

TD. T2.- Primer Principio de la Termodinámica

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

TD. T2.- Primer Principio de la Termodinámica

Objetivos:

En este tema se desarrollan los conceptos de Energía, Calor y Trabajo. para establecer el Primer Principio de la Termodinámica: conservación de la energía. Finalmente se presenta el concepto de capacidad calorífica

2

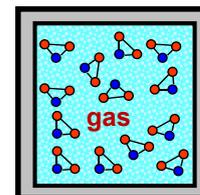
- 1.- Energía Interna y Calor
- 2.- Trabajo
- 3.- Expresión del Primer Principio
- 4.- Trabajo en Sistemas Cerrados
- 5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos
- 6.- Irreversibilidad Mecánica. Procesos Equivalentes
- 7.- Signo del Calor y el Trabajo
- 8.- Ley de Joule
- 9.- Capacidades Caloríficas

3

1.- Energía Interna y Calor (I)

Energía Interna, U (J): almacenada en un sistema en forma de:

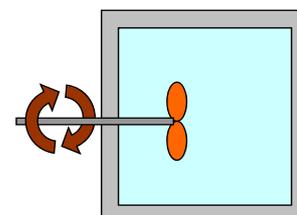
- Energía cinética de rotación y traslación de las moléculas
- Energía cinética de vibración de los átomos de las moléculas
- Energía de los enlaces químicos de interacción entre las moléculas



$$U = E_{\text{Enlaces Químicos}} + E_{\text{Cinética Molecular (traslación y rotación)}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{E. microscópica de las moléculas} \end{array} \right.$$

Es una propiedad extensiva, lo habitual es referirla a su valor específico, u , ($u = U / M$ [J/kg])

Si se agita el aire y se espera al equilibrio, no cambian ni la E_c ni la E_p del sistema (el sistema, macroscópico, está en el mismo sitio)
Pero el sistema incrementa su E , en forma de U (microscópico)



U se puede expresar en función de otras dos propiedades

$$u = f(p, v); \quad u = f(p, T); \quad u = f(v, T)$$

4

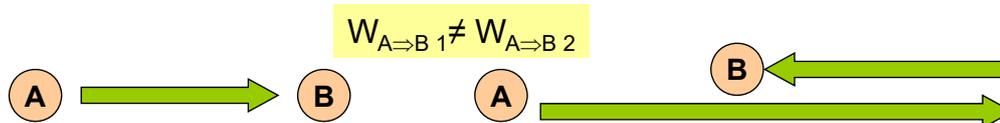
2.- Trabajo (I)

El **Trabajo, W (J)**, desde el punto de vista mecánico es el producto de una fuerza por la distancia recorrida en la dirección de la fuerza

$$W = F \cdot L \quad [\text{N} \cdot \text{m} = \text{Julio}]$$

Un sistema realiza Trabajo si se expande (positivo) o comprime (negativo) la frontera del sistema (se podría desplazar una masa)

No es una propiedad; el W realizado no depende de las propiedades el pto, sino del camino recorrido entre dos ptos



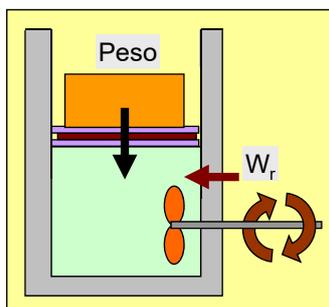
La **Potencia** es la velocidad con la que se transfiere energía mediante W

$$\text{Pot} = \frac{W}{t} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{Watio} \right]$$

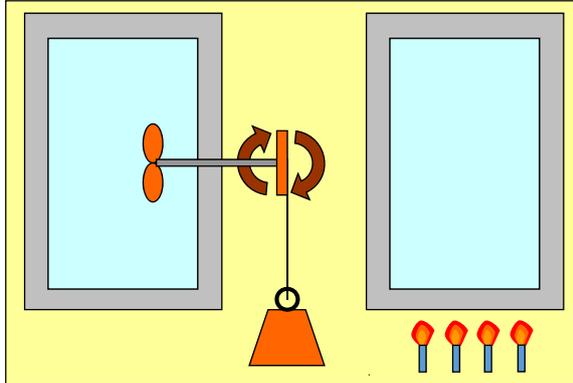
2.- Trabajo (II)

El **Trabajo de Rozamiento**, o **rozamiento interno**, **W_r (J)** (rozamiento entre las partículas del propio sistema), produce calentamiento al ser aplicado a un sistema

A diferencia del calor, W_r siempre es aportado al sistema, no puede ser extraído



La caída de 2 m de una masa de 50 kg gira una polea solidaria con una rueda de paletas introducida en un recipiente cerrado. Calcular el calor que habría que transferir para conseguir en efecto equivalente



9

El eje de un motor proporciona un par (C) de 100 N.m al girar a una velocidad de 3.000 r.p.m. Calcular la potencia proporcionada

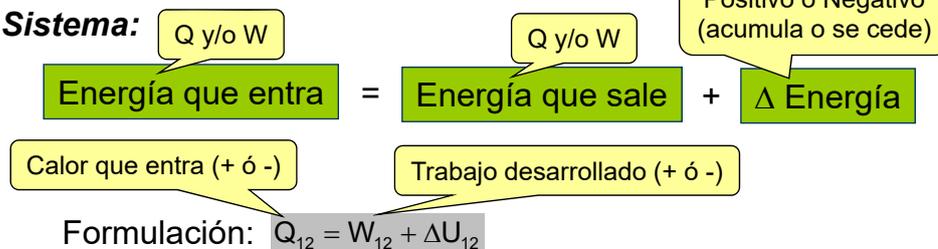
10

3.- Expresión del Primer Principio (I)

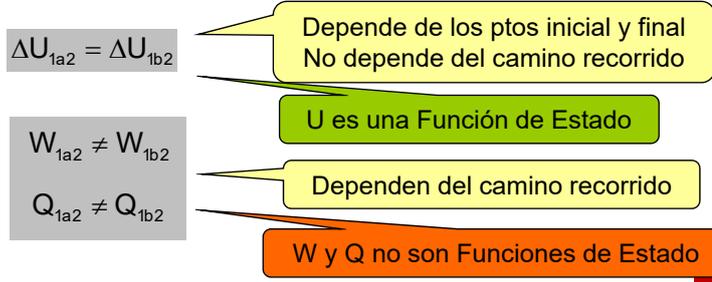
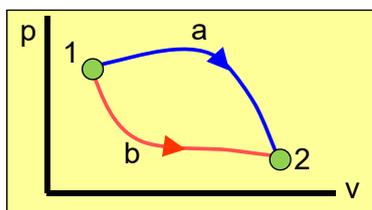
El **P.P.T.** es la Ley de la Conservación de la Energía

La energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma

Aplicado a un Sistema:



Aplicado a un Proceso



3.- Expresión del Primer Principio (II)

El **P.P.T.** es la Ley de la Conservación de la Energía

Originariamente se formuló para ciclos Termodinámicos como:

El calor recibido por un ciclo es igual al trabajo desarrollado en él

En un ciclo $\Delta U_{1a1} = 0$

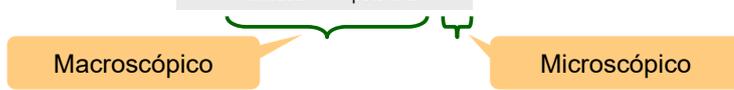
En un ciclo: $\sum W = \sum Q$

Aplicado a un Proceso: $\Delta E = (E_2 - E_1) = Q_{1-2} - W_{1-2}$

Siendo **E** la energía del sistema, propiedad extensiva

$e = \frac{E}{M}$

$E = E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}} + U$



Aplicado a un Sistema Aislado ($Q = W = 0$):

$E_2 = E_1$

$$U_2 = U_1 + Q - W_{ext}$$

3.- Expresión del Primer Principio (III)

El **P.P.T.** es la Ley de la Conservación de la Energía

La energía interna final de un sistema, U_2 , es igual a la inicial, U_1 , más el calor aportado, Q_{1-2} , menos el trabajo realizado contra la presión externa, W_{ext}

$$\Delta E = (E_2 - E_1) = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$E = E_{cinética} + E_{potencial} + U$$

