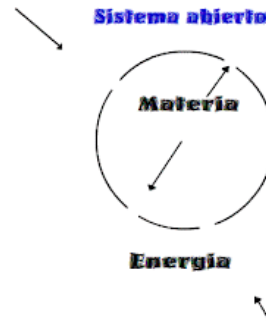


# Operaciones Unitarias 1

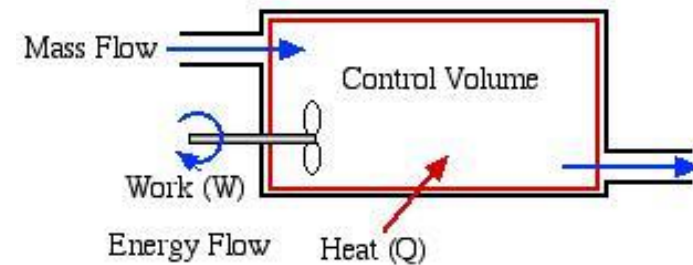
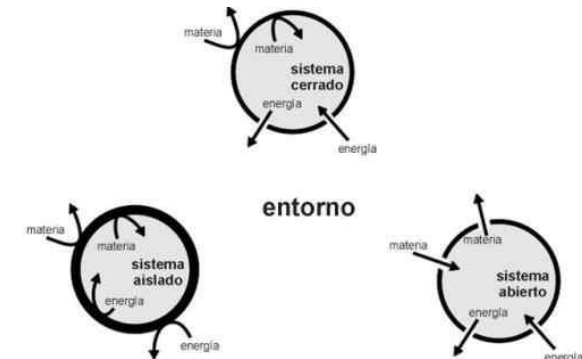
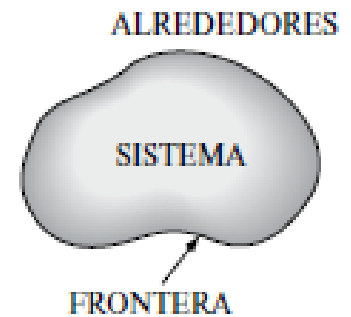
Conceptos termodinámicos asociados al  
transporte de fluidos

# Conceptos de Termodinámica sistema abierto, volumen y superficie de control

Un sistema termodinámico abierto es aquel que permite a través de sus fronteras, transferencias de masa y de energía (como calor y trabajo), con su entorno

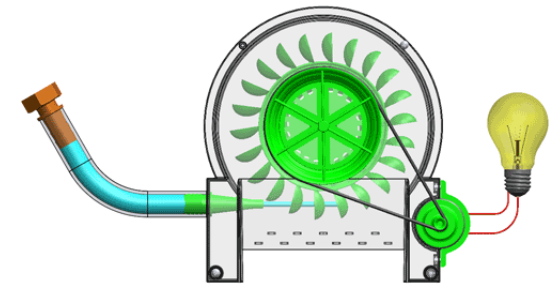
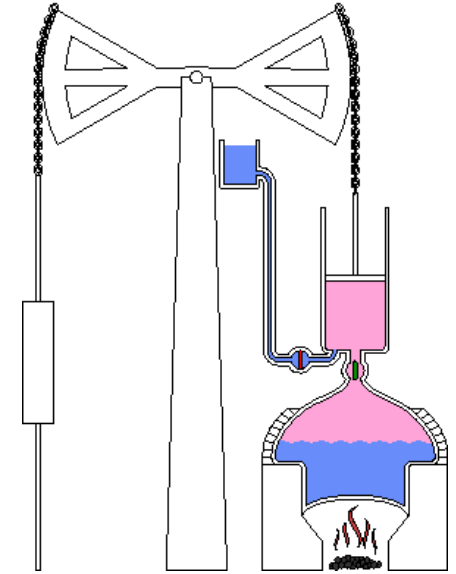


Un volumen de control es una región seleccionada de modo adecuado en el espacio. Encierra un dispositivo de transporte, o de transformación física / química que está asociado con flujo de masa y energía. El flujo por estos sistemas se estudia apropiadamente cuando se selecciona la región que se encuentra dentro de ellos como el volumen de control. Tanto masa como energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control. La frontera se constituye en su superficie. Normalmente asociado a un dispositivo o conjunto de dispositivos.



# Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

- Energía es el potencial para efectuar un trabajo. Diversas formas de energía: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear. Su suma es la energía Extensiva  $\underline{E}$  [J] (o Intensiva  $E$  [J.kg<sup>-1</sup>]) total de un sistema. En el movimiento de fluidos no son considerados la transformación de energía nuclear, química o térmica en energía mecánica. Asimismo, no incluyen transferencia de calor en cualquier cantidad significativa. Los sistemas se analizan considerando sólo las formas mecánicas de energía y los efectos de irreversibilidad asociados a su pérdida (es decir, a la conversión en energía térmica que no puede usarse para algún propósito útil).
- Las formas de la energía relacionadas con la estructura molecular de un sistema y el grado de actividad molecular se llaman energía microscópica. La suma de las formas microscópicas es la **energía interna** de un sistema y se denota por  $\underline{U}$  [J] (o  $U$  [J.kg<sup>-1</sup>]).
- La energía mecánica se define como la forma de energía que se puede convertir completa y directamente a trabajo mecánico por medio de un dispositivo mecánico.

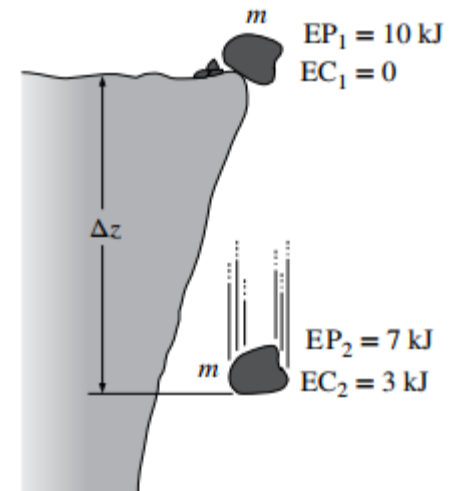
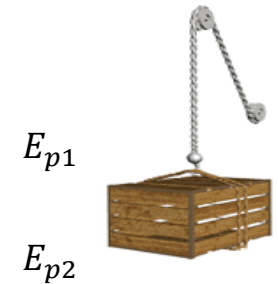


# Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

- Las formas comunes de la energía mecánica son la energía cinética y la potencial. Sin embargo, la energía térmica no es energía mecánica, puesto que no se puede convertir en trabajo de manera directa y por completo (2do principio de la termodinámica).
- La energía que un sistema tiene como resultado de su movimiento es **energía cinética**. Cuando todas las partes de un sistema se mueven a una velocidad media, la energía cinética por unidad de masa es  $E_c = \bar{v}^2 / 2$  [J.kg<sup>-1</sup>] ( $\bar{v}$  denota la velocidad media del sistema en relación con algún marco fijo de referencia). La energía que un sistema que tiene como resultado su posición en un campo gravitacional es **energía potencial**,  $E_p = gz$  [J.kg<sup>-1</sup>] donde  $g$  es la aceleración gravitacional y  $z$  es la elevación del centro de gravedad de un sistema en relación con algún plano de referencia seleccionado de manera arbitraria (*datum*).
- El primer principio de la termodinámica relaciona las diferentes formas de energía.



