

TRANSMISIÓN DEL CALOR

CONDUCCIÓN

Característica: se produce sin movimiento de materia, se transmite agitación térmica de átomos y moléculas

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k A \nabla T$$

Ley de Fourier

k: conductividad térmica

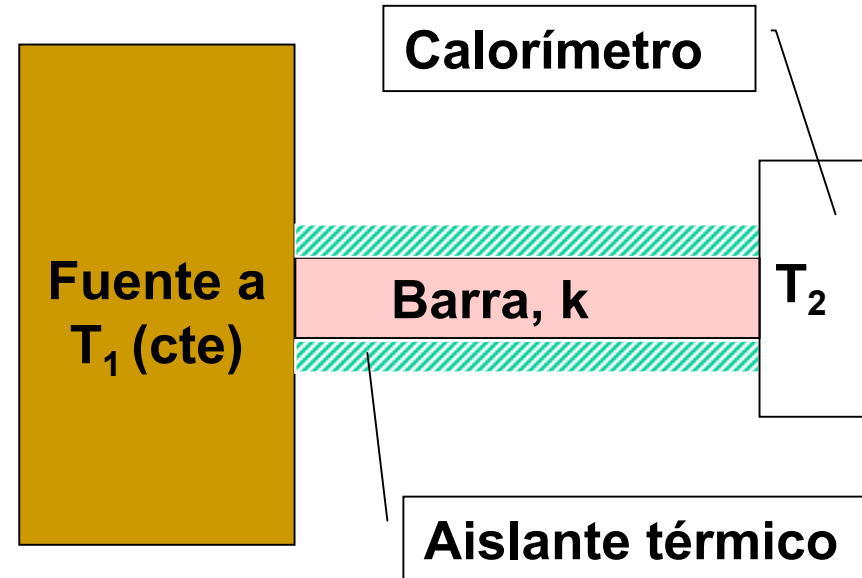
A: área, ∇T gradiente de T

Sólidos y líquidos muy viscosos

Cartesianas
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k A \left(\frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k \right)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k A \frac{dT}{dx}$$

k	Kcal/mhC
Corcho	0,061
Lana de vidrio	0,064
Madera, Amianto	0,2
Ladrillo hueco-común	0,3-0,4
Agua	0,5
Hormigón	0,65
Fe-Cu	55-330



Geometría plana

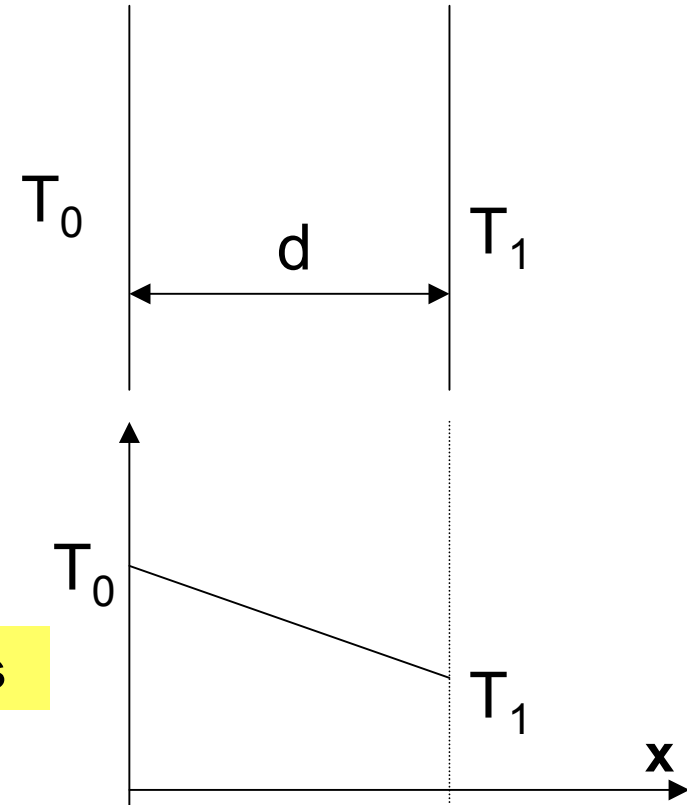
Aproximación de plano infinito

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = cte = H = -k A \frac{dT}{dx} = -k A \frac{T - T_0}{x} \Rightarrow T = T_0 - H \frac{x}{k A}$$

Régimen estacionario

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k A \frac{T_0 - T_1}{d}$$

Perfil de temperaturas

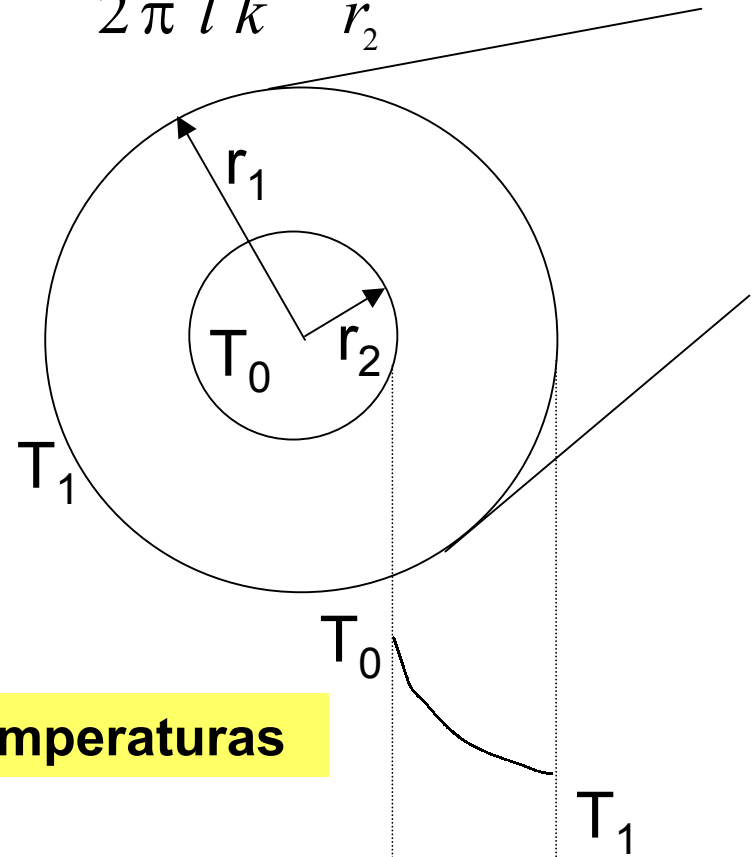


Geometría cilíndrica

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = -k 2\pi r l \frac{dT}{dr} \Rightarrow H \frac{1}{2\pi l k} \int_{r_2}^r \frac{dr}{r} = - \int_{T_0}^T dT$$

$$\frac{H}{2\pi l k} \ln \frac{r}{r_2} = -(T - T_0) \Rightarrow T = T_0 - \frac{H}{2\pi l k} \ln \frac{r}{r_2}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 2\pi l k \frac{T_0 - T_1}{\ln \frac{r_1}{r_2}}$$

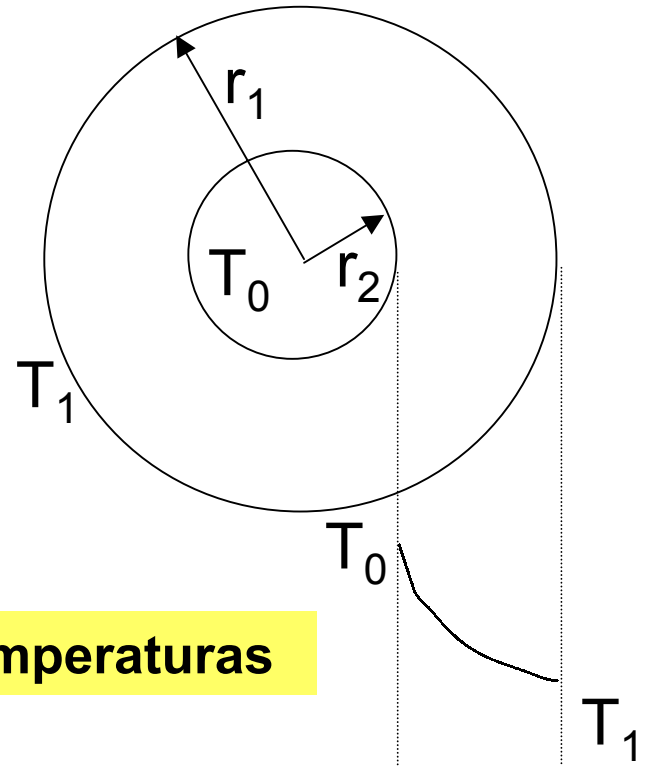


Geometría esférica

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = -k 4 \pi r^2 \frac{dT}{dr} \Rightarrow H \frac{1}{4 \pi k} \int_{r_2}^r \frac{dr}{r^2} = - \int_{T_0}^T dT$$

$$\frac{H}{4 \pi k} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r} \right) = -(T - T_0) \Rightarrow T = T_0 - \frac{H}{4 \pi k} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r} \right)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 4 \pi k \frac{T_0 - T_1}{\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)}$$



Combinación de geometrías planas

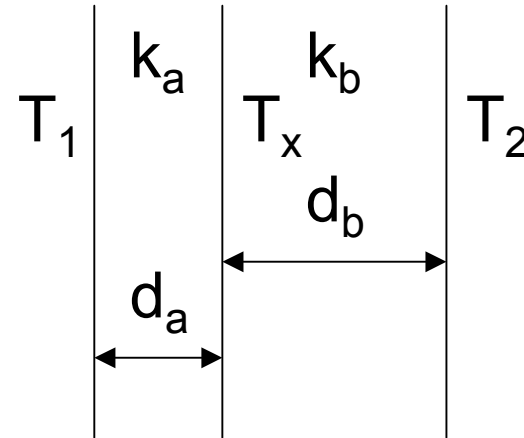
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = -k_a A \frac{T_1 - T_x}{d_a}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = -k_b A \frac{T_x - T_2}{d_b}$$

$$T_1 - T_x = H \frac{d_a}{k_a A}$$

$$T_x - T_2 = H \frac{d_b}{k_b A}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{H}{A} \left(\frac{d_a}{k_a} + \frac{d_b}{k_b} \right)$$



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = A \frac{T_1 - T_2}{\frac{d_a}{k_a} + \frac{d_b}{k_b}}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = A \frac{T_1 - T_2}{\sum \frac{d_i}{k_i}}$$

