Parte 3 : Procesos cíclicos :

I] Tipos de procesos.

A] Una cantidad de estado = cst : no cíclicos o cíclico

a) proceso isotérmico : $T = cst$

paredes diatérmicas

$T_s = T$ (entorno)

$(T) \rightleftarrows (T_s)$

$T_{entorno} = cst$, a pesar de la interacción con el sistema

(muy grande) reservorio de calor "baño térmico"

intercambio rápido de calor para que el sistema esté en equilibrio térmico con su entorno

b) isocórico : $V = cst$

$\boxed{V}$ δQ

paredes rígidas ($\Delta W_{meca} = 0$)

T_s puede ser fct. del tiempo ($\neq$ de $T_{entorno}$ posible)

c) isobárico : $P = cst$

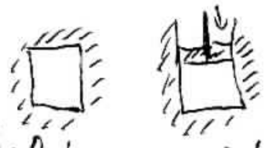
$P_{entorno}$

$\boxed{P_s}$

pistón sin fricción, sin masa, libre

$P_s = P_{entorno}$

d) adiabático : $\delta Q = 0$



aislado   aislado termicamente

B] Procesos reversibles y irreversibles :

si X es una variable de estado, $\oint dX = 0$.

No es el caso de calor y trabajo : $\oint \delta W \neq 0$ en general

Pero si : $\oint \delta W = 0 \Rightarrow \oint \delta Q = \oint dU - \oint \delta W = 0$

$\Rightarrow \delta W$ diferencial total, bien comportada : $\rightarrow dW$

(δQ $\qquad dQ$)

$\Rightarrow W$ se comporta como cantidad de estado univaluada

(Q)

$\boxed{\text{Procesos reversibles}}$

ejemplos simples: $\delta W = 0$ (no interacciones de trabajo) $\Rightarrow \delta Q = dU$ diferencial exacta

$\delta Q = 0$ (proceso adiabáticos) $\Rightarrow \delta W = dU$

en general, podemos tener procesos reversibles con $\delta W \neq 0$ y $\delta Q \neq 0$:

def: proceso reversible termodinámicamente:

2 condiciones: 1) quasi-estático.

2) ~~no~~ sin proceso disipativo (fricción, histéresis elástica).

Ejemplo pistón torea: $\delta W = -p_{entorno} dV = -p\,dV$ si sistema equilibrado

$p_{entorno} = p_{sistema}$ $\boxed{\text{siempre}}$ $p_{entorno} \rightleftarrows$ un p (único) en el sistema

no satisfecho si hay fricción:

ejemplo de proceso irreversible:

(el mundo real, siempre hay pequeños effectos de disipación)

$p - \frac{f_c}{A} < p_{entorno} < p + \frac{f_c}{A} \Rightarrow$ el pistón no se mueve

a) el pistón se mueve (compresión) si

$$p_{entorno} = p + \frac{f_c}{A}$$

$$\Rightarrow \delta W = -p\,dV - \underbrace{\frac{f_c}{A} dV}_{\text{término adicional de fricción}} \qquad (1)$$

b) el pistón se mueve (expansión) si:

$$p_{entorno} = p - \frac{f_c}{A}$$

$$\delta W = -p\,dV + \frac{f_c}{A} dV \qquad (2)$$

vemos que Ec. (1) $\neq$ Ec. (2) : δW depende del sentido del movimiento.

$$\oint dW = \Delta W = \underbrace{-\oint p\,dV}_{=0} + \frac{f_c}{A} \underbrace{\oint |dV|}_{>0} \Rightarrow$$ transformado en calor en las paredes donde se desliza el pistón.

C] Transferencia de calor reversible:

$\boxed{Sist} \rightarrow$

reservorios $\boxed{T_1}$ $\boxed{T_1+dT}$ .... $\boxed{T}$ .... $\boxed{T_f-dT}$ $\boxed{T_f}$

a cada dT, el sistema absorbe δQ

si lo regresamos, cede δQ.

D] Trabajo útil e inútil (ingeniería):

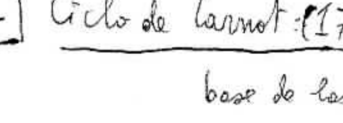
$$F_e^{(tot)} = Ap_e + F_e \simeq Ap \quad \text{(cuasiestático)}$$

$$\delta W = -p\,dV = \underbrace{-p_e\,dV}_{\text{trabajo inútil (empuja el fluido exterior)}} - \underbrace{\frac{F_e}{A} dV}_{\text{trabajo útil (empuja un cuerpo, masa, palanca ...)}}$$

II] Ciclo de Carnot (1796-1832):

base de las máquinas de calor

Teorema de Carnot, esquemáticamente: 1) "cuando existe una diferencia de T, un trabajo (fuerza motriz) puede producirse".



