El primer principio de la termodinámica en sistemas abiertos

Profesor:
Joaquín Zueco Jordán
Área de Máquinas y Motores Térmicos

Aplicación del primer principio a sistemas abiertos

•*Conservación de la masa*

La masa, como la energía, es una propiedad que se conserva, y no se crea ni se destruye.

$$E = m\,c^2$$

(Einstein)

(la masa cambia al cambiar la energía), excepto en reacciones nucleares, éste cambio es muy pequeño

$$\sum m_{ent} - \sum m_{sal} = \Delta m_{VC}$$

Masa que entra V.C. − *Masa que sale V.C.* = *Cambio de la masa en el V.C.*

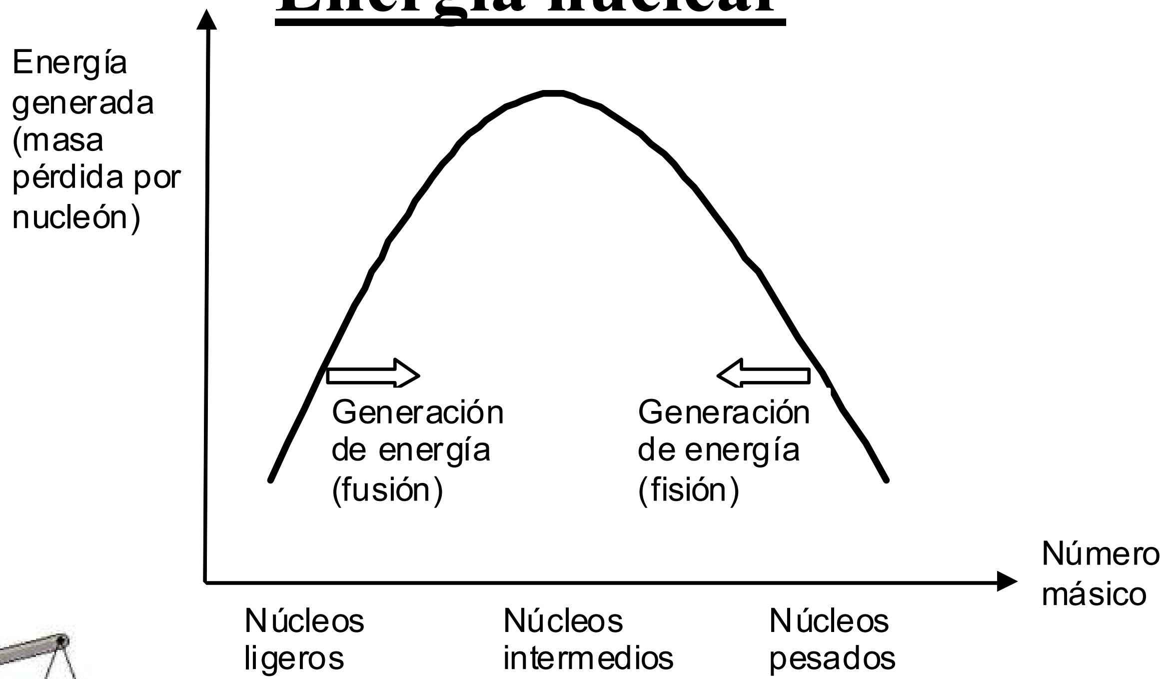
Caudal másico: $\dot{m}$, (kg/s)

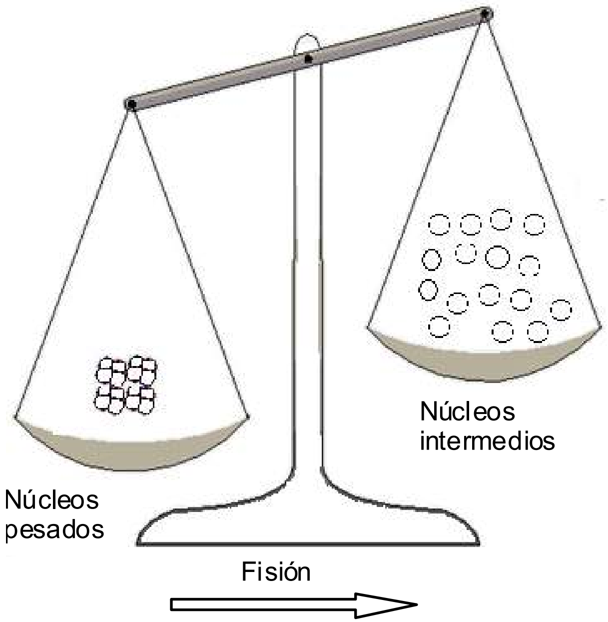
$$\sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sal} = dm_{VC}/dt$$

Energía nuclear

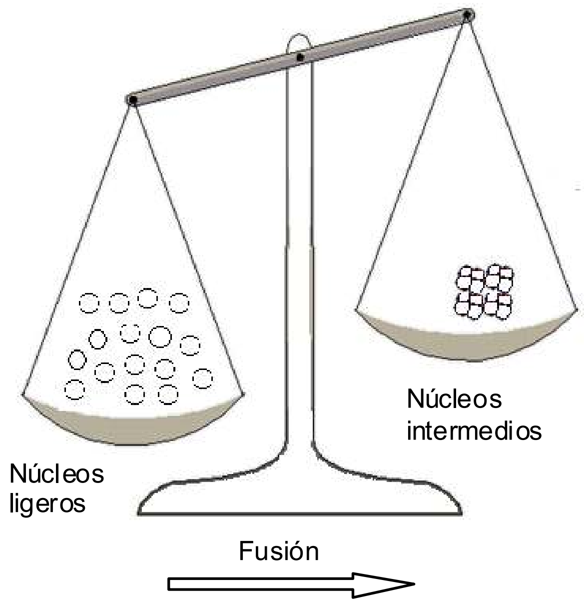
$$\mathbf{E = m\,c^2}$$

(Einstein)



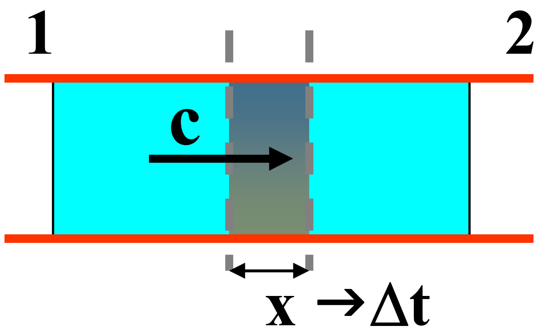


$$^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{90}_{36}\mathrm{Kr} + 2 \text{ neutrones}$$



• Ecuación de continuidad

Flujo unidimensional: Las propiedades en la frontera son uniformes en la sección transversal