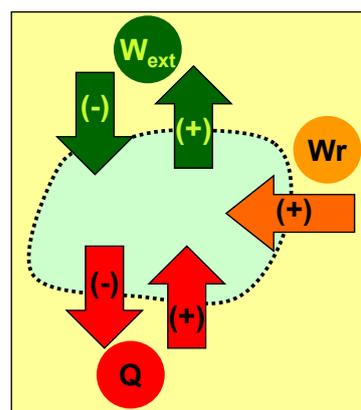
$$\Delta E = \Delta E_{cinética} + \Delta E_{potencial} + \Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

$$U_2 = U_1 + Q - W_{ext}$$

$$u_2 = u_1 + q - w_{ext}$$

Despreciando las variaciones de E_c y E_p

- Tanto Q como W_{ext} modifican la U de un sistema
- Q es positivo cuando es recibido (negativo cuando es extraído)
- W_{ext} es positivo cuando es de expansión (cedido) (negativo cuando es de compresión)



13

$$U_2 = U_1 + Q - W_{ext}$$

$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (I)

El equilibrio o régimen permanente se logra cuando las propiedades de toda la masa del sistema tienen el mismo valor

El **Trabajo Exterior**, W_{ext} , es el que el exterior recibe/cede al sistema

El **Trabajo Interior**, W_{int} , es el que el sistema recibe/cede (igual signo que W_{ext} : + cedido por el sistema, - absorbido por el sistema)

En expansiones o compresiones resistidas los dos W son "iguales", pero aparece un trabajo de rozamiento interno, W_r

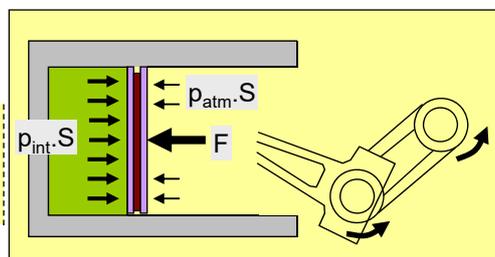
$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

Expansión \Rightarrow

$$W_{Cedido} \Rightarrow (|W_{ext}| < |W_{int}|) \quad 9 = 10 - |1|$$

Compresión \Rightarrow

$$W_{Absorbido} \Rightarrow (|W_{ext}| > |W_{int}|) \quad -10 = -9 - |1|$$



$$U_2 = U_1 + Q - W_{ext}$$

$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

$$Q + |W_r| = U_2 - U_1 + W_{int}$$

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (II)

W_r siempre es positivo

W_{int} y W_{ext} son positivos cuando son de expansión y negativos cuando son de compresión

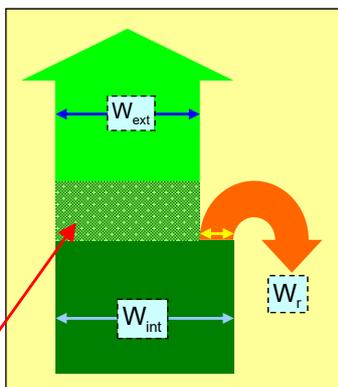
Expansión

$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

$$[+] = [+] - [+]$$

$$W_{ext} = 10 - 1$$

$$|W_{ext}| < |W_{int}|$$



Frontera del sistema

$$U_2 = U_1 + Q - W_{ext}$$

$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

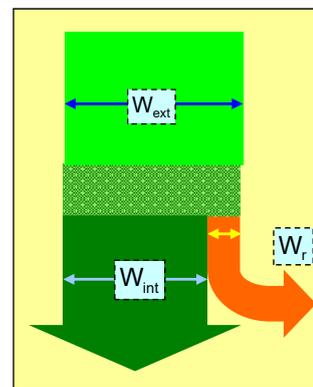
Compresión

$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

$$[-] = [-] - [+]$$

$$-W_{ext} = -10 - 1$$

$$|W_{ext}| > |W_{int}|$$



$$Q + |W_r| = U_2 - U_1 + W_{int}$$

$$q + |w_r| = u_2 - u_1 + w_{int}$$

P.P.T f(W_{int})



En una habitación aislada y bien sellada se utiliza un ventilador de 100 W para agitar el aire. Calcular el incremento de energía tras una hora de funcionamiento

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (III)

Al **cambiar el volumen** el sistema la frontera se desplaza y **realiza un trabajo** contra las fuerzas de la presión externa

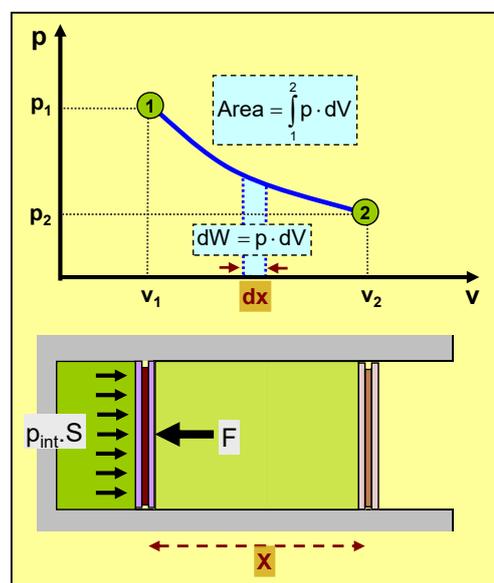
$$\left. \begin{aligned} dW_{int} &= F \cdot dx \\ F &= p \cdot S \end{aligned} \right\} dW_{int} = (p \cdot S) \cdot dx = p \cdot dv$$

$$W_{int} = \int_1^2 p \cdot dV \quad \left[\times \frac{1}{M} \right] \quad w_{int} = \int_1^2 p \cdot dv$$

- **El Trabajo de una Expansión (1 → 2):**
dv es positivo ⇒ $W > 0$
- **El Trabajo de una Compresión (2 → 1):**
dv es negativo ⇒ $W < 0$

En un **diagrama p-v**, está limitado por el área bajo la curva
(⇒ importa la transformación realizada)

Importa el camino recorrido



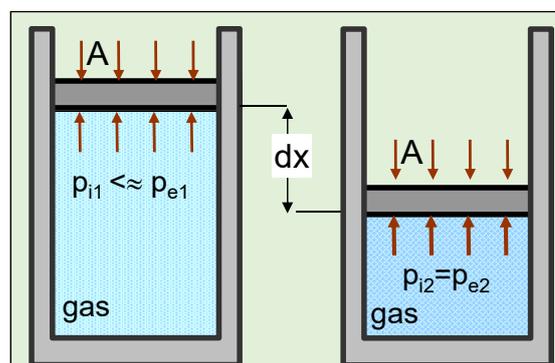
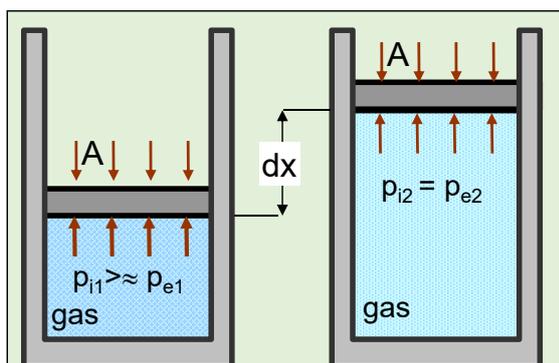
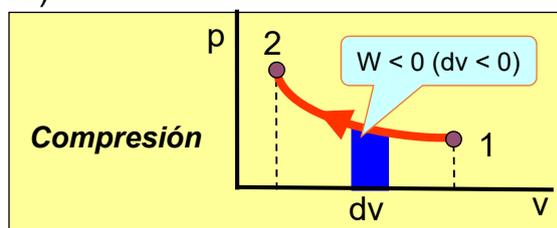
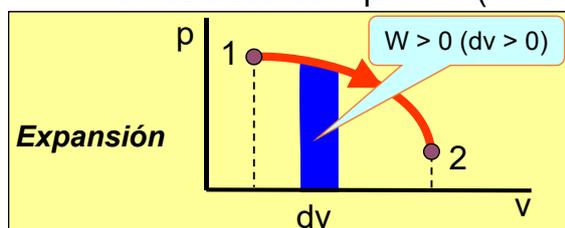
17

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (IV)

- **Si es mediante un proceso conocido**
El sistema pasa por una sucesiva serie de estados de equilibrio (conocidos)

$$p_e \approx p_i$$

$$W_{int12} = \int_1^2 p \cdot dV$$



4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (V)