CONVECCIÓN

Característica: se produce por movimiento de porciones de materia

Fluídos

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = h A (T_a - T_p)$$

Ley de Newton

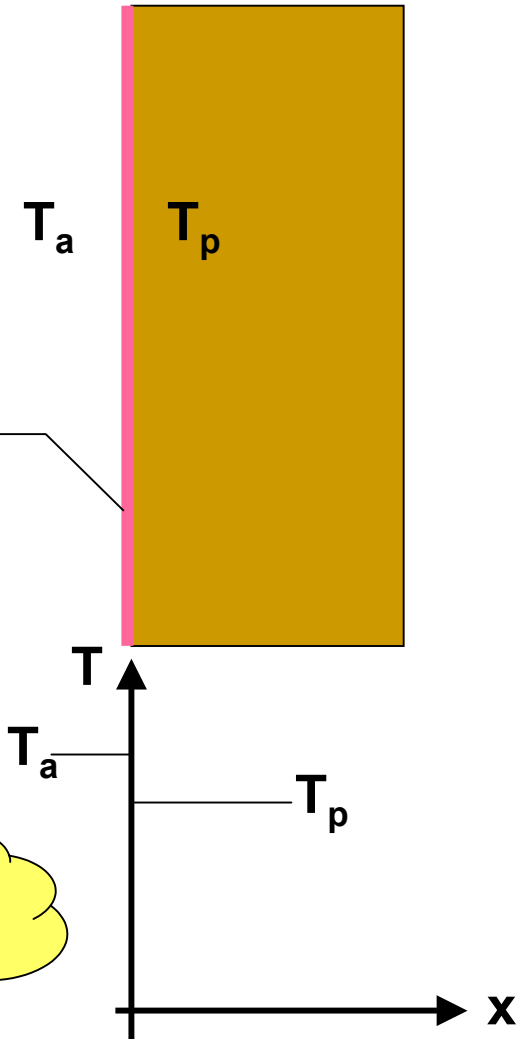
A: área

h: coeficiente de convección

h	Kcal/m ² hC
Aire en reposo	5,5
Aires a veloc. V	5,5+3,6.v
Agua en reposo	500
Agua en movim.	hasta 3000

Capa límite

Convección forzada



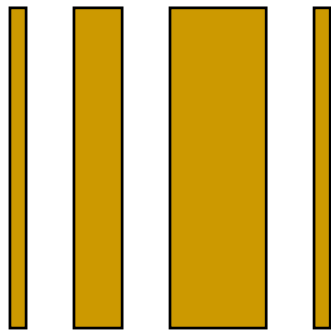
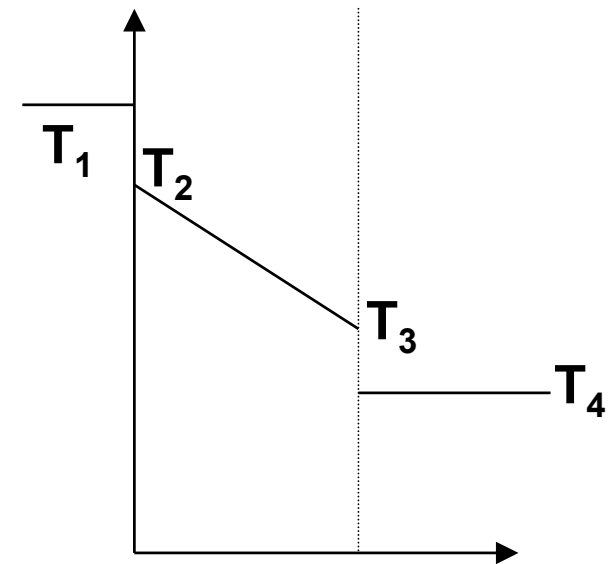
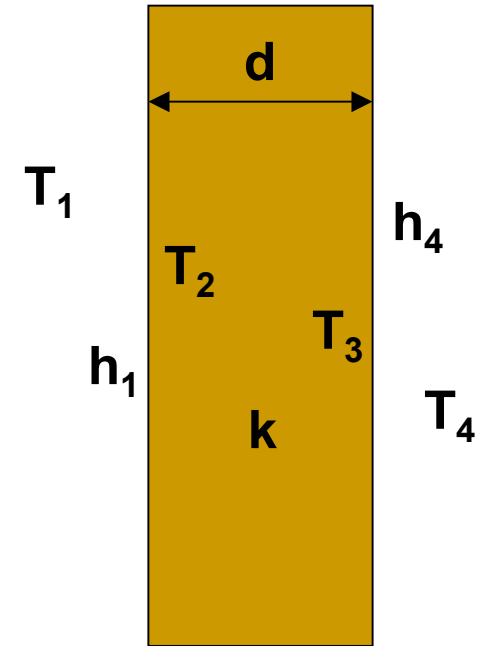
CONDUCCIÓN-CONVECCIÓN

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = h_1 A (T_1 - T_2) \Rightarrow T_1 - T_2 = \frac{H}{h_1 A}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = k A \frac{T_2 - T_3}{d} \Rightarrow T_2 - T_3 = \frac{H d}{k A}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = H = h_4 A (T_3 - T_4) \Rightarrow T_3 - T_4 = \frac{H}{h_4 A}$$

$$T_1 - T_4 = \frac{H}{A} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_4} \right)$$



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = A \frac{T_i - T_f}{\sum_i \left(\frac{1}{h_i} + \frac{d_i}{k_i} \right)}$$

Aplicaciones: masa m a T_i que se deja caer en masa de agua M a T_0

m, c, A, T_i

Mecanismo: convección (h) Si M muy grande $T_0 = T_f$

$$\Delta Q = c m \Delta T \quad \frac{dQ}{dt} = c m \frac{dT}{dt}$$

Ritmo de pérdida de energía de m

$$\frac{dQ}{dt} = h A \Delta T$$

Lo que pierde m (por convección) lo gana el agua

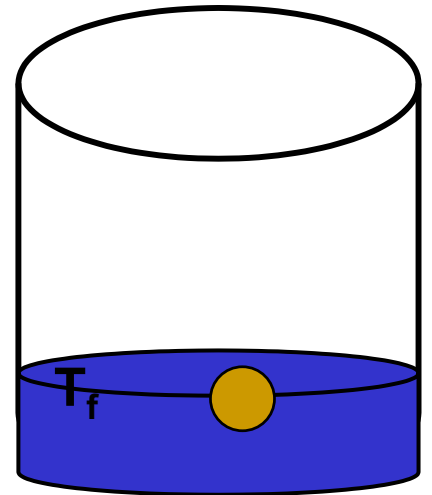
$$c m \frac{dT}{dt} + h A (T - T_0) = 0$$

$$\frac{dT}{T - T_0} = -\frac{h A}{c m} dt \Rightarrow \int_{T_i}^T \frac{dT}{T - T_0} = -\frac{h A}{c m} \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{T - T_0}{T_i - T_0} = -\frac{h A}{c m} t$$

$$\Rightarrow \frac{T - T_0}{T_i - T_0} = \exp\left(-\frac{h A}{c m} t\right)$$

$$T = T_0 + (T_i - T_0) \exp\left(-\frac{h A}{c m} t\right)$$



RADIACIÓN

Característica: es energía transportada como radiación electromagnética y puede propagarse en el vacío

Experimentalmente: todos los cuerpos a T emiten radiación electromagnética

$$\frac{\Delta Q}{A t} \propto T^4 \quad \text{A: área, t: tiempo}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e \sigma A T^4$$

Ley de Stefan-Boltzman, e: emisividad (0-1), σ : cte. de Stefan Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

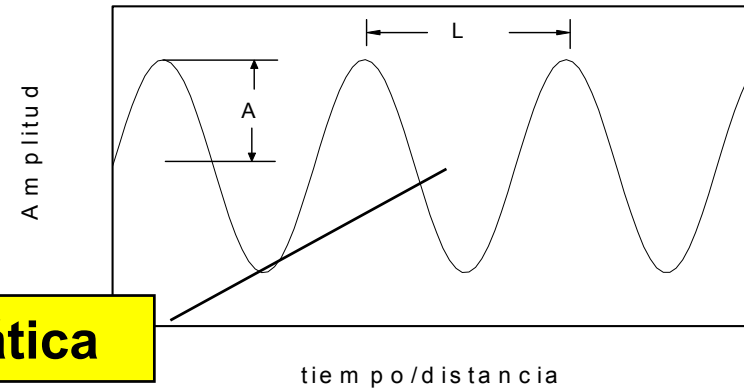
Explicación

Radiación electromagnética.

Ondas en materia.

