

Tema-14: SISTEMAS ABIERTOS, RÉG. ESTACIONARIO

14.1 EC. PARA UN SISTEMA ABIERTO, EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

14.2 BALANCE DE ÍMPETU COMO ENERGÍA

14.3 PROCESOS DE DERRAME SIN TRABAJO TÉCNICO

$$W_t = 0$$

14.3.1 Procesos de derrame “adiabático”

$$q \cong 0$$

14.3.1.1 Válvulas de laminación

14.3.1.2 Toberas y Difusores subsónicos

14.3.1.3 Diagrama general de procesos de Derrame Adiabático

14.3.2 Procesos de derrame “no adiabático”

$$q \neq 0$$

14.3.2.1 Calderas (1 corriente)

14.3.2.2 Cambiadores de calor (2 corrientes)

14.4 PROCESOS CON TRABAJO TÉCNICO

$$W_t \neq 0$$

14.4.1 Procesos con trabajo técnico y “adiabáticos”

$$q \cong 0$$

14.4.1.1 Diagrama general de procesos con Trabajo Técnico y Adiabáticos

14.4.1.2 Rendimiento Isoentrópico en procesos con Trabajo Técnico

14.4.2 Proceso con trabajo técnico y “no adiabático”

$$q \neq 0$$

14.1 EC. PARA UN SISTEMA ABIERTO, EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

- **Reg. Estacionario:** se dice que un sistema abierto describe un proceso en régimen estacionario cuando las propiedades termodinámicas intensivas “no varían” con el tiempo, en cualquier pto. del volumen de control V_c , incluidas las fronteras permeables.
- **Condición:**
 - a/ prop. termod. intensivas:
 - son ctes $\rightarrow (P; T; \rho; \dots)_{V_c} = ctes \neq f(t)$
 - pueden no ser uniformes $\rightarrow P = P(\vec{x}), T = T(\vec{x}), \rho = \rho(\vec{x}), \dots$
 - b/ prop. termod. extensivas:
 - son ctes $\rightarrow (m; U'; S; B'; V; \dots)_{V_c} = ctes \neq f(t)$
- **Ecuaciones:** las Ec. para un Sistema Abierto en Régimen Estacionario, se obtienen particularizando las Ec. Generales de un sistema abierto, con la condición de régimen estacionario.
- **Consideraciones:** como se explicó en el Tema-13, consideraremos:

① (13.7): $\delta Q_{SC} = \delta Q_{FI} + \delta Q_{FP} \cong \delta Q_{FI} = \delta Q \quad \rightarrow \delta Q_{FP} \cong \text{despreciable}$

② (13.8): $\delta W_{SC} = \delta W_v + \delta W_t + \delta W_{FP}$

$\delta W_v = 0$	\rightarrow trabajo por var. de vol. en fronteras, reg. estacionario $\Rightarrow V = cte$
δW_t	\rightarrow trabajo técnico (eje con álabes)
δW_{FP}	\rightarrow se incluye en la entalpía total h' de las corrientes de entrada y salida, ver: (13.14) y (13.16)

③ (13.19): $\delta \sigma_{SC} = \delta \sigma_{VC} + \delta \sigma_{FP} \cong \delta \sigma_{VC} = \delta \sigma \quad \rightarrow \delta \sigma_{FP} \cong \text{despreciable}$
 (gen. entrópica sistema cerrado \cong gen. entrópica masa presente en V_c)

④ (13.19): $(\delta J_s)_{SC} = (\delta J_s)_{VC} + (\delta J_s)_{FP} \cong (\delta J_s)_{VC} = \delta J_s \quad \rightarrow (\delta J_s)_{FP} \cong \text{despreciable}$
 (transf. calor sistema cerrado \cong transf. calor en volumen de control V_c)

■ **Régimen Estacionario** \Rightarrow $dm = 0$; $dV = 0$; $dU' = 0$; $dS = 0$; $dB' = 0$

Balance de Masa:

$$(13.2a): \quad 0 = \sum_{ent} dm_e - \sum_{sal} dm_s = \sum_j dm_j \quad [kg] \quad (14.1a)$$

$$(13.2b): \quad 0 = \sum_{ent} \dot{m}_e - \sum_{sal} \dot{m}_s = \sum_j \dot{m}_j \quad \left[\frac{kg}{s}\right] \quad (14.1b)$$

Balance de Energía: $dV = 0 \Rightarrow \delta W_v = 0$

$$(13.17a): \quad 0 = \delta Q - \delta W_t + \sum_{ent} h'_e \cdot dm_e - \sum_{sal} h'_s \cdot dm_s \quad [J] \quad (14.2a)$$

$$(13.17b): \quad 0 = \dot{Q} - \dot{W}_t + \sum_{ent} h'_e \cdot \dot{m}_e - \sum_{sal} h'_s \cdot \dot{m}_s \quad [w] \quad (14.2b)$$

Balance de Entropía:

$$(13.20a): \quad 0 = \delta\sigma + \delta J_s + \sum_{ent} s_e \cdot dm_e - \sum_{sal} s_s \cdot dm_s \quad \left[\frac{J}{K}\right] \quad (14.3a)$$

$$(13.20b): \quad 0 = \dot{\sigma} + \dot{J}_s + \sum_{ent} s_e \cdot \dot{m}_e - \sum_{sal} s_s \cdot \dot{m}_s \quad \left[\frac{w}{K}\right] \quad (14.3b)$$

