



UNIDAD 4

PRIMER PRINCIPIO PARA SISTEMAS ABIERTOS

Bibliografía: Morán, Michel J. ; Shapiro, Howard N. ;
“Fundamentos de Termodinámica Técnica”

Cengel, Yunus A.; Boles, Michael A.; “Termodinámica”

PRIMER PRINCIPIO PARA SISTEMAS ABIERTOS

4.A. Primer principio de la Termodinámica para sistemas abiertos.
Volumen de control. Balance de masa. Ecuación del primer principio para sistemas abiertos en flujo no estable. Flujo estable o estacionario. Balance de masa y energía para sistemas abiertos en flujo estable. Trabajo de circulación, representación gráfica.

4.B. Aplicaciones del primer principio para sistemas abiertos.
Aplicación del primer principio para sistemas abiertos en flujo estable a procesos en una tobera, en una turbina, en un compresor, en un intercambiador de calor, en una caldera, en un tabique poroso o estrangulamiento, en un fluido por una tubería.

4.C. Entalpía. Entalpía propiedad termodinámica, entalpía del gas ideal y no ideal. Algunas propiedades de la entalpía. Comparación entre la energía interna y la entalpía.

Parte II

**APLICACIONES DEL PRIMER
PRINCIPIO PARA
SISTEMAS ABIERTOS EN
RÉGIMEN ESTACIONARIO
(S.A.R.E)**

SISTEMA ABIERTO EN ESTADO ESTACIONARIO (SA R E)

ESTADO ESTACIONARIO

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \\ \text{Propiedades VC constantes con el tiempo} \\ \dot{Q} \text{ y } \dot{W}_s \text{ Constantes con el tiempo} \end{array} \right.$$

Balance de masa :

$$\Delta \dot{m}_{VC} = \dot{m}_e - \dot{m}_s = 0$$

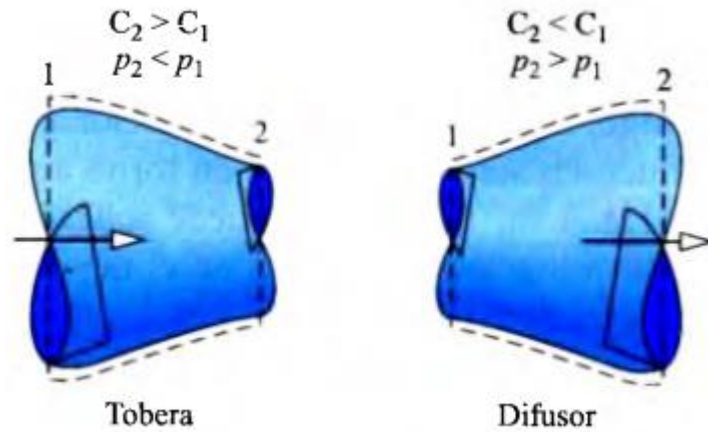
Balance de Energía:

$$\dot{m} \left[(h_s - h_e) + \frac{1}{2} (c_s^2 - c_e^2) + g(z_s - z_e) \right] = \dot{Q} - \dot{W}_s$$



1. TOBERAS Y DIFUSORES

Una **tobera** es un dispositivo que incrementa la velocidad de un fluido a expensas de la presión.



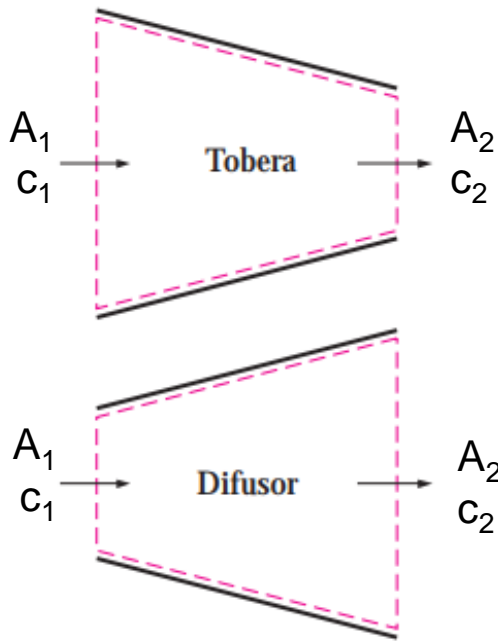
Un **difusor** es un dispositivo que incrementa la presión de un fluido al desacelerarlo. Es decir, las toberas y los difusores llevan a cabo tareas opuestas.

Las toberas y los difusores se utilizan generalmente en motores de propulsión por reacción, cohetes, vehículos espaciales e incluso en mangueras de jardín.

1. TOBERAS Y DIFUSORES

Balance de masa:

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



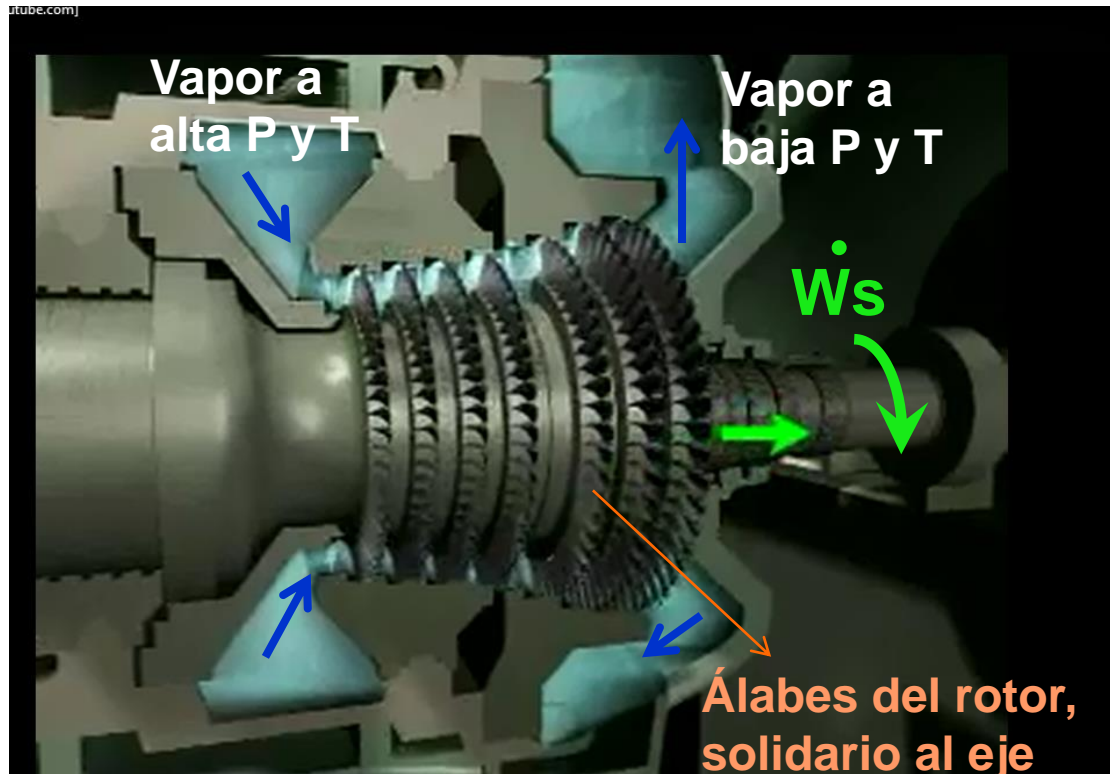
Balance de energía:

$$\dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + \overbrace{g(z_2 - z_1)}^0 \right] = \underbrace{\dot{Q}}_0 - \underbrace{\dot{W}_s}_0$$