Ondas electromagnéticas

Onda monocromática



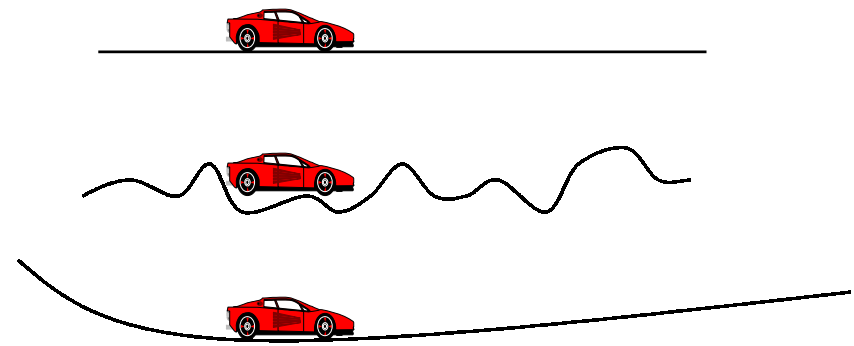
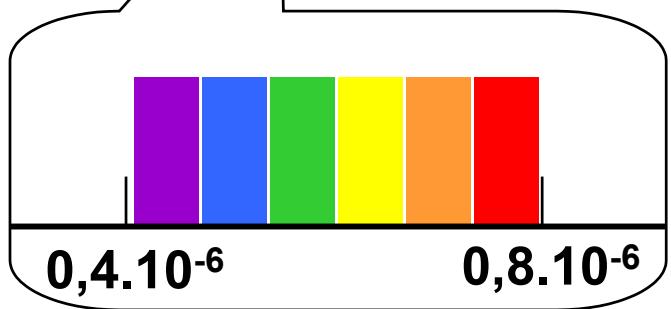
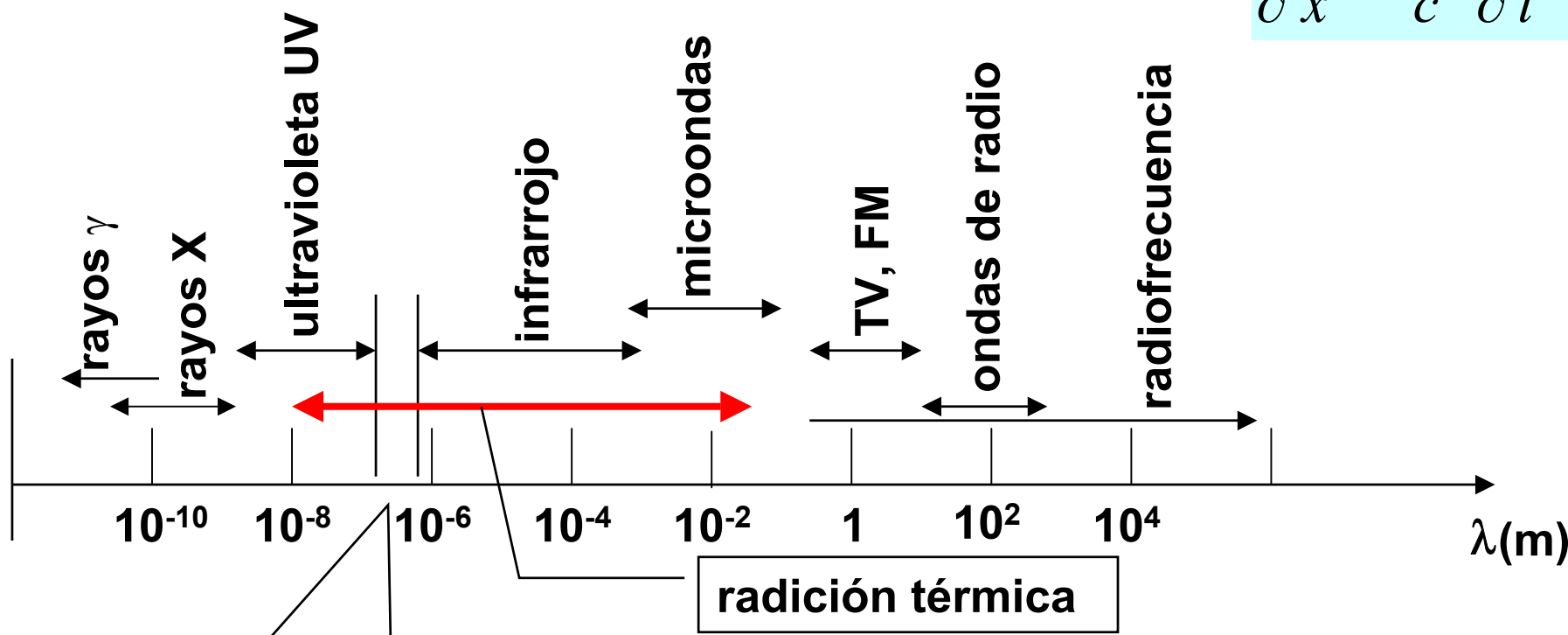
$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 A = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$$

Espectro electromagnético

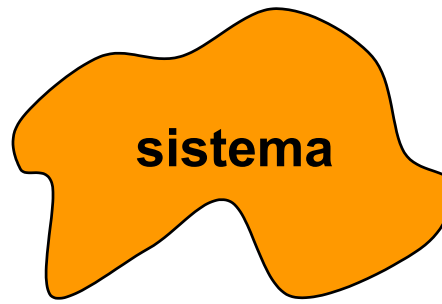
$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$



Interacción de onda y objeto es más efectiva cuando λ es del orden de las dimensiones del mismo

Definiciones

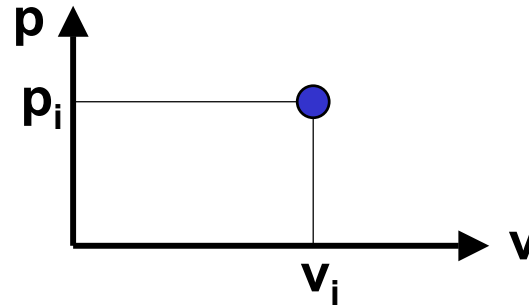
Sistema



medio exterior

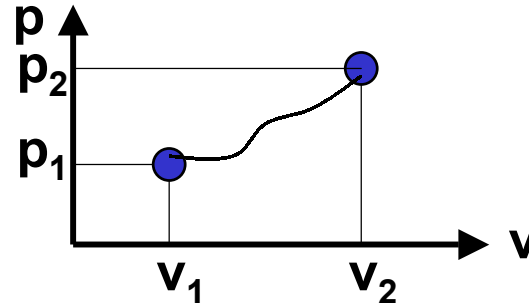
Variables termodinámicas(VT) Macroscópicas: p , V , T , m ,...

Estado



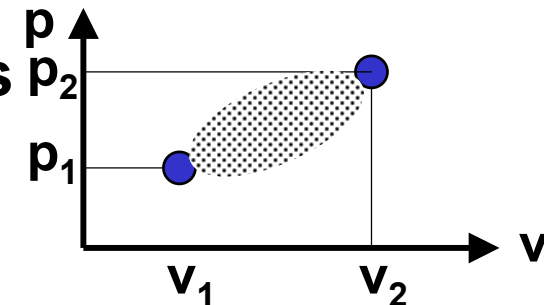
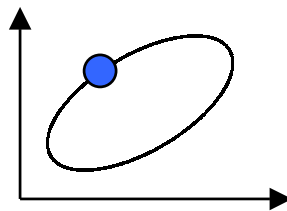
Caracterizado por conjunto de valores de las VT

Evolución, cambio de estado, transformación o proceso



Procesos reversibles o irreversibles

Ciclos



1er PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Princ. de Conservac.
de la Energía

Conocemos: conservación de la energía mecánica

$$E_M = E_M = E_C + E_P = cte \quad \text{si no existen fzas. disipativas}$$

$$= \frac{1}{2} m v^2$$

$$= m g \Delta h, \quad \frac{1}{2} k \Delta x^2, \dots$$

Como trabajar donde no interesa ΔE_p ni ΔE_c ?: ej. granada, motor....

ΔU : variación de energía interna (Joule): suma de todas las energías acumuladas (cinéticas y en las uniones químicas)(NO $\Delta m.c^2$)

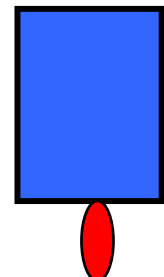
Como medir U?

Sistema intercambia energía con el medio exterior

Mediante trabajo efectuado por o sobre el sistema (ordenadamente), ΔW

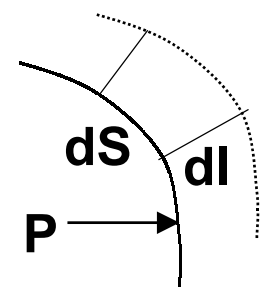


Mediante intercambio de calor (debido a fuentes térmicas) (desordenadamente), ΔQ

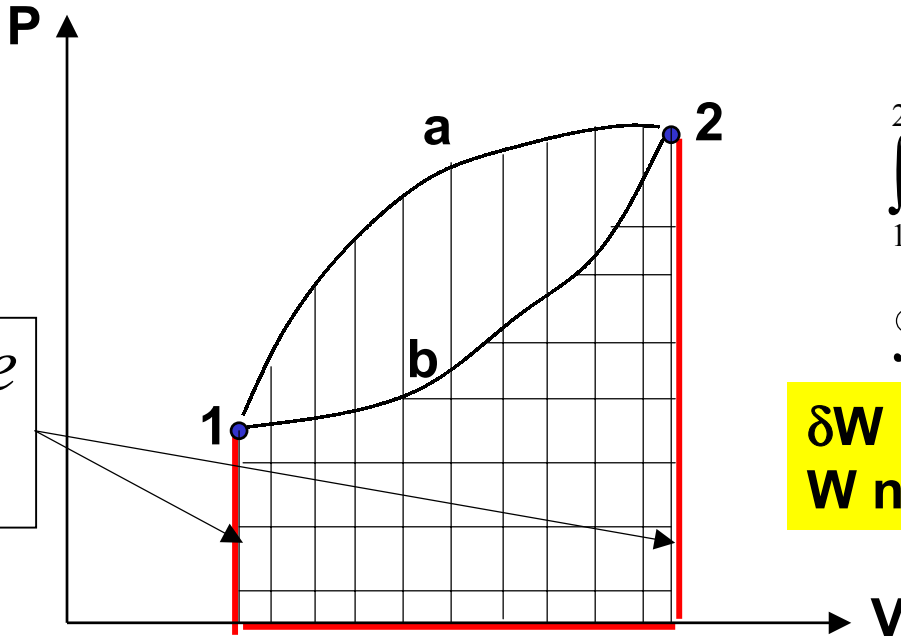


TRABAJO

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int P d\vec{S} \cdot d\vec{l} = \int P dV$$



$V = cte$
 $W = 0$



$$W = P \int dV = 0$$

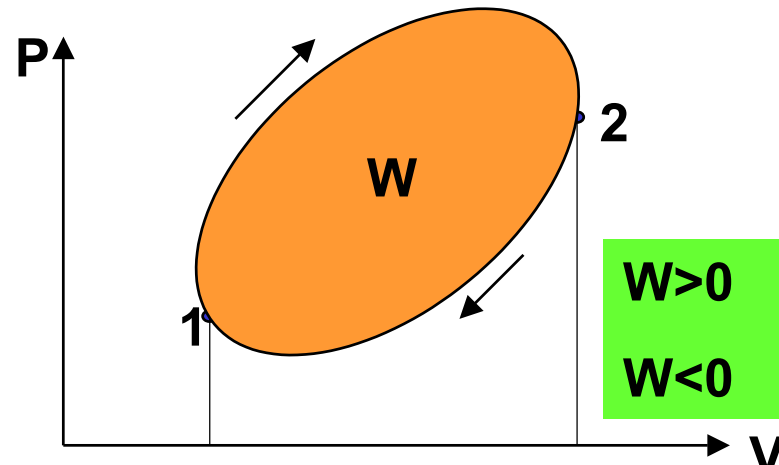
$$\int_1^2 (P dV)_a \neq \int_1^2 (P dV)_b$$

$$\oint \delta W \neq 0$$

δW no es un diferencial exacto
 W no es una función potencial

La energía intercambiada como trabajo en una evolución depende de cómo se realizó el proceso