Balance de Exergía:

$$(13.24a): \quad 0 = (\delta Q - T_0 \cdot \delta J_s) - \delta W_t - T_0 \cdot \delta\sigma + \sum_j e'_j \cdot dm_j \quad [J] \quad (14.4a)$$

$$(13.24b): \quad 0 = \dot{Q} - T_0 \cdot \dot{J}_s - \dot{W}_t - T_0 \cdot \dot{\sigma} + \sum_j e'_j \cdot \dot{m}_j \quad [w] \quad (14.4b)$$

- **Caso Particular:** - sistema abierto
 - régimen estacionario
 - 1 entrada / 1 salida

y llamando (o bien: por mol): $q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$; $w_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}$; $i = \frac{\dot{I}}{\dot{m}}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$; $\hat{\sigma} = \frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}}$; $j_s = \frac{\dot{J}_s}{\dot{m}}$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ (14.5)

Las ec. de balance quedan:

$$(14.1b): \quad \text{Balance de Masa:} \quad \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \quad \left[\frac{kg}{s}\right] \quad (14.6)$$

$$(14.2b): \quad \text{Balance de Energía:} \quad 0 = q - w_t + (h'_e - h'_s) \quad \left[\frac{J}{kg}\right] \quad (14.7)$$

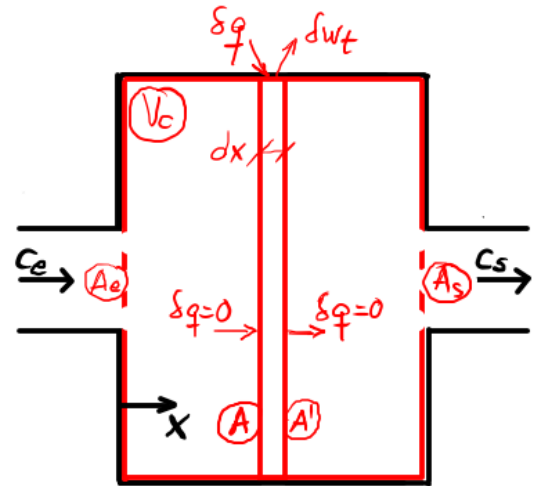
$$(14.3b): \quad \text{Balance de Entropía:} \quad 0 = \hat{\sigma} + j_s + (s_e - s_s) \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right] \quad (14.8)$$

$$(14.4b): \quad \text{Balance de Exergía:} \quad 0 = q - T_0 \cdot j_s - w_t - T_0 \cdot \hat{\sigma} + (e'_e - e'_s) \quad \left[\frac{J}{kg}\right] \quad (14.9)$$

14.2 BALANCE DE ÍMPETU COMO ENERGÍA

- Sea:
 - sistema abierto
 - reg. Estacionario
 - 1 entrada / 1 salida
 - prop. uniformes en secciones \perp al flujo

Aplicando las ec. de balances al elemento "dx" (sistema abierto infinitesimal) y "suponiendo despreciables los flujos de calor en el interior de V_c , en la dirección de avance del fluido":



Las ec. de balance quedan:

(14.7): Balance de Energía: $0 = \delta q - \delta w_t + (h'_A - h'_{A'}) = \delta q - \delta w_t - dh'$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.10)

(14.8): Balance de Entropía: $0 = \delta \hat{\sigma} + \delta j_s + (s_A - s_{A'}) = \delta \hat{\sigma} + \delta j_s - ds$ $\left[\frac{J}{kg.K} \right]$ (14.11)

- Si además:
 - se admite que hay equilibrio interno en el vol. control infinitesimal, de modo que:

T es uniforme en él, es decir, se cumple: $\delta j_s = \frac{\delta q}{T}$

(13.15): $h' = h + \frac{c^2}{2} + g \cdot z$

(14.10): $\delta q - \delta w_t = dh' \stackrel{\downarrow}{=} dh + d\left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z\right)$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.12)

(14.11): $T \cdot \delta \hat{\sigma} + \delta q = T \cdot ds$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.13)

(14.12)- (14.13): $-\delta w_t - T \cdot \delta \hat{\sigma} = \underbrace{dh - T \cdot ds}_{2^a \text{ Gibbs (6.18): } = v \cdot dP} + d\left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z\right)$
 función disipación (4.72): $\delta \psi$

$\delta w_t = -v \cdot dP - d\left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z\right) - T \cdot \delta \hat{\sigma}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.14)

integrando en V_c (entre A_e y A_s), queda:

Balance de Ímpetu como Energía: $w_t = - \int_e^s v \cdot dP - \left[\frac{c_s^2 - c_e^2}{2} + g \cdot (z_s - z_e) \right] - \psi$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.15)

- Caso particular:** si además:
 - V_c fuese un conducto $\Rightarrow w_t = 0$
 - la corriente fuese un líquido (fluido incompresible) $\Rightarrow \rho = \frac{1}{v} = cte$
 - con movimiento fuese reversible $\Rightarrow \psi = 0$

(14.14) queda: $v \cdot dP + d\left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z\right) = 0 \Rightarrow d(v \cdot P) + d\left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z\right) = 0$

Ec. Bernouilli: $P \cdot v + \frac{c^2}{2} + g \cdot z = cte$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.16)

14.3 PROCESOS DE DERRAME SIN TRABAJO TÉCNICO $W_t = 0$

- **Proceso de derrame:**
 - son sistemas abiertos
 - en régimen estacionario
 - en los que: $W_t = 0$
 - en general: $\Delta e_p \cong 0$ (sobretudo en caso de corrientes gaseosas)