$$(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)$$

TURBINA

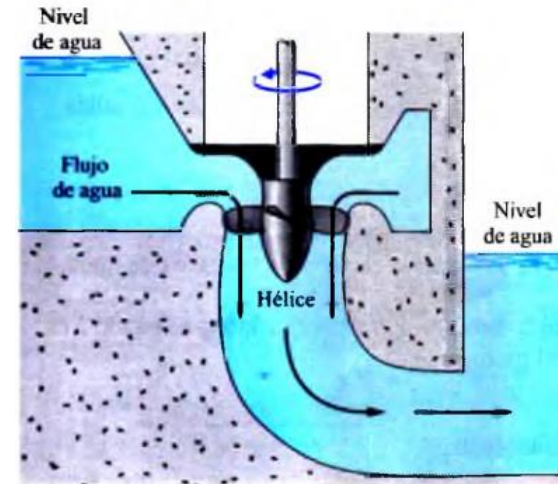
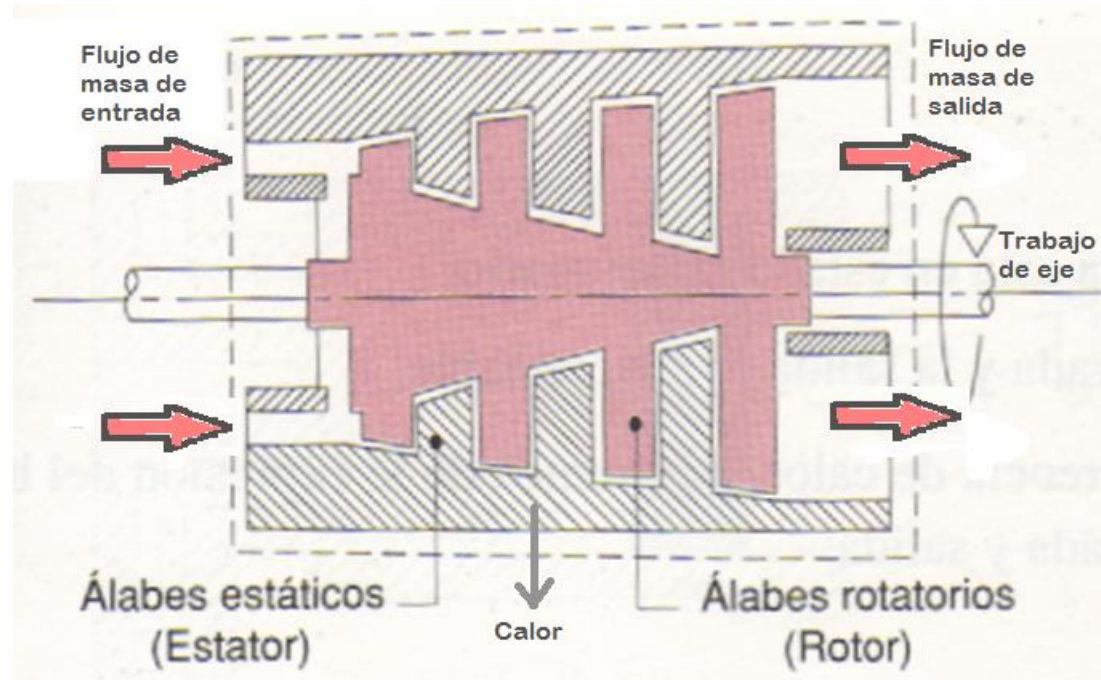
Una turbina es un dispositivo en el que se produce trabajo como resultado del paso de un gas o líquido a través de un sistema de álabes solidarios a un eje que puede girar libremente, obteniéndose una potencia.



Turbina axial

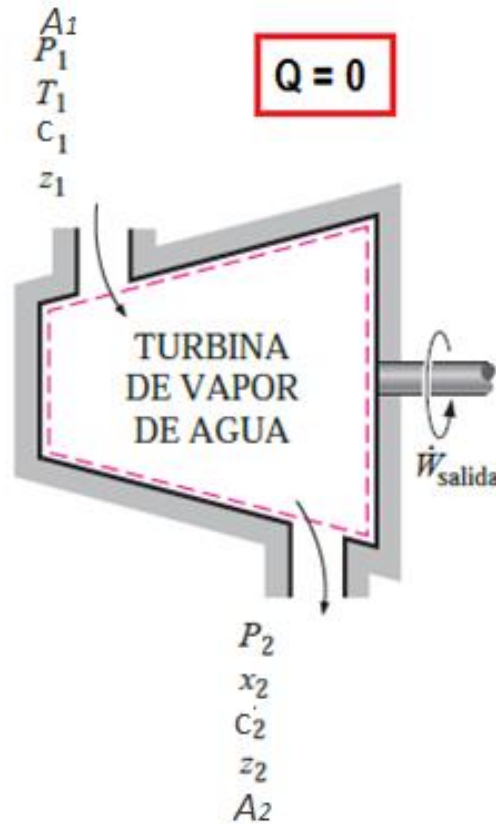
TURBINA

A medida que el fluido pasa realiza trabajo sobre los álabes haciendo girar el eje. En las turbinas de vapor, el fluido que ingresa es vapor sobrecalentado y en las de gas, el fluido son humos resultantes de la combustión de un combustible. Tanto el vapor sobrecalentado como el gas, entran a la turbina y se expande hasta una presión de salida menor produciendo trabajo. Las turbinas se emplean mucho en las centrales eléctricas de vapor (térmicas y nucleares), en las centrales de turbina de gas y como motores de aviación. En las turbinas hidráulicas el fluido de trabajo es agua.



Turbina hidráulica

TURBINAS DE VAPOR Y DE GAS



Balance de masa:

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

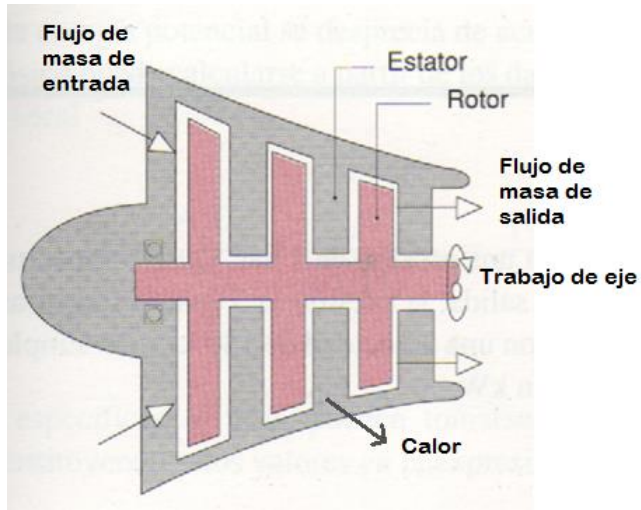
Balance de energía:

$$\dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \underbrace{\frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)}_{\sim 0} + \underbrace{g(z_2 - z_1)}_{0} \right] = \underbrace{\dot{Q}}_0 - \underbrace{\dot{W}_s}_0$$

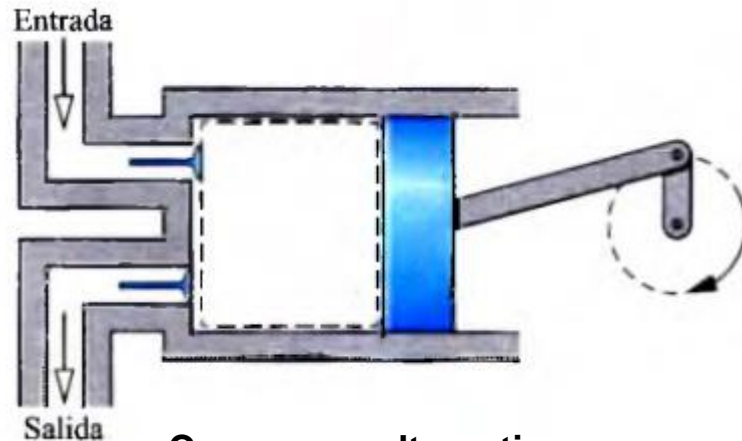
$$\dot{m} (h_2 - h_1) = - \dot{W}_s$$

La transferencia de calor desde las turbinas normalmente es insignificante ($Q \sim 0$). El cambio de energía potencial también es despreciable. Las velocidades de fluido encontradas en la mayor parte de las turbinas son muy altas, por lo que el fluido experimenta un cambio importante en su energía cinética. Sin embargo, este cambio es muy pequeño con respecto al cambio de entalpía, por lo tanto no se toma en cuenta.

