

Principios de la Termodinámica

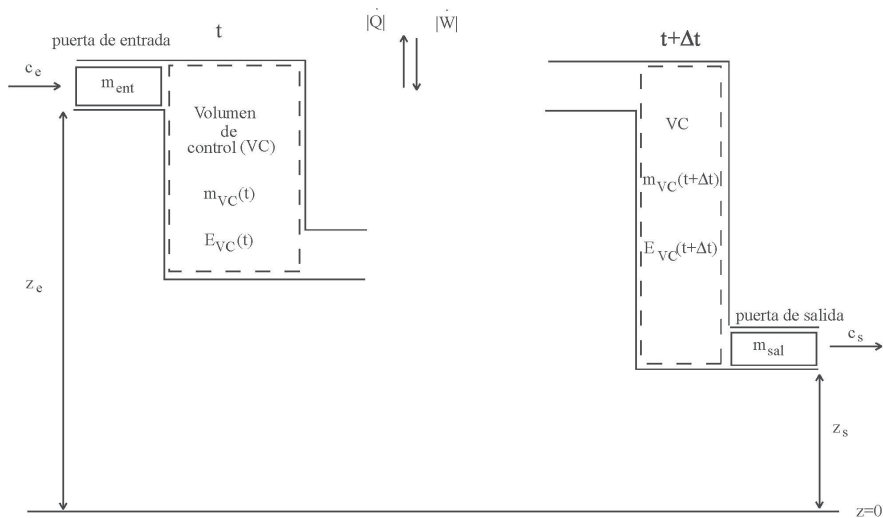
Termodinámica de Volúmenes de Control

José Miguel Mateos Roco

Principios de la Termodinámica para Volúmenes de Control

- Primer Principio de la Termodinámica para VC
- Segundo Principio de la Termodinámica para VC
- Key Equations:
- Aplicación a dispositivos de interés en la ingeniería
 - Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo sin transferencia de trabajo
 - Disp. de reducción de presión con $\dot{Q} = \dot{W} = 0$
- Análisis exergetico para VC en reg. estacionario

Primer Principio de la Termodinámica para VC



Primer Principio de la Termodinámica para VC

- Conservación de la masa entre t y $t + \Delta t$:

$$m \equiv m_{\text{VC}}(t) + m_{\text{ent}} = m_{\text{VC}}(t + \Delta t) + m_{\text{sal}} \quad (1)$$

- Primer Principio entre t y $t + \Delta t$ para la masa m :

$$E(t + \Delta t) - E(t) = Q + W + (PV)_{\text{ent}} - (PV)_{\text{sal}} \quad (2)$$

$$E(t) = E_{\text{VC}}(t) + E_{\text{ent}}, \quad E(t + \Delta t) = E_{\text{VC}}(t + \Delta t) + E_{\text{sal}} \quad (3)$$

Se definen:

$$\bar{e} \equiv E/m, \quad \bar{v} \equiv V/m \quad (4)$$

Primer Principio de la Termodinámica para VC

A partir de (1)

$$m_{VC}(t + \Delta t) - m_{VC}(t) = m_{ent} - m_{sal} \quad (5)$$

Sustituyendo (3) y (4) en (2)

$$E_{VC}(t + \Delta t) - E_{VC}(t) + (\bar{e}m)_{sal} - (\bar{e}m)_{ent} = Q + W \\ + (P\bar{v}m)_{ent} - (P\bar{v}m)_{sal} \quad (6)$$

$$(5) \times 1/\Delta t, \quad (6) \times 1/\Delta t, \quad \Delta t \rightarrow 0$$

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{ent} \dot{m}_{ent} - \sum_{sal} \dot{m}_{sal}, \quad \dot{m} \equiv \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{ent} \dot{m}_{ent}(\bar{e} + P\bar{v})_{ent} - \sum_{sal} \dot{m}_{sal}(\bar{e} + P\bar{v})_{sal} \quad (8)$$

Primer Principio de la Termodinámica para VC

$$\bar{e} = \bar{u} + \frac{1}{2}c^2 + gz; \quad \bar{h} = \bar{u} + P\bar{v} \quad (9)$$

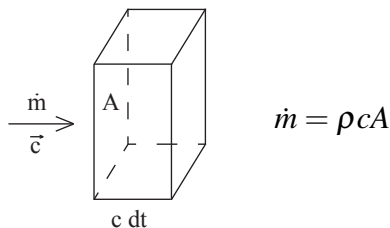
Régimen estacionario: $\frac{dm_{VC}}{dt} = 0, \quad \frac{dE_{VC}}{dt} = 0$

⇓

$$\sum_{ent} \dot{m}_{ent} = \sum_{sal} \dot{m}_{sal} \quad (10)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_{sal} \dot{m}_{sal} \left(\bar{h}_{sal} + \frac{1}{2}c_{sal}^2 + gz_{sal} \right) - \sum_{ent} \dot{m}_{ent} \left(\bar{h}_{ent} + \frac{1}{2}c_{ent}^2 + gz_{ent} \right) \quad (11)$$