14.3.1 Procesos de derrame “adiabático”: $q \cong 0$

- son procesos de derrame, en los que, además, pueden despreciarse las transferencias de calor a través de las fronteras impermeables: $q \cong 0$

- Las ec. de balance quedan:

<ul style="list-style-type: none"> - sistema abierto - régimen estacionario - 1 entrada / 1 salida 	}	<ul style="list-style-type: none"> - $W_t = 0$ (proceso de derrame) - $Q = 0$ (proceso adiabático) - $\Delta e_p \rightarrow$ despreciable
---	---	--

(14.2a): Balance de Energía: $h'_2 = h'_1 \Rightarrow h_2 + \frac{c_2^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.17)

(14.3a): Balance de Entropía: $s_2 - s_1 = \hat{\sigma} (\geq 0)$ (4.94): destruc. exergética $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ (14.18)

(14.4a): Balance de Exergía: $e'_2 - e'_1 = -T_0 \cdot \hat{\sigma} = -i (\leq 0)$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.19)

(14.14): Balance de Ímpetu como energía: $v \cdot dP + d\left(\frac{c^2}{2}\right) + \delta\psi = 0$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.20)

- **Caso particular:** “derrame adiabático reversible” (4.21) $\Rightarrow ds = 0 \Rightarrow$ sección debe variar

(14.6): $\rho \cdot c \cdot A = cte \Rightarrow \rho \cdot c \cdot dA + \rho \cdot A \cdot dc + c \cdot A \cdot d\rho = 0 \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dc}{c} + \frac{dA}{A} = 0$ (14.21)

siendo: $\delta w = 0$ (derrame); $\delta e_p \cong 0$ (en general); $\delta\psi = 0$ (reversible)

(14.14): $0 = v \cdot dP + c \cdot dc \Rightarrow c \cdot dc = -v \cdot dP \Rightarrow \frac{dc}{c} = -\frac{v \cdot dP}{c^2}$ (14.22)

$P = P(\rho, s): dP = \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_s \cdot d\rho + \left. \frac{\partial P}{\partial s} \right|_\rho \cdot ds = a^2 \cdot d\rho$ (a = vel. sónica en fluido) $\Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = \frac{v \cdot dP}{a^2}$

(14.21): $\frac{dA}{A} = \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{a^2} \right) \cdot v \cdot dP \rightarrow$ da la variación de A para que el derrame sea reversible (14.23)

Conclusiones:

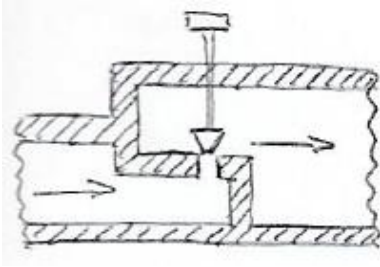
- si el fluido alcanza la veloc. del sonido en alguna sección, lo hará en el área mín. ($c = a \Rightarrow dA = 0$)

	<u>(14.23)</u>	<u>(14.22)</u>	
• $c < a$	$dA < 0 \Rightarrow dP < 0$	$dc > 0 \Rightarrow$	derrame acelerado, con $P \downarrow \rightarrow$ Tobera subsónica
	$dA > 0 \Rightarrow dP > 0$	$dc < 0 \Rightarrow$	derrame decelerado, con $P \uparrow \rightarrow$ Difusor subsónico
• $c > a$	$dA < 0 \Rightarrow dP > 0$	$dc < 0 \Rightarrow$	derrame decelerado, con $P \uparrow \rightarrow$ Difusor supersónico
	$dA > 0 \Rightarrow dP < 0$	$dc > 0 \Rightarrow$	derrame acelerado, con $P \downarrow \rightarrow$ Tobera supersónica

- Tobera de Laval: se puede pasar de flujo subsónico a supersónico ($dc > 0$) y viceversa, mediante un conducto “convergente ($dA < 0$) - divergente ($dA > 0$)”, obteniendo el flujo sónico ($dc = 0$) en la sección mínima.

Nota: Velocidad del sonido en un fluido: $a = \sqrt{\left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_s} \underset{\substack{\text{en gases} \\ \downarrow}}{=} \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}} \underset{\substack{\text{en G.I.} \\ \downarrow}}{=} \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}$ $\left[\frac{m}{s} \right]$ (14.24)

14.3.1.1 Válvulas de laminación



■ **Válvula de laminación:**

- son procesos de derrame adiabáticos
- en los que se produce una fuerte restricción al flujo (o estrangulamiento, es decir: brusca variación de la sección de paso), que provoca torbellinos (mov. turbulento)
⇒ no se cumple la condición de equilibrio termodinámico local:
- es decir: son “procesos no estáticos localmente”.