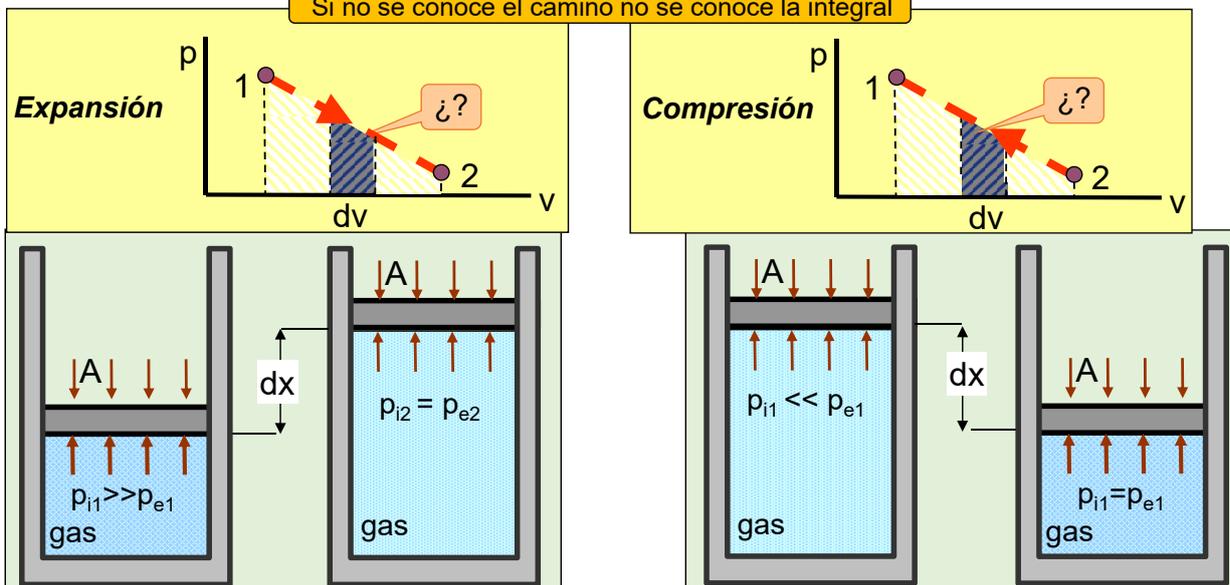
- Si es mediante un **proceso desconocido**

Los estados intermedios, no están en equilibrio debido al desplazamiento rápido del pistón

$$p_e \ll p_i \quad \text{o} \quad p_e \gg p_i$$

$$W_{int12} \neq \int_1^2 p \cdot dv$$

Si no se conoce el camino no se conoce la integral



4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (V)

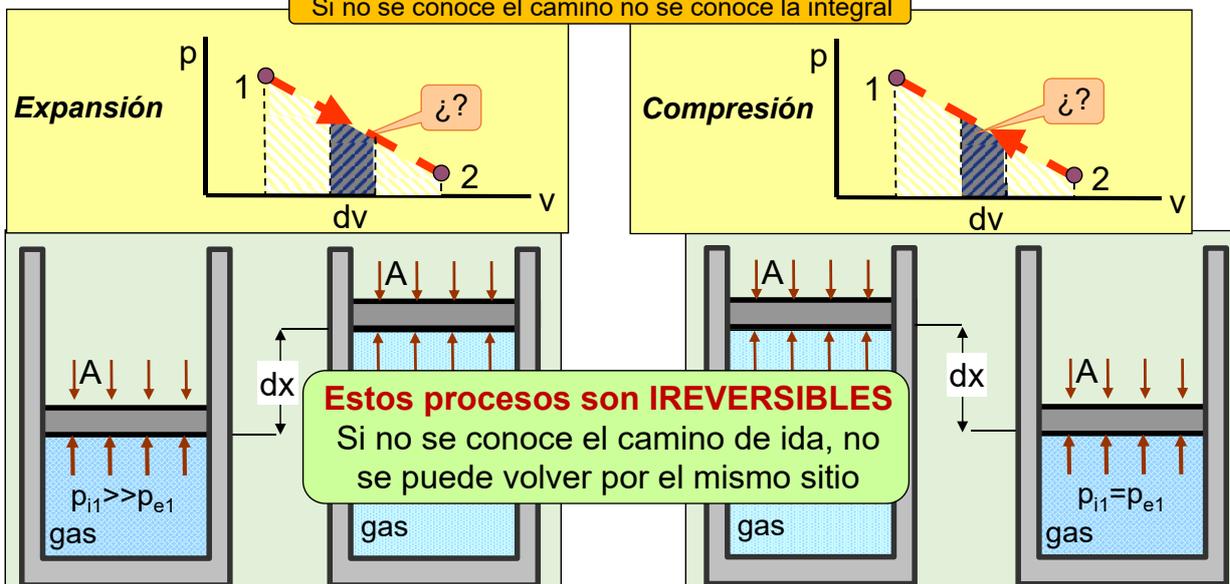
- Si es mediante un **proceso desconocido**

Los estados intermedios, no están en equilibrio debido al desplazamiento rápido del pistón

$$p_e \ll p_i \quad \text{o} \quad p_e \gg p_i$$

$$W_{int12} \neq \int_1^2 p \cdot dv$$

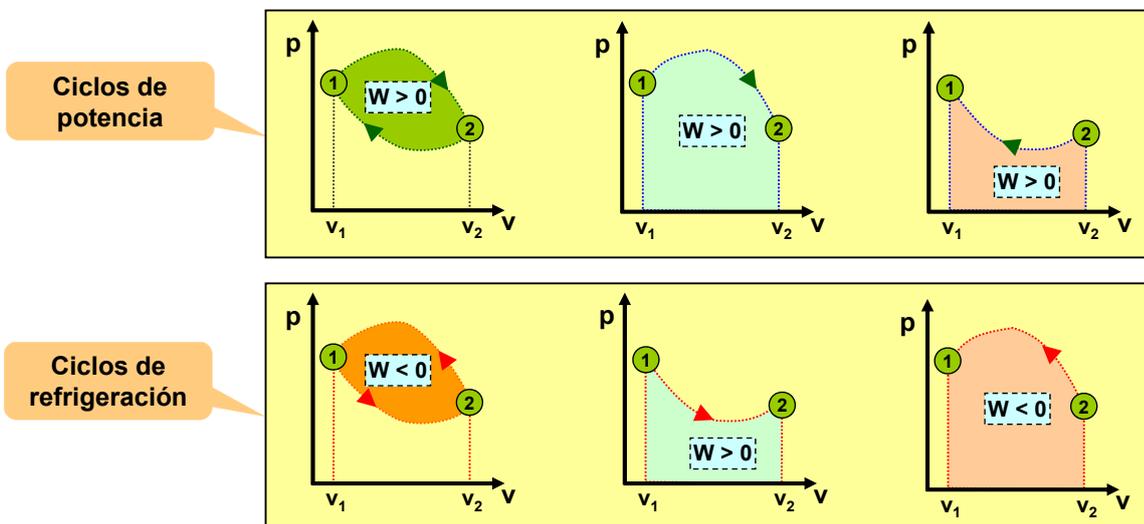
Si no se conoce el camino no se conoce la integral



4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (VI)

$$W_{int} = \int_1^2 p \cdot dv$$

En un ciclo el trabajo es el área encerrado
 + si el sentido es horario (*expansión por arriba*)
 - si es antihorario (*compresión por arriba*)



4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (VII)

$$\left. \begin{aligned} W_{int} &= \int_1^2 p \cdot dv \\ q + |W_r| &= u_2 - u_1 + W_{int} \end{aligned} \right\}$$

$$q + |W_r| = u_2 - u_1 + \int_1^2 p \cdot dv$$

$$dq + |dw_r| = du + p \cdot dv$$

Adiabática: ($Q = W_r = 0$)