Primer Principio de la Termodinámica para VC



Volumen de control con una entrada (1) y una salida (2)

$$\rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 \quad (12)$$

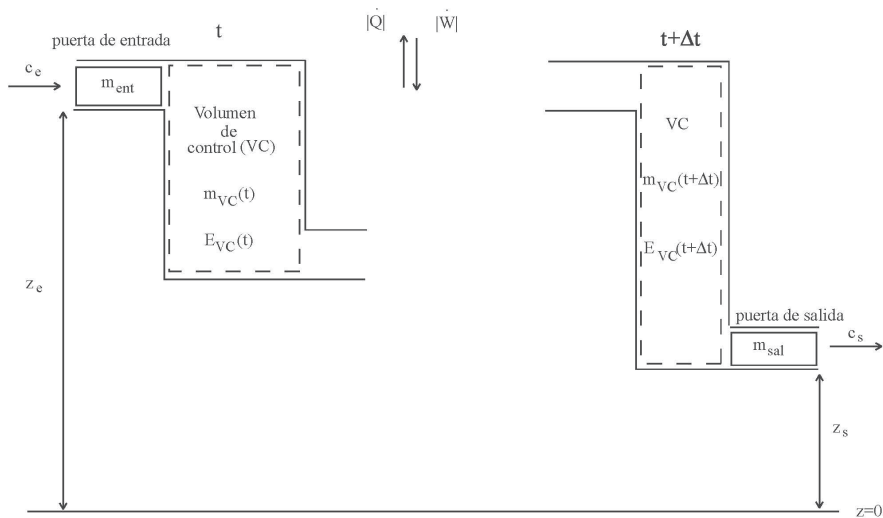
$$\bar{q} + \bar{\omega} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (13)$$

$$\bar{q} \equiv \frac{Q}{m} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}; \quad \bar{\omega} \equiv \frac{W}{m} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

Principios de la Termodinámica para Volúmenes de Control

- Primer Principio de la Termodinámica para VC
- Segundo Principio de la Termodinámica para VC
- Key Equations:
- Aplicación a dispositivos de interés en la ingeniería
 - Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo sin transferencia de trabajo
 - Disp. de reducción de presión con $\dot{Q} = \dot{W} = 0$
- Análisis exergetico para VC en reg. estacionario

Segundo Principio de la Termodinámica para VC



Segundo Principio de la Termodinámica para VC

- Conservación de la masa entre t y $t + \Delta t$:

$$m \equiv m_{\text{VC}}(t) + m_{\text{ent}} = m_{\text{VC}}(t + \Delta t) + m_{\text{sal}} \quad (14)$$

- Segundo Principio entre t y $t + \Delta t$ para la masa m :

$$S(t + \Delta t) - S(t) = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{T_j} + \sigma \quad (15)$$

σ : creación de entropía

$$S(t) = S_{\text{VC}}(t) + S_{\text{ent}}, \quad S(t + \Delta t) = S_{\text{VC}}(t + \Delta t) + S_{\text{sal}} \quad (16)$$

Se define:

$$\bar{s} \equiv S/m \quad (17)$$

Segundo Principio de la Termodinámica para VC

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_{ent} \dot{m}_{ent} \bar{s}_{ent} - \sum_{sal} \dot{m}_{sal} \bar{s}_{sal} + \dot{\sigma}_{VC} \quad (18)$$

Régimen estacionario: $\frac{dS_{VC}}{dt} = 0$

⇓

$$\sum_{j=1}^n \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma}_{VC} = \sum_{sal} \dot{m}_{sal} \bar{s}_{sal} - \sum_{ent} \dot{m}_{ent} \bar{s}_{ent} \quad (19)$$

Volumen de control con una entrada (1) y una salida (2)

$$\sum_{j=1}^n \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma}_{VC} = \dot{m} (\bar{s}_2 - \bar{s}_1) \quad (20)$$

Principios de la Termodinámica para Volúmenes de Control

- Primer Principio de la Termodinámica para VC
- Segundo Principio de la Termodinámica para VC
- Key Equations:
- Aplicación a dispositivos de interés en la ingeniería
 - Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo sin transferencia de trabajo
 - Disp. de reducción de presión con $\dot{Q} = \dot{W} = 0$
- Análisis exergetico para VC en reg. estacionario

Key Equations:

Volumen de control en régimen estacionario con una puerta de entrada (1) y una puerta de salida (2).

- Conservación de la masa:

$$\rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 \quad (21)$$

Key Equations:

Volumen de control en régimen estacionario con una puerta de entrada (1) y una puerta de salida (2).