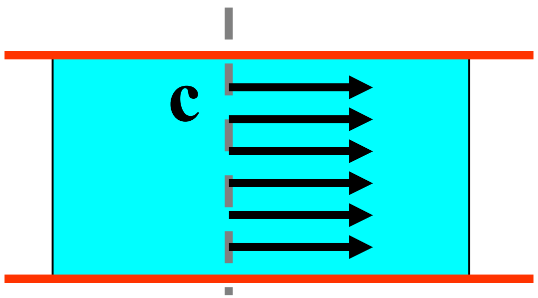


$$c = x/\Delta t$$

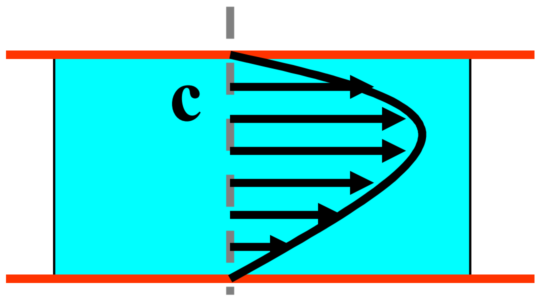
$$m = \rho A\, x = \rho\, A\, c\, \Delta t \;\Rightarrow\; \dot{m} = \rho\, c\, A$$

$$\dot{m} = \frac{c_1 A_1}{v_1} = \frac{c_2 A_2}{v_2}$$

$$\dot{m} = \rho_1 A_1\, c_1 = \rho_2 A_2\, c_2$$



Perfil unidimensional

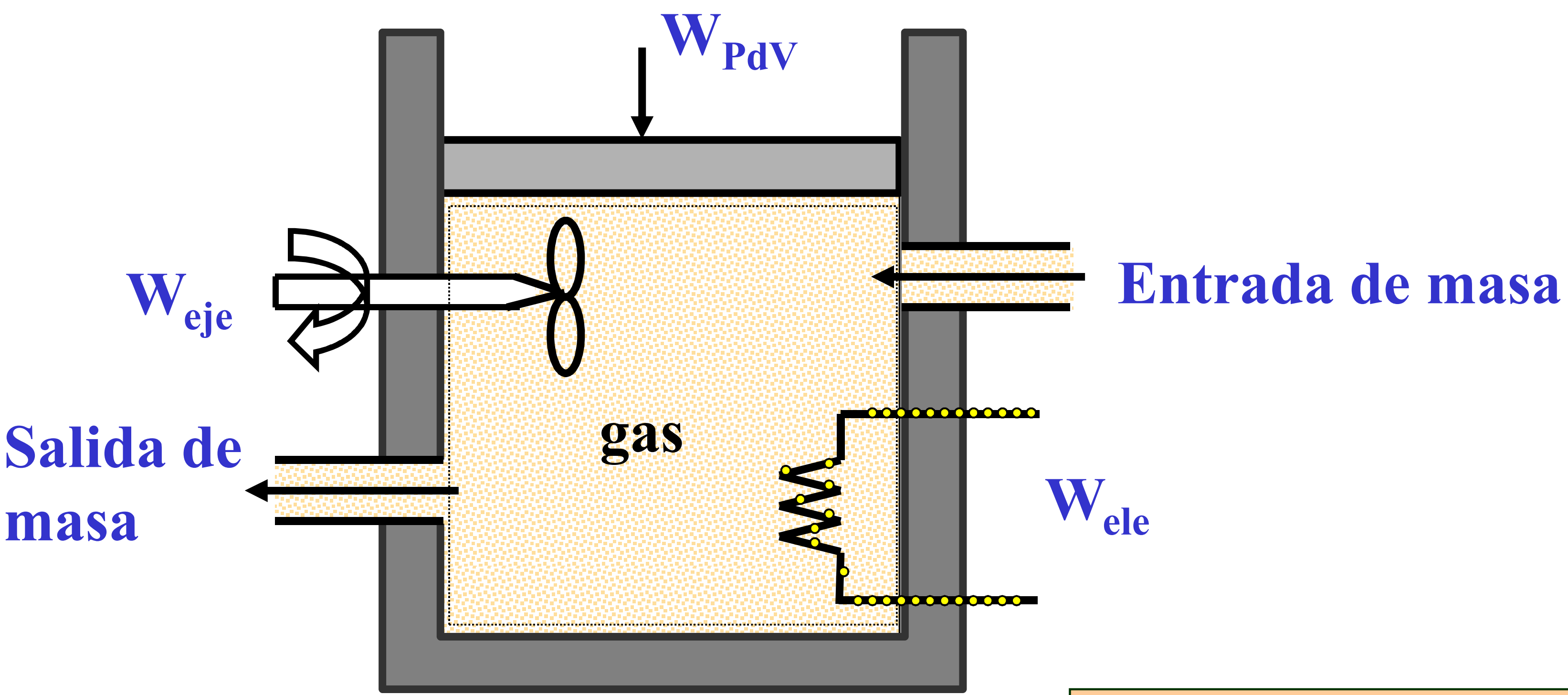


Perfil real

$$\dot{V} = \int_A c_n\, dA$$

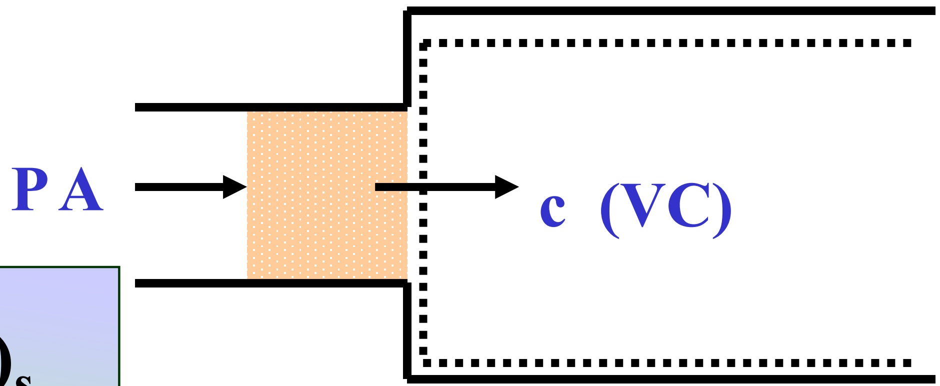
$$\dot{m} = \int_A \rho\, c_n\, dA$$

Interacciones de trabajo en un V.C.



