0.5 setgray0 0.5 setgray1

0. Inicio

II. Conservación de masa y energía

(use los comandos de su visor pdf para navegar las fichas)

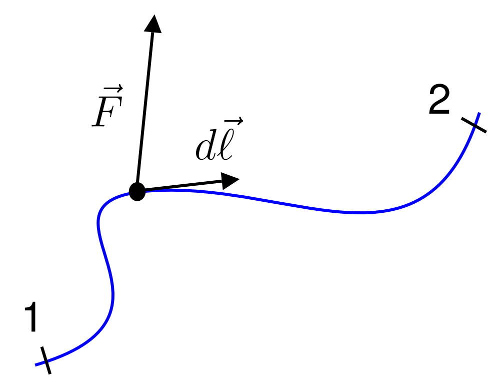
1. trabajo

Existen sólo dos formas en las que una masa de control puede intercambiar energía con su entorno: trabajo y calor.

El calor puede definirse como la energía intercambiada por la masa de control en virtud únicamente de una diferencia de temperatura con el ambiente. El trabajo, puede pensarse simplemente como la parte de la energía intercambiada que no es calor.

En Mecánica, el trabajo de una fuerza se calcula a partir de la integral de camino sobre la trayectoría de la partícula,

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{\ell}$$



En Termodinámica, es fácil asociar éste trabajo al desplazamiento cuasiestático de una parte de la superficie de control (trabajo de frontera). Sin embargo, existen otros tipos de trabajo.

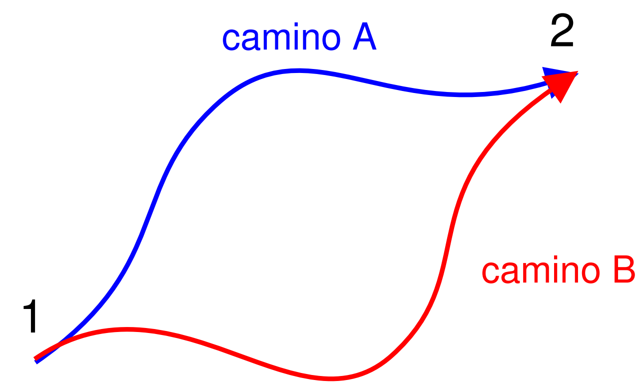
2. tipos de trabajo

- El trabajo (y el calor) no es una función de estado sino una función de camino: puede ser diferente para dos procesos entre los mismos estados inicial y final.
- **Convención de signos:**
  Un trabajo positivo representa una transferencia de energía del sistema al ambiente.
- Existen muchos tipos de trabajo: de frontera, de eje, de flujo, trabajo eléctrico, magnético, etc.
- En el caso de una sustancia compresible simple interesa el trabajo de frontera, trabajo de eje y el trabajo de flujo.

3. función de camino

Si $z = f(x,y)$ es una función de camino, el orden de diferenciación es importante

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x \neq \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y$$



El diferencial de f es inexacto,

$$\oint \delta z \neq 0$$

y su integral entre dos puntos depende del camino elegido. En general,

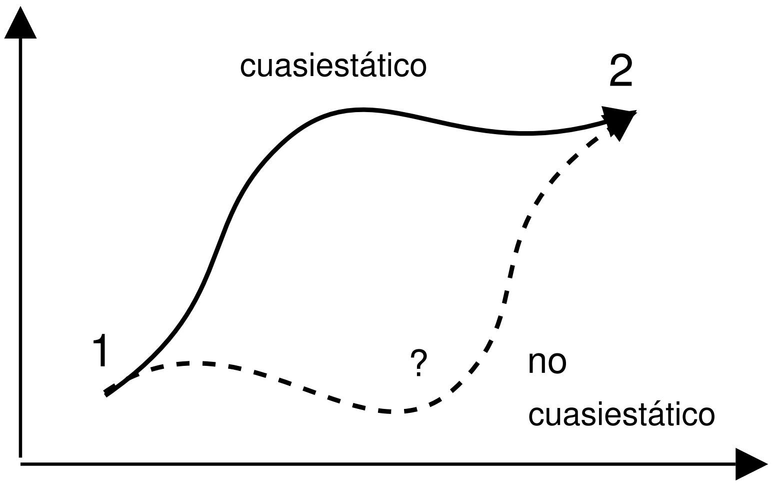
$$\left[\int_1^2 \delta z\right]_A \neq \left[\int_1^2 \delta z\right]_B$$

Notación: usamos δ para indicar un diferencial inexacto.

