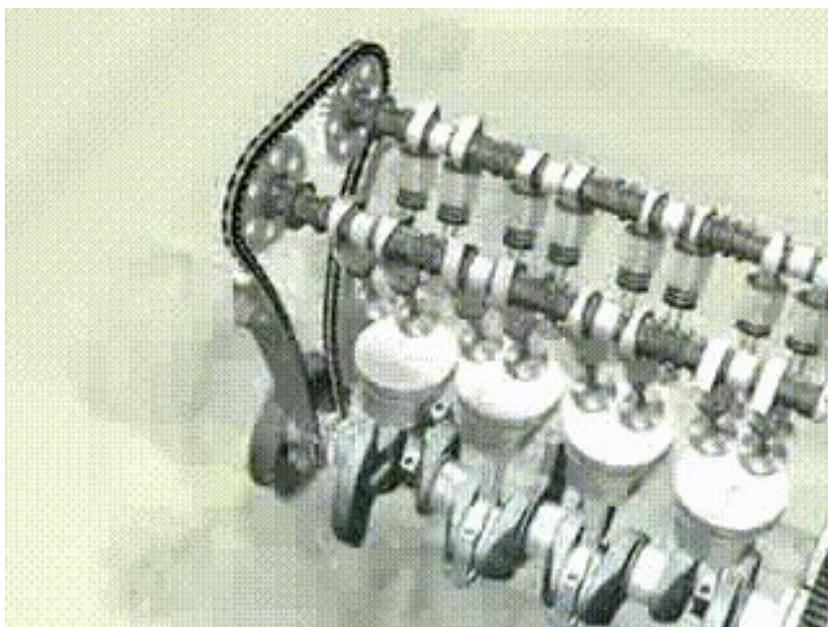
Maria Susana Conconi

<http://motorgiga.com/ciclo-otto/gmx-tag911.htm>

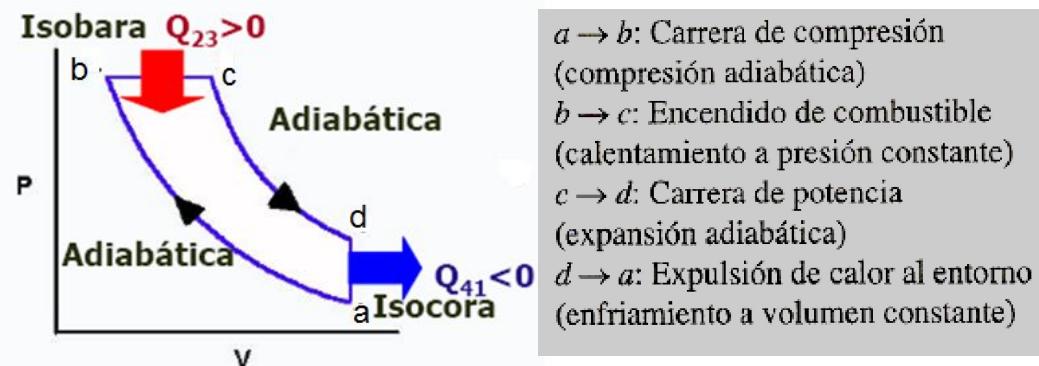
Motor de cuatro tiempos



Maria Susana Conconi



Ciclo Diesel



Maria Susana Conconi

Segunda Ley de la Termodinàmica

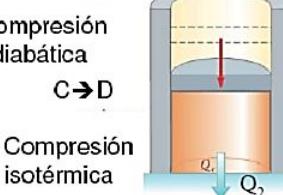
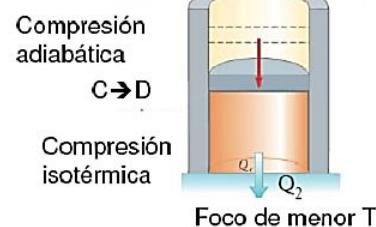
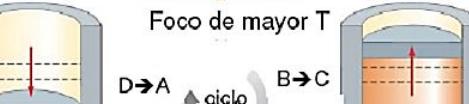
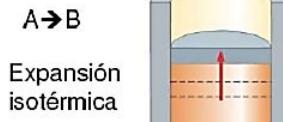
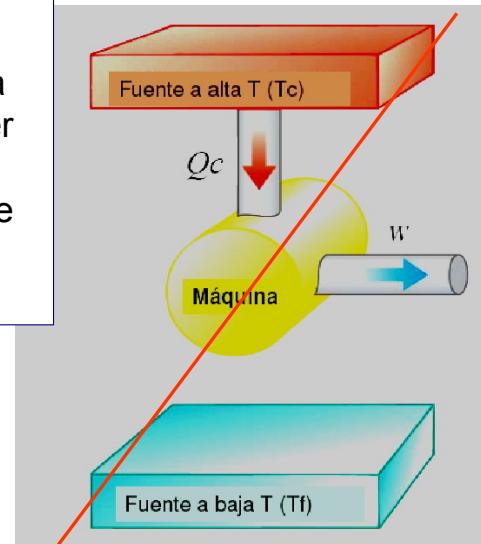
Enunciado de Kelvin-Planck

Es imposible la existencia de una máquina que después de recorrer un ciclo tenga como único resultado la absorción de calor de un foco y la conversión de este calor en trabajo.

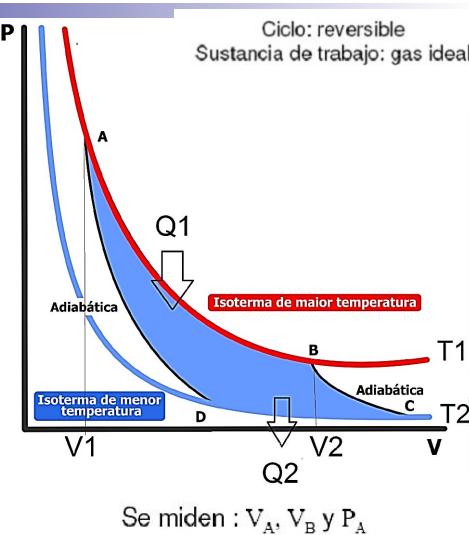
Rendimiento del ciclo

$$\eta = W_{\text{neto}} / Q_c \neq 100\%$$

Maria Susana Conconi