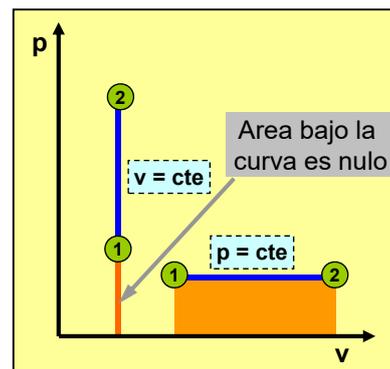
$$u_2 - u_1 + \int_1^2 p \cdot dv = 0$$

$$du + p \cdot dv = 0$$

-Si la expansión es isócara, ($v = cte$):

$$W_{int} = \int_1^2 p \cdot dv = 0$$

$$W_{int} = 0$$



4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (VIII)

$$w_{int} = \int_1^2 p \cdot dv$$

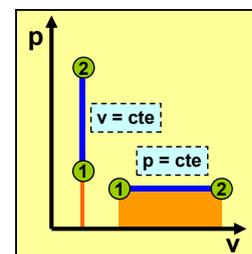
–Si la expansión es isobara ($p = cte$):

$$w_{int} = p \cdot (v_2 - v_1)$$

Si es un **gas perfecto**:

$$p \cdot v = R \cdot T$$

$$w_{int} = R \cdot (T_2 - T_1)$$



–Si la expansión, para un **gas perfecto** es **isoterma** ($T = cte$, $p \cdot v = cte$):

$$w_{int} = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

Expresado en función de p :

$$p \cdot v = R \cdot T$$

$$w_{int} = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (IX)

$$w_{int} = \int_1^2 p \cdot dv$$

–Si la expansión es **adiabática** se tiene que: $p \cdot v^\gamma = cte$

$$w_{int} = \frac{p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2}{\gamma - 1}$$

* γ es el exponente adiabático, [T1] $\left\{ \begin{array}{l} 1,66 \text{ en gases monoatómicos} \\ 1,40 \text{ en gases biatómicos} \\ 1,33 \text{ en gases triatómicos} \end{array} \right.$

Si es un **gas perfecto**:

$$p \cdot v^\gamma = cte$$

$$p \cdot v = R \cdot T$$

$$w_{int} = \frac{R \cdot (T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$$

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (X)

$$w_{int} = \int_1^2 p \cdot dv$$

–Si la **expansión es politrópica** $p \cdot v^n = cte$

* n es el exponente politrópico

sirven las mismas expresiones que en la adiabática sustituyendo γ por n

$$w_{int} = \frac{p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2}{\gamma - 1} \rightarrow w_{int} = \frac{p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2}{n - 1}$$

Si es un **gas perfecto**:

$$w_{int} = \frac{R \cdot (T_1 - T_2)}{\gamma - 1} \rightarrow w_{int} = \frac{R \cdot (T_1 - T_2)}{n - 1}$$

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (XII)

$$w_{int} = \int_1^2 p \cdot dv$$

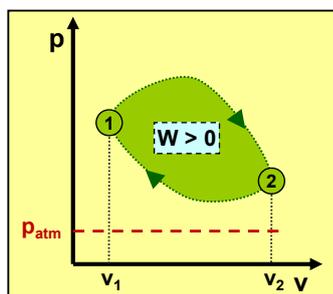
La p_{atm} , p_a , es capaz de desarrollar un trabajo W_a
En un ciclo queda anulado

$$W_a = p_a \cdot (v_2 - v_1)$$

En un sistema cerrado el **Trabajo Util**, W_u , es el que se produce por las **presiones relativas**, ya que la p_{atm} siempre está presente en el exterior

$$w_u = \left[\int_1^2 (p - p_a) \cdot dv \right] - |w_r|$$

$$W_u = W_{ext} - W_a$$



- Desplazar el eje de presión no varía el área encerrada en un ciclo W_a en la expansión (>0) contrarresta W_a en la compresión (<0)

$$U_2 = U_1 + Q - W_{ext}$$

$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

$$Q + |W_r| = U_2 - U_1 + W_{int}$$

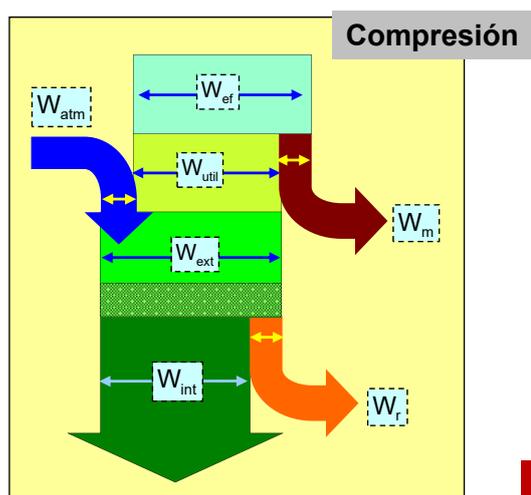
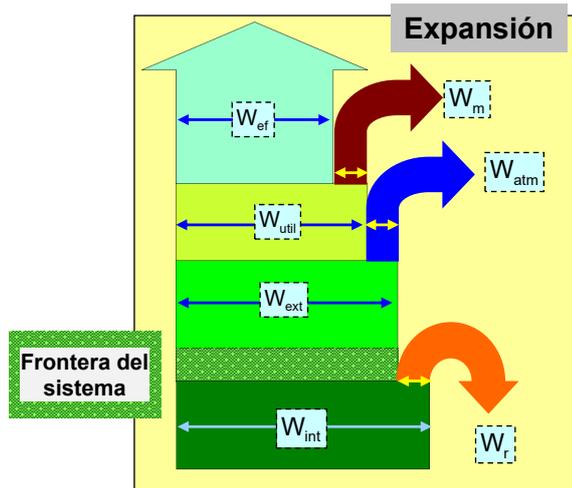
4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (XIII)

Parte del trabajo útil se destruye en **Rozamientos Mecánicos**, W_m , dando lugar al **Trabajo Efectivo**, W_{ef} .

$$W_{ef} = W_{ext} - W_a - |W_m|$$

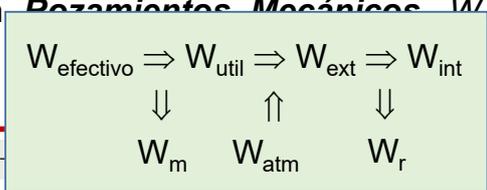
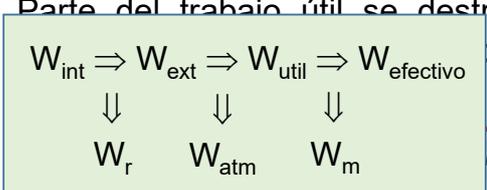
$$W_u = W_{ext} - W_a$$

$$W_{ef} = W_u - |W_m|$$

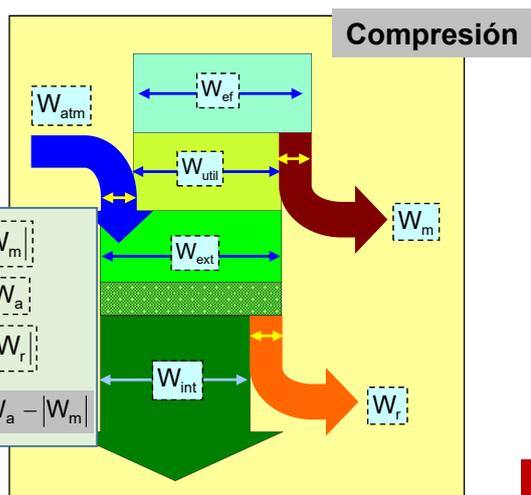
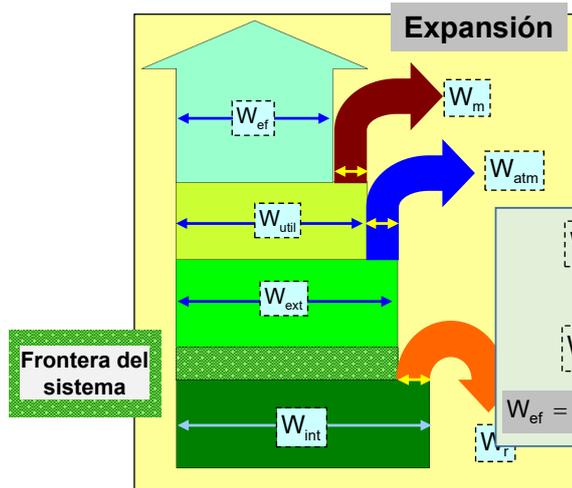


4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (XIII)

Parte del trabajo útil se destruye en **Rozamientos Mecánicos**, W_m , dando lugar al **Trabajo Efectivo**, W_{ef} .