4. proceso cuasiestático

En un proceso cuasiestático el sistema está en todo momento arbitrariamente cerca de un estado de equilibrio.

Este tipo de procesos se puede indicar en un diagrama de propiedades como una línea contínua.

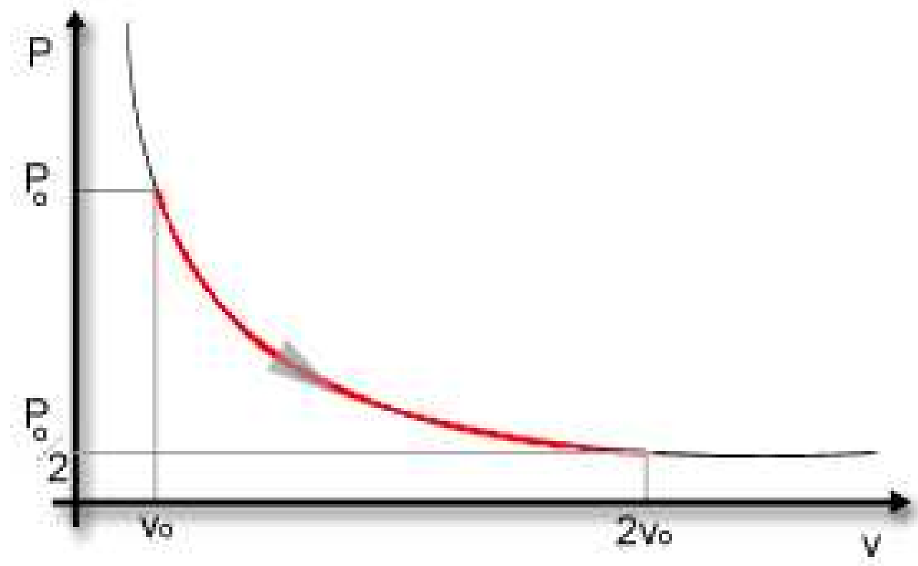


los procesos no cuasiestáticos se indican por una línea punteada, ya que no hay estados de equilibrio intermedios bien definidos.

ejemplos: expansión cuasiestática expansión no cuasiestática

5a. expansión cuasiestática

El proceso de expansión cuasi-estática se representa en un diagrama P-V

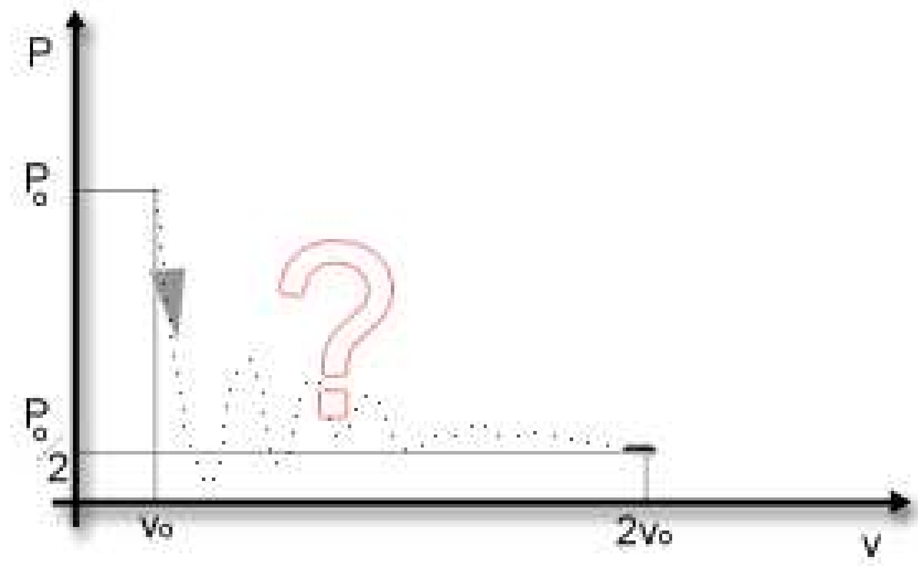


Ver animación de una expansión cuasiestática

[sigue]