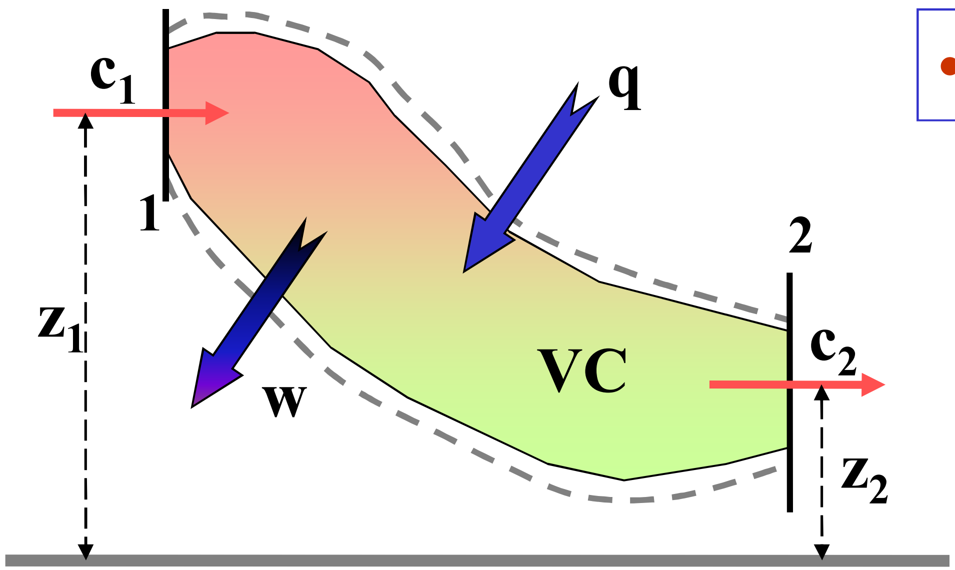
Trabajo de flujo

$$\dot{W} = P\,(A\,c) = P\,\dot{m}\,v$$



$$\dot{W}_{flujo} = \dot{m}_e\,(P\,v)_e - \dot{m}_s\,(P\,v)_s$$

Aplicación del primer principio a sistemas abiertos



•*Conservación de la energía*

$$\Delta E_{VC} = Q - W + \sum E_{ent} - \sum E_{sal}$$

Energía de calor y trabajo	+	Energía que entra VC	−	Energía que sale VC	=	Cambio energía del VC

$$q - w + u_1 + gz_1 + \frac{c_1^2}{2} + P_1 v_1 - u_2 - gz_2 - \frac{c_2^2}{2} - P_2 v_2 = \Delta e_{VC}$$

Entalpía especifica => $h = u + P\,v$

Aplicación del primer principio a sistemas abiertos

•*Conservación de la energía*

$$q - w + h_1 + gz_1 + \frac{c_1^2}{2} - h_2 - gz_2 - \frac{c_2^2}{2} = \Delta e_{VC}$$

V.C. con más de una entrada y una salida

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{\text{Entrada}} \dot{m}\left[\left(h + \frac{c^2}{2} + g\,z\right)\right] - \sum_{\text{Salida}} \dot{m}\left[\left(h + \frac{c^2}{2}\,g\,z\right)\right]$$

Aplicación del primer principio a sistemas abiertos

Caso de régimen estacionario

- Ninguna propiedad dentro del V.C. cambia con el tiempo
- Ninguna propiedad en la frontera del V.C. cambia con el tiempo
- Los flujos de calor y trabajo no cambian con el tiempo

Como el volumen del V.C. es “cte” el trabajo de frontera $W_{PdV} = 0$

Conservación de la masa

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{V}_1 = c_1 A_1 \neq \dot{V}_2 = c_2 A_2$$

Ecuación estacionaria de la energía

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{\text{Entrada}} \dot{m}\,[(h + \frac{c^2}{2} + g\,z)] - \sum_{\text{Salida}} \dot{m}\,[(h + \frac{c^2}{2}\; g\,z)]$$

Sistema estacionario con 1 entrada y 1 salida

$$q = h_2 - h_1 + \frac{c^2_2 - c^2_1}{2} + g\,(z_2 - z_1) + w$$

q $\rightarrow$ **calor específico**
w $\rightarrow$ **trabajo específico**
$c^2/2$ $\rightarrow$ **energía cinética por unidad de masa**
gz $\rightarrow$ **energía potencial por unidad de masa**

$$\underbrace{q\,,\ h\,,\ g\,z\,,\ c^2/2\,,\ w}_{\text{J/kg}}$$

$$Q = m\,[h_2 - h_1 + \frac{c^2_2 - c^2_1}{2} + g(z_2 - z_1)] + W$$

Q $\rightarrow$ **calor**
W $\rightarrow$ **trabajo**
m $\rightarrow$ **masa**

$$\left.\begin{matrix} Q \\ W \end{matrix}\right\} \text{Julios}$$

$$m \Rightarrow \text{kg}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}\left[h_2-h_1+\frac{c_2^2-c_1^2}{2}+g(z_2-z_1)\right]+\dot{W}$$

$\dot{Q} = \dot{m}\, q$

$\dot{W} = \dot{m}\, w$

$\dot{Q} \rightarrow$ flujo de calor

$\dot{W} \rightarrow$ potencia

$\dot{m} \rightarrow$ gasto másico

$\left.\begin{matrix}\dot{Q}\\ \dot{W}\end{matrix}\right]$ Watios

$\dot{m} \Rightarrow$ kg/s

ΔEC y ΔEP suelen ser despreciables:

Δc de 45 m/s supone ΔEC=1 kJ/kg

Δz de 102 m supone ΔEP=1 kJ/kg

- **Ecuación de Bernuillí**

En un líquido $\rho = cte \rightarrow v_1 = v_2 = v$

$$0 = \frac{P_2-P_1}{\rho}+\frac{c_2^2-c_1^2}{2}+g\,(z_2-z_1)$$

(explicación más adelante)