COMPRESORES



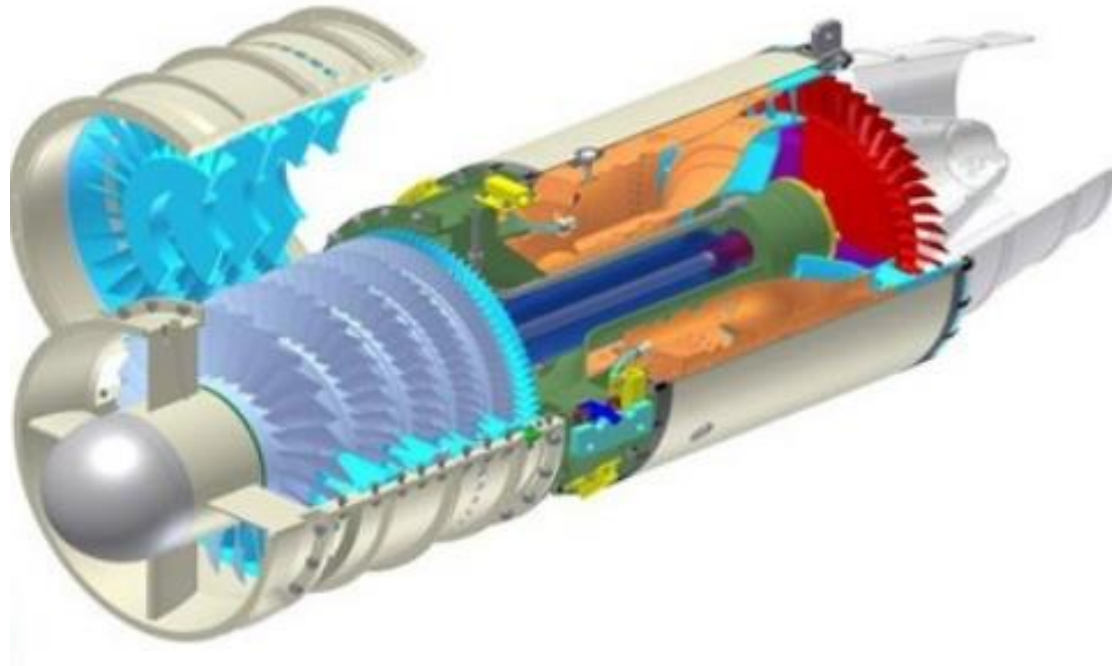
Compresor rotativo axial



Compresor alternativo

Los compresores son dispositivos que se utilizan para incrementar la presión de un fluido gaseoso mediante la reducción del volumen del gas. Para lograrlo debe suministrarse trabajo desde una fuente externa. Se utilizan, también, para transportar masas gaseosas desde un ambiente a baja presión, hasta otro donde es más elevada. Son muy diversos los tipos de mecanismos que pueden llevar a cabo esta operación, pueden ser alternativos, centrífugos, rotativos, helicoidales, etc., sin embargo, el análisis energético, puede realizarse haciendo abstracción del mecanismo particular.

COMPRESORES

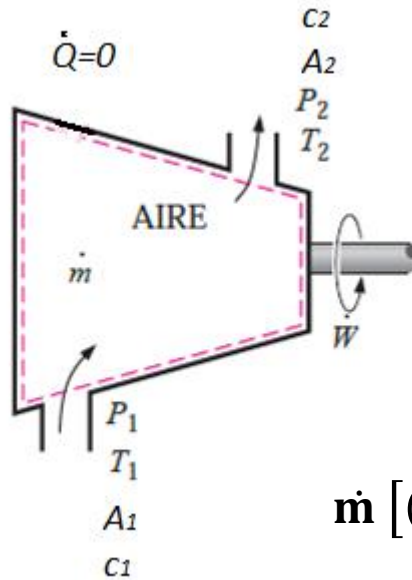


**Compresor axial en un motor
de turbina de gas**

COMPRESORES

Balance de masa:

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



Balance de energía:

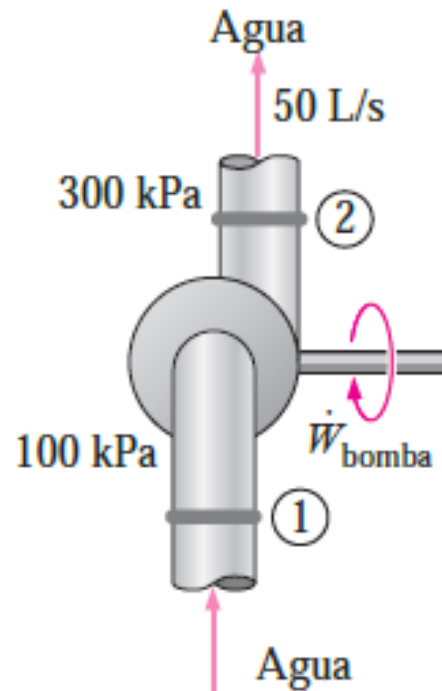
$$\dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \underbrace{\frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)}_{\sim 0} + \underbrace{g(z_2 - z_1)}_0 \right] = \underbrace{\dot{Q}}_0 - \underbrace{\dot{W}_s}_0$$

Para los compresores la transferencia de calor es insignificante, a menos que haya enfriamiento intencional. Los cambios de energía potencial son insignificantes para todos estos dispositivos; mientras que las velocidades son demasiado bajas para causar algún cambio importante en su energía cinética.

$$\dot{m} (h_2 - h_1) = - \dot{W}_s$$

BOMBAS

Las bombas funcionan de manera muy parecida a los compresores excepto que manejan líquidos en lugar de gases.



Se modelan como adiabáticas $\rightarrow Q = 0$

Además, también se considera

$$\Delta e_c \cong 0 ; \Delta e_p \cong 0$$

$$\dot{m} (h_2 - h_1) = - \dot{W}_s$$

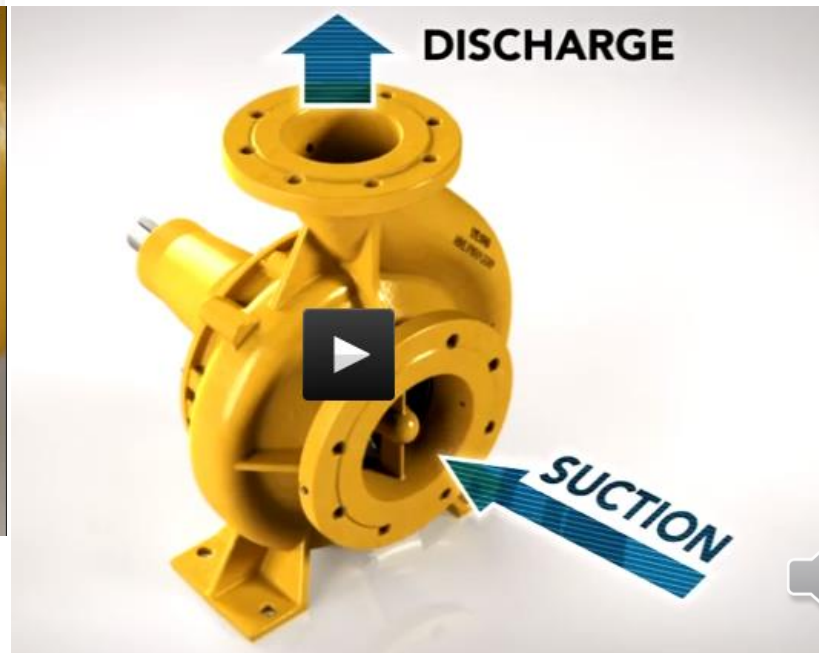
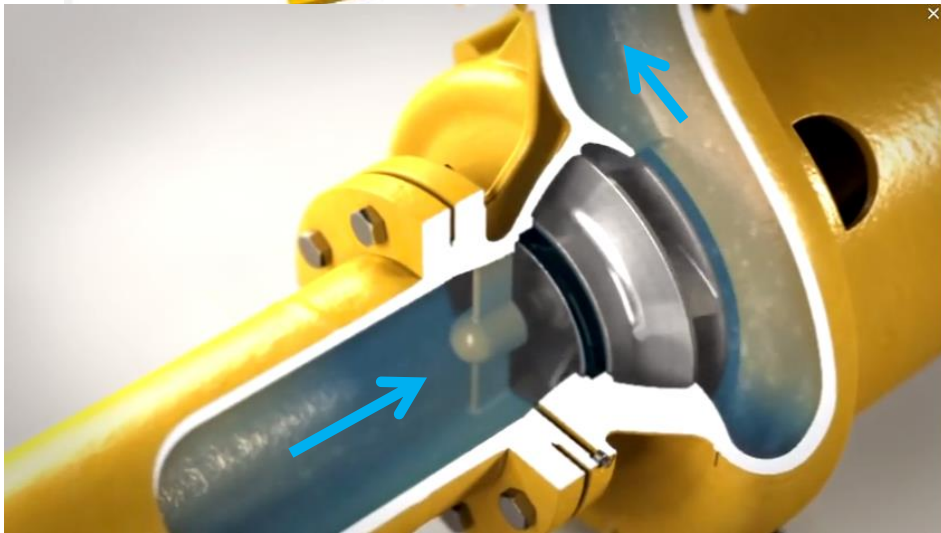
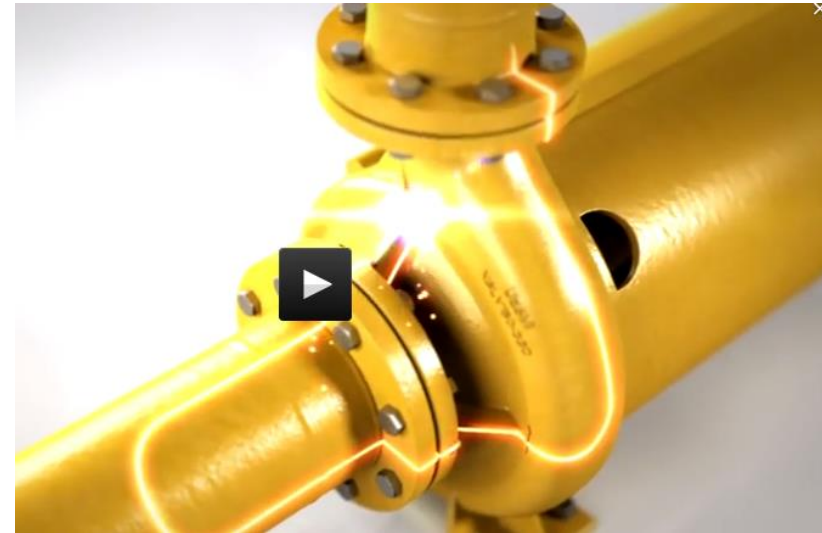
Si recordamos la definición de trabajo de circulación:

$W_c = W_s = - \int v \, dP$; Por ser los líquidos incompresibles $\rightarrow v = \text{cte}$, luego:

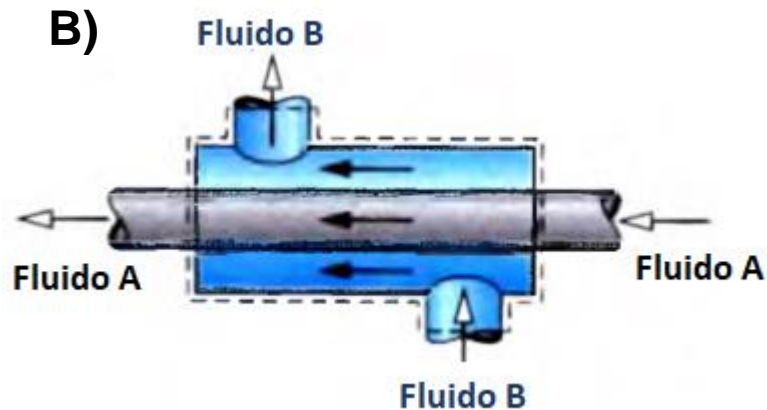
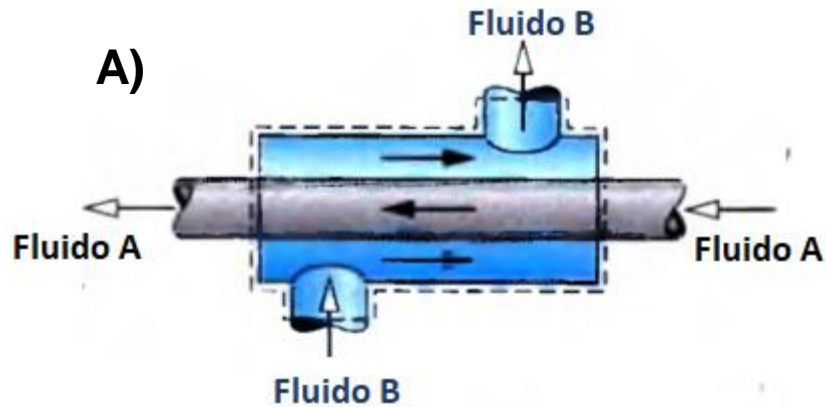
$$\dot{W}_s = v (P_2 - P_1)$$

BOMBAS

Bomba centrífuga / autocebante / para agua de mar / c
NSLH



INTERCAMBIADOR DE CALOR



Intercambiadores de tubo y coraza.

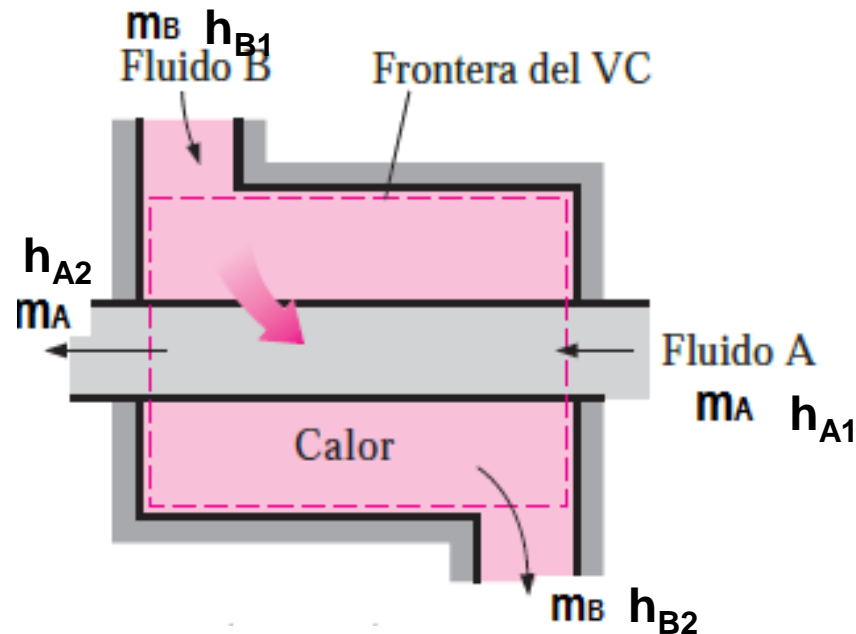
- A) En contracorriente
- B) En equicorriente

Los intercambiadores de calor son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclarse. Se usan ampliamente en varias industrias y su diseño es variado. La forma más simple de un intercambiador de calor es el de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza), que se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos. Un fluido corre por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. La coraza se aísla térmicamente para evitar pérdidas de calor al ambiente.

INTERCAMBIADOR DE CALOR CON UN MAZO DE TUBOS Y CORAZA EXTERNA



INTERCAMBIADOR DE CALOR



Balance de masa:

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = \text{constante}$$

Balance de energía:

$$W_s = 0$$
$$\Delta e_{\text{cinética}} \cong 0 ; \Delta e_{\text{potencial}} \cong 0$$

Además, cuando todo el intercambiador de calor se selecciona como el volumen de control, Q se vuelve cero porque la frontera para este caso queda justo debajo del aislamiento y la cruza poco o nada de calor.