$$W_u = W_{ext} - W_a$$



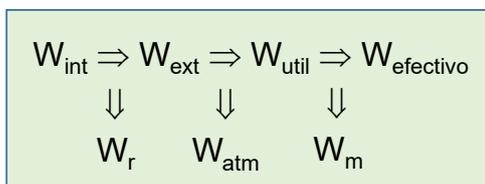
$$W_{ef} = W_u - |W_m|$$

$$W_u = W_{ext} - W_a$$

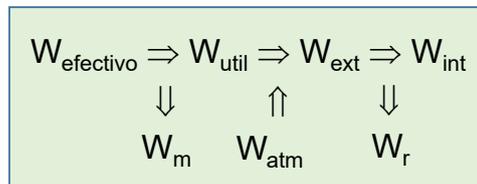
$$W_{ext} = W_{int} - |W_r|$$

$$W_{ef} = W_{int} - |W_r| - W_a - |W_m|$$

4.- Trabajo en Sistemas Cerrados (XIV)



Expansión



Compresión

$$W_{\text{int}} = W_{\text{ext}} + |W_r|$$

$$W_{\text{ext}} = W_{\text{util}} + W_a$$

$$W_{\text{int}} = W_{\text{util}} + W_a + |W_r|$$

$$W_{\text{util}} = W_{\text{efectivo}} + |W_m|$$

$$W_{\text{int}} = W_{\text{efectivo}} + |W_m| + W_a + |W_r|$$

$$W_{\text{int}} = W_{\text{ext}} + |W_r| = \underbrace{W_{\text{util}} + W_a + |W_r|}_{W_{\text{ext}}} = \underbrace{W_{\text{efectivo}} + |W_m| + W_a + |W_r|}_{W_{\text{util}}}$$

29

Calcular el trabajo de expansión de 100 dm³ de nitrógeno desde 7 bar hasta 1 bar si la expansión es:

a) Expansión isoterma:

b) Expansión adiabática (N₂, γ = 1,4);

30

5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (I)

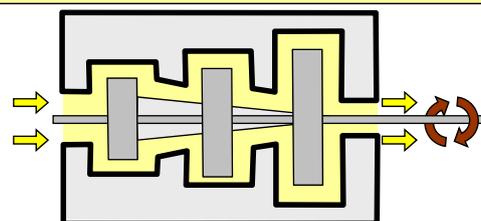
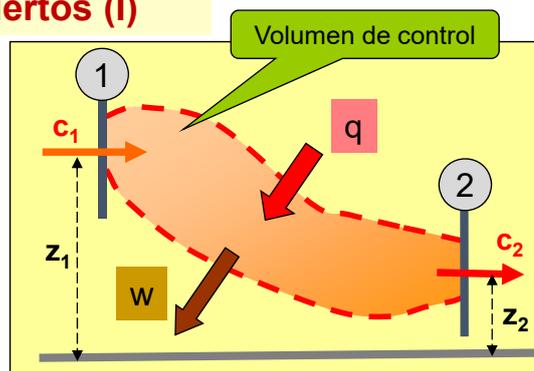
En los **Sistemas Abiertos** una masa de fluido fluye en un volumen (de control)

En él, el estado de equilibrio o régimen permanente se alcanza cuando las propiedades en cada sección tienen el mismo valor a lo largo del tiempo

La **Energía de un Flujo, E**, en una sección transversal es la suma de sus energías. Expresada por unidad de masa, ϵ , resulta:

$$\epsilon = u + p \cdot v + \frac{c^2}{2} + g \cdot z$$

- Energía interna, u
- Energía de presión: $p/\rho = p \cdot v$
- Energía cinética: $c^2/2$, c es la velocidad
- Energía potencial: $g \cdot z$, z es la altura (sistema real ≈ 0)



5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (I)

En los **Sistemas Abiertos** una masa de fluido fluye en un volumen (de control)

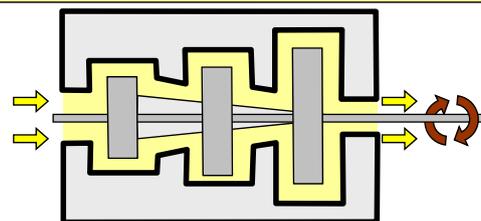
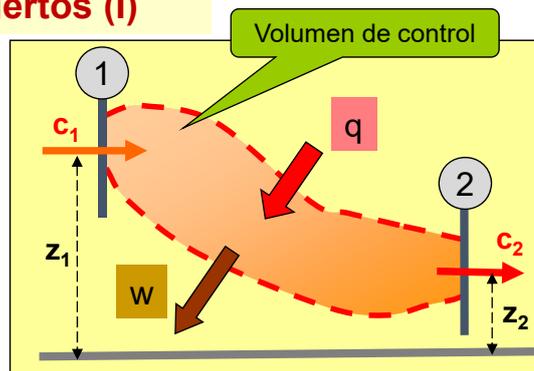
En el estado de equilibrio o régimen permanente se alcanza cuando las propiedades en cada sección tienen el mismo valor a lo largo del tiempo

La **Energía de un Flujo, E**, en una sección transversal es la suma de sus energías. Expresada por unidad de masa, ϵ , resulta:

$$u \Rightarrow \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{(\text{N} \cdot \text{m})}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{(\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

$$p \cdot v \Rightarrow \left[\text{Pa} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right]$$

$$\frac{c^2}{2} \Rightarrow \left[\left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right]$$

$$g \cdot z \Rightarrow \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$$


$$\epsilon = u + p \cdot v + \frac{c^2}{2} + g \cdot z$$

- Energía interna, u
- Energía de presión: $p/\rho = p \cdot v$
- Energía cinética: $c^2/2$, c es la velocidad
- Energía potencial: $g \cdot z$, z es la altura (sistema real ≈ 0)

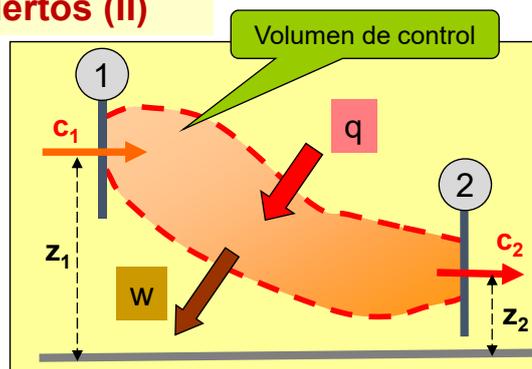
5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (II)

Haciendo un **Balace de Energía** cuando se alcanza el régimen estacionario:

$$\text{Energía}_{\text{Entra}} = \text{Energía}_{\text{Sale}}$$

$$[q] + [\varepsilon_1] = [w] + [\varepsilon_2]$$

$$[q] + \left[u_1 + p_1 \cdot v_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right] = [w] + \left[u_2 + p_2 \cdot v_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right]$$



La **Entalpía, H [J]**, es la magnitud de un cuerpo que suma la energía interna y el producto del volumen por la presión, es la **cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno**

$$h = u + p \cdot v \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Es una propiedad extensiva, depende de la masa

$$h = \frac{H [\text{J}]}{M [\text{kg}]}$$

típicamente $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$

5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (III)

Haciendo un **Balace de Energía** cuando se alcanza el régimen estacionario:

$$\text{Energía}_{\text{Entra}} = \text{Energía}_{\text{Sale}}$$

$$[q] + [\varepsilon_1] = [w] + [\varepsilon_2]$$

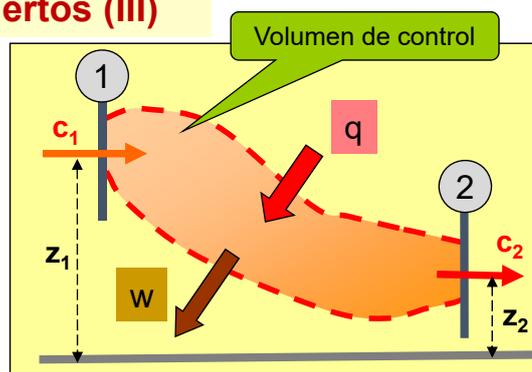
$$[q] + \left[u_1 + p_1 \cdot v_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right] = [w] + \left[u_2 + p_2 \cdot v_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right]$$

$$h_1 = u_1 + p_1 \cdot v_1$$

$$h_2 = u_2 + p_2 \cdot v_2$$

$$[q] + \left[h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right] = [w] + \left[h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right]$$

$$[q] = [h_2 - h_1] + \left[\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right] + g \cdot [z_2 - z_1] + [w]$$