Aplicaciones típicas del primer principio a sistemas abiertos

Turbinas

Compresores
Bombas y ventiladores

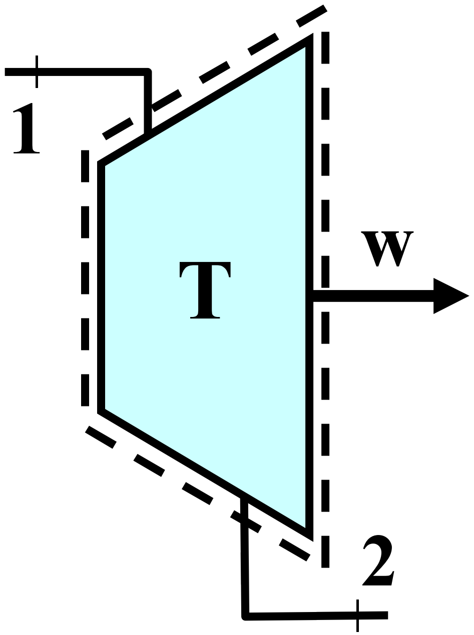
Toberas y difusores

Válvulas y tubos aislados

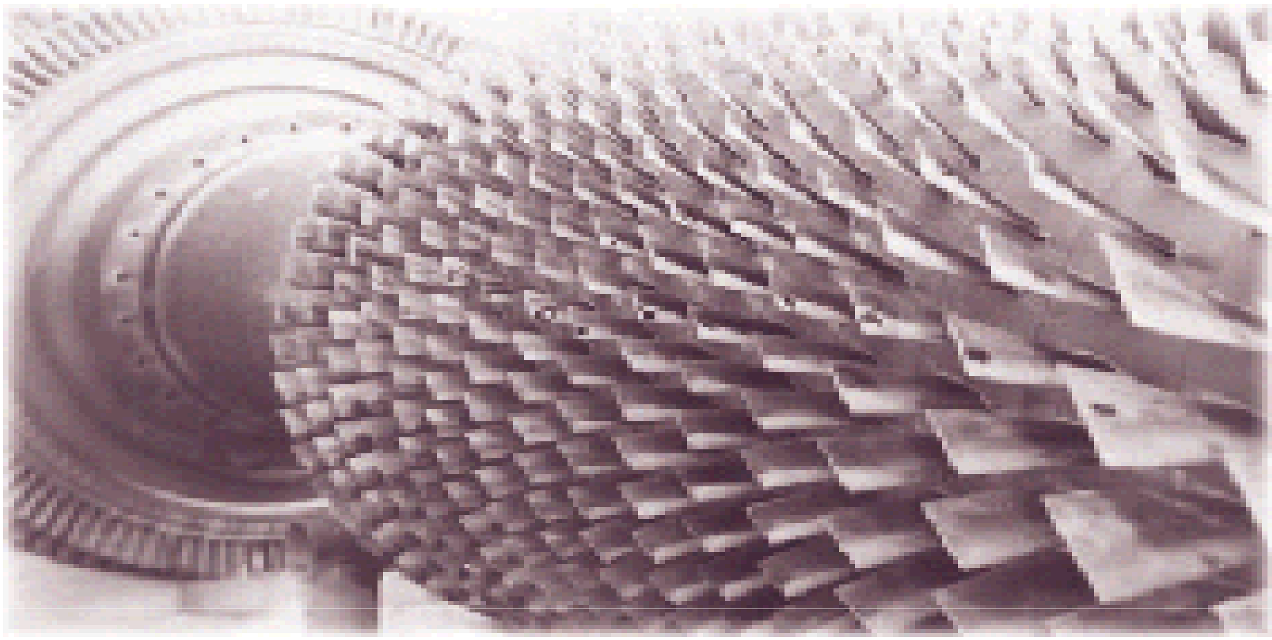
Intercambiadores de calor

Cerrados y abiertos

Representación simbólica



Turbina axial

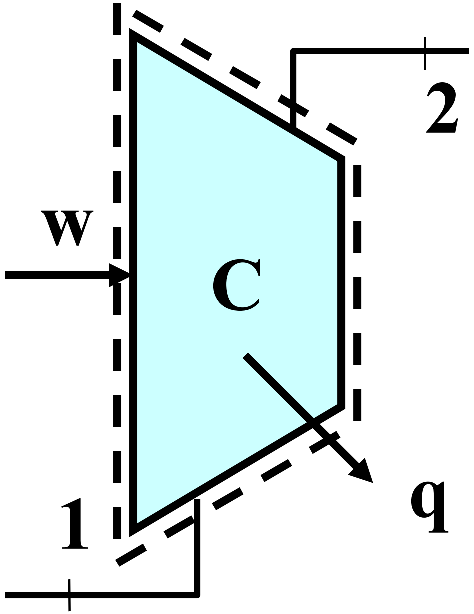


$$\cancel{q} = h_2 - h_1 + \cancel{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + w$$

$$\left.\begin{array}{l} c_1 \approx c_2 \\ q = 0 \Rightarrow \text{Proceso adiabático} \\ z_2 - z_1 \Rightarrow \text{Se desprecia} \end{array}\right\} \boxed{w = h_1 - h_2}$$

Representación simbólica

Compresores y bombas



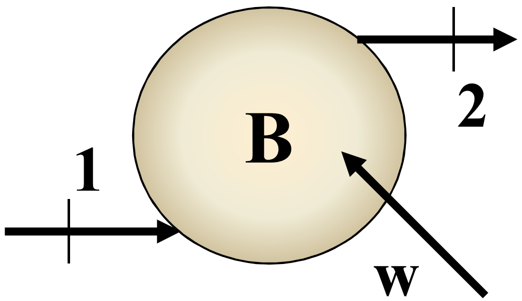
$$q = h_2 - h_1 + \cancel{\frac{c^2{}_2 - c^2{}_1}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + w$$

$c_1 \approx c_2$

$z_2 - z_1$ => Despreciable

$$\boxed{q = h_2 - h_1 + w}$$

$\rho_1 = \rho_2 = cte$



$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \cancel{\frac{c^2{}_2 - c^2{}_1}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + w$$