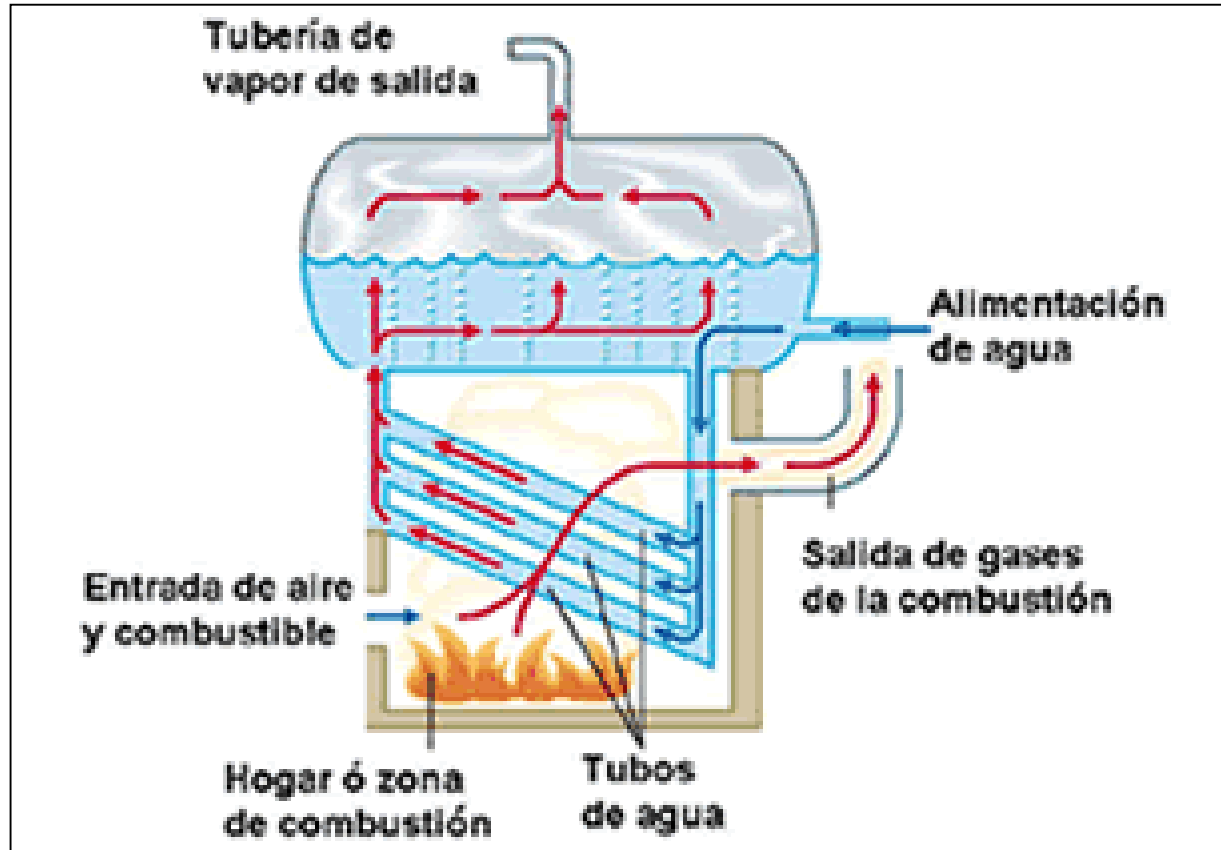
Luego:

$$Q = 0$$

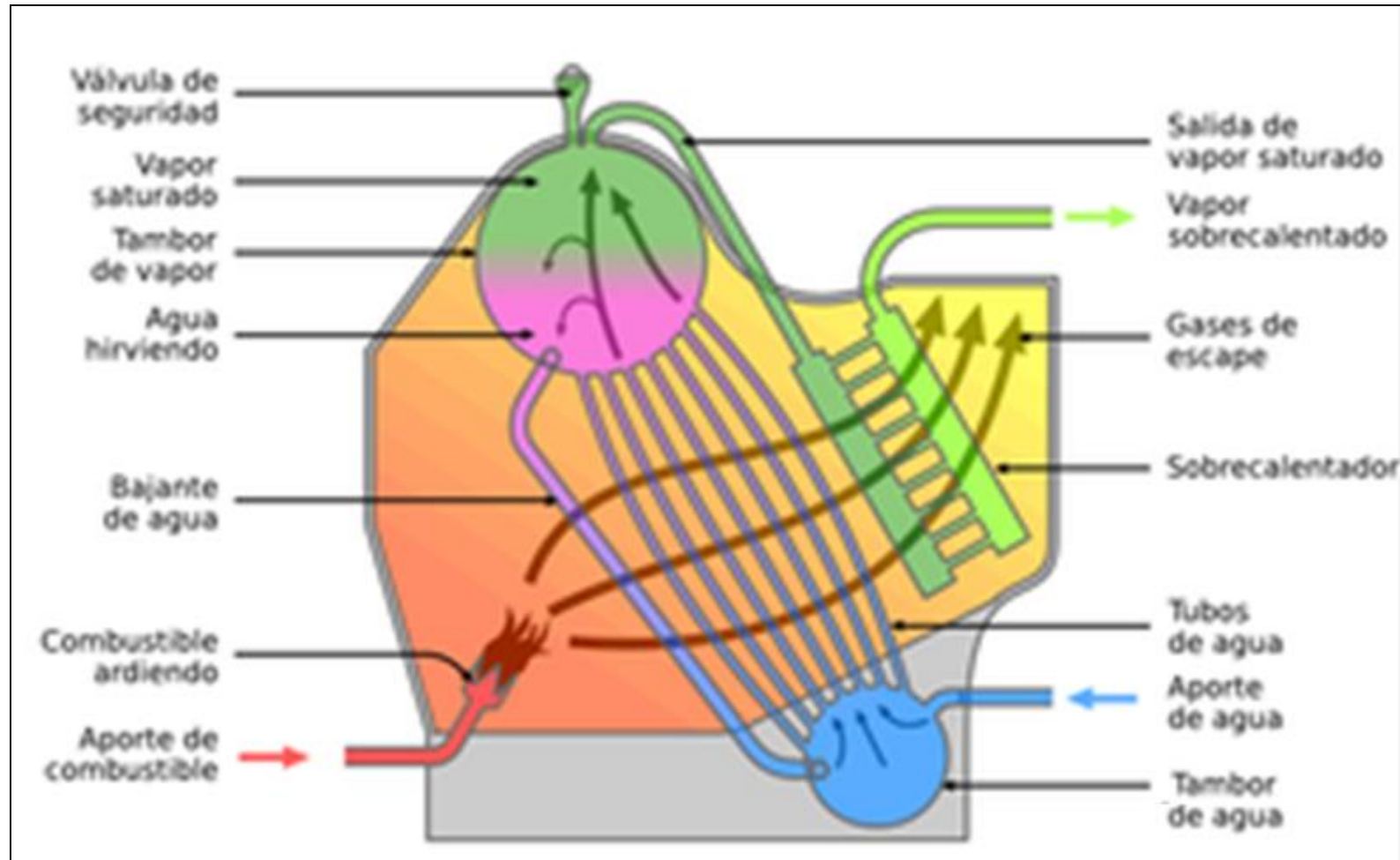
$$m_A (h_{A2} - h_{A1}) = m_B (h_{B1} - h_{B2})$$

CALDERA

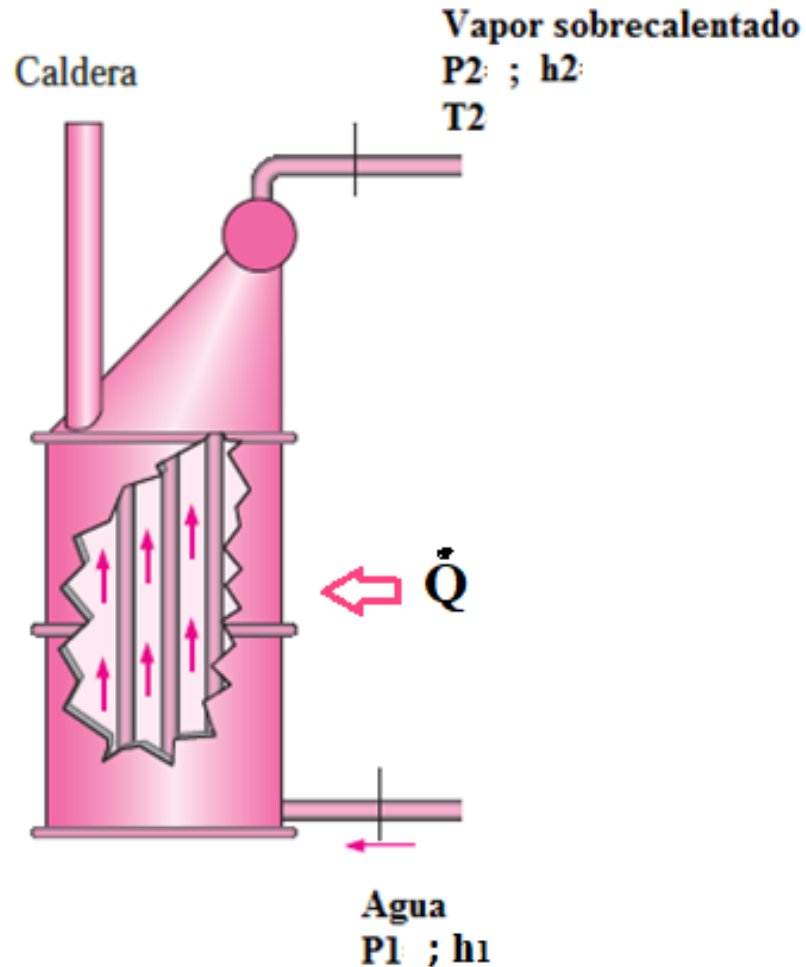
La caldera, en la industria, es un dispositivo diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado o, incluso, llega a sobrecalentado.