CICLO de CARNOT



Consideramos: $T_2 = T_f$ y $T_1 = T_c$

Este ciclo es una **idealización** ya que está constituido por transformaciones **reversibles**: el intercambio de calor de la sustancia de trabajo con los focos se produce a través de isotermas y las variaciones de temperatura de forma adiabática.

Análisis de cada transformación

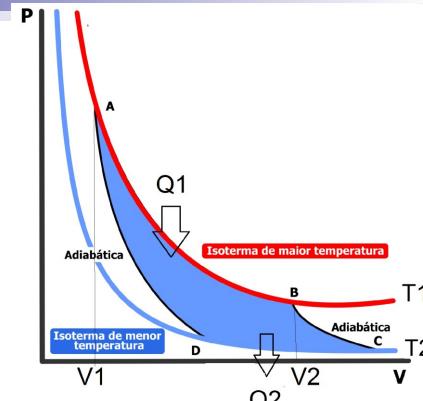
Transformación A-B (isoterma)

La presión $P_B = nRT_1 / V_B$

Variación de energía interna: $\Delta U = 0$

Trabajo $W = nRT_1 \ln(V_B/V_A)$

Calor $Q_1 = W_{AB} > 0$ absorbido y expansión



Transformación B-C (adiabática)

El Volumen $V_C = [(P_B V_B)^{\gamma} / P_C]^{1/\gamma}$

Calor $Q = 0$

Variación de energía interna $\Delta U = nCv(T_2 - T_1)$

Trabajo $W = -\Delta U > 0$ expansión

Transformación C-D (isoterma)