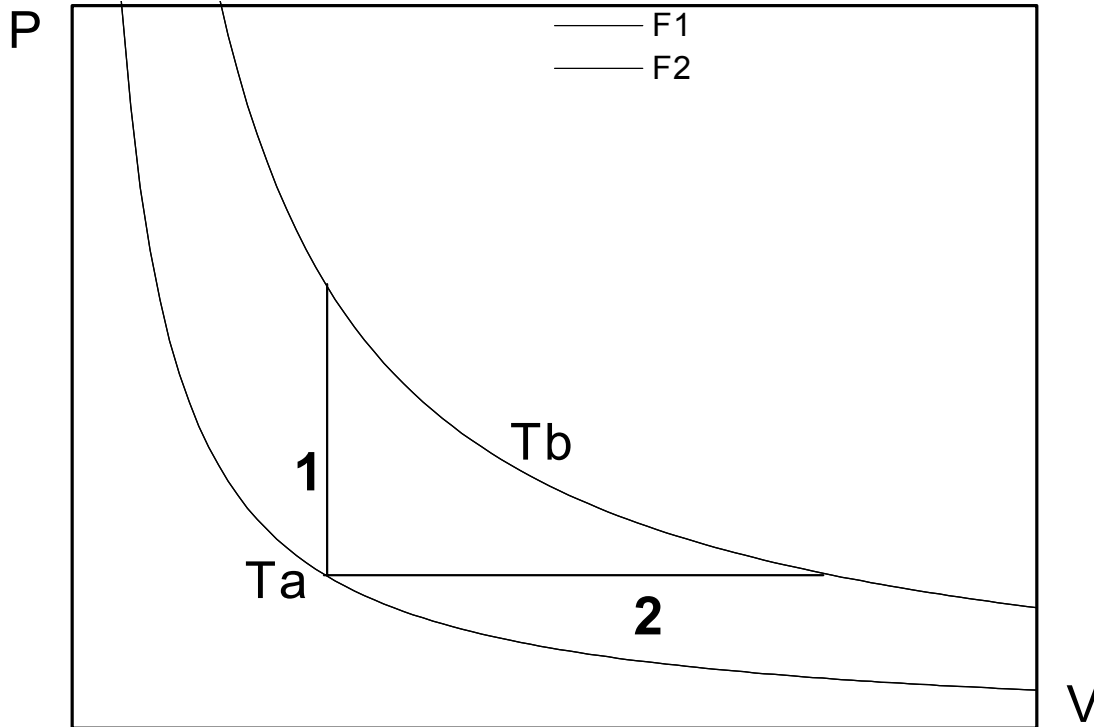
W no es una función de estado



CALOR

$$Q = c m \Delta T$$

c (calor específico) depende de la forma de la evolución



Para aumentar T de Ta a Tb

Por 1 (V cte) todo el Q se emplea en aumentar T

Por 2 (p cte) el Q se emplea en aumentar T y en expandir el sistema

$$\int_1 c m dT \neq \int_2 c m dT$$

$$\oint \delta Q \neq 0$$

La energía intercambiada como calor en una evolución depende de cómo se realizó el proceso

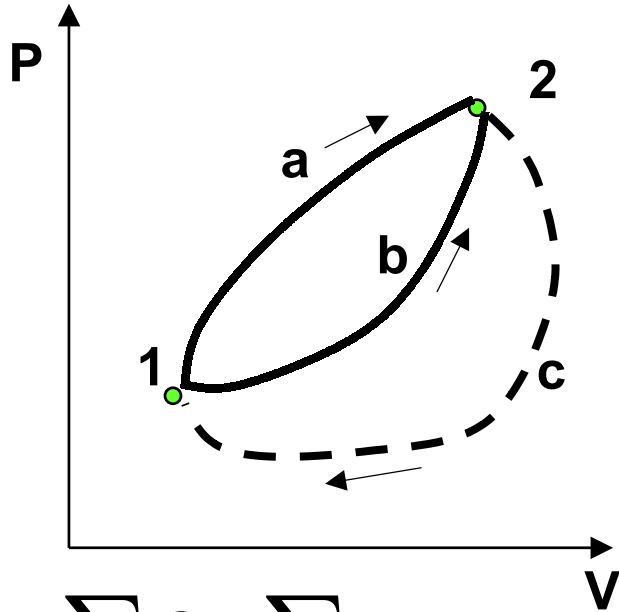
Q no es una función de estado

δQ no es un diferencial exacto
Q no es una función potencial

$$Q > 0$$

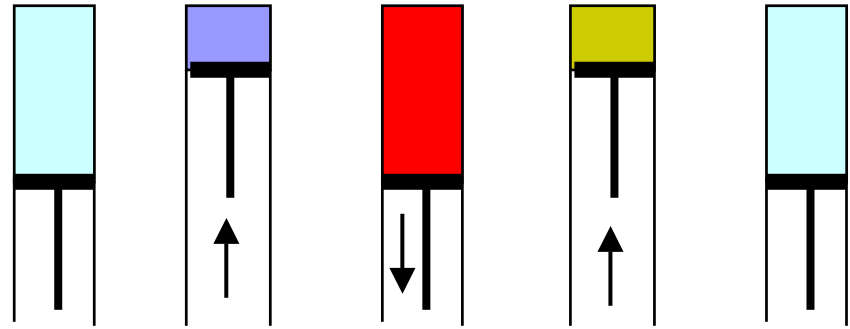
$$Q < 0$$

Podemos determinar ΔU mediante Q y W , pero tenemos un problema: Q y W no son variables de estado, dependen del proceso



Al cabo de un ciclo (1-2-1), sistema en situación inicial $\Rightarrow \Delta U=0$

Ej: pistón de motor de combustión



Se vuelve a condición de partida: $\Delta U=0$

$$\sum Q = \sum W \Rightarrow$$

$$Q_a + Q_c = W_a + W_c$$

$$Q_b + Q_c = W_b + W_c$$

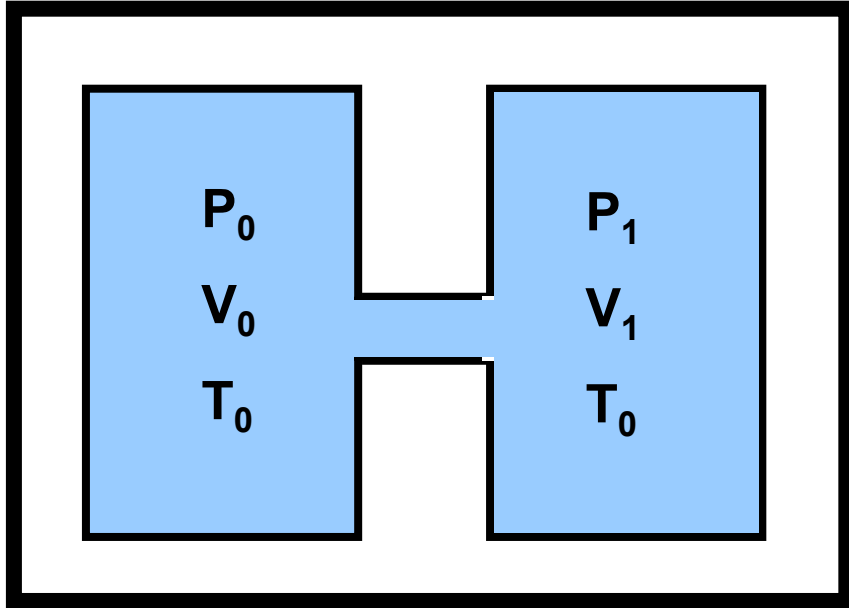
$$Q_a - Q_b = W_a - W_b$$

$$Q_a - W_a = Q_b - W_b = cte$$

$$\Delta U_{a-b} = Q - W$$



Experiencia de Joule



$$\Delta U = Q - W$$

$Q = 0$ Lo indica el calorímetro

$W = 0$ Gas se expande contra vacío, no “obliga” a un límite (pistón, paredes, etc) a desplazarse

$$\Rightarrow \Delta U = 0$$

Variarn V y P , pero T cte

$\Rightarrow \underline{U=f(T)}$ en gases ideales

Aplicaciones

Motor eléctrico

$$-Q = W_2 - W_1$$

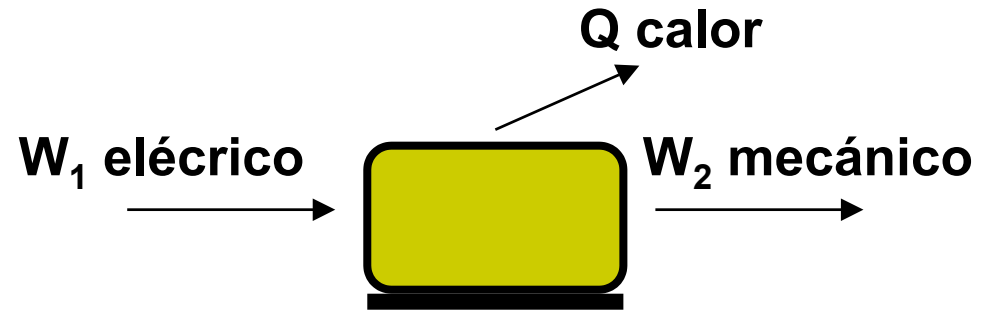
$$W_2 = W_1 - Q$$

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_1 - Q}{W_1}$$

Motor térmico (de combustión) o celda solar

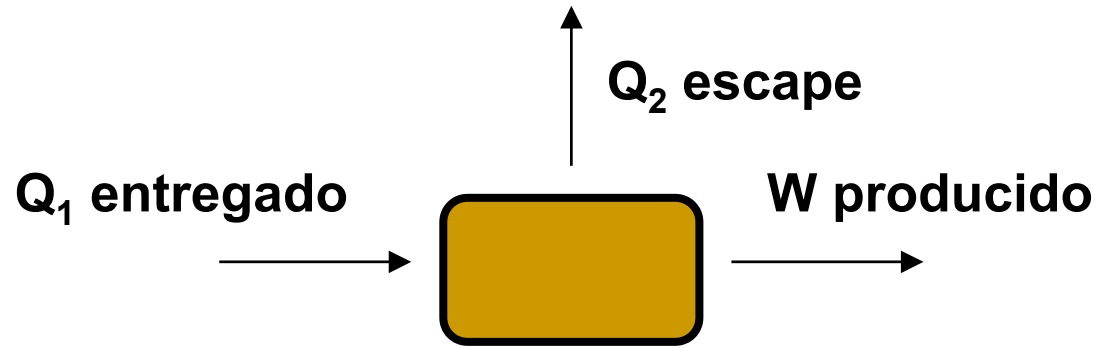
$$Q_1 - Q_2 = W$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$