CALDERA



CALDERA



Balance de masa:

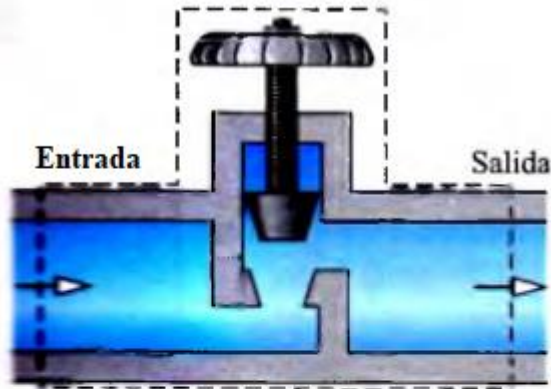
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} = \text{constante}$$

Balance de energía:

$$W_s = 0$$
$$\Delta e_{\text{cinética}} \cong 0 ; \Delta e_{\text{potencial}} \cong 0$$

$$\dot{m} (h_2 - h_1) = \dot{Q}$$

ESTRANGULAMIENTO



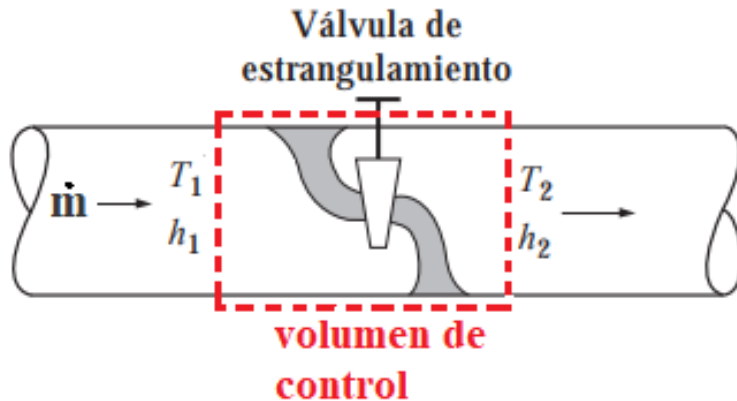
Válvula parcialmente abierta



Tapón poroso

Las válvulas de estrangulamiento son cualquier clase de dispositivo que restringe el flujo, lo cual causa una caída de presión importante en el fluido. Algunos ejemplos comunes son válvulas de regulación, tubos capilares y tapones porosos. A diferencia de las turbinas, producen una caída de presión sin implicar trabajo.

ESTRANGULAMIENTO



Balance de masa:

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

Balance de energía:

$$\dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \underbrace{\frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)}_{\sim 0} + \underbrace{g(z_2 - z_1)}_0 \right] = \underbrace{\dot{Q}}_0 - \underbrace{\dot{W}_s}_0$$

$$h_1 = h_2$$

No existe una transferencia significativa de calor puesto que no hay suficiente tiempo ni área suficientemente grande para que ocurra alguna transferencia de calor efectiva. Tampoco se realiza trabajo, y el cambio en la energía potencial, si tiene lugar, es muy pequeño. Aunque las velocidades son relativamente altas en las proximidades de la restricción, eligiendo adecuadamente el volumen de control, la variación de energía cinética es insignificante. Luego, las entalpías de entrada y salida son iguales

ESTRANGULAMIENTO

Para comprender mejor de qué manera el estrangulamiento afecta las propiedades del fluido, analicemos lo siguiente:

$$h_1 = h_2$$

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

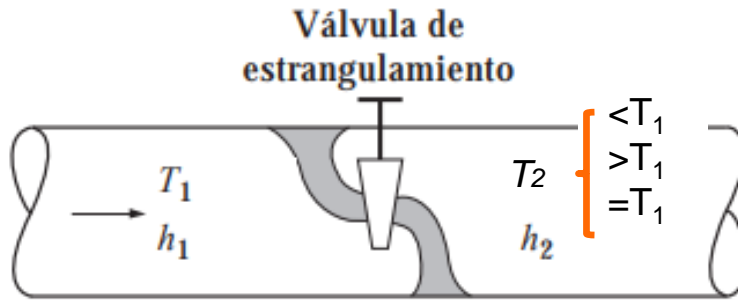
Si se cumple que $P_2 v_2 > P_1 v_1 \rightarrow u_1 > u_2$

O sea que el trabajo de flujo aumenta a expensas de la energía interna. Como resultado, la energía interna disminuye, lo cual va acompañado de una disminución de temperatura. Esto es lo que sucede con los fluidos utilizados en refrigeración.

Si se cumple que $P_2 v_2 < P_1 v_1 \rightarrow u_1 < u_2 \rightarrow T$ aumenta

Después veremos que para un gas ideal, $T_1 = T_2$, porque $h = f(T)$

COEFICIENTE DE JOULE-THOMSON



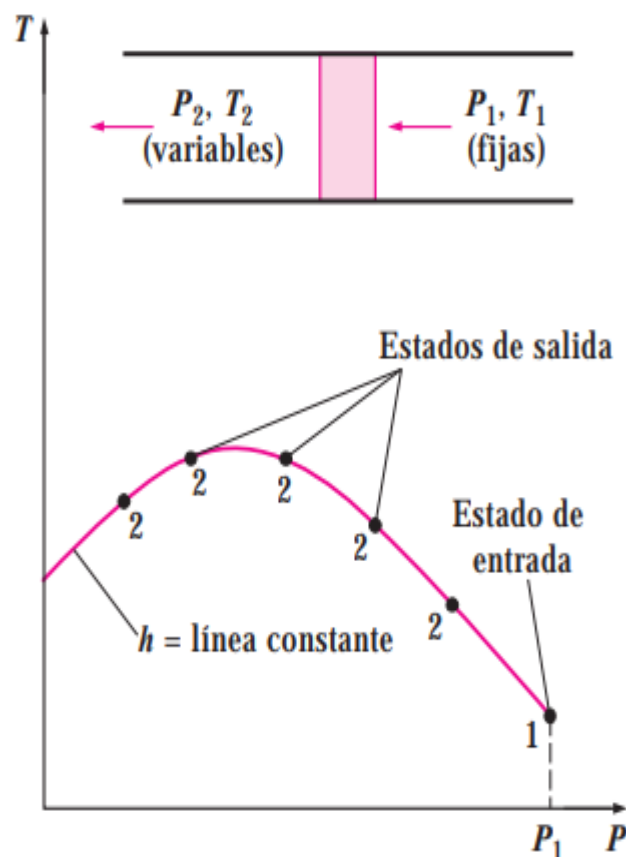
El comportamiento de la temperatura de un fluido durante un proceso de estrangulamiento (h constante) está descrito por el coeficiente de Joule-Thomson

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$$

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 & \text{la temperatura aumenta} \\ = 0 & \text{la temperatura permanece constante} \\ > 0 & \text{la temperatura disminuye} \end{cases}$$

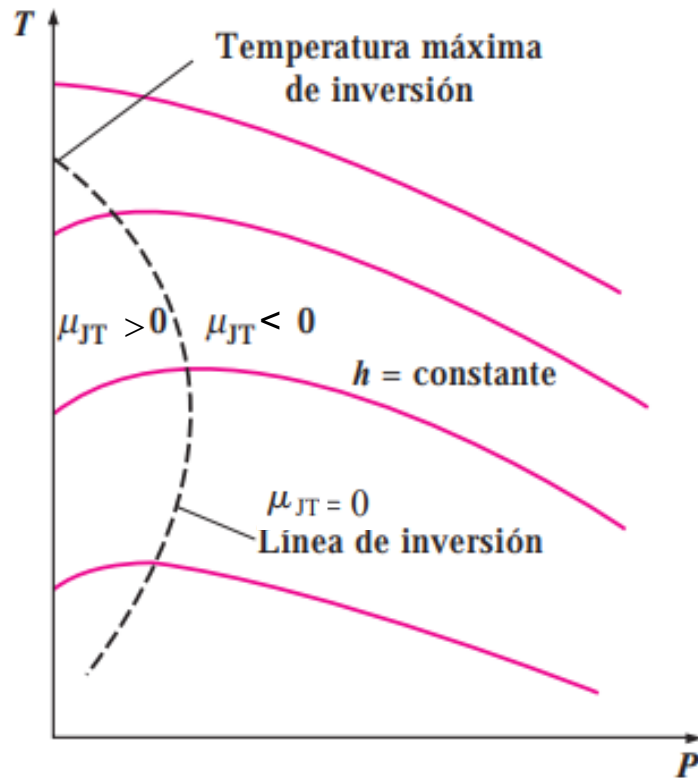
El coeficiente de Joule-Thomson es una medida del cambio en la temperatura con la presión durante un proceso de entalpía constante, o sea, representa la pendiente de las líneas h constante en un diagrama $T - P$.