5b. expansión súbita

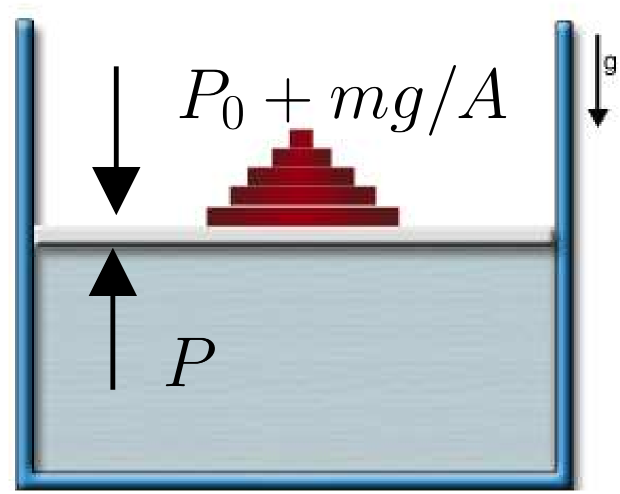
En cambio, una **expansión súbita** no recorre estados de equilibrio bien definidos,



Por convención, se representa por una línea punteada que une el estado de partida y el de llegada.

6. trabajo de frontera

El trabajo de frontera está asociado al movimiento de la superficie de control. Si el proceso se da en condiciones de cuasi-equilibrio, se puede vincular el trabajo con la presión en el sistema,



$$W = \int_1^2 F d\ell = \int_1^2 P dV$$

Por ejemplo, para un pistón de sección transversal A,

$$P = F/A \qquad A d\ell = dV$$

Si el proceso es cuasiestático $P = P_0 + \frac{mg}{A}$ y $W = P\Delta V$.

7. Calor

El calor puede definirse como la energía que atraviesa la superficie de control debido a una diferencia de temperatura.

- el calor no se almacena! Un ingreso de calor al sistema puede resultar en un aumento de la energía interna.
- **Convención de signos:** el calor positivo ingresa al sistema.
- el calor intercambiado en un proceso es una función de camino.
- Las definiciones de calor y de trabajo involucran a la frontera del sistema. Si un flujo de energía es calor o trabajo, depende de la definición del sistema.

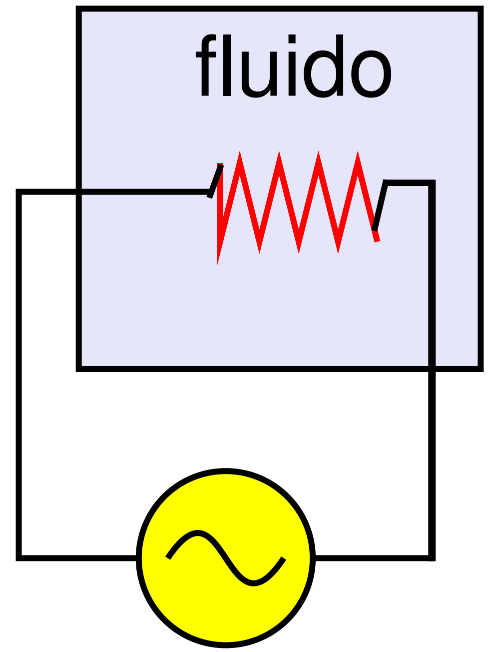
[sigue]

8a. Calor - ejemplo 1

En este ejemplo, una fuente de fem aporta energía a un fluido, que consideramos como el sistema.

La resistencia se calienta por efecto Joule y eleva su temperatura en relación al fluido.

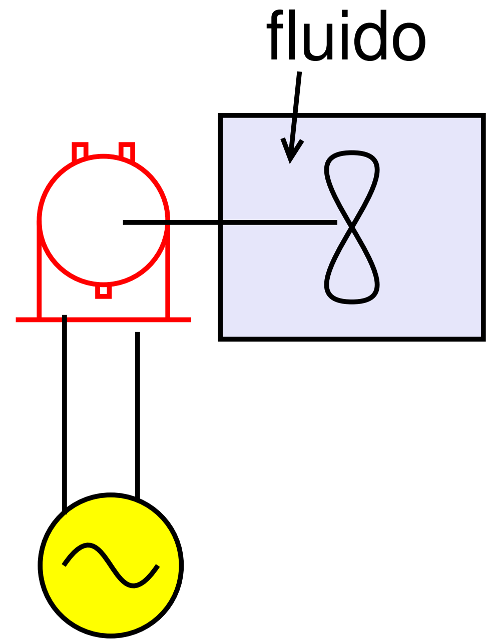
Se transfiere **calor**.



[sigue]

8b. Calor - ejemplo 1

La resistencia se sustituyó por un agitador que aporta energía al fluido, ahora la transferencia de energía no es consecuencia de una diferencia de temperatura.