■ Siempre se cumple:

- se produce una expansión de la corriente ⇒ $P_2 < P_1$
- hay poca variación de la velocidad ⇒ $c_2 \cong c_1$
- la variación de T depende de:
 - la expansión producida: $P_1 - P_2$
 - coef. Joule-Thomson (tanto en la entrada como en la salida)

$$(3.40): \mu_{JT}(P, h) = \left. \frac{\delta T}{\delta P} \right|_h = - \frac{\delta h}{\delta P} \Big|_T \Big|_c$$

- Las ec. de balance quedan:
- | | | | |
|------------------------|--|---|----------------------|
| - sistema abierto | | - $W_t = 0$ | (proceso de derrame) |
| - régimen estacionario | | - $Q = 0$ | (proceso adiabático) |
| - 1 entrada / 1 salida | | - Δe_c y $\Delta e_p \rightarrow$ despreciables | |

(14.17): Bal. de Energía: $h_2 = h_1$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.25)

(14.18): Bal. de Entropía: $s_2 - s_1 = \hat{\sigma} (>0)$ $\left[\frac{J}{kg.K} \right]$ (14.26)

(14.19): Bal. de Exergía: $e'_2 - e'_1 = -T_0 \cdot \hat{\sigma} \equiv -i (<0)$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.27)

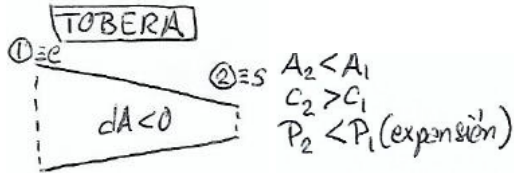
(14.20): Bal. de Ímpetu como energía: $v \cdot dP + d \left(\frac{c^2}{2} \right) + \delta\psi = 0$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.28)

14.3.1.2 Toberas y Difusores subsónicos

- **Toberas y Difusores:**
 - son procesos de derrame adiabáticos a
 - en conductos de sección lentamente variables

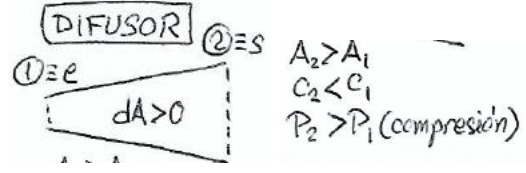
En ellos: $M = \frac{c}{a} < 1$ [-] (14.29) $\left\{ \begin{array}{l} M = \text{n}^\circ \text{ Mach (adimensional)} \\ c = \text{velocidad local del fluido} \\ a = \text{ " " " " sonido} \end{array} \right.$

Subsónico: $M < 1$
 Supersónico: $M > 1$



Toberas subsónica:

- sección convergente: $dA < 0$
- acelera la corriente: $c_2 > c_1$ (a costa de $P \downarrow$)
- expansiona la corriente: $P_2 < P_1$



Difusores subsónico:

- sección divergente: $dA > 0$
- decelera la corriente: $c_2 < c_1$ (a costa de $P \uparrow$)
- comprime la corriente: $P_2 > P_1$

- Las ec. de balance quedan:
 - sistema abierto
 - régimen estacionario
 - 1 entrada / 1 salida
- $W_t = 0$ (proceso de derrame)
 - $Q = 0$ (proceso adiabático)
 - $\Delta e_p \rightarrow$ despreciable

(14.17): Bal. de Energía: $h'_2 = h'_1 \Rightarrow h_2 + \frac{c_2^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2}$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.30)

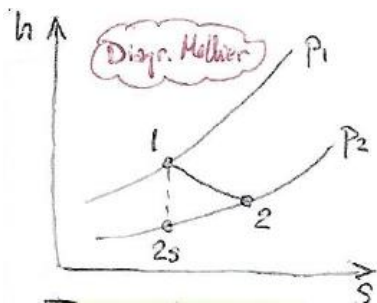
(14.18): Bal. de Entropía: $s_2 - s_1 = \hat{\sigma} (\geq 0)$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ (14.31)

(14.19): Bal. de Exergía: $e'_2 - e'_1 = -T_0 \cdot (s_2 - s_1) = -i (\leq 0)$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.32)

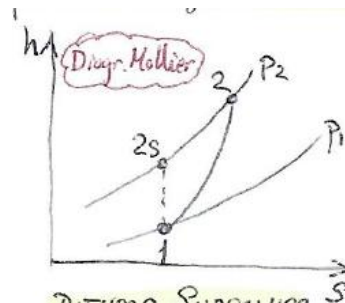
(14.20): Bal. de Impetu como energía: $v \cdot dP + d\left(\frac{c^2}{2}\right) + \delta\psi = 0$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.33)

■ **Rendimiento isoentrópico en Toberas y Difusores:**

- Se compara el salto entálpico del proceso real con el del proceso reversible (isoentrópico), partiendo del mismo estado inicial y hasta la misma presión final, tomados de forma que el cociente sea < 1
- En estos procesos la energía mecánica degradada por viscosidad en el interior del V_c suele tener valor pequeño \Rightarrow disponen de rendimientos altos (se toman como reversibles, muchas veces)



Tobera: $\eta_{TO} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1}$ [-] (14.34)



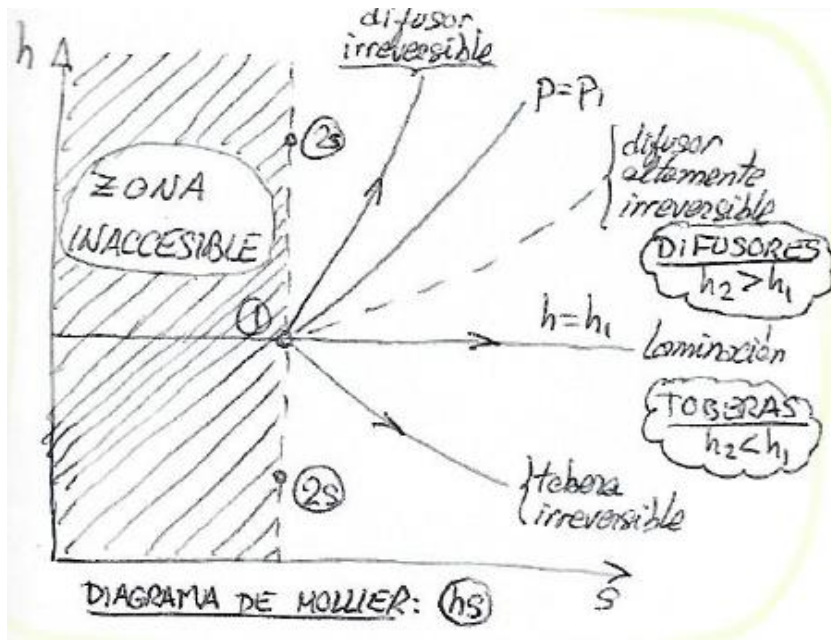
Difusor: $\eta_D = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$ [-] (14.35)