COEFICIENTE DE JOULE-THOMSON



Un diagrama P - T , para un fluido dado, puede construirse a partir de mediciones de T y P durante los procesos de estrangulamiento. Un fluido a temperatura y presión fijas T_1 y P_1 (en consecuencia, de entalpía fija) es obligado a fluir por un tapón poroso, y se miden las reducciones de su temperatura y presión (T_2 y P_2). El experimento se repite para tapones porosos de diferentes tamaños, cada uno de ellos con un conjunto diferente de T_2 y P_2 (Pero iguales condiciones iniciales P_1 y T_1). Al graficar las temperaturas con las presiones se obtiene una línea de h constante sobre un diagrama T - P

COEFICIENTE DE JOULE-THOMSON



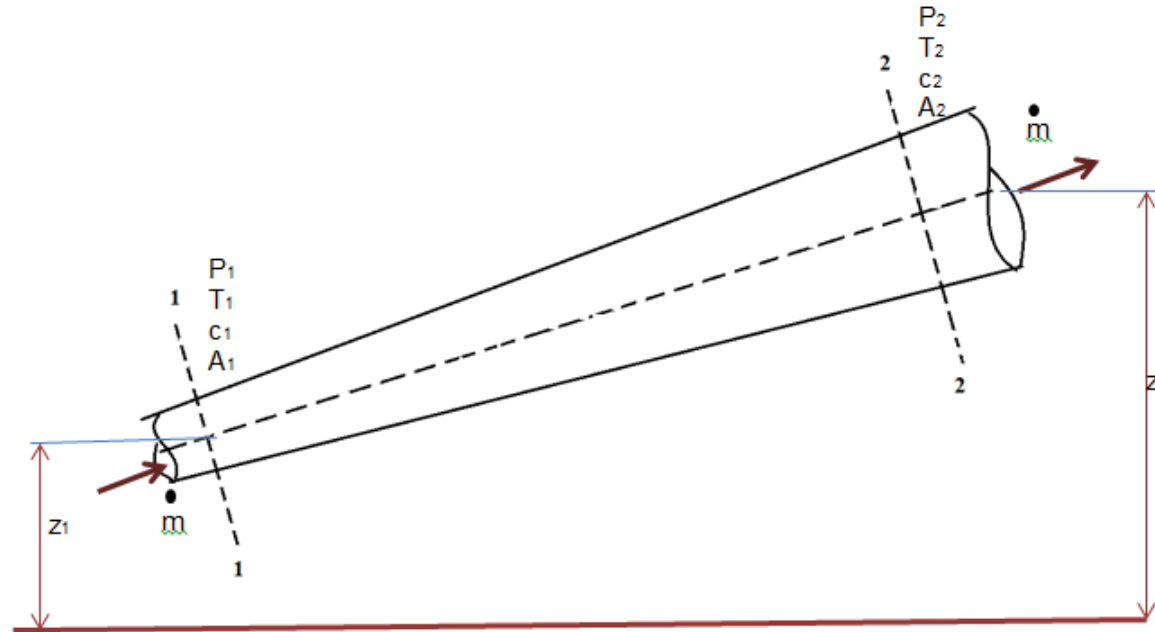
Con la repetición del experimento para diferentes conjuntos de P_1 y T_1 , y graficando los resultados, se construye un diagrama T - P con varias líneas de h constante

Algunas líneas de entalpía constante en el diagrama T - P contienen un punto de pendiente cero ó $\mu_{JT}=0$. La línea que pasa por estos puntos recibe el nombre de línea de inversión, y la temperatura en un punto donde la línea de entalpía constante intersecta la línea de inversión se conoce como temperatura de inversión.

Un proceso de estrangulamiento se desarrolla a lo largo de una isoentálpica en la dirección de la presión decreciente, es decir, de derecha a izquierda.

Por lo tanto, la temperatura de un fluido aumentará durante un proceso de estrangulamiento que finalice al lado derecho de la línea de inversión, o bien disminuirá durante un proceso que finalice en el lado izquierdo de la línea de inversión

FLUJO ESTABLE DE UN FLUIDO POR UNA TUBERÍA



Balance de masa:

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

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

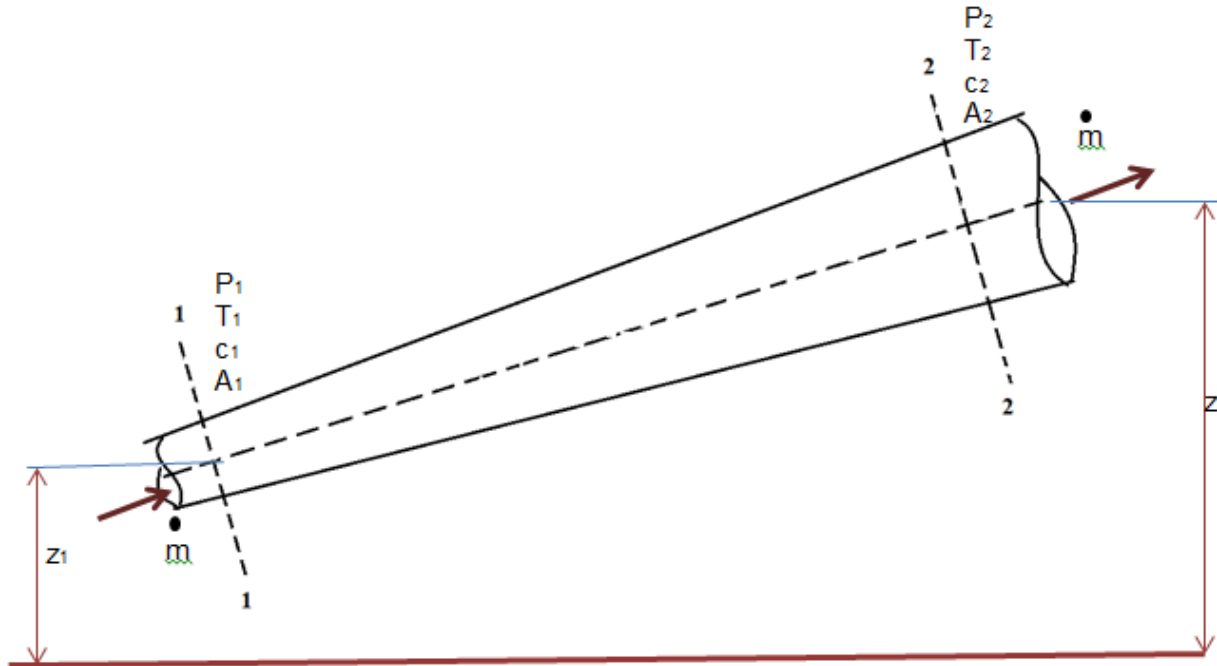
**Fluido incompresible
(Líquido)**

$$v_1 = v_2$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2$$

$$\text{Si } A_1 = A_2 \rightarrow c_1 = c_2$$

FLUJO ESTABLE DE UN FLUIDO POR UNA TUBERÍA



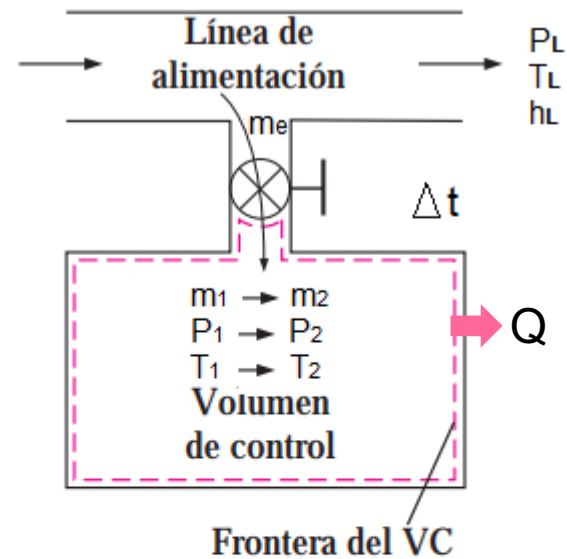
Balance de energía:

$$\dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] = \underbrace{\dot{Q}}_0 - \underbrace{\dot{W}_s}_0$$

Puede haber o no

LLENADO (ó VACIADO) DE RECIPIENTES

Como hay acumulación o pérdida de masa, se modela como sistema abierto en régimen no permanente. Se toma en cuenta un intervalo de tiempo Δt , en el que el volumen de control pasa de un estado de equilibrio 1 a otro estado 2. En este intervalo ingresa (m_e) y/o sale masa (m_s).