Variación de energía interna $\Delta U = 0$

Trabajo $W = nRT_2 \ln(V_D/V_C)$

Calor $Q_2 = W_{CD} < 0$ cedido y compresión

Transformación D-A (adiabática)

Se despeja V_D de la ecuación de la adiabática

Variación de energía interna $\Delta U = nCv(T_1 - T_2)$

Trabajo $W = -\Delta U < 0$ compresión

Análisis del ciclo

$$\Delta U = \Delta U_{B \rightarrow C} + \Delta U_{D \rightarrow A} = 0$$

$$W = nR(T_1 - T_2) \ln(V_B/V_A)$$

$$Q_{\text{abs}} = nRT_1 \ln(V_B/V_A)$$

Las relaciones de los volúmenes:

$$\begin{aligned} T_1 V_2^{\gamma-1} &= T_2 V_3^{\gamma-1} \\ T_1 V_1^{\gamma-1} &= T_2 V_4^{\gamma-1} \end{aligned} \quad \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



El rendimiento de una máquina de Carnot (η_c)

$$\eta_c = W_{\text{neto}} / Q_{\text{abs}}$$

$$\eta_c = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - T_2 nR \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)}{T_1 nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

Maria Susana Conconi

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Sólo depende de las temperaturas de los focos. Se debe cumplir para cualquier sustancia

Un motor de Carnot es un dispositivo ideal que describe un ciclo de Carnot.

En un **motor real**, el foco caliente está representado por la caldera de vapor que suministra el calor, el sistema cilindro-émbolo produce el trabajo y se cede calor al foco frío que es la atmósfera.

Ejercitación:

Un motor que funciona como una maquina de Carnot, produce 50 Kw cuando trabaja entre temperaturas de 800°C y 100°C. Determinar el rendimiento del motor y el calor absorbido en un ciclo

Maria Susana Conconi

Límite en el rendimiento de un motor real

TEOREMA DE CARNOT: Todas las máquinas que funcionan *reversiblemente* entre los mismos focos tienen el mismo rendimiento térmico

Corolario del teorema de Carnot: ninguna máquina térmica funcionando entre dos temperaturas puede tener un rendimiento mayor que la máquina de carnot

Máximo rendimiento de una máquina térmica funcionando entre dos temperaturas T_1 y T_2 ≡ con rendimiento de Carnot *

$$\eta = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 1 - \left(\frac{T_f}{T_c} \right)$$

Determinar el rendimiento del motor y el calor absorbido en un ciclo

$$\eta = \frac{W_{\text{tot}}}{Q_{\text{abs}}}$$

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\text{Pot} = \frac{W_{\text{tot}}}{t}$$

$$\eta_c = \frac{1073 \text{ K} - 373 \text{ K}}{1073 \text{ K}} = 0,65$$

$$\eta_c = 0,65 = \frac{W_{\text{tot}}}{Q_{\text{abs}}} = \frac{W_{\text{tot}}/t}{Q_{\text{abs}}/t} = \frac{\text{Pot}}{Q_{\text{abs}}/t}$$

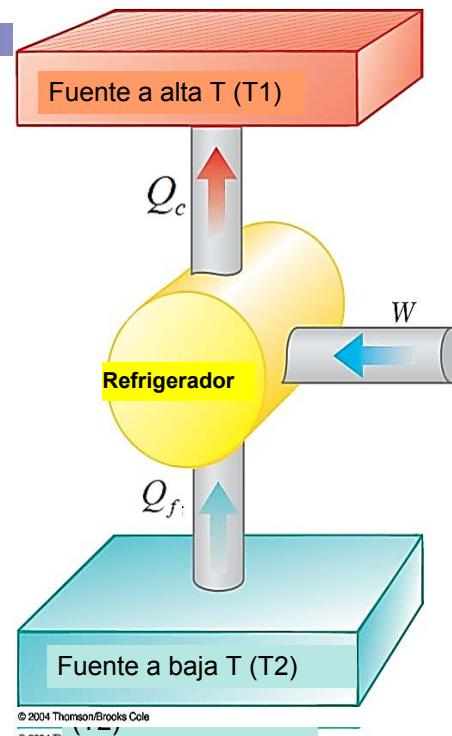
$$Q_{\text{abs}}/t = \text{Pot}/\eta = 50 \text{ Kw} / 0,65 = 76,9 \text{ Kw}$$