**Kinetic Energy  
= Motion**



# Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

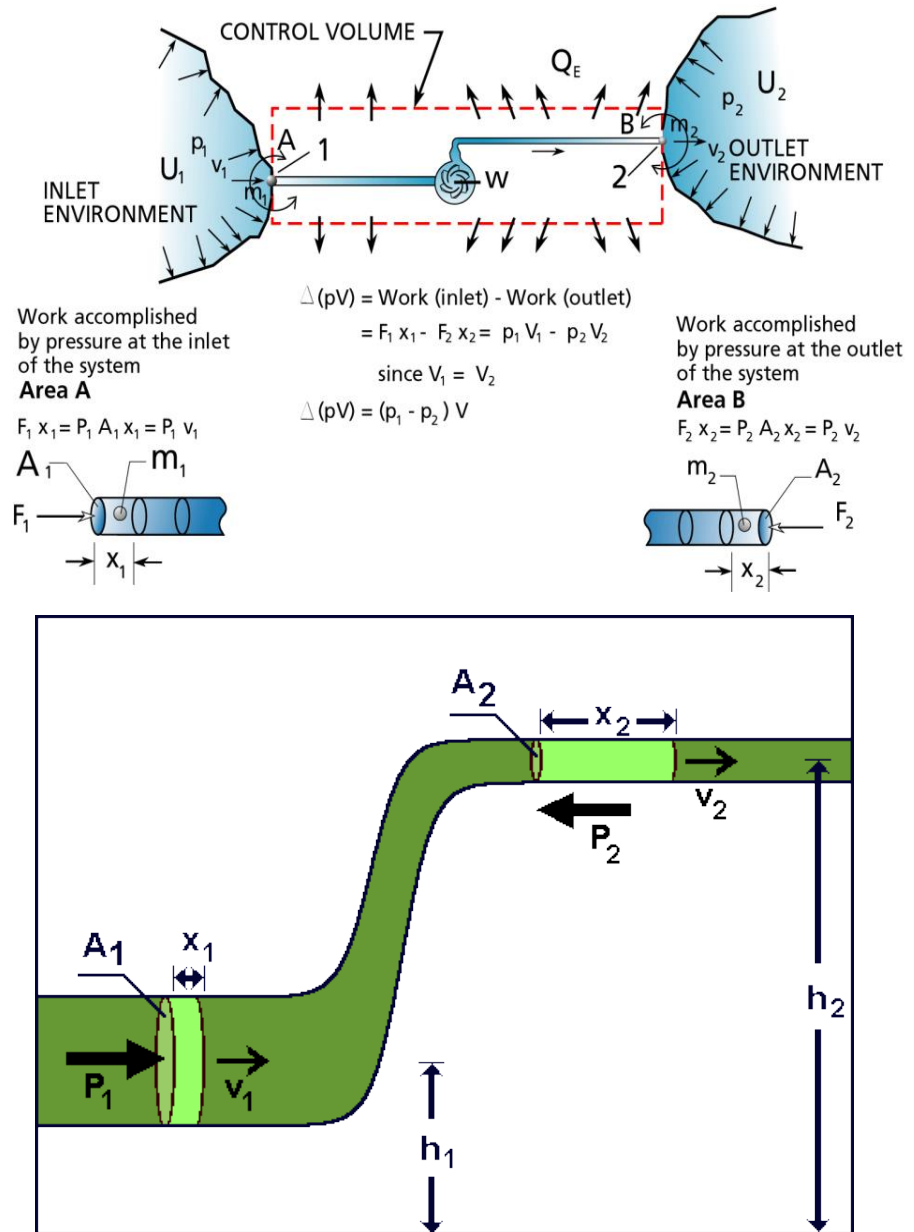
- La presión de un fluido que escurre está asociada con su energía mecánica. La unidad de presión  $Pa$  es equivalente a  $Pa = N \cdot m^{-2} = N \cdot m \cdot m^{-3} = J \cdot m^{-3}$ , (energía por unidad de volumen); el producto  $P \cdot V$ , o su equivalente  $P \cdot \rho^{-1}$ , tiene la unidad de  $J \cdot kg^{-1}$ , (energía por unidad de masa). La presión no es una forma de energía; está asociada a una cantidad de energía potencial almacenada por unidad de volumen. Una fuerza de presión ( $P \cdot dA_c$ ) que actúa sobre un fluido a lo largo de una distancia produce *trabajo del flujo o energía de flujo* por unidad de masa,  $(P/\rho)$ .

- La energía mecánica de un fluido que escurre por unidad

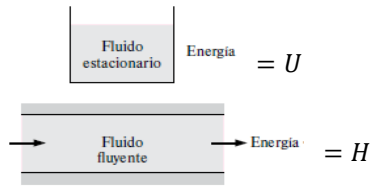
de masa es: 
$$E_{mec} = \frac{P}{\rho} + E_c + E_p = \frac{P}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz.$$