W entregado < W recibido; Δ se pierde como calor (rozamientos)

Para que η máximo (=1) Q debería ser nulo



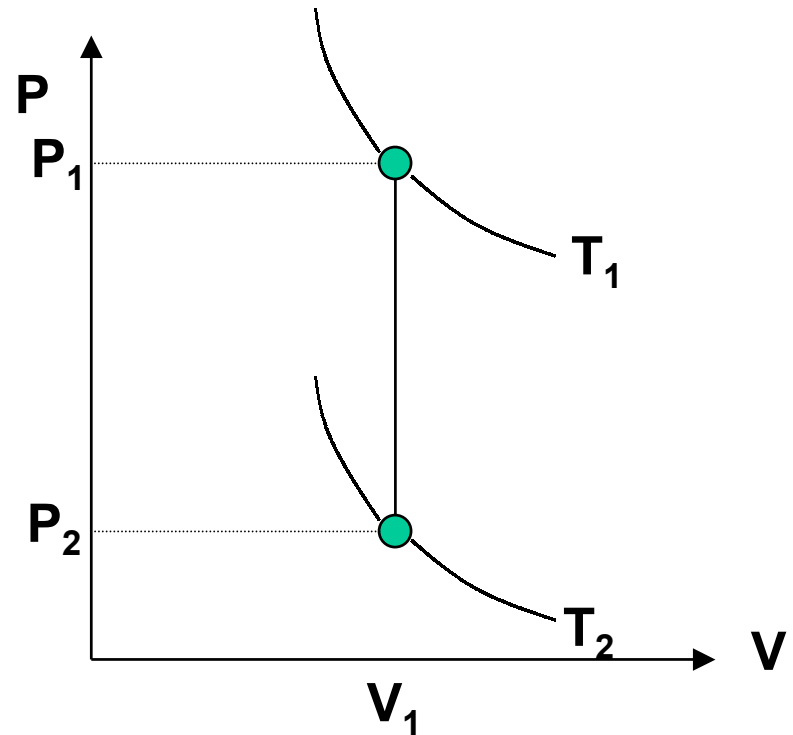
Para que η máximo (=1) Q2 debería ser nulo

Transformación isocórica (a V cte) (Recipiente cerrado)

$$Q = c_V m \Delta T$$

$$W = \int P dV = 0$$

$$\Delta U = c_V m (T_2 - T_1)$$

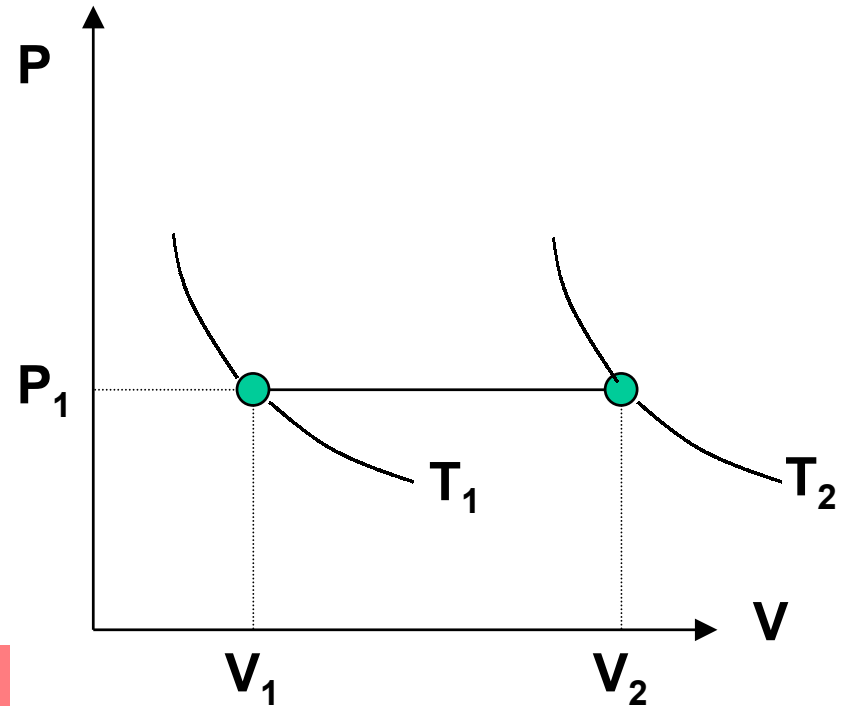


Transformación isobárica (a P cte) (Recipiente abierto)

$$Q = c_p m \Delta T$$

$$W = \int P dV = P_1 (V_2 - V_1)$$

$$\Delta U = c_p m (T_2 - T_1) - P_1 (V_2 - V_1)$$



Relación entre c_p y c_v Trabajando con calores específicos molares

$$PV = nRT \quad P dV + V dP = nR dT \quad dQ = c n dT \quad c = \frac{dQ}{n dT}$$

$$dQ = dU + dW = dU + P dV$$

$$c_p = \left(\frac{\partial Q}{n \partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial U}{n \partial T} \right)_P + P \left(\frac{\partial V}{n \partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial U}{n \partial T} \right)_P + \frac{nR dT}{n dT}$$

$$c_v = \left(\frac{\partial Q}{n \partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{n \partial T} \right)_V$$

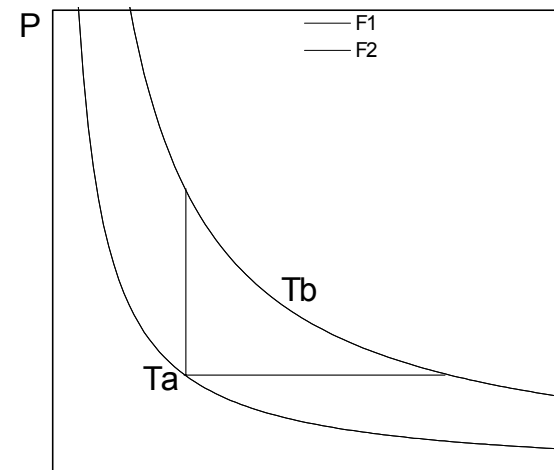
Idem para muchas sustancias sólidas

Para gases ideales

$$U = f(T) \Rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

$$c_p - c_v = R$$

$$R = 1,98 \text{ Cal/mol K}$$



A V cte energía calienta el sistema, a P cte lo calienta y expande

Sólidos y líquidos más comunes en la tecnología

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \cong 0 \Rightarrow c_p = c_v$$

**Gases monoatómicos $c_p = 5/2$, $c_v = 3/2(xR)$
gases diatómicos $c_p = 7/2$, $c_v = 5/2(xR)$**

Transformación Isotérmica (T cte)

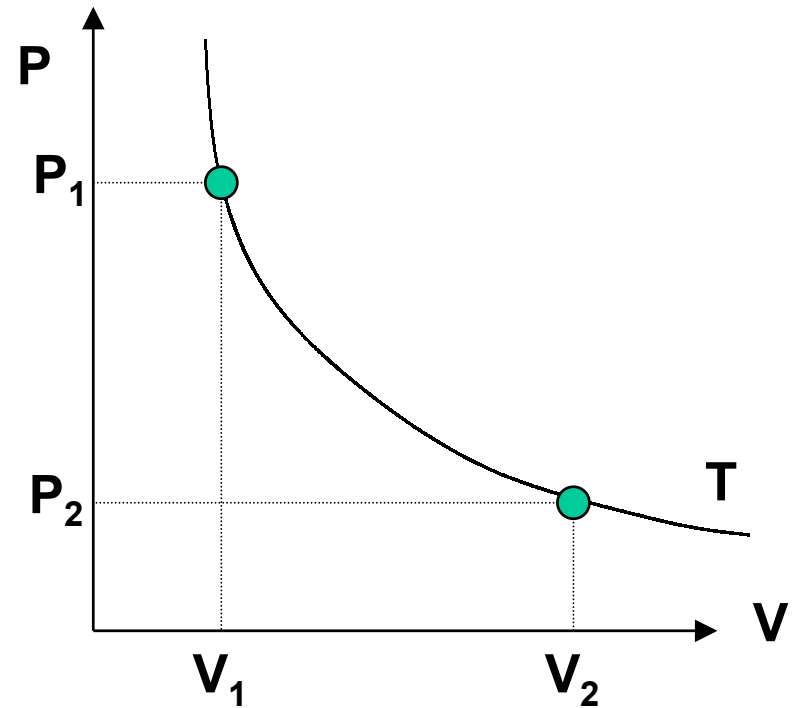
$$\Delta U = 0, \quad T = cte$$

$$Q = W = \int P dV$$

$$PV = nRT$$

$$W = \int \frac{nRT}{V} dV$$

$$Q = W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



Transformación adiabática (Q cte)