Máquina Frigorífica:

Refrigerador/ Acondicionador

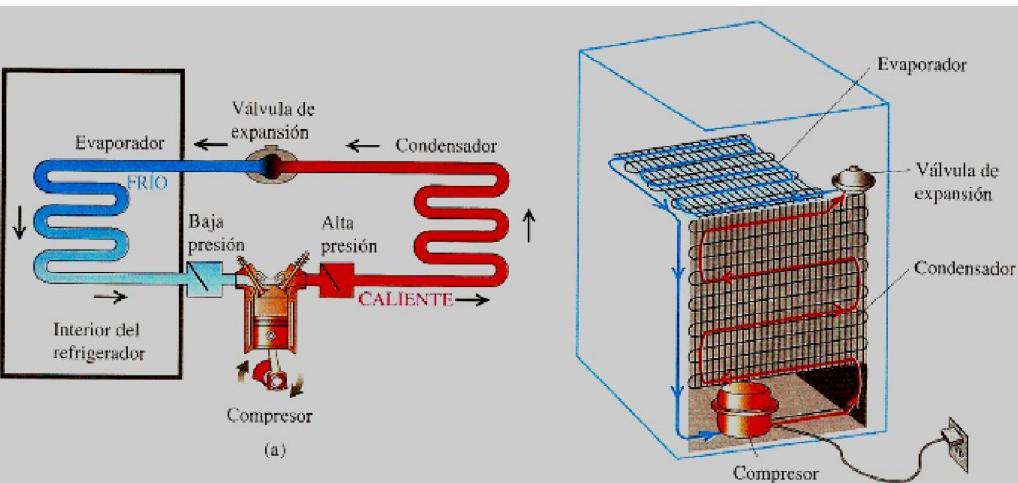
- Extrae calor de un foco frío.
- El calor se extrae del foco frío realizando trabajo y se cede al foco caliente.
- La sustancia de refrigeración puede ser agua, aire, gasoil, gasolina..

$$W_{\text{sobre sist.}} + Q_f = |Q_c|$$



* OJO no puede violar el segundo principio de la termodinámica $\eta < 100\%$

Heladera



Los sistemas de compresión emplean cuatro elementos en el ciclo de refrigeración: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador.

Maria Susana Conconi

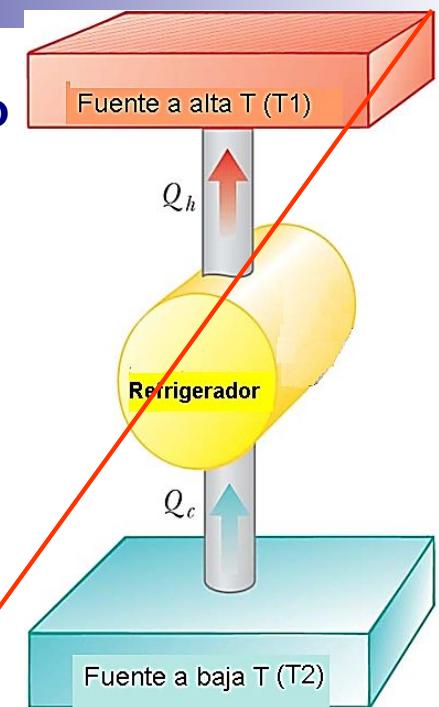
Segundo principio

Enunciado de Clausius

No es posible un proceso cíclico cuyo único resultado sea la transferencia de calor de un cuerpo de menor T a otro de mayor T.

Para funcionar necesitan corriente eléctrica!