■ **Rend. exergético en Toberas y Difusores:**

(14.46) (14.19)(14.18) y (13.23b)(13.23a), con $\Delta e_p \cong 0$

$$\xi = \frac{e'_2}{e'_1} \stackrel{(14.46)}{=} 1 - \frac{i}{e'_1} \stackrel{(14.19)(14.18) \text{ y } (13.23b)(13.23a), \text{ con } \Delta e_p \cong 0}{=} 1 - \frac{T_0 \cdot (s_2 - s_1)}{(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) + \frac{c_1^2}{2}} \quad [-] \quad (14.36)$$

14.3.1.3 Diagrama general de los procesos de Derrame Adiabático:



Nota: en un difusor, si el proceso fuese altamente irreversible, podría darse una disminución de la presión, situación que lógicamente no es deseable en el diseño pues, va en contra del objetivo principal del diseño de difusores, que es aumentar la presión del fluido.

14.3.2 Procesos de derrame “no adiabático”: $q \neq 0$

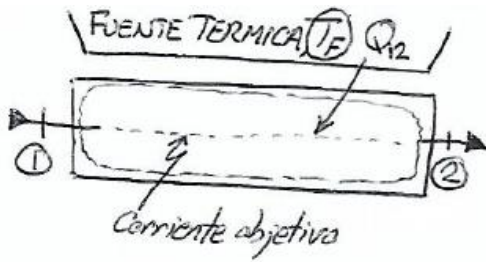
■ Son dispositivos con dos funciones primordiales:

- ① Extraer (enfriar) o Ceder (calentar) energía térmica de una corriente fluida.
- ② Cambiar deliberadamente la fase de la corriente fluida al paso por el cambiador (es el caso de los: condensadores, evaporadores, calderas, etc. en las plantas de potencia).

Los dispositivos más utilizados son:

- calderas
- cambiadores de calor

14.3.2.1 Calderas (1 corriente)



- desde el punto de vista termodinámico, es análoga a un cambiador de calor a contracorriente, sólo que ahora en una de las corrientes se produce un proceso de combustión (exotérmico), comunicando calor a la “corriente objetivo”
- en la práctica se asimila el proceso en una caldera como el paso de una corriente por un conducto, en régimen estacionario, recibiendo calor desde un foco térmico a una cierta temperatura T_F

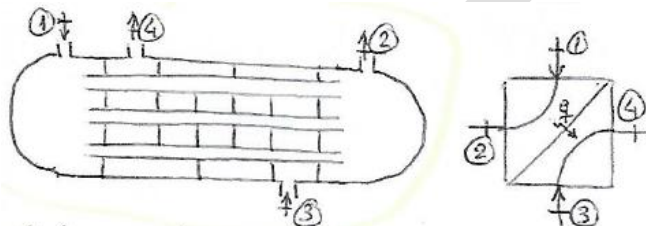
- Las ec. de balance quedan:
- sistema abierto
 - régimen estacionario
 - 1 entrada / 1 salida

- $W_t = 0$ (proceso de derrame)
- $Q \neq 0$ (proceso diatermano)
- Δe_c y $\Delta e_p \rightarrow$ despreciables

(14.2b): Bal. de Energía: $0 = \dot{Q} + \dot{m} \cdot (h_1 - h_2)$ [w] (14.37b)

(14.3b): Bal. de Entropía: $0 = \dot{\sigma} + \dot{J}_s + \dot{m} \cdot (s_1 - s_2)$ [w/K] (14.38b)

14.3.2.2 Cambiadores de calor (2 corrientes)



- las corrientes se mueven por conductos separados, sin mezclarse:
 - “Corriente objetivo” \rightarrow la que se desea enfriar o calentar.
 - “Corriente de aporte” \rightarrow la usada para conseguirlo.
- cada corriente sufre un proceso: de derrame en rég. estacionario $\rightarrow W_t = 0$ y $\Delta e_p \cong 0$
no adiabático $\rightarrow q_A = -q_B \neq 0$
- el conjunto de ambas corrientes sufre un proceso: de derrame, adiabático (en general), ya que prácticamente toda la transferencia de calor se produce entre ambas corrientes (se desprecian las pérdidas de calor al exterior)
- muy frecuentemente se desprecian las variaciones de energía cinética $\rightarrow \Delta e_c \cong 0$

- Las ec. de balance quedan:
- sistema abierto
 - régimen estacionario
 - 2 entradas / 2 salidas

- $W_t = 0$ (proceso de derrame)
- $Q = 0$ (“conjunto” adiabático)
- Δe_c y $\Delta e_p \rightarrow$ despreciables