●: sistema

$$\Delta W_{\text{entorno} \to \text{sist}} < 0$$

2) Para que $|\Delta W|$ sea máximo, los cambios de T en el sistema deberían ser causado por cambios de volumen y no por flujo de calor (adiabático). Se cumple para un motor reversible.

algunas igualdades: y desigualdades

en un ciclo:

(i) $\underbrace{\Delta Q_1}_{>0} + \underbrace{\Delta Q_2}_{<0} + \underbrace{\Delta W}_{<0} = 0$ por conservación de la energía (1ª ley). (cf. corriente eléctrica en circuitos)

(ii) eficiencia: $\eta \equiv -\dfrac{\Delta W}{\Delta Q_1} = 1 + \dfrac{\Delta Q_2}{\Delta Q_1}$ indep. del motor (Th. de Carnot). depende de T_1 y T_2 solamente

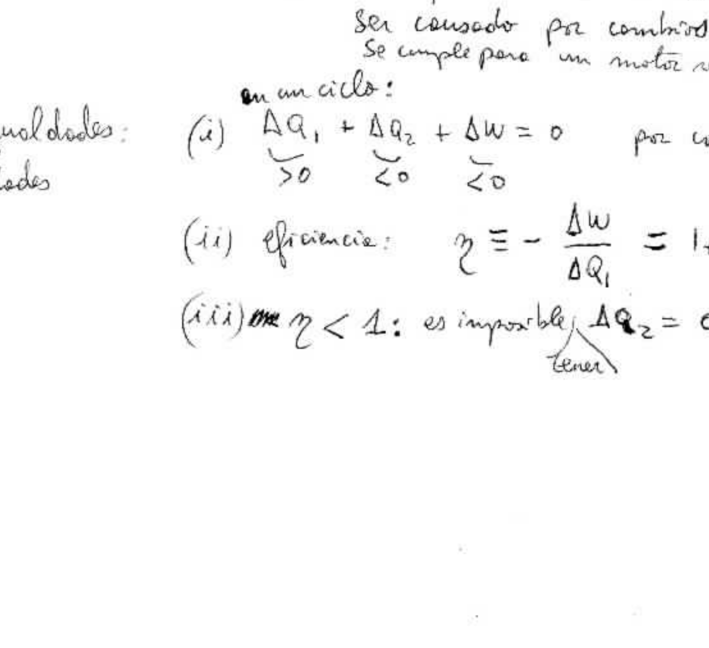
(iii) $\eta < 1$: es imposible tener $\Delta Q_2 = 0$ es decir imposible convertir todo el calor en trabajo (en un proceso cíclico). Ver mi ejemplo del pistón la clase anterior: se debe al carácter desordenado de la energía en forma de calor.

→ Si fuera el caso: fuente de calor T_2 sería inútil.

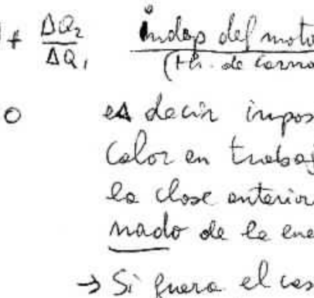
→ un motor debe tener a lo menos 2 fuentes de calor.

→ hay un costo en mantener $T_2 \neq T_1$.

Ciclo de Carnot:



$\boxed{\text{2 isotermas y 2 adiabáticas}}$ aplicadas a una substancia (gas ideal: caso simple)



$\Delta W = -\oint p\,dV < 0$

N.B.: (i) si hacemos el camino en sentido contrario

$\Delta W > 0$, $\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 < 0$

mismos valores, signos opuestos

$\boxed{\text{"motor reversible"}}$ quiere decir que cada rama es reversible (no es reversible en la definición general anterior dado que $-\oint dW \neq 0$)

(ii) in AB, $T = T_1 - \varepsilon$

in CD, $T = T_2 + \varepsilon$

(iii) al revés: quitarle calor a (2) y darlo a (3) refrigerador.

Ahora hacemos los cálculos para el gas ideal:

paso AB: $W_{AB} = -\int_{V_A}^{V_B} P\,dV = -Nk_BT_1 \int_{V_A}^{V_B} \frac{dV}{V} = -Nk_BT_1 \ln\frac{V_B}{V_A} < 0$

$T = T_1 \Rightarrow dU = 0 \Rightarrow \Delta Q_{AB} = \underbrace{\Delta Q_1}_{\text{calor recibido de "1"}} = -W_{AB}$

paso BC: $W_{BC} = -\int_{V_B}^{V_C} P\,dV = \Delta U = C_V(T_2 - T_1) < 0$

paso CD: $W_{CD} = -Nk_BT_2 \ln\frac{V_D}{V_C} > 0$

$\Delta Q_{CD} = \underbrace{\Delta Q_2}_{\text{calor dado a "2"}} = -W_{CD}$

paso DA: $W_{DA} = C_V(T_1 - T_2)$

$\Rightarrow$ trabajo total: $W = W_{AB} + \cancel{W_{BC}} + W_{CD} + \cancel{W_{DA}}$

$= -Nk_BT_1 \ln\frac{V_B}{V_A} - Nk_BT_2 \ln\frac{V_D}{V_C}$

Eficiencia: $\eta = -\frac{W}{\Delta Q_1} = +\frac{W_{AB} + W_{CD}}{W_{AB}} = 1 - \frac{T_2 \ln V_D/V_C}{T_1 \ln V_A/V_B}$

sabemos que
$$\left.\begin{aligned} P_AV_A &= P_BV_B \\ P_CV_C &= P_DV_D \\ P_BV_B^\gamma &= P_CV_C^\gamma \\ P_DV_D^\gamma &= P_AV_A^\gamma \end{aligned}\right\} \quad \frac{V_A}{V_B} = \frac{P_B}{P_A} = \frac{\frac{P_CV_C^\gamma}{V_B^\gamma}}{\frac{P_DV_D^\gamma}{V_A^\gamma}} = \frac{V_D}{V_C}\frac{V_C^\gamma V_A^\gamma}{V_B^\gamma V_D^\gamma}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{V_D}{V_C}\right)^{1-\gamma}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

(mnemotécnico $0 \leq \eta \leq 1 \Rightarrow 1 - \frac{\text{frío}}{\text{caliente}}$)