Maria Susana Conconi



Eficiencia de un refrigerador

$$\Delta U = 0 = Q_{neto} - W_{neto,sist.}$$

Como

$$W_{sobre\ syst.} + Q_f = |Q_c| \quad \rightarrow \quad W_{sobre\ syst.} = |Q_c| - Q_f$$

Definimos eficiencia para cualquier frigorífico:

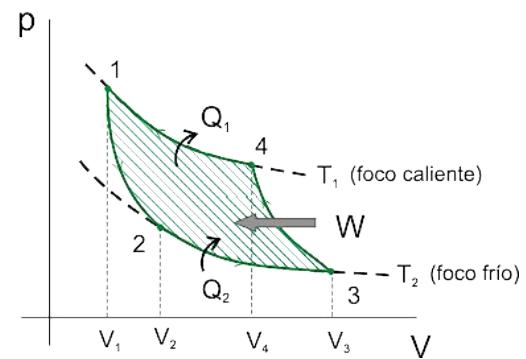
$$\mathcal{E} = \frac{Q_f}{W_{sobre\ syst.}} = \frac{Q_f}{|Q_c| - Q_f}$$

Maria Susana Conconi

Refrigerador de Carnot

La máquina de Carnot puede funcionar en sentido inverso, como frigorífico. Se extraería calor Q_2 del foco frío aplicando un trabajo W , y cedería Q_1 al foco caliente.

En un frigorífico real, el motor conectado a la red eléctrica produce un trabajo que se emplea en extraer un calor del foco frío (la cavidad del frigorífico) y se cede calor al foco



$$\mathcal{E}_{Carnot} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Maria Susana Conconi

Ejercitación:

.- Un refrigerador de Carnot funciona con 18 moles de un gas ideal monoatómico, realizando ciclos de 2 s. Las temperaturas de los focos son 250 K y 150 K y consume una potencia de 60 kW.

- a) Dibuja el ciclo en un diagrama p - V especificando las transformaciones que lo componen. Calcular la eficiencia.
- b) Calcular el calor intercambiado en cada etapa y la relación entre los volúmenes en la compresión isotérmica.

Maria Susana Conconi

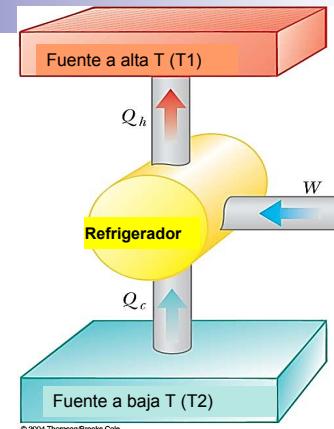
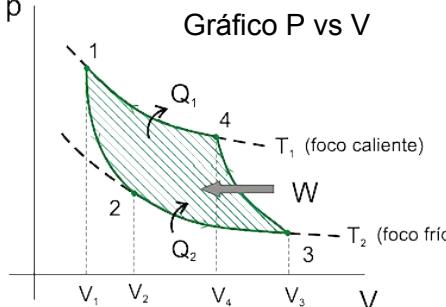


a) Dibuja el ciclo en un diagrama p - V especificando las transformaciones que lo componen. Calcular la eficiencia.

$$T_c = 250 \text{ K} \text{ y } T_f = 150 \text{ K}$$

Consumo: 60 kW y ciclos de 2 seg

p



Esquema

$$\epsilon_C = \frac{150 \text{ K}}{250 - 150 \text{ K}} = 1,5$$



- b) Calcular el calor intercambiado en cada etapa y la relación entre los volúmenes en la compresión isotérmica.

En las adiabáticas $Q=0$

$$Q_{12} = Q_{34} = 0$$

En las isotermas: $Q = W = nRT \ln(V_f/V_i)$ Nos faltan datos

$$\epsilon = \frac{Q_f}{W_{\text{sist.}}}$$



$$W_{\text{tot}} = Q_{\text{tot}} = |Q_c| - |Q_f| = |Q_{41}| - |Q_{23}| \quad \square$$

$$|Q_{41}| = |Q_{23}| + W_{\text{tot}} = 180 \text{ kJ} + 120 \text{ kJ} = 300 \text{ kJ} \text{ en valor absoluto}$$

Calor cedido en el foco caliente = Calor absorbido en foco frío + Trabajo realizado sobre el sistema

¿la relación entre los volúmenes en la compresión isotérmica?