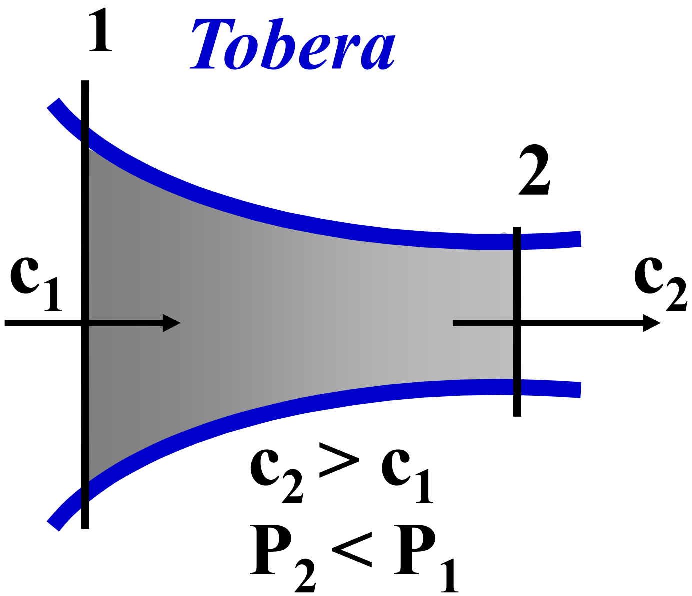
Proceso isoentrópico

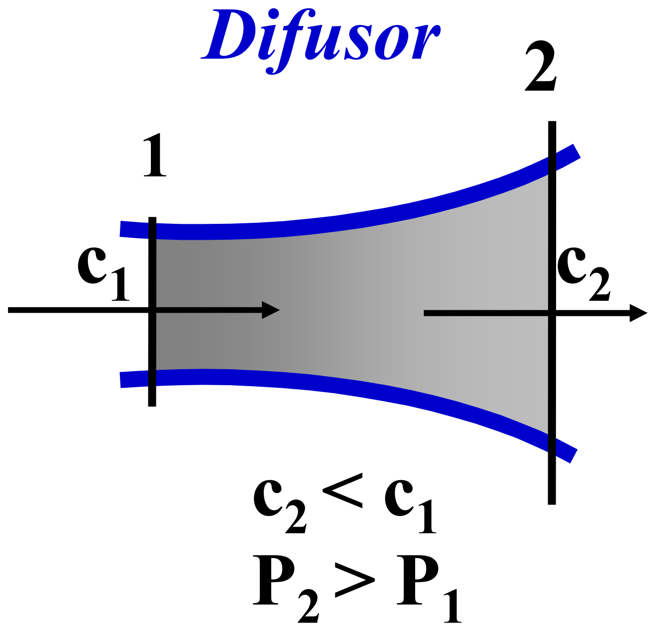
$c_1 \approx c_2$

$z_2 - z_1$ => Despreciable

$$\boxed{|w| = \frac{P_2 - P_1}{\rho}}$$

Procesos de derrame: W =0

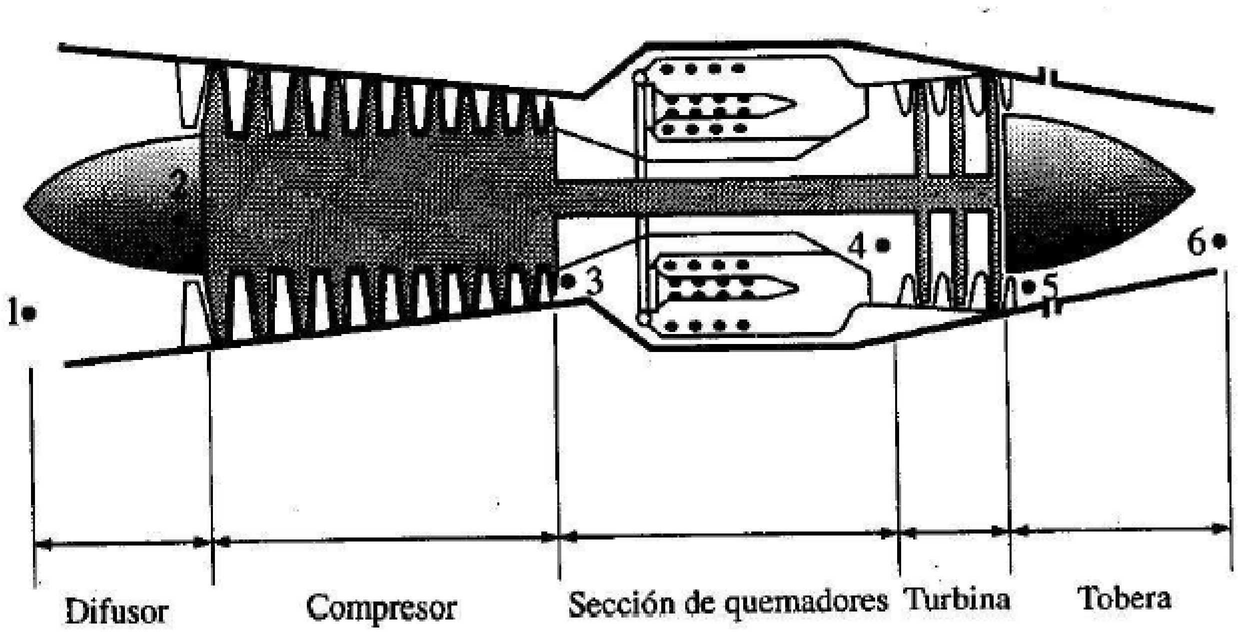




$$\cancel{q} = h_2 - h_1 + \frac{c^2{}_2 - c^2{}_1}{2} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + \cancel{w}$$

$$\left.\begin{array}{l} q = 0 \Rightarrow \text{Proceso adiabático} \\ z_2 - z_1 \Rightarrow \text{Se desprecia} \\ w = 0 \end{array}\right\} \quad h_1 + \frac{c^2{}_1}{2} = h_2 + \frac{c^2{}_2}{2}$$

turbinas de gas para aviación

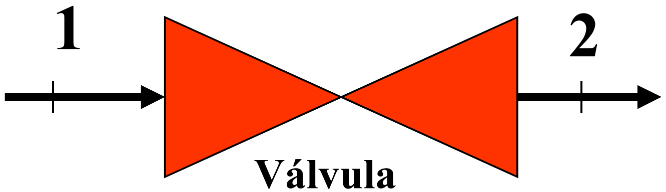


turborreactor o propulsión a chorro

difusor: frena el aire incidente y eleva su presión
tobera: acelera el aire que sale y baja su presión


402

Válvula y tuberías



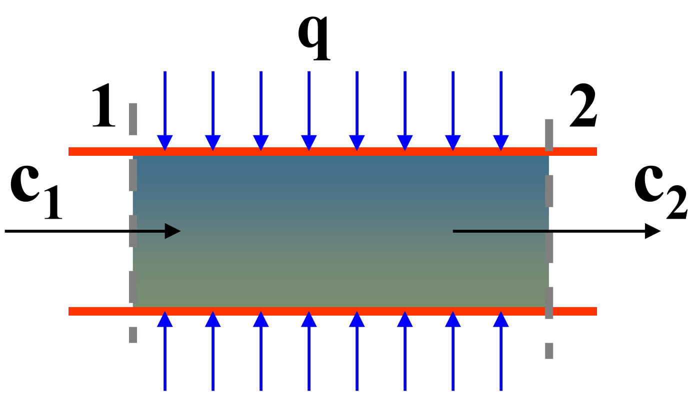
Válvula laminación

$$\cancel{q} = h_2 - h_1 + \cancel{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + \cancel{w}$$