(14.1b): Bal. de Masa: (cada corriente) $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$; $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ [kg/s] (14.39b)

(14.2b): Bal. de Energía: (al conjunto) $0 = \sum_e h_e \cdot \dot{m}_e - \sum_s h_s \cdot \dot{m}_s$ [w] (14.40b)

$0 = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_4)$ [w] (14.40b)

(14.3b): Bal. de Entropía: (al conjunto) $\dot{\sigma} = \dot{m}_1 \cdot (s_2 - s_1) + \dot{m}_3 \cdot (s_4 - s_3)$ [w/K] (14.41b)

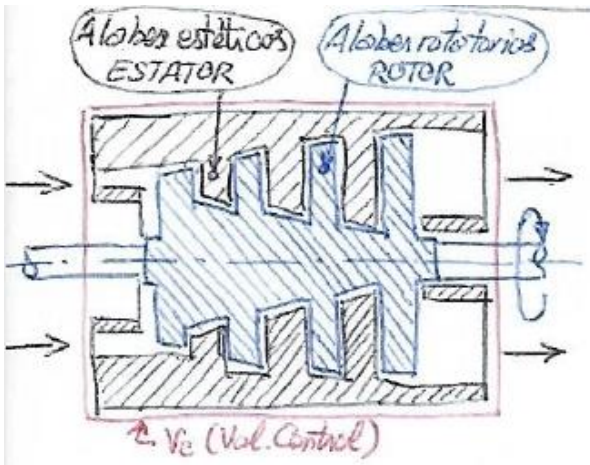
(14.4b): Bal. de Exergía: (al conjunto) $\dot{I}_{cc} = T_0 \cdot \dot{\sigma} = \dot{m}_1 \cdot (e_1 - e_2) + \dot{m}_3 \cdot (e_3 - e_4)$ [w] (14.42b)

$\dot{I}_{cc} = T_0 \cdot [\dot{m}_1 \cdot (s_2 - s_1) + \dot{m}_3 \cdot (s_4 - s_3)]$ [w] (14.42b)

(14.14): Bal. de Impetu: (cada corriente) $0 = -v \cdot dP - d \left(\frac{c^2}{2} + g \cdot z \right) - \delta\psi \Rightarrow dP < 0$ [w] (14.43a)

$0 \leq 0$

14.4 PROCESOS CON TRABAJO TÉCNICO $\dot{W}_t \neq 0$

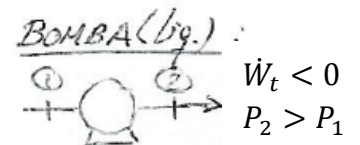
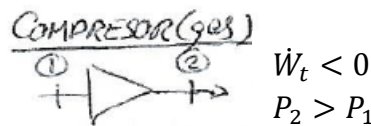
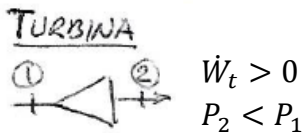


■ Son procesos en los que se pretende: obtener (expansión) / aportar (compresión), trabajo técnico de/a una corriente fluida, gracias al uso de álabes unidos a un eje giratorio que atraviesa las fronteras del V_c .

Turbinas: (gas y líquido) | Objetivo: obtener trabajo técnico de una corriente fluida (expansión):
 - se extrae potencia mecánica de la corriente: $\dot{W}_t > 0$ [w]
 - a expensas de provocar una expansión: $P_2 < P_1$ [Pa]

Compresor (gas) | Objetivo: aportar trabajo técnico a una corriente fluida (compresión):
Bomba (líquido) | - se proporciona potencia mecánica a la corriente, desde el exterior: $\dot{W}_t < 0$ [w]
 - provocando una compresión: $P_2 > P_1$ [Pa]

- En ambos casos:
 - régimen estacionario, de la corriente.
 - hay trabajo técnico: $\dot{W}_t \neq 0$ [w]
 - en general: $\Delta e_p = 0$ [J/kg] ¡OJO!: caso de bombeo de líq. desde gran altura
 - en general: $\Delta e_c \ll \Delta h$ [J/kg] ¡OJO!: turbina de vapor: veloc. descarga es alta
 - son procesos que “no deben considerarse reversibles”, ya que la energía mecánica degradada por viscosidad en el interior del vol. control V_c puede ser grande, por lo que los rendimientos son medios.



14.4.1 Procesos con trabajo técnico y “adiabáticos”: $q \cong 0$

■ En la práctica se considera que las turbinas, compresores y bombas son dispositivos adiabáticos: $\delta Q \cong 0$, ya que el tiempo de residencia de la corriente en el dispositivo es pequeño.

- Las ec. de balance quedan:
- | | | |
|------------------------|--|---|
| - sistema abierto | | - $W_t \neq 0$ |
| - régimen estacionario | | - $Q = 0$ (proceso adiabático) |
| - 1 entrada / 1 salida | | - Δe_c y $\Delta e_p \rightarrow$ despreciables |

(14.1b): Bal. de Masa: $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$ $\left[\frac{kg}{s} \right]$ (14.44)

(14.2b): Bal. de Energía: $w_t = h_e - h_s$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.45)

(14.3b): Bal. de Entropía: $\hat{\sigma} = s_s - s_e (>0)$ $\left[\frac{J}{kg.K} \right]$ (14.46)