- La energía total de flujo es  $E_{flujo} = U + E_{mec} = U +$

$$\frac{P}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz$$



# Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

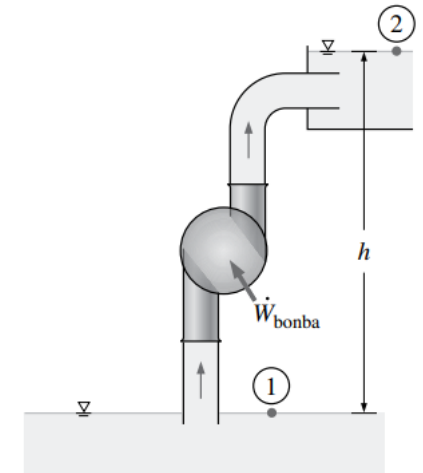
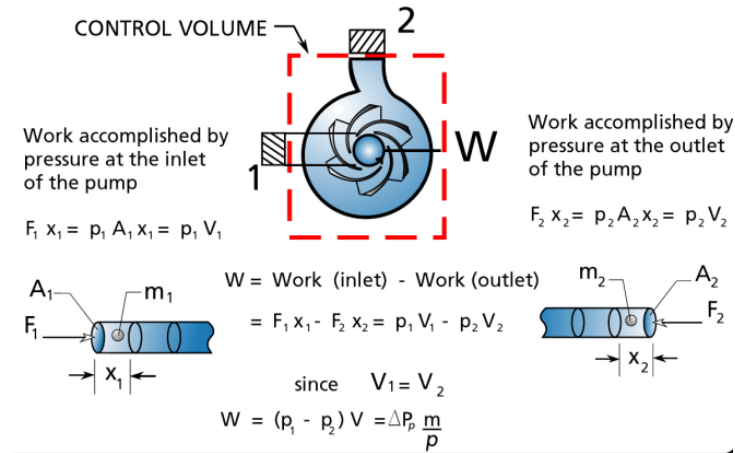


- La combinación  $U + PV = U + \frac{P}{\rho} = H$ , es la entalpía. Es a veces conveniente tratar el trabajo de flujo como parte de la energía del fluido y representar la energía microscópica de una corriente de fluido por la entalpía H.

$$E_{flujo} = H + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz$$

- Mas comúnmente, en mecánica de fluidos, en donde sólo interesa, para el transporte, la energía mecánica, el tratamiento es  $E_{flujo} = U + E_{mec} = U + \frac{P}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz$  y los cambios, manteniendo el principio de conservación, implica la reconversión (muy parcial) de U nuevamente en energía mecánica. El resto es disipación térmica (o irreversibilidad)
- El cambio de la energía mecánica (en ausencia de irreversibilidad)

$\Delta E_{mec} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2} + g\Delta z = w_s$  es trabajo mecánico que debe ser entregado ( $w_s > 0$ ) o extraído del sistema ( $w_s < 0$ ) mediante un dispositivo mecánico.



Flujo estacionario

$$V_1 = V_2 \approx 0$$

$$z_2 = z_1 + h$$

$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

$$\dot{E}_{mec, ent} = \dot{E}_{mec, sal} + \dot{E}_{mec, pérdida}$$

$$\dot{W}_{bomba} + mgz_1 = mgz_2 + \dot{E}_{mec, pérdida}$$

$$\dot{W}_{bomba} = mgh + \dot{E}_{mec, pérdida}$$

# Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \frac{d}{dt} \int_{VC} E \rho dV + \sum_{sal} \dot{m} \left( \frac{P}{\rho} + U + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( \frac{P}{\rho} + U + \frac{v^2}{2} + gz \right) \left[ \frac{J}{s} \right]$$