$c_1 \approx c_2$
$q = 0 \Rightarrow$ Adiabático
$z_2 = z_1$
$w = 0$

Proceso isoentálpico
$h_2 = h_1$

Tubos

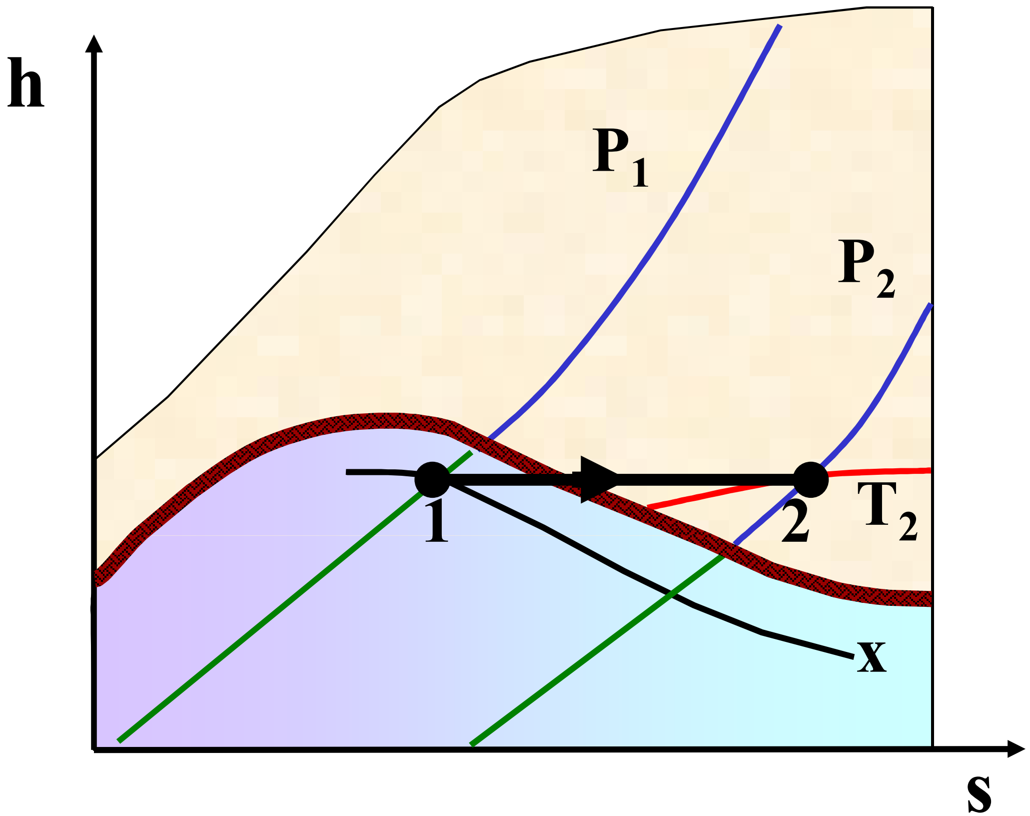


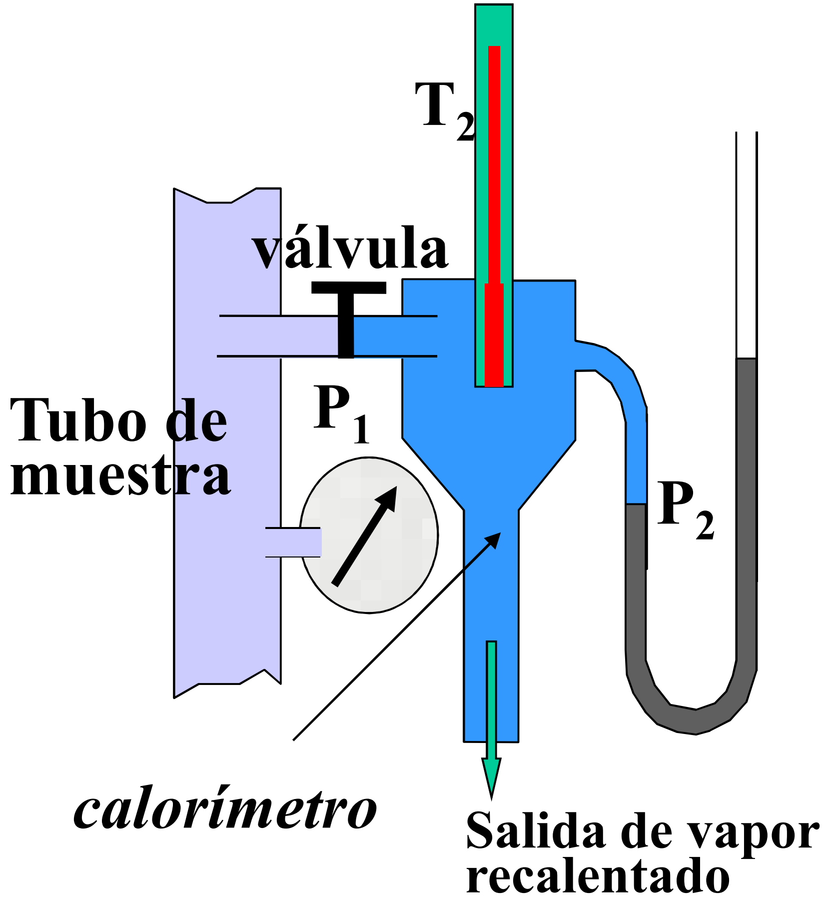
$$q = h_2 - h_1 + \cancel{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + \cancel{w}$$

$c_1 = c_2$
$z_2 = z_1$
$w = 0$

$q = h_2 - h_1$

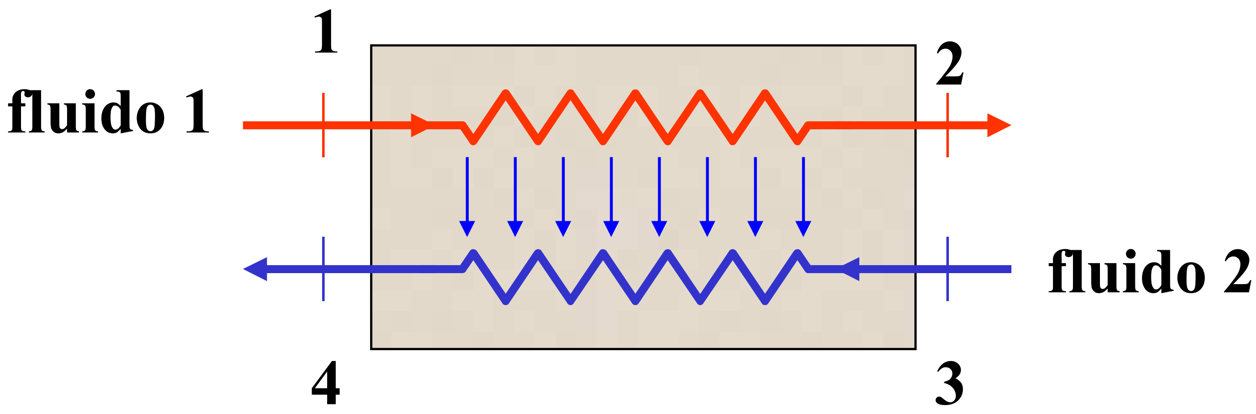
Medición del título de un vapor húmedo





Estado 2	$\left.\begin{matrix} P_2 \\ T_2 \end{matrix}\right\}$ h_2	→	**Proceso de laminación** $h_2 = h_1$
Estado 1	$\left.\begin{matrix} P_1 \\ h_1 \end{matrix}\right\}$	→ Mirando en las tablas	$x = \dfrac{h_1 - h_{1f}}{h_{1g} - h_{1f}}$

Intercambiador cerrado



$P_1 = P_2$
$P_3 = P_4$

$T_1 > T_2$
$T_4 > T_3$

$$q_{12} = h_2 - h_1 + \cancel{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + \cancel{w_{12}}$$

$c_1 = c_2$
$z_2 = z_1$
$w_{12} = 0$

$$q_{34} = h_4 - h_3 + \cancel{\frac{c_4^2 - c_3^2}{2}} + \cancel{g(z_4 - z_3)} + \cancel{w_{34}}$$