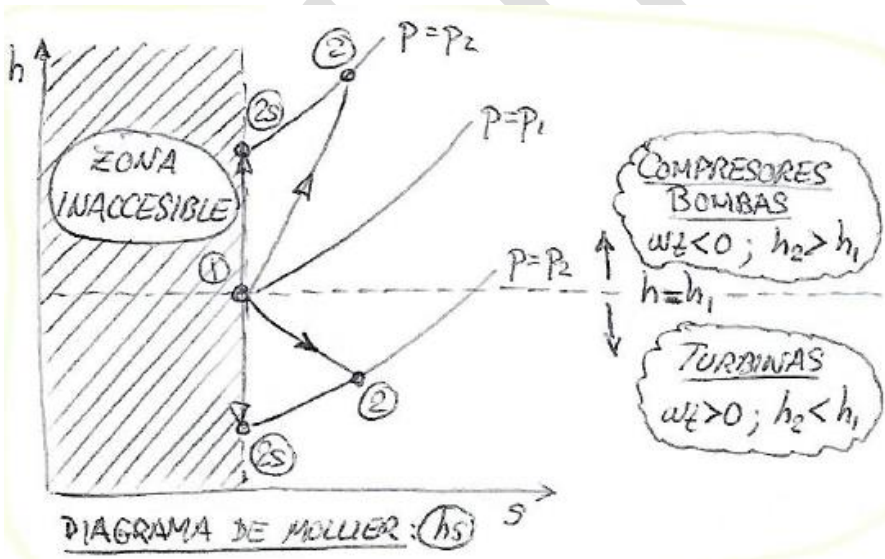
(14.15): Bal. de Ímpetu como energía: $w_t = - \int_e^s v \cdot dP - \psi = w_t^{rev} - \psi$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.47)

■ **Caso particular:** si además: - el proceso fuera reversible $\rightarrow \hat{\sigma} = 0$; $\psi = 0$

(14.46): Bal. de Entropía: $s_s = s_e$ o bien: $s_2 = s_1$ $\left[\frac{J}{kg.K} \right]$ (14.48)

(14.47): Bal. de Ímpetu como energía: $w_t^{rev} = - \int_1^2 v \cdot dP \Rightarrow \psi = w_t^{rev} - w_t \geq 0$ $\left[\frac{J}{kg} \right]$ (14.49)

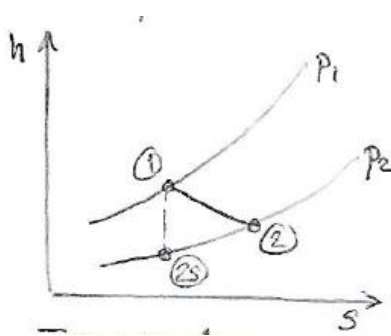
14.4.1.1 Diagrama general de los procesos con Trabajo Técnico y Adiabáticos



14.4.1.2 Rendimiento Isoentrópico en procesos con Trabajo Técnico

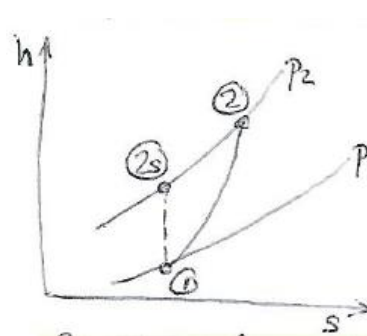
■ **Rendimiento isoentrópico en Turbinas y Compresores:**

- Se compara el salto entálpico del proceso real con el del proceso reversible (isoentrópico), partiendo del mismo estado inicial y hasta la misma presión final, tomados de forma que el cociente sea < 1 .
- En estos procesos la energía mecánica degradada por viscosidad en el interior del V_c puede ser relevante \Rightarrow disponen de rendimientos medios.



Turbina adiabática: $\eta_{TU} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1}$ [-] (14.50)

- con (14.45): $\eta_{TU} = \frac{\dot{w}_t}{\dot{w}_{t,s}}$ [-] (14.51)



Compresor adiabático: $\eta_C = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$ [-] (14.52)

- con (14.45): $\eta_C = \frac{\dot{w}_{t,s}}{\dot{w}_t}$ [-] (14.53)

14.4.2 Procesos con trabajo técnico y “no adiabáticos”: $q \neq 0$

- De los procesos en régimen estacionario con presencia de trabajo técnico, en los que existan transferencias de calor con el exterior, sólo tienen interés técnico los que son “ISOTERMOS”, en los que también admitiremos: $\Delta e_p \cong 0$; $\Delta e_c \ll \Delta h$

■ **Rendimiento isoterma:**

- Se define como el cociente entre los trabajos en el proceso real y en el proceso reversible isoterma, entre los mismos estados inicial y final, tomados de forma que el cociente sea < 1 .
- En estos procesos la energía mecánica degradada por viscosidad en el interior del V_c puede ser relevante \Rightarrow disponen de rendimientos medios.