Es el proceso 41:

$$Q_{41} = W_{41} = nRT_c \ln(V_1/V_4) < 0 \text{ por ser compresión y calor cedido}$$

$$Q_{41} = -300.000 \text{ J} = \frac{18 \text{ mol} \cdot 8.31 \text{ J} \cdot 250 \text{ K} \ln(V_1/V_4)}{\text{K mol}}$$

$$\text{Pot} = \frac{W_{\text{sist.}}}{t} \quad \square \quad W_{\text{sist.}} = \text{Pot} \cdot t = 60 \text{ kW} \cdot 2 \text{ seg} = 120 \text{ kJoul}$$

$$Q_{\text{abs,ff}} = Q_{23} = W_{\text{sist.}} \cdot \epsilon = 120 \text{ kJ} \cdot 1,5 = 180 \text{ kJ}$$

$$(V_1/V_4) = e^{(-8,02)}$$

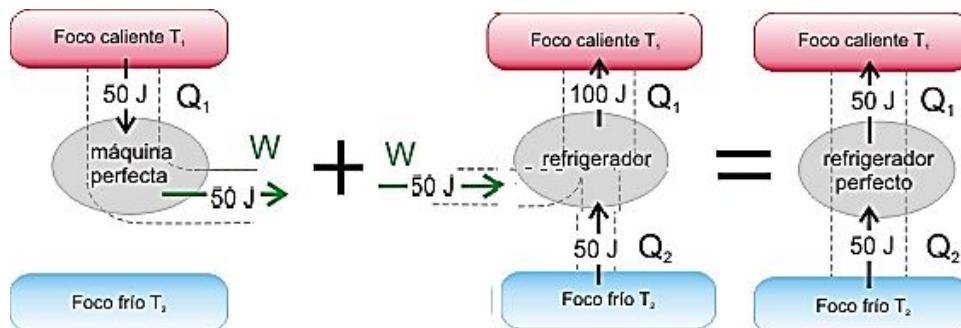
$$(V_1/V_4) = 0,0003$$

Equivalencia entre los enunciados de Kelvin-Planck y de Clausius



Supongamos una máquina perfecta que **viola el enunciado de Kelvin-Planck** y se la hiciera trabajar enlazada con un refrigerador, de modo que el trabajo producido por ésta se utilizará como trabajo consumido por el refrigerador, el resultado final sería un refrigerador perfecto; es decir, **violaría el enunciado de Clausius**

Si un principio no se cumpliera el otro tampoco se cumpliría: son equivalentes



Bibliografía

Resnick R., Halliday D. & Krane K.: 1993, Física, Vol. 1 (5ta edición- cap 24), C.E.C.S.A., Mexico.1

Tipler, P. A.: 1993, Física (cuarta edición - cap), Editorial REVERTÉ, Barcelona,

Serway, R. A.: 1998, Física, Vol. I, Mc Graw-Hill, México.

Sitios útiles de consulta

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/carnot/carnot.htm>

Maria Susana Conconi

Entropía

Del ciclo reversible de Carnot

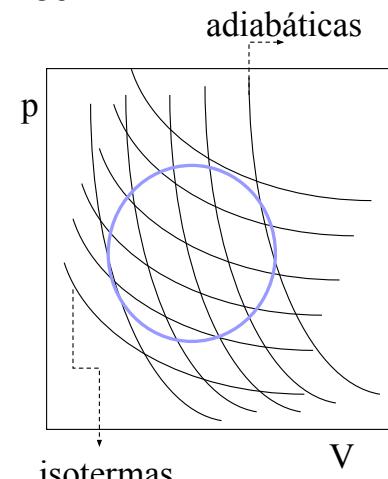
$$1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