$c_3 = c_4$
$z_3 = z_4$
$w_{34} = 0$

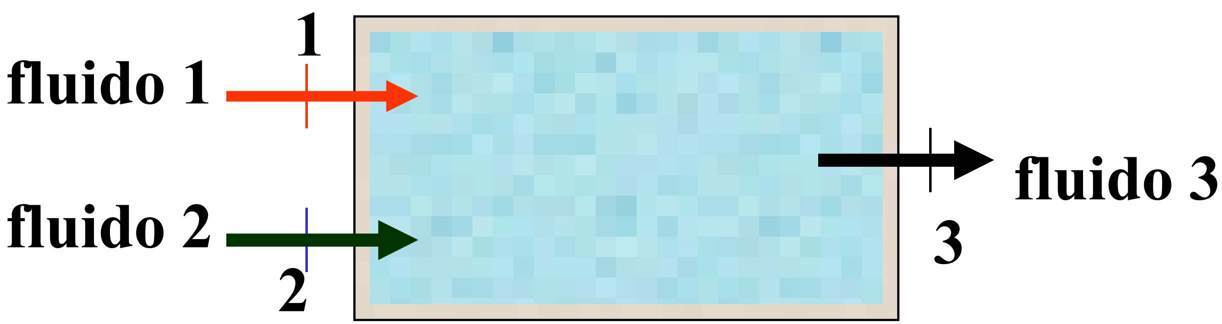
|Calor cedido| = Calor absorbido

$$|q_{12}| = q_{34}$$

$$\boxed{|h_2 - h_1| = h_4 - h_3}$$

$$\dot{m}_{fluido1} = \dot{m}_{fluido2}$$

Intercambiador abierto (procesos de mezcla)



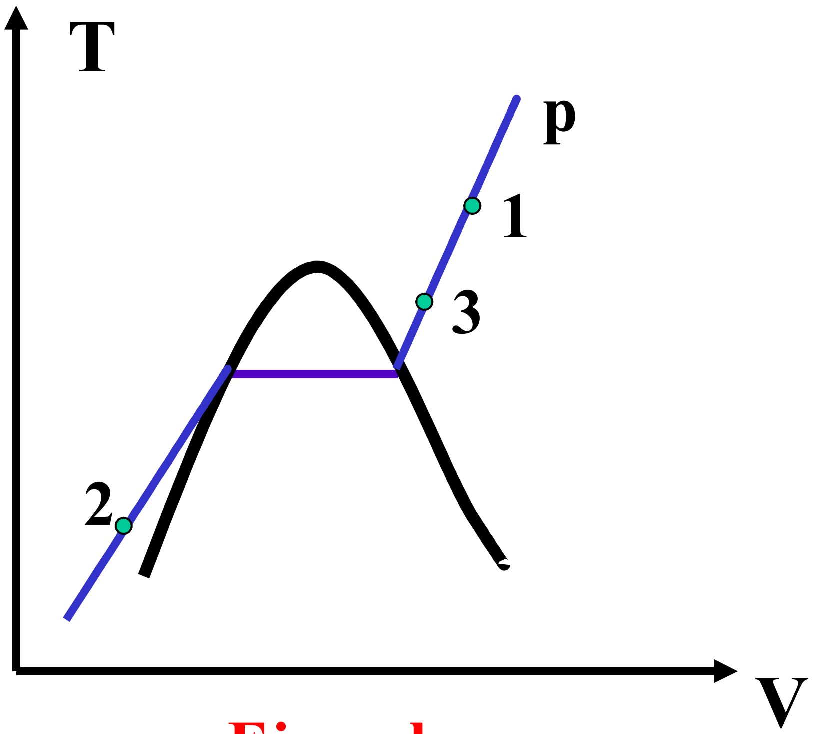
$P_1 = P_2 = P_3$

$\dot{Q} = 0$

Son despreciables las variaciones de EC y EP

$$0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3$$

$$\dot{m} \Rightarrow kg/s$$

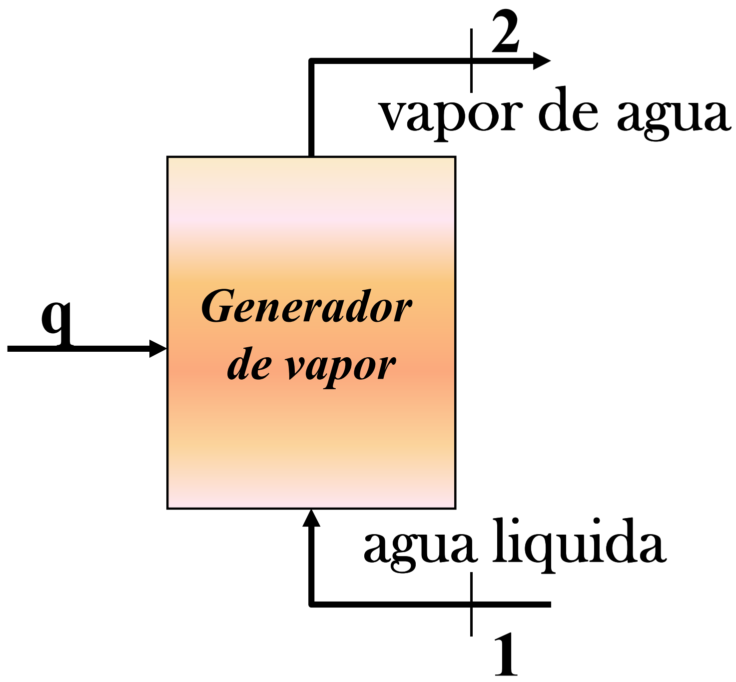


Ejemplo

Aplicación principal:

Calentadores de agua de alimentación

Generador de vapor

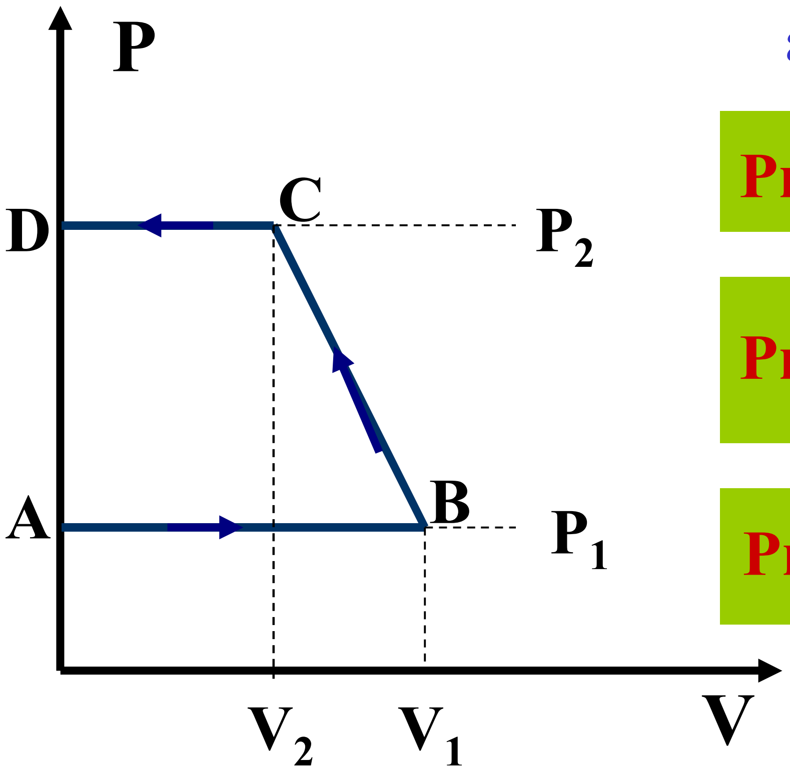


$$q = h_2 - h_1 + \cancel{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + \cancel{w}$$