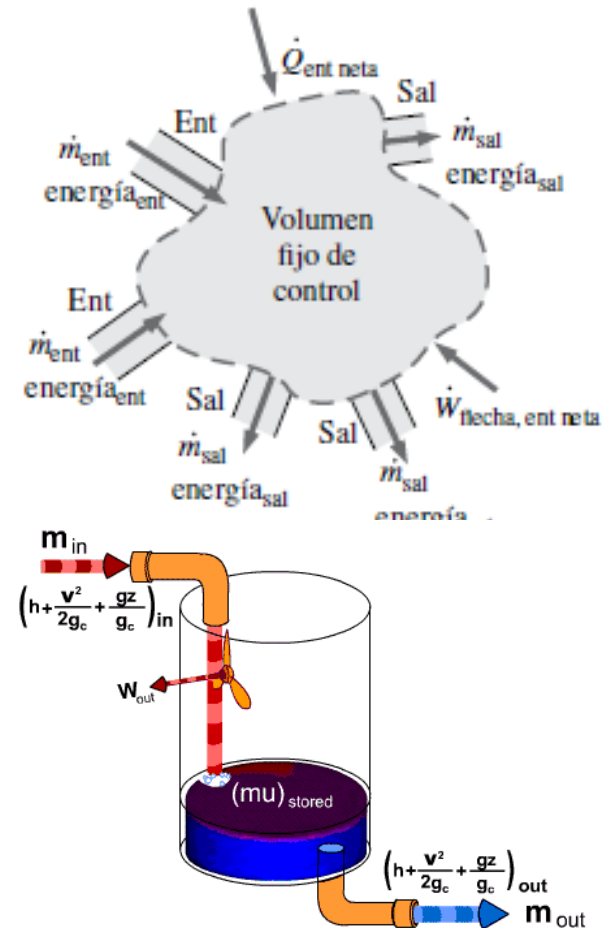
Donde:  $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$  flujo másico;  $\dot{Q}_{neta} = \dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sal} \left[ \frac{J}{s} \right]$  es la tasa de transferencia neta de calor hacia o desde el sistema.  $\dot{W}_{neta} = \dot{W}_{ent} - \dot{W}_{sal}$  es la transferencia neta de potencia de eje (el eje o flecha atraviesa la superficie de control) hacia o desde el sistema

$E = U + \frac{v^2}{2} + gz \left[ \frac{m^2}{s^2} \right] \equiv \left[ \frac{J}{kg} \right]$  contenido de energía interna ( $U \left[ \frac{J}{kg} \right]$ ), cinética ( $\frac{v^2}{2} \left[ \frac{m^2}{s^2} \right]$ ) y potencial ( $gz \left[ \frac{m^2}{s^2} \right]$ ) por unidad de masa de fluido.

$\frac{P}{\rho} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  es el trabajo de flujo o trabajo PV, el trabajo relacionado con empujar un fluido hacia adentro o hacia afuera de un volumen de control por unidad de masa.

$$H = U + PV = U + \frac{P}{\rho} \text{ entalpia específica}$$

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \frac{d}{dt} \int_{VC} E \rho dV + \sum_{sal} \dot{m} \left( H + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( H + \frac{v^2}{2} + gz \right) \left[ \frac{J}{s} \right]$$



# Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \sum_{sal} \dot{m} \left( H + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( H + \frac{v^2}{2} + gz \right) \left[ \frac{J}{s} \right]$$

Para dispositivos de una sola corriente

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \dot{m} \left( H_2 - H_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \left[ \frac{J}{s} \right]$$

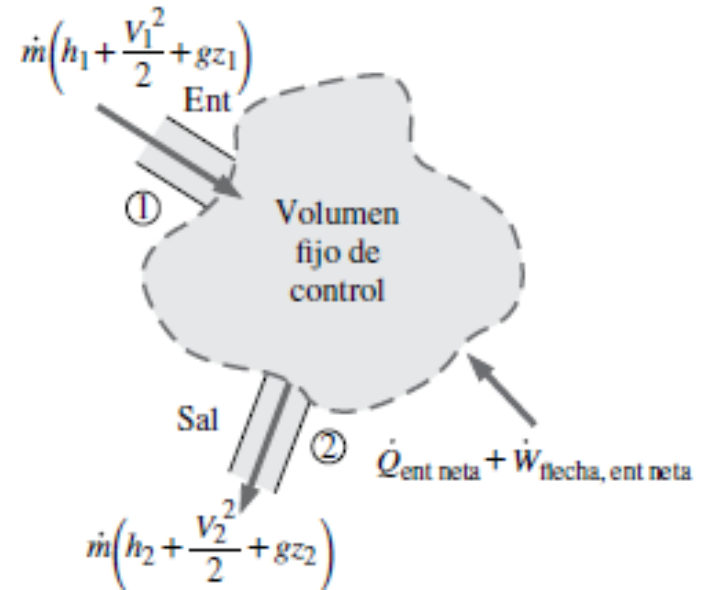
$$q_{neta} + w_{neta} = H_2 - H_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

un nuevo reordenamiento conveniente:

$$w_{neta} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + (U_2 - U_1 - q_{neta}) \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

para flujo ideal (sin irreversibilidad)  $U_2 - U_1 - q_{neta} = 0$ ; sin pérdida de energía mecánica  $U_2 - U_1 = q_{neta}$ .