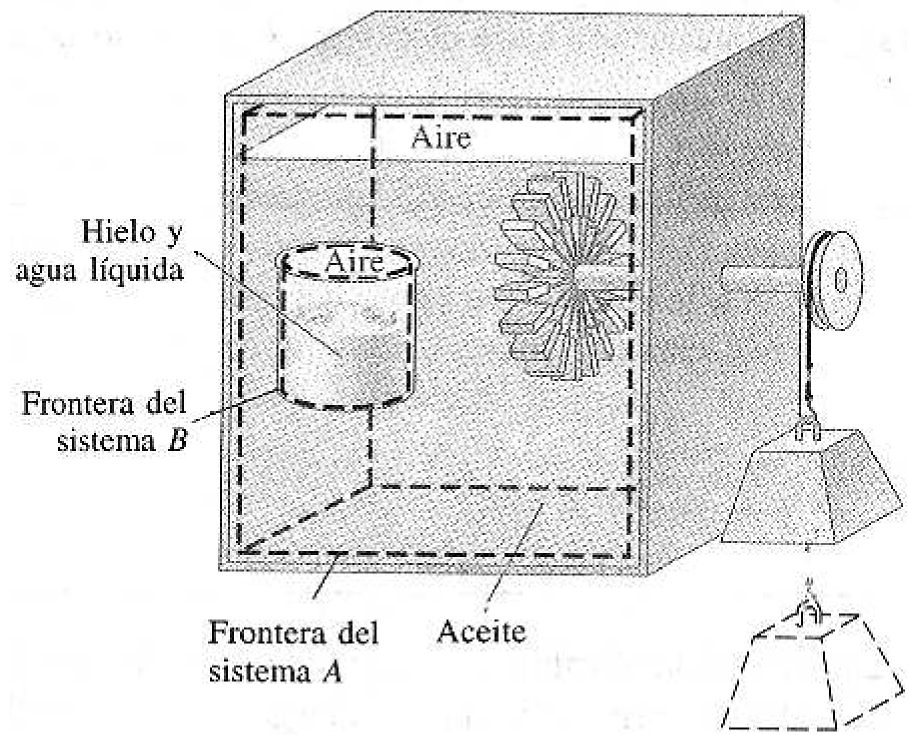
En este caso, se transfiere **trabajo** (de eje) al fluido.

9a. Trabajo y Calor - ejemplo 2

La caja adiabática contiene aceite y aire, además de un cilindro metálico con agua y hielo en contacto con aire. La caja define el volumen de control del **sistema A**.

El cilindro define el volumen de control del **sistema B**.

El **sistema C** es la caja, excluyendo el cilindro y su contenido (A=B+C).

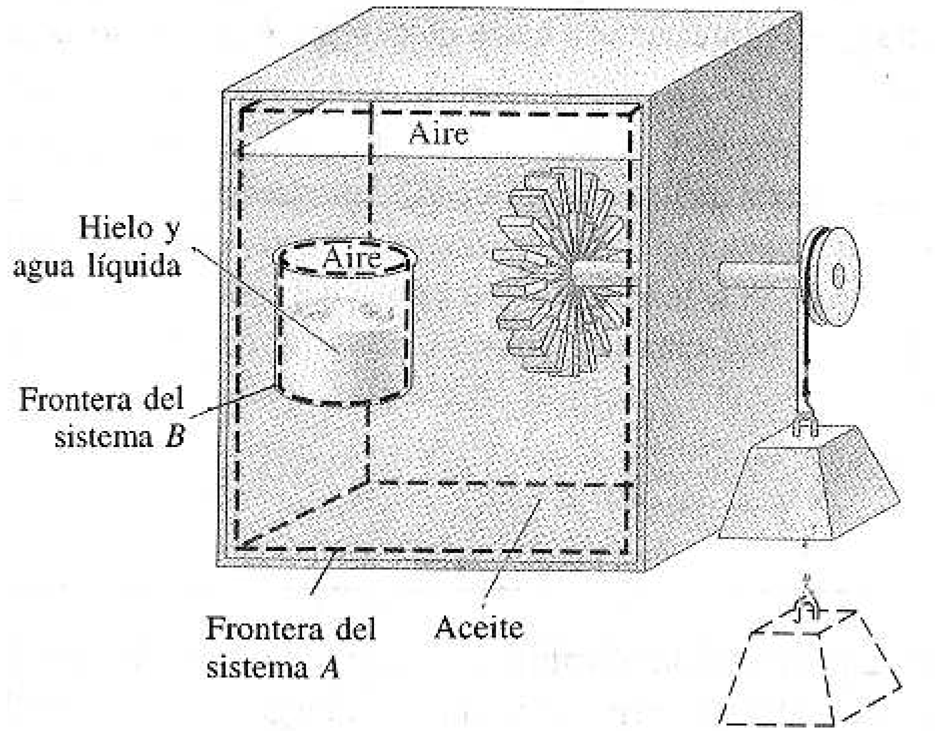


(de: Jones Y Dugan, Ingeniería Termodinámica, Simon & Schuster)