$c_1 = c_2$
$z_2 - z_1$ => Se desprecia
$w = 0$

$$\boxed{q = h_2 - h_1}$$

Análisis energético de un compresor IDEAL: Comparación



a) Sistema cerrado:

Proceso A-B: $W_{AB} = P_1 (V_B - V_A) = P_1 V_1$

Proceso B-C: $W_{BC} = \dfrac{1}{1-n} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$

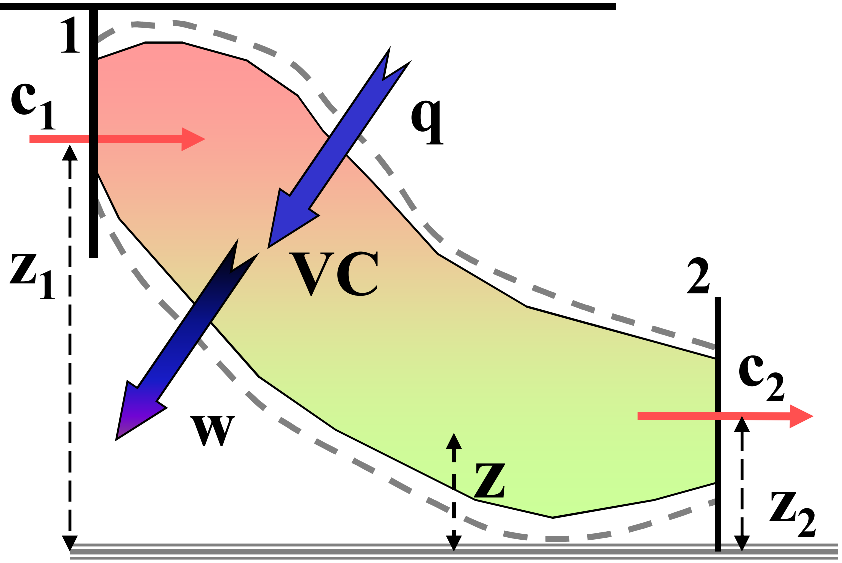
Proceso C-D: $W_{CD} = P_2 (V_D - V_C) = - P_2 V_2$

$$W_{TOTAL} = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} = \frac{n}{1-n} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

b) Sistema abierto: **Se obtendrá la misma expresión**

Aplicación del primer principio a sistemas abiertos

Caso de régimen no estacionario



P=P(t) T=T(t) c=c(t)	En cada punto del VC tendremos en cuenta la variación de masa y de energía

•Balance de materia :

Masa que entra V.C.   *Masa que sale V.C.* = *Variación de masa en V.C.*

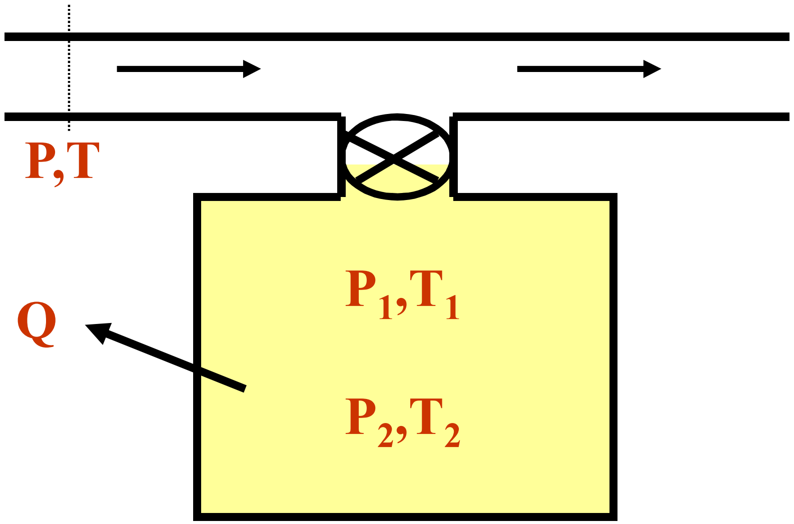
$$\frac{dm}{dt} = \sum_{\text{Entrada}} \dot{m} - \sum_{\text{Salida}} \dot{m}$$

•Balance de energía:

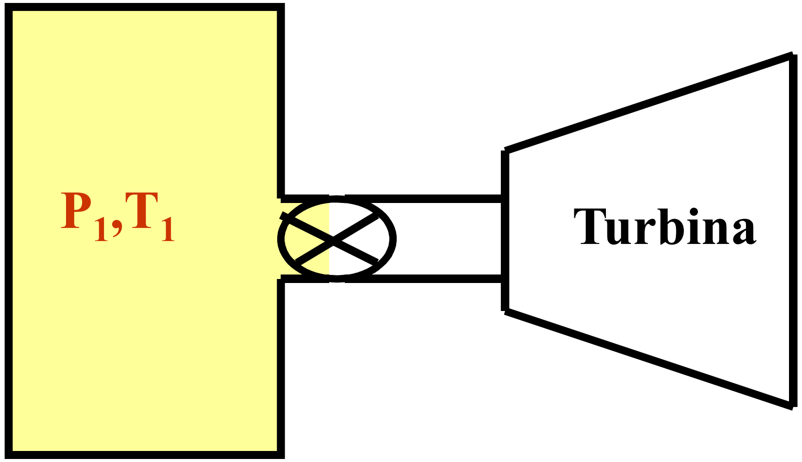
Energía que entra V.C. - *Energía que sale V.C.* = *Variación de energía en V.C.*

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{\text{Entrada}} \dot{m}\left[\left(h + \frac{c^2}{2} + g\,z\right)\right] - \sum_{\text{Salida}} \dot{m}\left[\left(h + \frac{c^2}{2} + g\,z\right)\right]$$

Ejemplos de procesos no estacionarios



Carga de un depósito



Descarga de un depósito

Arranque de turbinas, compresores y calderas