$$Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -W$$

$$\Delta U = c_V n \Delta T \quad \text{Siempre para gases ideales}$$

$$n c_V dT + P dV = 0$$

$$P dV + V dP = n R dT$$

$$dT = \frac{P dV + V dP}{n R}$$

$$n c_V \left(\frac{P dV + V dP}{n R} \right) + P dV = 0$$

$$c_V P dV + c_V V dP + R P dV = 0$$

$$(c_V + R) P dV + c_V V dP = 0$$

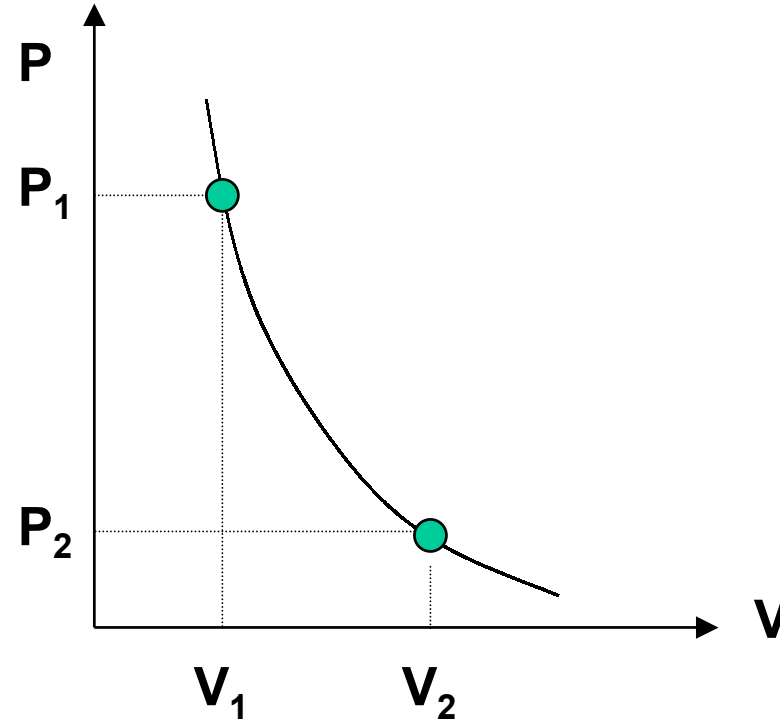
$$c_P P dV + c_V V dP = 0$$

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} \Rightarrow$$

$$P V^\gamma = cte$$

$$T V^{\gamma-1} = cte$$

Importante pues ciclos de maquinas térmicas pueden aproximarse así



$$c_P \frac{dV}{V} + c_V \frac{dP}{P} = 0$$

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -W = -\int P dV$$

$$P V^\gamma = cte$$

$$W = -\int (cte / V^\gamma) dV = -cte \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV = \frac{cte}{-\gamma + 1} (V_2^{-\gamma + 1} - V_1^{-\gamma + 1})$$

$$\Delta U = \frac{cte}{-\gamma + 1} (V_2^{-\gamma + 1} - V_1^{-\gamma + 1})$$

Ciclo Otto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

r: relación de compresión $V_b = r \cdot V_a$

$$Q_1 = c_v m (T_a - T_d) > 0$$

$$Q_2 = c_v m (T_c - T_b) < 0$$

$$T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1} = T_b (r V_a)^{\gamma-1}$$

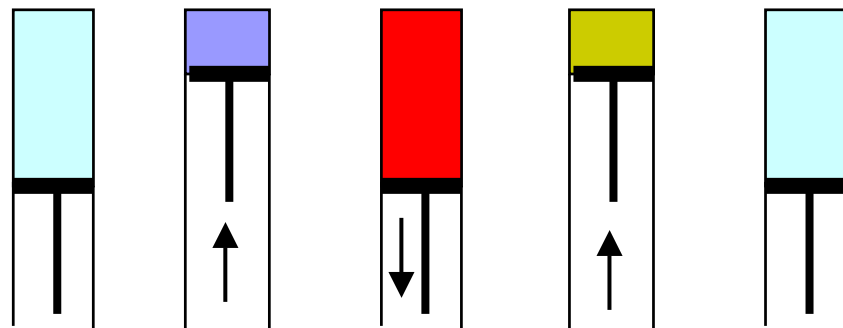
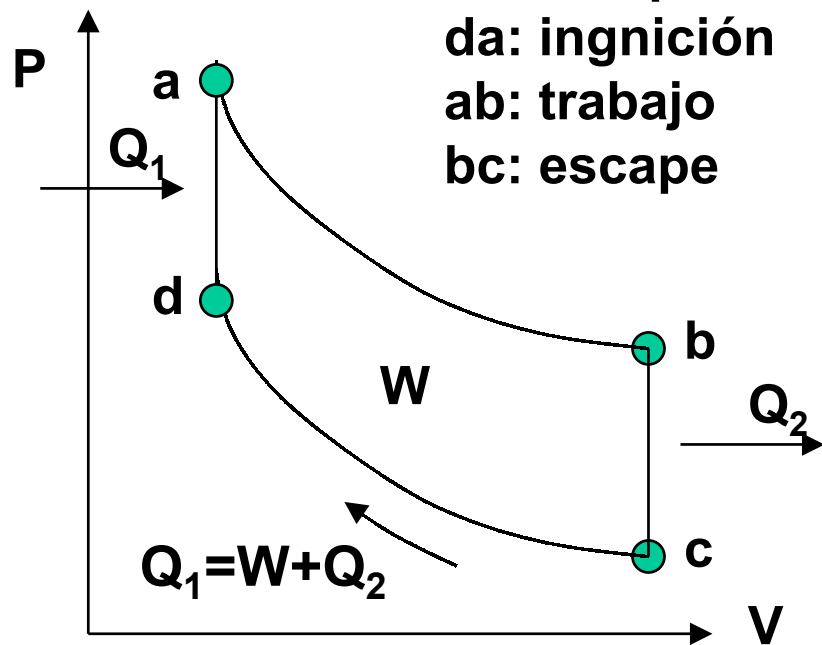
$$T_d V_d^{\gamma-1} = T_c V_c^{\gamma-1} = T_c (r V_a)^{\gamma-1}$$

$$(T_a - T_d) V_a^{\gamma-1} = (T_b - T_c) (r V_a)^{\gamma-1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_c - T_b}{T_a - T_d} = 1 - \frac{(T_a - T_d)}{r^{\gamma-1} (T_a - T_d)}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

cd: compresión
da: ignición
ab: trabajo
bc: escape



Motores a nafta: r: 8-10, $\gamma = 1,4$ (aire) $\Rightarrow \eta = 54 \%$

Alternativa: aumentar r, pero eso aumenta T_1 (pre-encendido, materiales)

Ciclo de motor Diesel

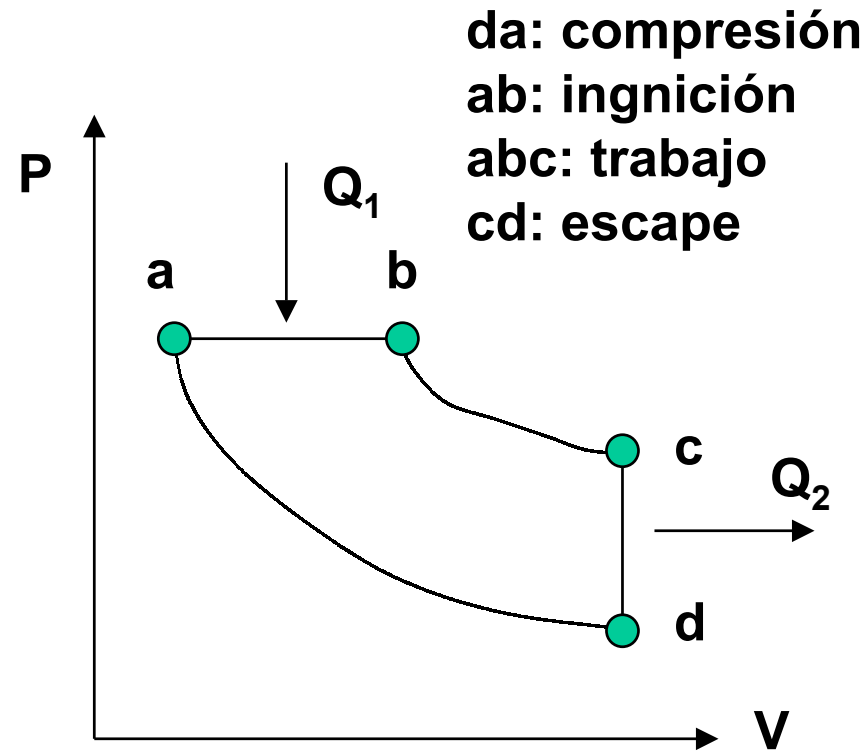
Ni hay combustible en el cilindro durante la etapa de compresión, no hay preignición

Combustible se inyecta al final de la compresión mediante inyectores

Así $r = 15-20$ y con $\gamma = 1,4$ $\eta = 65, 70 \%$

Diesel: mayor peso por unidad de potencia, complejidad de sistema de inyectores (mantenimiento), etc

Nafta: sistema de encendido, carburador, preignición, etc



Cual es el ciclo de mayor rendimiento?. Existe uno?

Ciclo de Carnot

Ciclo: dos etapas de trabajo y dos de intercambio térmico

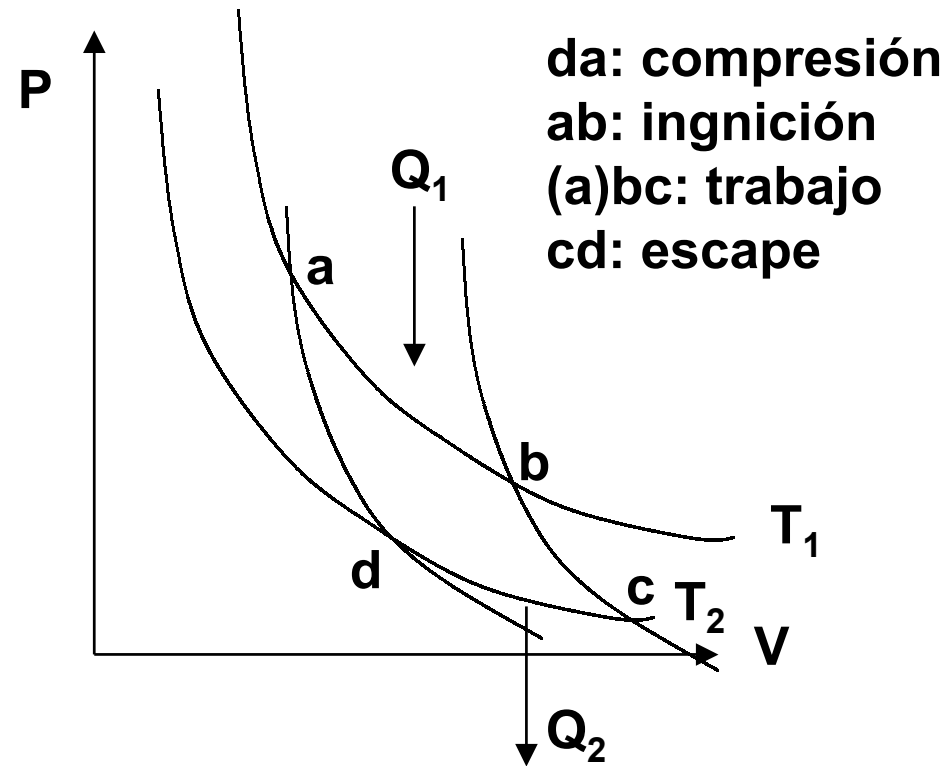
Ciclo ideal: en etapas de trabajo no se tranfiera calor (adiabáticas) y donde hay Q que sea sin cambio de T (isotérmicas)