- Conservación de la masa:

$$\rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 \quad (21)$$

- Primer Principio:

$$\bar{q} + \bar{\omega} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (22)$$

Key Equations:

Volumen de control en régimen estacionario con una puerta de entrada (1) y una puerta de salida (2).

- Conservación de la masa:

$$\rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 \quad (21)$$

- Primer Principio:

$$\bar{q} + \bar{\omega} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (22)$$

- Segundo Principio:

$$\sum_{j=1}^n \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma}_{\text{VC}} = \dot{m}(\bar{s}_2 - \bar{s}_1) \quad (23)$$

Principios de la Termodinámica para Volúmenes de Control

- Primer Principio de la Termodinámica para VC
- Segundo Principio de la Termodinámica para VC
- Key Equations:
- Aplicación a dispositivos de interés en la ingeniería
 - Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo sin transferencia de trabajo
 - Disp. de reducción de presión con $\dot{Q} = \dot{W} = 0$
- Análisis exergetico para VC en reg. estacionario

Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo

$$\bar{q} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad z_1 = z_2; \quad \rho \simeq cte.$$

$$d\bar{h} = Td\bar{s} + \bar{v}dP, \quad \bar{h}_{2S} - \bar{h}_1 = \frac{1}{2}(c_1^2 - c_{2S}^2)$$

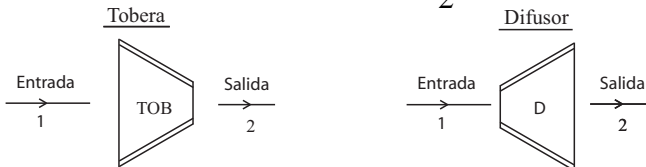


Figura: Toberas y difusores ideales $\bar{s}_1 = \bar{s}_{2S}$

Cons. masa:

$$A_1 > A_2 \Rightarrow c_1 < c_{2S}$$

$$A_2 > A_1 \Rightarrow c_{2S} < c_1$$

Primer Principio:

$$c_1 < c_{2S} \Rightarrow \bar{h}_1 > \bar{h}_{2S}$$

$$c_1 > c_{2S} \Rightarrow \bar{h}_1 < \bar{h}_{2S}$$

Segundo Principio: $\bar{s}_1 = \bar{s}_{2S}$

$$\bar{h}_1 > \bar{h}_{2S} \Rightarrow P_1 > P_2$$

$$\bar{h}_1 < \bar{h}_{2S} \Rightarrow P_1 < P_2$$

Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo

$$\bar{q} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad z_1 = z_2; \quad \rho \simeq cte.$$

$$d\bar{h} = Td\bar{s} + \bar{v}dP, \quad \bar{h}_2 - \bar{h}_1 = \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)$$

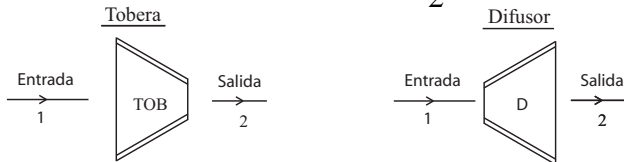


Figura: Toberas y difusores reales $P_{2S} = P_2$, $\bar{s}_1 = \bar{s}_{2S} < \bar{s}_2$

$$\bar{h}_2 > \bar{h}_{2S} \Rightarrow c_2 < c_{2S}$$

$$\eta_{tob} \equiv \frac{c_2^2 - c_1^2}{c_{2S}^2 - c_1^2} = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{\bar{h}_1 - \bar{h}_{2S}} \leq 1$$

$$\eta_d \equiv \frac{c_1^2 - c_{2S}^2}{c_1^2 - c_2^2} = \frac{\bar{h}_{2S} - \bar{h}_1}{\bar{h}_2 - \bar{h}_1} \leq 1$$

Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo

$$\bar{q} = 0, \quad c_1 = c_2; \quad z_1 = z_2$$

$$d\bar{h} = Td\bar{s} + \bar{v}dP, \quad \bar{\omega} = \bar{h}_{2S} - \bar{h}_1$$

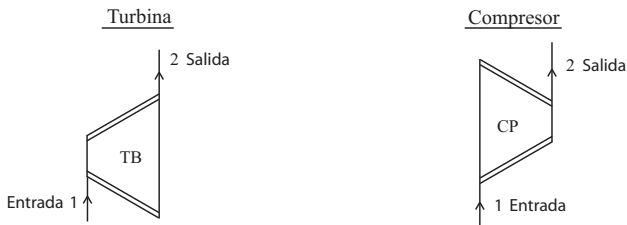


Figura: Turbinas y compresores ideales $\bar{s}_1 = \bar{s}_{2S}$

Primer Principio:

$$\bar{\omega}_{TB} < 0 \Rightarrow \bar{h}_1 > \bar{h}_{2S}$$

$$\bar{\omega}_{CP} > 0 \Rightarrow \bar{h}_1 < \bar{h}_{2S}$$

Segundo Principio: $\bar{s}_1 = \bar{s}_{2S}$

$$\bar{h}_1 > \bar{h}_{2S} \Rightarrow P_1 > P_2$$

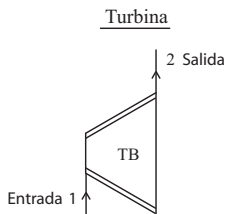
$$\bar{h}_1 < \bar{h}_{2S} \Rightarrow P_1 < P_2$$

Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo

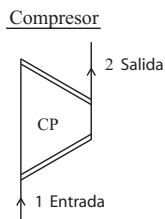
$$\bar{q} = 0, \quad c_1 = c_2; \quad z_1 = z_2$$

$$d\bar{h} = Td\bar{s} + \bar{v}dP, \quad \bar{\omega} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1$$

Figura: Turbinas y compresores reales $P_{2S} = P_2$, $\bar{s}_1 = \bar{s}_{2S} < \bar{s}_2$



$$\bar{s}_2 > \bar{s}_{2S} \Rightarrow \bar{h}_2 > \bar{h}_{2S};$$



$$\eta_{tb} \equiv \frac{|\dot{W}|}{|\dot{W}|_S} = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{\bar{h}_1 - \bar{h}_{2S}} \leq 1$$

$$\eta_{cp} \equiv \frac{|\dot{W}|_S}{|\dot{W}|} = \frac{\bar{h}_{2S} - \bar{h}_1}{\bar{h}_2 - \bar{h}_1} \leq 1$$

Dispositivos de flujo sin transferencia de trabajo

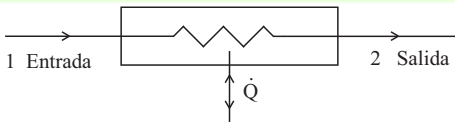


Figura: Intercambiador de calor

$$\bar{\omega} = 0, \quad c_1 = c_2; \quad z_1 = z_2$$

Primer Principio: $\bar{q} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1; \quad \delta q = d\bar{h}$

Segundo Principio:

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \int_1^2 \frac{\delta \bar{q}}{T} + \bar{\sigma}, \quad \bar{\sigma} \equiv \frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}}, \quad \bar{\sigma} \geq 0; \quad Td\bar{s} \geq \delta \bar{q} = d\bar{h}$$

$$d\bar{h} = Td\bar{s} + \bar{v}dP \Rightarrow dP \leq 0$$

Intercamb. ideal: $Td\bar{s} = \delta \bar{q} = d\bar{h} \Rightarrow dP = 0 \Rightarrow P = cte.$

Intercamb. real: $Td\bar{s} > \delta \bar{q} = d\bar{h} \Rightarrow dP < 0 \Rightarrow$ Caída de Presión.

Disp. de reducción de presión con $\dot{Q} = \dot{W} = 0$

$$\bar{\omega} = 0, \quad \bar{q} = 0, \quad c_1 = c_2; \quad z_1 = z_2$$



Figura: Válvula de estrangulamiento

Primer Principio: $\bar{h}_2 = \bar{h}_1; \quad d\bar{h} = 0$

Segundo Principio: $\bar{s}_2 \geq \bar{s}_1; \quad Td\bar{s} \geq 0$

$$0 = d\bar{h} = Td\bar{s} + \bar{v}dP \Rightarrow dP \leq 0$$

Para que haya reducción de presión

$$\bar{s}_2 > \bar{s}_1 \Rightarrow P_2 < P_1 \Rightarrow \text{Proceso irreversible.}$$

Principios de la Termodinámica para Volúmenes de Control

- Primer Principio de la Termodinámica para VC
- Segundo Principio de la Termodinámica para VC
- Key Equations:
- Aplicación a dispositivos de interés en la ingeniería
 - Dispositivos de flujo adiabático sin transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo adiabático con transferencia de trabajo
 - Dispositivos de flujo sin transferencia de trabajo
 - Disp. de reducción de presión con $\dot{Q} = \dot{W} = 0$
- Análisis exergético para VC en reg. estacionario

Análisis exergético para VC en reg. estacionario

Volumen de control con una puerta de entrada (1) y una puerta de salida (2).

$$\dot{E}x_W + \dot{E}x_Q - \dot{E}x_p = \dot{E}x_{c2} - \dot{E}x_{c1}$$

$$\dot{E}x_c = \dot{m} \left(\bar{h} - \bar{h}_0 + \frac{c^2}{2} + gz - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0) \right)$$

$$\dot{E}x_{c2} - \dot{E}x_{c1} = \dot{m} \left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1 - T_0(\bar{s}_2 - \bar{s}_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W}; \quad \dot{E}x_Q = \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j$$