5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (VI)

Si la energía potencial es despreciable

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= u + \frac{c^2}{2} + p \cdot v + g \cdot z \\ h &= u + p \cdot v \end{aligned} \right\}$$

$$\varepsilon = h + \frac{c^2}{2}$$

Entalpía / M E_{Cinética} / M

El PPT se puede expresar en función de la Entalpía como:

$$h = u + p \cdot v$$

$$\partial dh = du + (dp \cdot v + p \cdot dv)$$

$$du + p \cdot dv = dh - v \cdot dp$$

$$\left. \begin{aligned} \text{PPT } u_2 &= u_1 + q - w_{\text{ext}} \\ q + |w_r| &= u_2 - u_1 + \int_1^2 p \cdot dv \\ dq + |dw_r| &= du + p \cdot dv \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} dq + |dw_r| &= dh - v \cdot dp \\ q + |w_r| &= h_2 - h_1 - \int_1^2 v \cdot dp \end{aligned} \right\}$$

P.P.T f(h)

35

5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (VII)

El trabajo que atraviesa un sistema abierto se le llama **Trabajo Técnico**, W_t , o Trabajo cedido en el Eje

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 + q - w_t = \varepsilon_2 \rightarrow q &= \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + w_t \\ \varepsilon &= h + \frac{c^2}{2} \end{aligned} \right\}$$

$$q = \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} \right) - \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} \right) + w_t$$

$$q = \left(h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right) + w_t$$

P.P.T Sist. Ab.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x^2}{2} \right) = \frac{2 \cdot x}{2} = x \rightarrow dq = dh + c \cdot dc + dw_t$$

Para calcular el W_t :

$$\left. \begin{aligned} q &= h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + w_t \\ q + |w_r| &= h_2 - h_1 - \int_1^2 v \cdot dp \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} q - (h_2 - h_1) &= \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + w_t \\ q - (h_2 - h_1) &= -|w_r| - \int_1^2 v \cdot dp \end{aligned} \right\}$$

$$w_t + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = -\int_1^2 v \cdot dp - |w_r|$$

$$w_t = -\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - \int_1^2 v \cdot dp - |w_r|$$

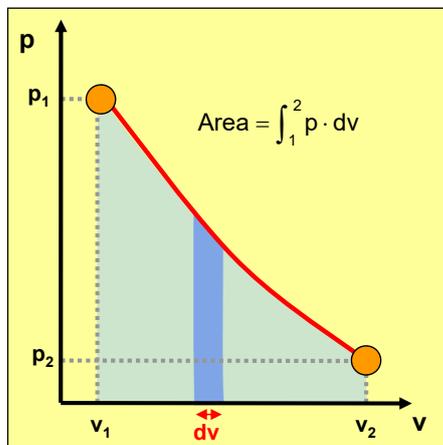
$$dw_t = -c \cdot dc - v \cdot dp - |dw_r|$$

Considerar entrada y salida del **volumen de control** del sistema abierto

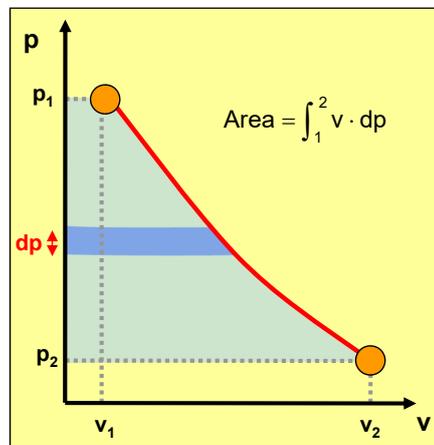
36

5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (VIII)

Sistemas cerrados



Sistemas abiertos



Para obtener trabajo en los sistemas abiertos la p tiene que disminuir

$$w_t = -\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - \int_1^2 v \cdot dp - |w_r|$$

37

5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (IX)

En los sistemas abiertos la presión es cambiante

según el tipo de transformación la expresión $\int_1^2 v \cdot dp$ toma el valor:

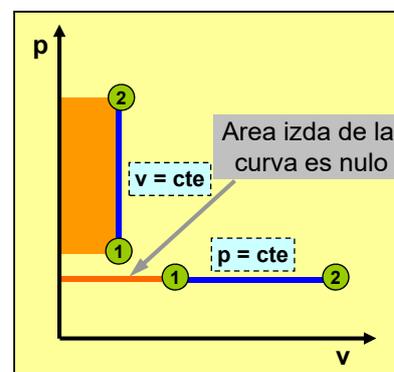
– Si es isobara ($p = \text{cte}$): $\int_1^2 v \cdot dp = 0$

– Si es isócara ($v = \text{cte}$): $\int_1^2 v \cdot dp = v \cdot (p_2 - p_1)$

– Si es Isoterma en un gas perfecto: $\int_1^2 v \cdot dp = -w_{\text{int}}$

$$\left. \begin{array}{l} p \cdot v = \text{cte} \\ p \cdot v = R \cdot T \end{array} \right\} \int_1^2 v \cdot dp = \int_1^2 \frac{R \cdot T}{p} dp = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$(T \text{ cte}) \Rightarrow w_{\text{int}} = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$



38

5.- Primer Principio en Sistemas Abiertos (X)

En los sistemas abiertos la presión es cambiante
según el tipo de transformación la expresión $\int_1^2 v \cdot dp$ toma el valor:

– Si es adiabática ($p \cdot v^\gamma = cte$): $\int_1^2 v \cdot dp = -\gamma \cdot w_{int}$

– Si es politrópica cambiando γ por n $\int_1^2 v \cdot dp = -n \cdot w_{int}$

Calcular la T final en un cilindro de 2 m³ que contiene vapor de agua a 500 kPa y 200°C si se le suministra un calor de 3.500 kJ y el émbolo del cilindro se desplaza para mantener la p cte, suponer $W_r = 0$

P = 5,0 bar = 0,50 MPa				
T	v	u	h	s
°C	m ³ /kg	kJ / kg	kJ / kg	kJ / kg K
Sat	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213
180	0,4045	2609,7	2812,0	6,9656
200	0,4249	2642,9	2855,4	7,0592
240	0,4646	2707,6	2939,9	7,2307
280	0,5034	2771,2	3022,9	7,3865
320	0,5416	2834,7	3105,6	7,5308
360	0,5796	2898,7	3188,4	7,6660
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938
440	0,6548	3028,6	3356,0	7,9152
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952

6.- Irreversibilidad Mecánica. Procesos Equivalentes (I)

Exergía (Ex) [J], parte de la energía que se puede convertir en trabajo mecánico

Anergía (An) [J], parte de la energía que es incapaz de transformarse en trabajo

$$\text{Energía} = \text{Exergía} + \text{Anergía}$$

Son extensivas, dependen de la cantidad de masa (ex, an) ex [J/kg]
an [J/kg]

p.ej: el calor a T ambiente tiene energía pero no puede calentar

Si dos sistemas tiene la misma cantidad de Energía

$$E_1 = E_2$$

pero uno de ellos tiene más Exergía

$$Ex_1 > Ex_2 \Rightarrow (An_1 < An_2)$$

la **calidad de su energía** es mayor

41

Temperatura de llama de combustible

	Temperatura de fusión (°C)	Combustible	Comburente	°C
Acero	1.400 - 1.500	Gasolina	Aire	2100
Aluminio	650	Hidrógeno (H2)	Aire	2200
Bronce	900 - 1.000	Hidrógeno (H2)	Oxígeno	3200
Cobre	1.080	Metano (CH4)	Aire	1900
Estaño	230	Metanol (CH4O)	Aire	1900
Hierro	1.540	Gas natural	Aire	1900
Latón	900 - 1.000	Pentano (C5H12)	Aire	1900
Oro	1.050	Propano (C3H8)	Aire	1900
Plata	960	Propano (C3H8)	Oxígeno	2500
Platino	1.775	Gas MAPP Metilacetileno (C3H4)	Aire	2000
Plomo	330	Gas MAPP Metilacetileno (C3H4)	Oxígeno	2900
Titanio	1.650	Tolueno (C7H8)	Aire	2000
Tungsteno	3.400	Madera	Aire	1900
Vanadio	1.900	Queroseno	Aire	2000
Zinc	420	Fueloil ligero	Aire	2100
		Fueloil medio	Aire	2100
		Fueloil pesado	Aire	2100
		Hulla	Aire	2100
		Antracita	Aire	2100
		Antracita	Oxígeno	2900