- Por lo tanto:

$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$$

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

- Para motores reales
- $\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} \leq 0$



Se puede demostrar que este ciclo puede ser recubierto por N ciclos de Carnot

Anexo

Maria Su:



- Si nos vamos al límite de pasos infinitesimales, el calor dQ y la energía dU del ciclo deben ser:

$$\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0 \quad \oint dU = 0$$

- Si definimos al diferencial de una función de estado S que llamamos Entropía como:

$$dS \equiv \frac{dQ_{rev}}{T}$$

Para procesos isotérmicos el cambio de entropía está dado por $\Delta S = q_{rev} / T$

- Parece que S está definida sólo para procesos reversibles. No es así; al ser S una función de estado podemos escribir para cualquier proceso:

$$\Delta S = S_{(estado\ final)} - S_{(estado\ inicial)}$$

Maria Susana Conconi

Como el universo es un sistema aislado, cuando en el universo se produce una transformación cualquiera AB irreversible

$$\Delta S_U > \int_A^B \frac{\delta Q_L}{T} = 0 \quad \boxed{\Delta S_U > 0}$$

Es decir, la entropía del universo siempre crece para cualquier transformación irreversible que se produzca.

Cuando en el universo tiene lugar una transformación reversible, debemos tomar el signo igual:

$$\Delta S_U = \int_A^B \frac{\delta Q_R}{T} = 0 \quad \boxed{\Delta S_U = 0}$$

Agrupando ambos resultados:

$$\boxed{\Delta S_U \geq 0}$$

Esta afirmación constituye un nuevo enunciado del Segundo Principio

Maria Susana Conconi

Si el ciclo de la figura hubiera sido recorrido irreversiblemente, habría que utilizar el signo menor en la discusión anterior, por lo que la forma final de la integral en un circuito cerrado es:

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

teorema de Clausius.

El universo es el conjunto constituido por un sistema y sus alrededores. Lo consideramos un sistema aislado (no hay nada fuera de él). La suma de entropía de un sistema termodinámico y la entropía de sus alrededores se denomina variación de entropía del universo.

Maria Susana Conconi

Segundo Principio de la Termodinámica

- En todo sistema en equilibrio (proceso reversible), la entropía del universo permanece constante.
- En todo proceso irreversible (espontáneo), la entropía del universo aumenta

p. reversible

Sistema en equilibrio: $\Delta S_{univ} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{ent} = 0$
Proceso irreversible: $\Delta S_{univ} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{ent} > 0$