Si  $q_{neta} = 0$  (situación común en los sistemas de transporte) entonces  $U_2 = U_1$





## Conceptos de Termodinámica 2do Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

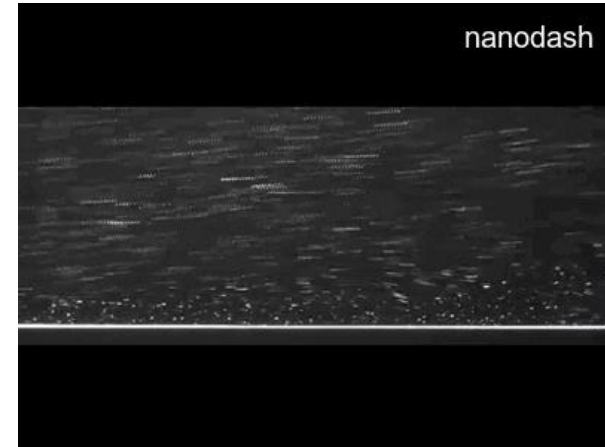
El fenómeno de irreversibilidad aparece cuando  $U_2 - U_1 > 0$ ; implica un incremento de energía interna entre los puntos 1 y 2

El escurrimiento de la porción de fluido inmediatamente en contacto con una superficie sólida es nulo (condición de no deslizamiento o de estancamiento). Se originan regiones de fluido con diferencias en su velocidad. Estas diferencias se traducen como transferencia de cantidad de movimiento.

Desde el punto de vista microscópico, esta transferencia está asociada al movimiento al azar o asociados a remolinos (turbulencia) en direcciones diferentes a la observada en el flujo macroscópico de las especies moleculares existentes y supone la colisión **inelástica** de las mismas. Las moléculas más lentas siempre ralentizan el movimiento masivo de las moléculas más rápidas. Esto genera compresión y, desde un punto de vista termodinámico, incremento local de temperatura (y eventualmente presión).

Como consecuencia de estos incrementos, la energía interna aumenta  $U_2 > U_1$

Causas de la irreversibilidad (o de las pérdidas por “fricción” o pérdidas de carga)



fricción o irreversibilidad?

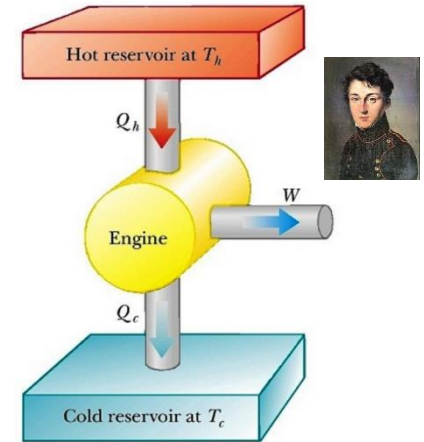
## Conceptos de Termodinámica 2do Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

¿Puede esta energía interna reconvertirse nuevamente y completamente en energía mecánica? Según el 2do Principio de la Termodinámica, **no**

Una consecuencia de este principio es que la energía mecánica puede ser convertida completamente en energía térmica, pero no la conversión inversa.

De hecho, la eficiencia no puede ser mayor que la obtenida mediante un motor térmico ideal y está definida en términos de las temperaturas de los reservorios caliente y frío. Por ejemplo, por cada 1°C que cada porción de fluido incremente su temperatura a partir de la temperatura ambiente (25°C), como consecuencia de los fenómenos de estancamiento y compresión, la cantidad de energía que podría ser reconvertida en trabajo (energía mecánica utilizable para el flujo) no puede ser mayor al 0,34 %. A los fines prácticos, la reconversión es despreciable, por lo que el incremento en energía interna asociado a los fenómenos de estancamiento y compresión es disipado como transferencia de calor (o energía térmica) al medio ambiente y no es recuperable como energía útil para el flujo del fluido; es considerada, por lo tanto, pérdida de energía mecánica, por unidad de masa  $e_L$ .

$$w_{pump} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + w_{turbina} + e_L \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad e_L \text{ es energía mecánica pérdida por unidad de masa}$$



No toda la energía térmica entregada por un reservorio caliente puede ser convertida en capacidad de efectuar trabajo mecánico