6.- Irreversibilidad Mecánica. Procesos Equivalentes (II)

Un **Proceso** es **Irreversible** cuando provoca destrucción de Exergía

- transforma Exergía en Anergía (la cantidad de Energía no cambia)
- la Exergía destruida va a parar en forma de calor al medio ambiente

Irreversibilidades internas, asociadas rozamiento interno (W_r)

Irreversibilidades externas, asociadas rozamiento mecánico (W_m)

Un **Proceso** es **Reversible** si : $W_r = W_m = 0$

Una **Transformación** es **reversible** si: $W_r = 0$

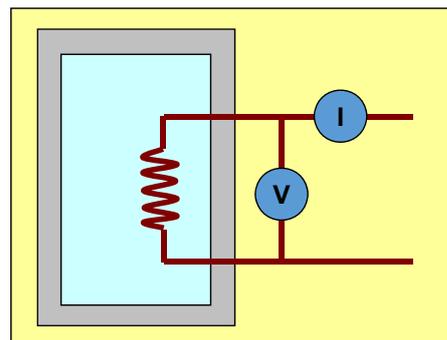
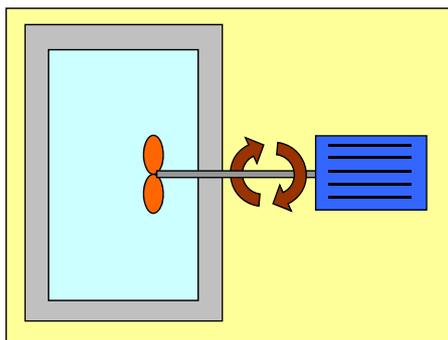
43

6.- Irreversibilidad Mecánica. Procesos Equivalentes (III)

Dos procesos para la misma transformación termodinámica son equivalentes cuando generan la misma Anergía; tienen el mismo grado de irreversibilidad

En experiencias de laboratorio W_r se puede “sustituir” por trabajo eléctrico, que es más fácil de medir

$$W_r = V \cdot I \cdot t \quad (\text{V voltios, I amperios, t en segundos})$$



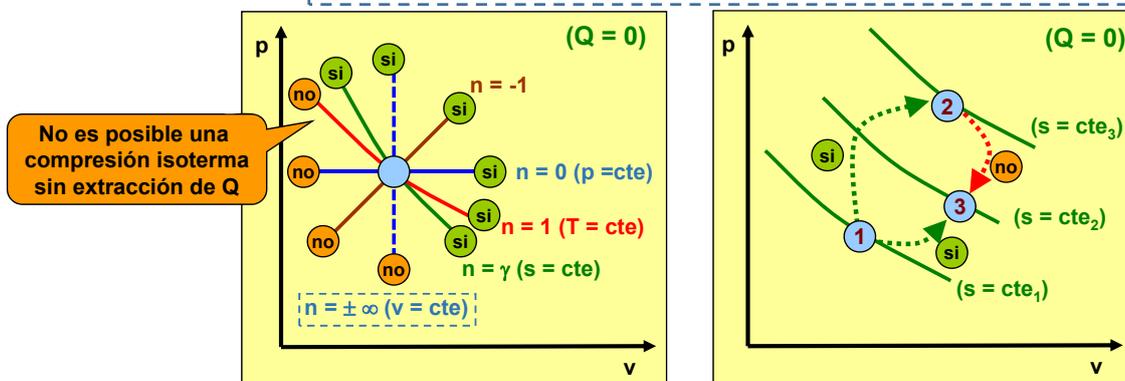
44

Partiendo de 1 bar y 2.400 K se comprime aire a $T = \text{cte}$ hasta 4 bar. Después se reduce el volumen a la mitad manteniendo $p = \text{cte}$; y finalmente se termina enfriando a $v = \text{cte}$; $p_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$, $M_{\text{aire}} = 28,964 \text{ kg/kmol}$. Si $W_r = 0$, representar las transformaciones y determinar el trabajo de expansión en cada transformación en kJ/kg

Partiendo de 1 bar y 2.400 K se comprime aire a $T = \text{cte}$ hasta 4 bar. Después se reduce el volumen a la mitad manteniendo $p = \text{cte}$; y finalmente se termina enfriando a $v = \text{cte}$; $p_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$, $M_{\text{aire}} = 28,964 \text{ kg/kmol}$. Si $W_r = 0$, representar las transformaciones y determinar **el trabajo útil total**

7.- Signo de Q y W_r

En un sistema adiabático sólo se pueden alcanzar estados por encima de su adiabática, para lo que se requiere aporte de calor mediante W_r. (recordar la posición relativa entre adiabáticas e isothermas, [T1])



El signo del calor es positivo si es recibido; y, negativo si es cedido

En una transformación reversible (W_r = 0) el **signo del Q** se sabe con la posición relativa respecto a la adiabática del estado inicial:

si el pto final está por encima es positivo; y si está por debajo negativo

$p \cdot v = R \cdot T$
Si $T = cte \rightarrow p \cdot v = cte$
 $h = u + p \cdot v$

8.- Ley de Joule

u es una propiedad del sistema y puede expresarse en función de otras dos

$u = f(p, v); u = f(p, T); u = f(v, T)$

En los gases perfectos u y h sólo dependen de la temperatura

Si $T_1 = T_2 \Rightarrow u_1 = u_2$ y $h_1 = h_2$

$T = cte \Rightarrow \begin{cases} u = cte \\ h = cte \end{cases}$

En una isoterma reversible (W_r = 0), el Q es:

$T = cte \Rightarrow u = cte \Rightarrow \Delta u = 0$

P.P.T. $q + |w_r| = u_2 - u_1 + \int_1^2 p \cdot dv \Rightarrow q = \int_1^2 p \cdot dv$

$w_{int} = \int_1^2 p \cdot dv = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$

$q = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = w_{int}$

9.- Capacidades Caloríficas (I)

Capacidad calorífica, C [J / K], es el cociente entre la energía térmica recibida (o cedida) por un sistema y su variación de temperatura

Es extensiva. La capacidad calorífica específica, c [J / (kg.K)]

$$c = \frac{dq + |dw_r|}{dT}$$

$$\left. \begin{aligned} dq + |dw_r| &= du + p \cdot dv \\ h = u + p \cdot v &\rightarrow du + p \cdot dv = dh - v \cdot dp \\ dq + |dw_r| &= dh - v \cdot dp \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} c \cdot dT &= du + p \cdot dv \\ c \cdot dT &= dh - v \cdot dp \end{aligned} \right\}$$

La capacidad calorífica:

- en una transformación adiabática, ($Q = W_r = 0$) es nula
- en una transformación isoterma es $\pm \infty$

A presión constante, c_p
en una isóbara, $dp = 0$

$$c_p = \left[\frac{dh}{dT} \right]_p = c_p(p, T)$$

A volumen constante, c_v
en una isocora, $dv = 0$

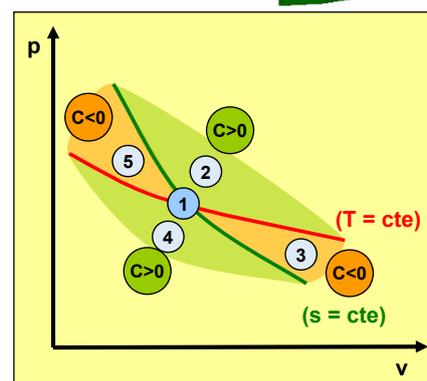
$$c_v = \left[\frac{du}{dT} \right]_v = c_v(v, T)$$

9.- Capacidades Caloríficas (II)

El signo de C depende de Q , W_r y T

- 1-2 positivo (+/+)
- 1-3 negativo (+/-)
- 1-4 positivo (-/-)
- 1-5 negativo (-/+)
- adiabáticas 0
- isotermas $\pm \infty$

$$c = \frac{dq + |dw_r|}{dT}$$



En los **gases perfectos**, u y h sólo dependen de T

$$c_p = \left[\frac{dh}{dT} \right]_p = c_p(p, T) = c_p(T)$$

$$c_v = \left[\frac{du}{dT} \right]_v = c_v(v, T) = c_v(T)$$

\approx ctes en los gases

$$\left. \begin{aligned} h &= u + p \cdot v \\ p \cdot v &= R \cdot T \end{aligned} \right\} h = u + R \cdot T$$