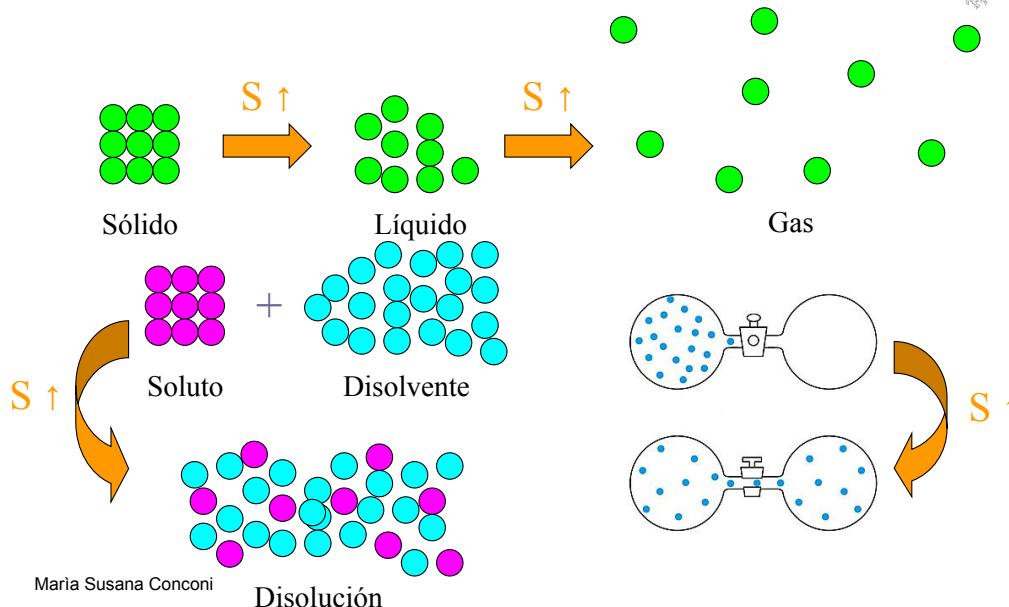
p. espontáneo

$\Delta S_{univ} \geq 0$

Maria Susana Conconi

La entropía puede considerarse como una medida de la probabilidad de que un proceso tenga lugar. La segunda ley de la termodinámica determina la dirección preferida de los procesos irreversibles de la naturaleza : **Hacia el máximo desorden.**

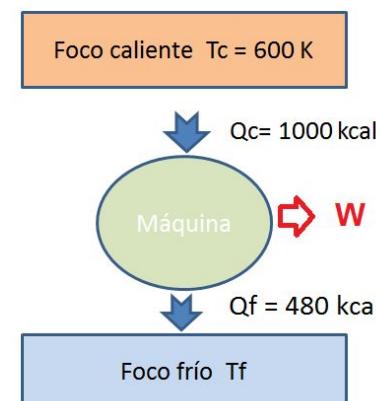
Consideraciones sobre la 1ra y la 2da ley de la termodinámica



Una motor que funciona como una máquina de Carnot toma 1000 kcal del foco caliente a 600 K y cede 480 kcal al foco frío.

Determinar:

- 1) El rendimiento de la máquina.
- 2) La temperatura del foco frío.
- 3) El trabajo realizado por la máquina
- 4) El rendimiento que se obtiene cuando el foco frío está a -5°C



Las dos se aplican solamente a sistemas aislados, es decir, en los que no existe intercambio de energía, información o material.

El Universo en su totalidad puede ser considerado como un sistema aislado.

La Primera Ley de la Termodinámica indica que la cantidad total de energía del Universo se mantiene constante, sin distinguir jerarquías entre las formas de energía.

La Segunda Ley indica, por su parte, que la energía del Universo es irreversiblemente degradada. Jerarquía las formas de energía que permiten obtener trabajo mecánico útil (direccional) frente a las que implican aumento de desorden

1) El rendimiento de la máquina

$$\text{En un ciclo: } W_{\text{tot}} = Q_{\text{tot}} = |Q_{\text{abs}}| - |Q_{\text{ced}}|$$

$$\eta = \frac{W_{\text{tot}}}{Q_{\text{abs}}} \quad \eta = \frac{|Q_{\text{abs}}| - |Q_{\text{ced}}|}{Q_{\text{abs}}}$$

$$\eta = \frac{1000 \text{ kcal} - 480 \text{ kcal}}{1000 \text{ kcal}} = 0,52$$

2) La temperatura del foco frío.

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - (T_f/T_c) = 0,52$$

$$(1 - 0,52) T_c = T_f = (1 - 0,52) 600 \text{ K} = 288 \text{ K}$$

3) El trabajo realizado por la máquina

$$W_{\text{tot}} = Q_{\text{tot}} = |Q_{\text{abs}}| - |Q_{\text{ced}}| = 1000 \text{ kcal} - 480 \text{ kcal} = 520 \text{ kcal}$$

O $\eta = \frac{W_{\text{tot}}}{Q_{\text{abs}}} \longrightarrow W_{\text{tot}} = \eta \cdot Q_{\text{abs}}$

4) El rendimiento que se obtiene cuando el foco frío está a -5°C

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - \left(\frac{T_f}{T_c} \right) = 1 - (268 \text{ K} / 600 \text{ K}) = 0,55$$