$$Q_1 = n R T_1 \ln \frac{V_b}{V_a}$$

$$Q_2 = n R T_2 \ln \frac{V_d}{V_c}$$

$$T_1 V_a^{\gamma-1} = T_2 V_d^{\gamma-1}$$

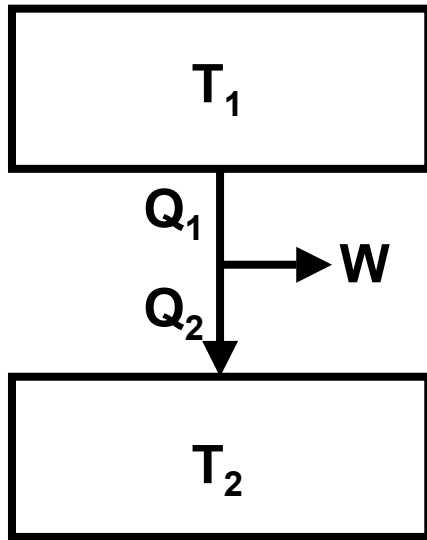
$$T_1 V_b^{\gamma-1} = T_2 V_c^{\gamma-1}$$



$$\frac{V_a}{V_b} = \frac{V_d}{V_c}$$

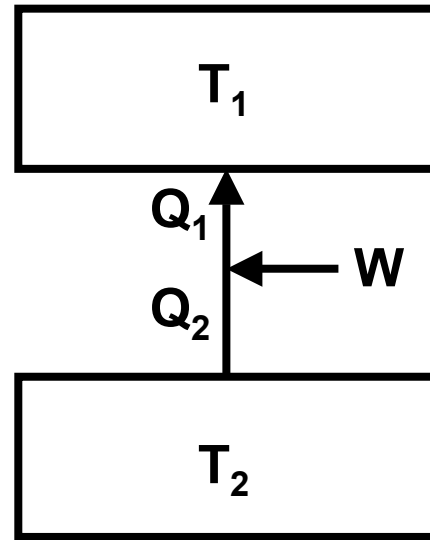
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Máquina térmica

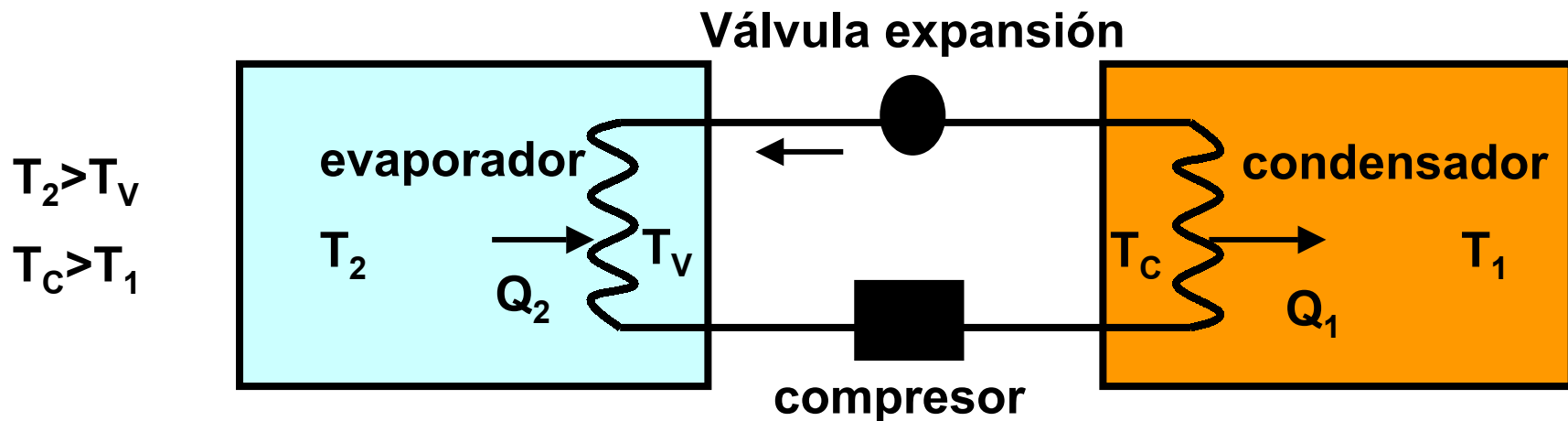


$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

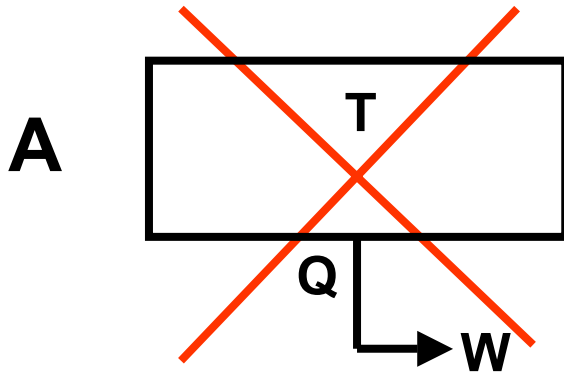
Máquina frigorífica



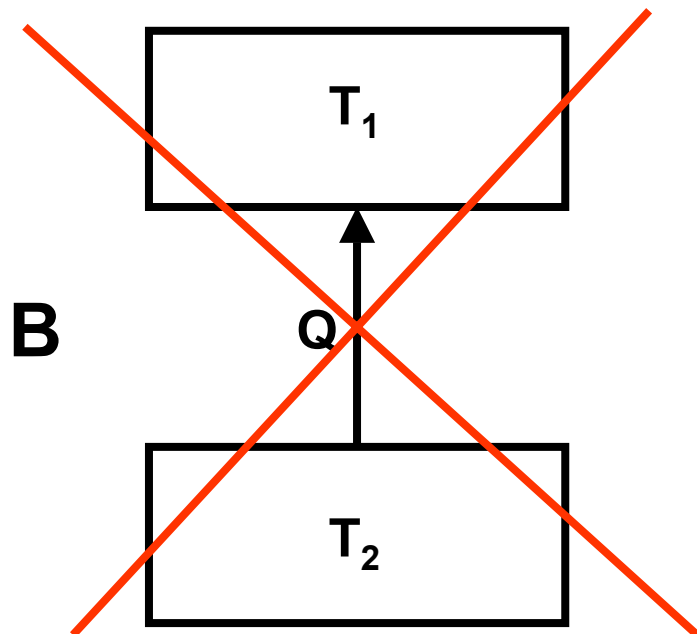
$$K = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - |Q_2|}$$



2do Principio de la Termodinámica

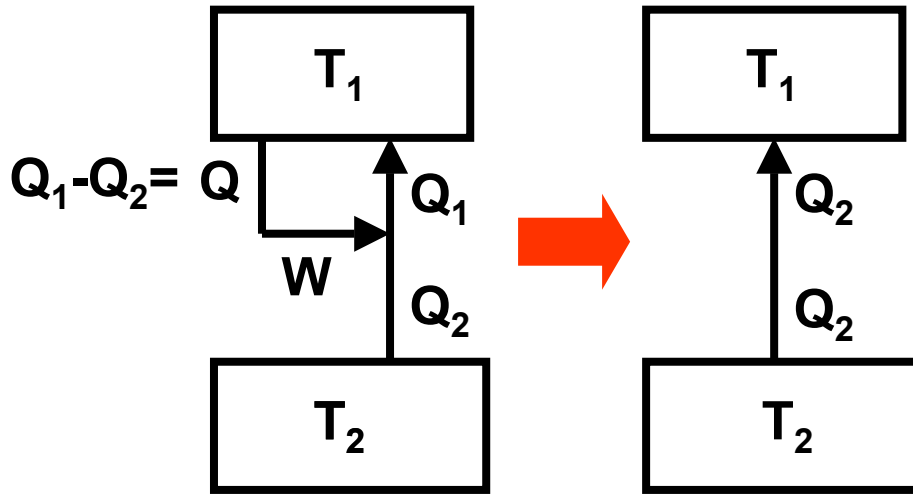


Es imposible construir una máquina cíclica cuyo único resultado sea la conversión de Q totalmente en W



Es imposible construir una máquina cíclica cuyo único resultado sea la transmisión de calor de una fuente fría a una caliente