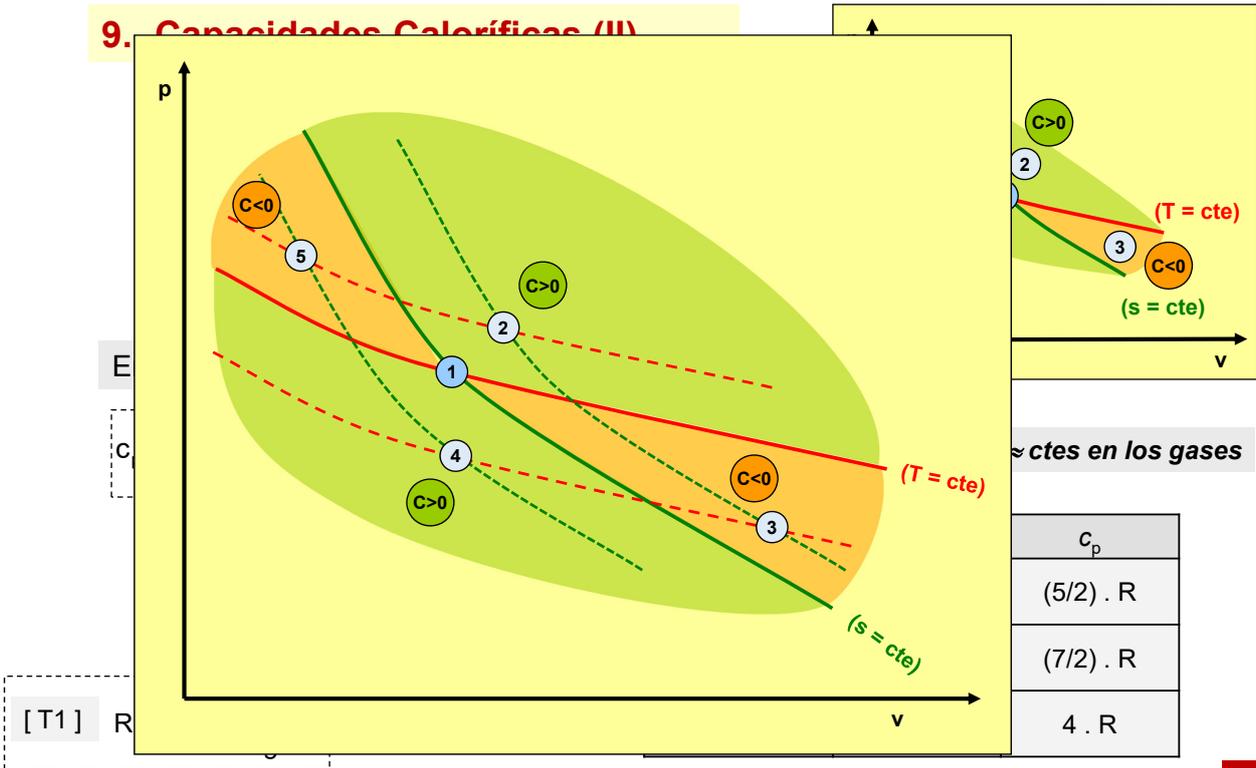
$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

$$[T1] \quad R = \frac{8,3143 \text{ kJ}}{\text{M kgK}}$$

$$c_p = c_v + R$$

	c_v	c_p
Gases monoatómicos	$(3/2) \cdot R$	$(5/2) \cdot R$
Gases biatómicos	$(5/2) \cdot R$	$(7/2) \cdot R$
Gases triatómicos	$3 \cdot R$	$4 \cdot R$

9.- Capacidades Calóricas (II)



9.- Capacidades Calóricas (III)

En las adiabáticas ($c = 0$)

$$c = \frac{dq + |W_r|}{dT}$$

$$dq + |dw_r| = du + p \cdot dv$$

$$du + p \cdot dv = dh - v \cdot dp$$

$$\text{Si } c = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} c \cdot dT = dh - v \cdot dp \Rightarrow dh = v \cdot dp \\ c \cdot dT = du + p \cdot dv \Rightarrow du = -p \cdot dv \end{array} \right\}$$

$$\frac{dh}{du} = \frac{-v \cdot dp}{p \cdot dv}$$

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{-v \cdot dp}{p \cdot dv}$$

$$c_p = \left[\frac{dh}{dT} \right]$$

$$\frac{c_p \cdot dv}{c_v \cdot v} + \frac{dp}{p} = 0$$

$$c_v = \left[\frac{du}{dT} \right]$$

$$\frac{c_p}{c_v} \cdot \ln(v) + \ln(p) = \text{cte}$$

	c_p	c_v	$\gamma (c_p/c_v)$
Gases monoatómicos	$(5/2) \cdot R$	$(3/2) \cdot R$	$5/3 = 1,66$
Gases biatómicos	$(7/2) \cdot R$	$(5/2) \cdot R$	$7/5 = 1,4$
Gases triatómicos	$4 \cdot R$	$3 \cdot R$	$4/3 = 1,33$

Llamando $(c_p / c_v) = \gamma$

$$\ln(v^\gamma) + \ln(p) = \ln(p \cdot v^\gamma) = \text{cte}$$

$$p \cdot v^\gamma = \text{cte}$$

es la expresión de las adiabáticas

9.- Capacidades Caloríficas (IV)

En las adiabáticas ($c = 0$)

$$\left. \begin{array}{l} c_p = c_v + R \\ (c_p / c_v) = \gamma \end{array} \right\} \gamma \cdot c_v = c_v + R \Rightarrow (\gamma - 1) \cdot c_v = R \Rightarrow \begin{array}{l} c_v = R \cdot \frac{1}{\gamma - 1} \\ c_p = R \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \end{array}$$

En los **gases perfectos**, u y h sólo dependen de T

$$c_p = \left[\frac{dh}{dT} \right]_p = c_p(T) \rightarrow h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

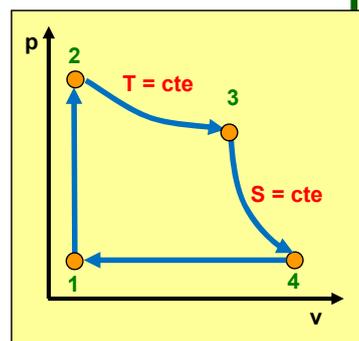
$$c_v = \left[\frac{du}{dT} \right]_v = c_v(T) \rightarrow u_2 - u_1 = c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

≈ ctes en los gases

	c_p (kJ/kg°C)	c_v (kJ/kg°C)
Aire	1	0,717
Agua	4,18	-

Valores más exactos en tablas

En las transformaciones de la figura decir:
 a) Si $Q = 0$, ¿Cuáles se pueden realizar?,
 ¿serían reversibles o irreversibles?
 b) Si $W_r = 0$, ¿cúal sería el signo del Q en
 cada transformación?

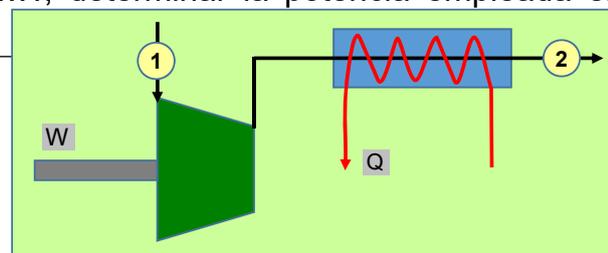


Un gas monoatómico a 2 bar y $5 \text{ m}^3/\text{kmol}$ duplica su volumen a p cte; a continuación se expande a T cte hasta 1 bar. Representar las transformaciones y calcular:

- el trabajo de expansión
- la variación de energía interna
- el calor si $W_r = 0$
- la variación de entalpía

55

Un compresor toma amoníaco con una entalpía de 1.240 kJ/kg (1) y lo descarga con otra de 1.400 kJ/kg (2). Sabiendo que: circulan 400 kg/h , que se transfieren al exterior por el circuito de refrigeración 40 kJ/kg , y que se requiere una potencia real o efectiva de 25 kW , determinar la potencia empleada en vencer las irreversibilidades externas



56