Balance de masa:

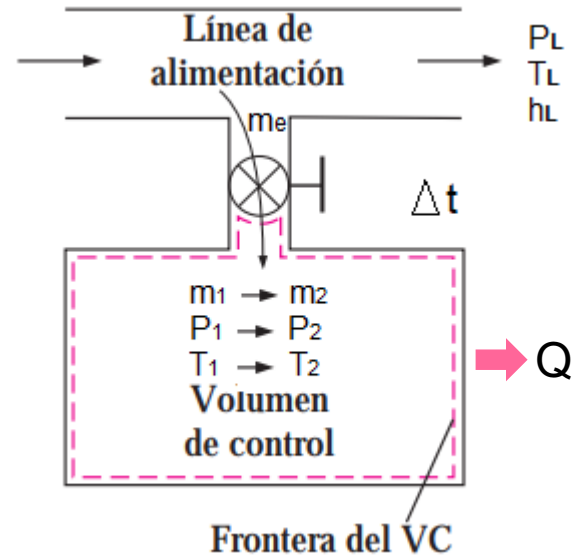
$$\Delta m_{vc} = m_e - m_s$$

$$m_2 - m_1 = m_e - m_s$$

$$m_s = 0 \rightarrow m_2 = m_1 + m_e$$

La carga de un recipiente rígido desde una línea de suministro es un proceso de flujo no estacionario porque tiene relación con cambios en el volumen de control.

LLENADO (ó VACIADO) DE RECIPIENTES



Balance de energía:

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 + m_s(h_s + ec_s + ep_s) - m_e(h_e + ec_e + ep_e) = Q - W$$

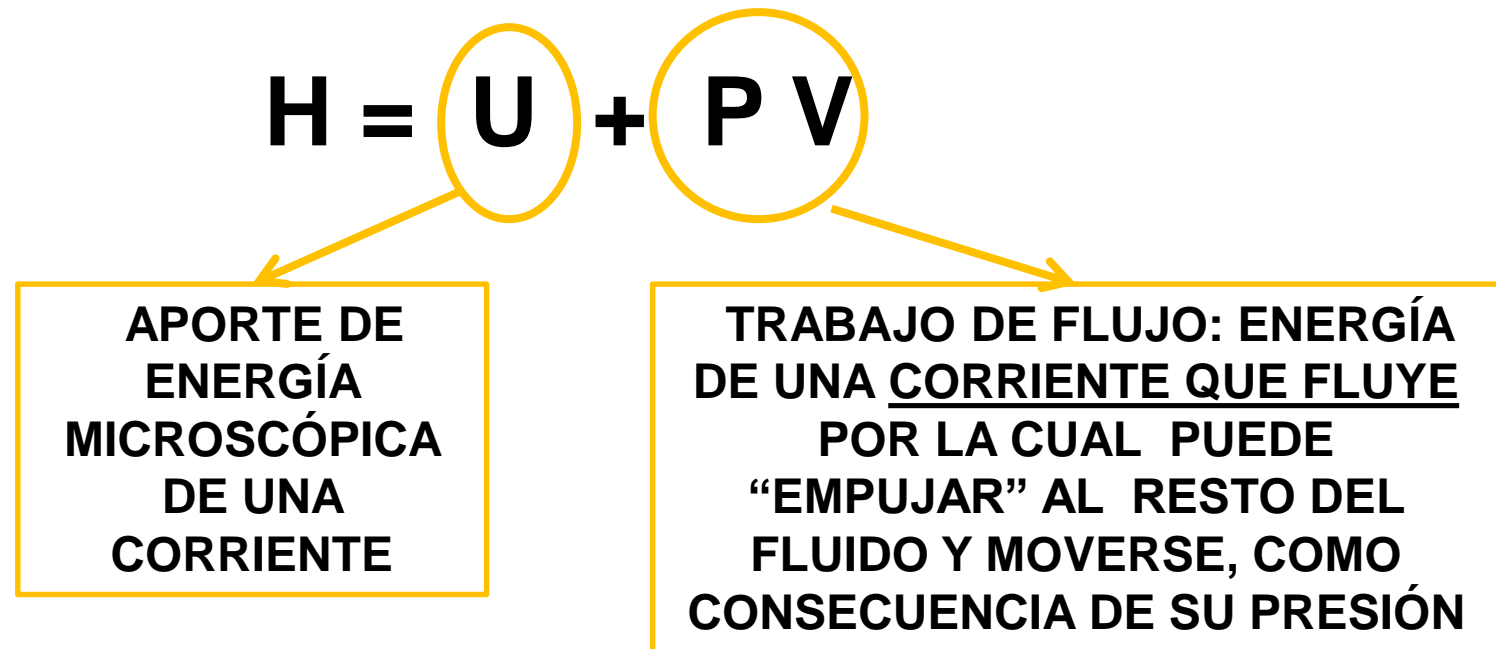
$$m_s=0 \quad ; \quad ec_e \cong 0 \quad ; \quad ep_e \cong 0 \quad ; \quad W=0$$

$$\text{Luego; } m_2 u_2 - m_1 u_1 = Q + m_e h_e \quad ; \quad \text{En este caso } Q < 0$$

ENTALPÍA: $H = U + P V$

Propiedad

ES
"PROPIEDAD"



ENTALPÍA

PARA GASES REALES, definiendo dos propiedades, queda definido el estado del sistema y por lo tanto el valor de cualquier otra propiedad como H

Por ejemplo,

$$H = F(P,T)$$

$$h = H/m = f(P,T)$$

$$dh = \frac{\partial h}{\partial T_P} dT + \frac{\partial h}{\partial P_T} dP$$

Por definición: $H = U + PV$

PARA GASES IDEALES, SE CUMPLE QUE

$$H = U + PV$$
$$H = U + R_u T$$

Como además , $U = f'(T)$ $\Rightarrow H = f'(T) + R_u T$

$$H = f(T)$$

**Es decir que para gases
“ideales” H es sólo
función de T**

LEY DE MEYER:

$$dq = du + P dv \quad \text{Y también} \quad dq = dh - v dP$$

$$\text{Luego} \quad du + P dv = dh - v dP$$

$$\text{Para gases ideales:} \quad \begin{cases} du = c_v dT \\ dh = c_p dT \end{cases}$$

$$c_v dT + P dv = c_p dT - v dP$$

$$(c_p - c_v) dT = P dv + v dP$$

$$(c_p - c_v) dT = d(P v)$$

$$(c_p - c_v) dT = d(R_u T) \quad ; \quad (c_p - c_v) dT = d(R_u T)$$

$$; \quad (c_p - c_v) dT = R_u dT$$

$$(c_p - c_v) = R_u$$

Si consideramos el Primer Principio para sistemas cerrados:

$$dq - dw = du$$

Para un proceso
cuasiestático:

$$dq - P dv = du \quad (1)$$

$$h = u + Pv \quad ; \quad dh = du + Pdv + vdP \quad ;$$
$$du = dh - Pdv - vdP \quad (2)$$

Reemplazando (2)
en (1):

$$dq - P dv = dh - Pdv - vdP$$

$$dq = dh - v dP$$

Si la transformación es a
presión constante

$$dP=0 \quad , \quad \text{luego} \quad dq_P = dh$$

$$\text{o sea: } c_p dT = dh \quad ; \quad dh = \frac{\partial h}{\partial T_P} dT + \frac{\partial h}{\partial P_T} dP$$

$$c_P = \frac{\partial h}{\partial T_P}$$

para gases reales,

o bien

$$c_P = \frac{dh}{dT_P}$$

para gases ideales

COMPARACION U Y H

ENERGIA INTERNA

■ En sistemas cerrados

■ $du = dq - P dv$

■ $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = c_v$

■ *Proceso Isocórico*

■ $u_f - u_i = q_v$

■ $u_f - u_i = \int c_v dT$

■ *Proceso Adiabático*

■ $u_f - u_i = - \int P dv$

ENTALPIA

■ En sistemas cerrados

■ $dh = dq + v dP$

■ $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P = c_P$

■ *Proceso Isobárico*

■ $h_f - h_i = q_P$

■ $h_f - h_i = \int c_P dT$

■ *Proceso Adiabático*

■ $h_f - h_i = \int v dP$

FIN PARTE II