Turbina isoterma: $\eta_{T,TU} = \frac{(w_t)_T}{(w_t)_T^{rev}} = -\frac{(w_t)_T}{\Delta g}$ [-] (ver: Demo) (14.54)

Compresor isoterma: $\eta_{T,C} = \frac{(w_t)_C^{rev}}{(w_t)_C} = -\frac{\Delta g}{(w_t)_C}$ [-] (ver: Demo) (14.55)

Demo:

(14.15): $w_t = -\int_1^2 v \cdot dP - \psi$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$ (ya que: $\Delta e_p \cong 0$ y $\Delta e_c \ll \Delta h$) (14.56)

(14.15): $(w_t)^{rev} = -\int_1^2 v \cdot dP$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$ (ya que: $rev \Rightarrow \psi = 0$) (14.57)

(6.27), 4ª Gibbs: $dg = -s \cdot dT + v \cdot dP$ ($T = cte$) $\Rightarrow dg = v \cdot dP$

(14.57): $(w_t)^{rev} = -\Delta g$ ¡OJO!: recordar que según (10.22), si: $T = cte \rightarrow \Delta g = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$

• (14.57) garantiza que siempre, Turbina/Compresor: $(w_t)_T^{rev} > (w_t)_{AD}^{rev}$ (ver diagramas y Demo)

Demo: (ver: ANEXO E.2: Jacobianos)

$$\left. \frac{\delta P}{\delta v} \right|_s = \frac{\delta(P,s)}{\delta(v,s)} = \frac{\delta(P,s)}{\delta(v,s)} \cdot \frac{\delta(v,T)}{\delta(v,T)} \cdot \frac{\delta(P,T)}{\delta(P,T)} = \frac{\delta(P,s)}{\delta(P,T)} \cdot \frac{\delta(v,T)}{\delta(v,s)} \cdot \frac{\delta(P,T)}{\delta(v,T)} = \underbrace{\left. \frac{\delta s}{\delta T} \right|_P} \cdot \underbrace{\left. \frac{\delta T}{\delta s} \right|_v} \cdot \left. \frac{\delta P}{\delta v} \right|_T = \frac{c_p}{T} \cdot \frac{T}{c_v} \cdot \left. \frac{\delta P}{\delta v} \right|_T = \gamma \cdot \left. \frac{\delta P}{\delta v} \right|_T$$

(6.53a) coef. calóricos
(6.53b) coef. calóricos

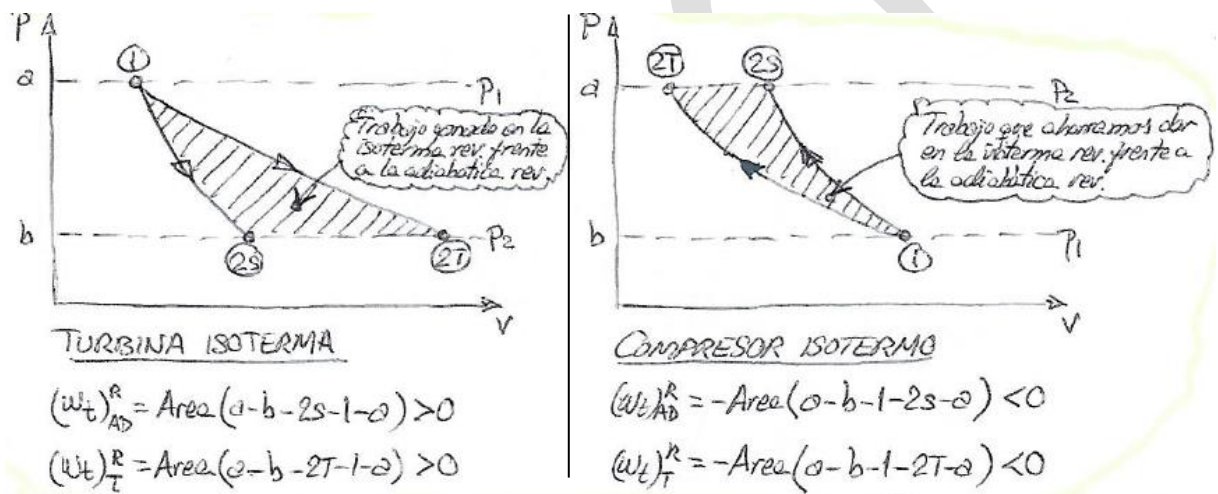
y como: $\gamma > 1 \Rightarrow \left| \left(\frac{\delta P}{\delta v} \right)_s \right| > \left| \left(\frac{\delta P}{\delta v} \right)_T \right|$

Es decir, en un diagrama $P - v$: "pendiente de las adiabáticas reversible ($s = cte$) > pendiente de las isotermas reversible ($T = cte$)"

Y según (14.57): $\Rightarrow (w_t)^{rev} = - \int_1^2 v \cdot dP$

\Rightarrow turbina ($dP < 0$): \Rightarrow los trabajos son positivos: $|(w_t)_T^{rev}| > |(w_t)_{AD}^{rev}| \Rightarrow (w_t)_T^{rev} > (w_t)_{AD}^{rev}$

\Rightarrow compresor ($dP > 0$): \Rightarrow los trabajos son negativos: $|(w_t)_T^{rev}| < |(w_t)_{AD}^{rev}| \Rightarrow (w_t)_T^{rev} > (w_t)_{AD}^{rev}$



■ **Conclusiones:**

① Interesa construir turbinas y compresores isotermos pero, no es viable en la práctica ya que tecnológicamente es prácticamente imposible mantener $T = cte$ en estos dispositivos.

② Lo más aproximado podría ser:

a/ en Turbinas: realizar pequeñas expansiones adiabáticas, seguidas de calentamientos intermedios a $P = cte$. Si cada una de las expansiones es pequeña, el proceso es casi isoterma. No se suelen hacer en más de 2 etapas, pues el coste es alto.

b/ en Compresores: realizar pequeñas compresiones adiabáticas, seguidas de refrigeraciones intermedias a $P = cte$. Si cada una de las compresiones es pequeña, el proceso es casi isoterma. No se suelen hacer en más de 2 etapas, pues el coste es alto.