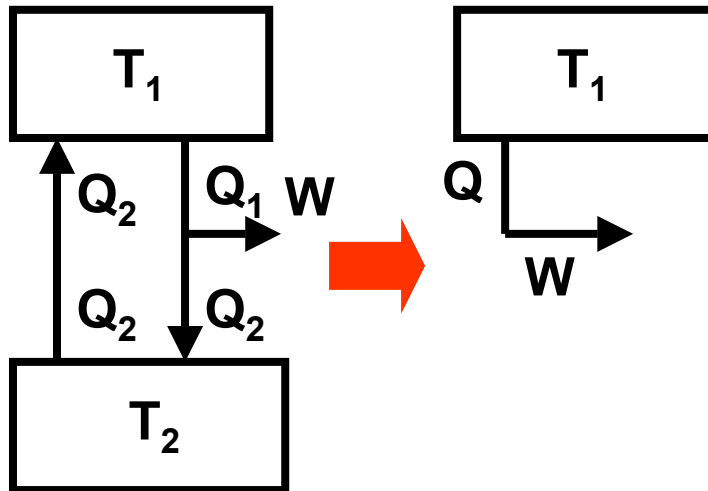
Son enunciados equivalentes



Si A es cierto

Conectándolo a una máquina frigorífica

Se tiene B



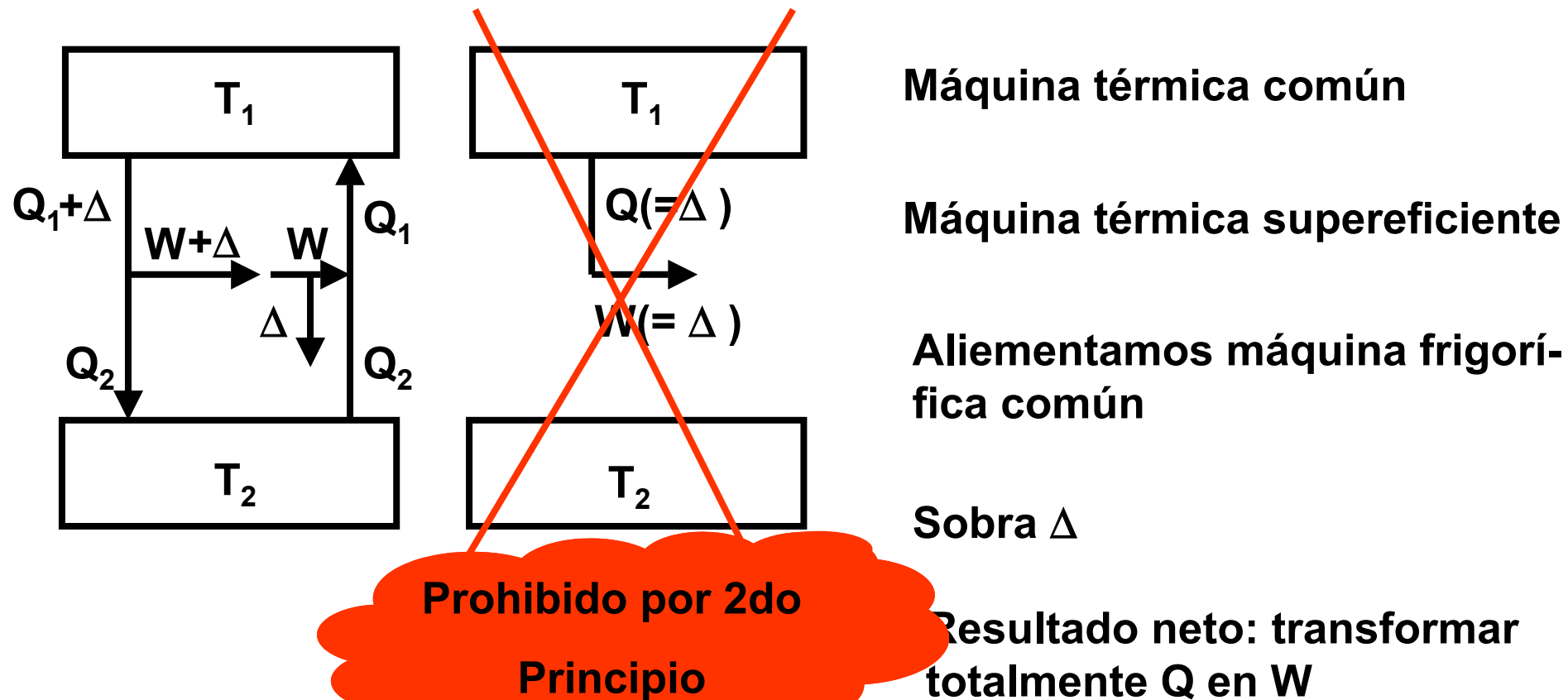
Si B es cierto

Conectándolo a una máquina térmica

Se tiene A

Ciclo de Carnot es el de máxima eficiencia

Si no fuera así, supongamos una máquina térmica supereficiente con mayor rendimiento que el ciclo de Carnot, con el que alimentamos una máquina frigorífica de Carnot



Otro enunciado del 2do Princ.: Operando entre T_1 y T_2 no existe máquina más eficiente que la de Carnot

2do. Princ.: afirmación de imposibilidades (es imposible....)

Como cuantificar estas leyes naturales?

Interés de la humanidad: obtener energía mecánica (y de allí W o Q)

Turbinas hidráulicas, eólicas, de mareas, etc: W (agua, viento) \Rightarrow W (eléctrico)

Combustibles fósiles, energía nuclear: se produce primero Q y \Rightarrow W

W \Rightarrow Q totalmente en ciclo (ej. acción de mecha sin filo sobre metal)

Q $\not\Rightarrow$ W totalmente en un ciclo; lo prohíbe el 2do. P.

W: relacionado con procesos ordenados

Q: relacionado con procesos desordenados

Gota de tinta en vaso de agua

Gas en esquina de recipiente

Movimiento caótico de $\sim 10^{23}$ entidades

Como cuantificar el desorden?

En transformación isotérmica $dQ = dW = P dV = \frac{n R T}{V} dV$

$\frac{dV}{V}$ Es una medida de desorden

$$\frac{dV}{V} \propto \frac{dQ}{T}$$

Definimos una VT

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Definición válida solo para procesos reversibles

(valores definidos en todo punto por lo que puedo integrar)

S: entropía, variable de estado

Si $\Delta S > 0$ aumenta el desorden (evolución espontánea: tinta en agua)

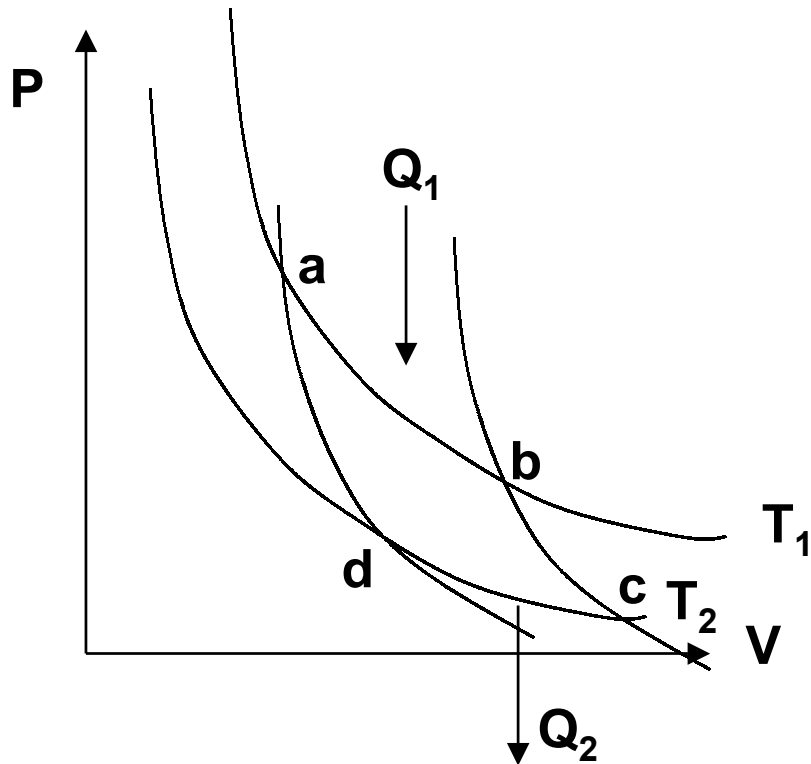
Si $\Delta S < 0$ disminuye el desorden (aumenta el orden)(evolución inducida: creación de vida, de estructuras organizadas, etc)

Ejemplos

Entropía en un ciclo de Carnot

En dos etapas adiabáticas: $\Delta S = 0$

En dos etapas isotérmicas



$$dQ = dW = P dV = \frac{n R T}{V} dV$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = n R \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$\Delta S_{Total} = \Delta S_{a-b} + \Delta S_{c-d}$$

$$\Delta S_{Total} = n R \left(\ln \frac{V_b}{V_a} + \ln \frac{V_d}{V_c} \right)$$

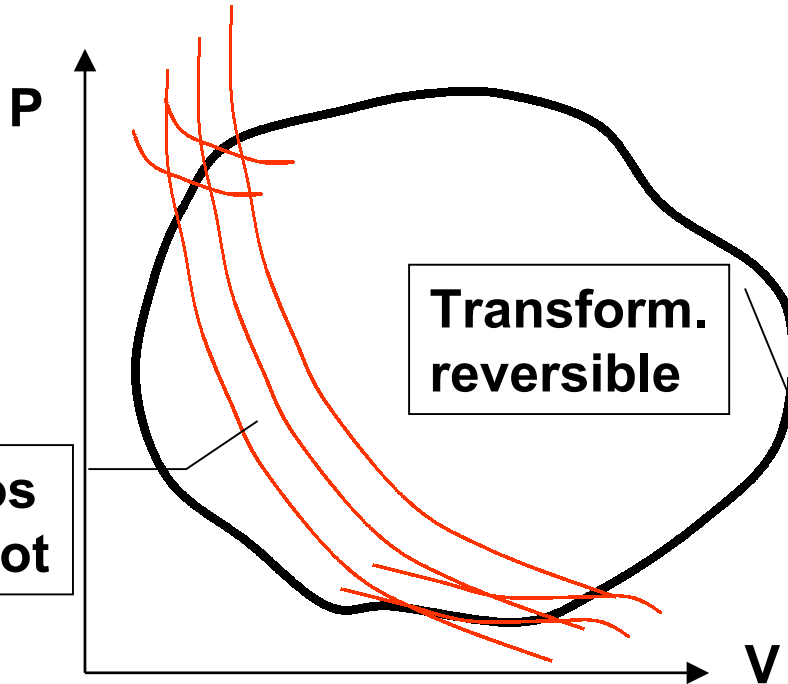
En adiabáticas

$$T V^{\gamma-1} = cte \Rightarrow \frac{V_a}{V_b} = \frac{V_d}{V_c}$$

$$\Delta S_{Total} = 0$$

En un ciclo de Carnot (reversible) la S es una variable de estado

Pero todo ciclo reversible puede aproximarse como una sucesión de ciclos de Carnot en cada uno de los cuales $\Delta S = 0$



$$\Delta S_{Total} = 0$$

Para cualquier ciclo reversible

S es un diferencial exacto, depende solo de los estados iniciales y finales de una transformación reversible

Que pasa si se tiene una evolución real, por ej. 1 Kg de Agua de 0 °C a 100 °C?, irreversible

Se tomo cualquier transformación reversible entre esos estados, por ej. a volumen constante y el ΔS debe ser el mismo

Cálculo de S en diferentes transformaciones

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

V cte $dQ = c_v m dT$ $\Delta S = \int c_v m \frac{dT}{T}$

$$\Delta S = c_v m \ln \frac{T_f}{T_i}$$

P cte $dQ = dU + dW = c_v m dT + P dV$ $\Delta S = \int c_v m \frac{dT}{T} + \int n R \frac{dV}{V}$

$$\Delta S = c_v m \ln \frac{T_f}{T_i} + n R \ln \frac{V_f}{V_i}$$

T cte $dQ = dW = n R T \frac{dV}{V}$ $\Delta S = \int n R \frac{dV}{V}$

$$\Delta S = n R \ln \frac{V_f}{V_i}$$

Q cte $dQ = 0$

$$\Delta S = 0$$

Transformación isoentrópica