[sigue]

9b. Trabajo y Calor - ejemplo 2

Se deja caer el peso, las aspas giran, se eleva la temperatura del aceite y se derrite algo de hielo en el cilindro, de modo que al final del proceso la temperatura del aceite es la misma que al inicio.



(de: Jones Y Dugan, Ingeniería Termodinámica, Simon & Schuster)

¿Puede identificar el calor y/o trabajo intercambiado por cada sistema?

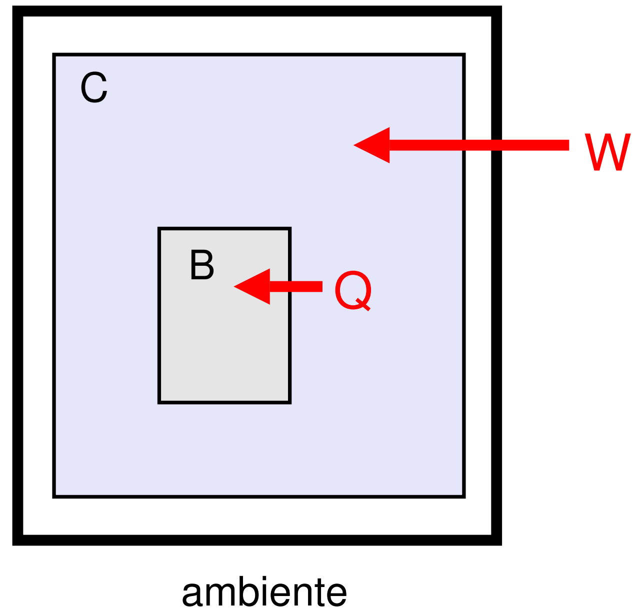
[sigue]

9c. Trabajo y Calor - ejemplo 2

El **sistema A** recibe trabajo del ambiente (su frontera es adiabática) y se eleva la temperatura del aceite (sistema C).

En virtud de la diferencia de temperatura, se transfiere calor al agua en el cilindro (**sistema B**) y se derrite algo de hielo.

La transferencia de calor cesa cuando se equilibran las temperaturas del agua y el aceite en el valor inicial. El **sistema C** recibió trabajo del entorno y entregó calor (al sistema B).



(se desprecian los pequeños cambios de presión en B resultantes de la fusión del hielo)

10. proceso cíclico

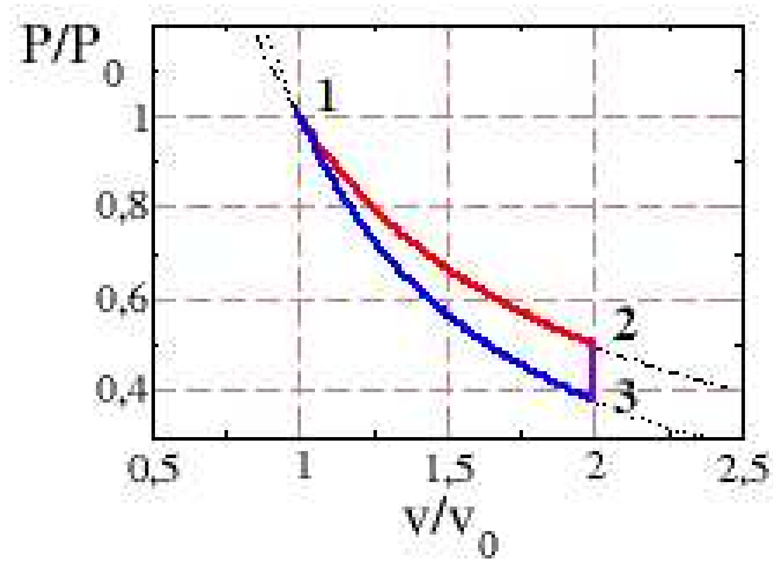
Un proceso cíclico es aquel que retorna a su estado de partida.

El siguiente es un ejemplo basado en un gas ideal, de un ciclo de tres etapas:

etapa 1-2: expansión isoterma

etapa 2-3: enfriamiento isócoro

etapa 3-1: compresión adiabática

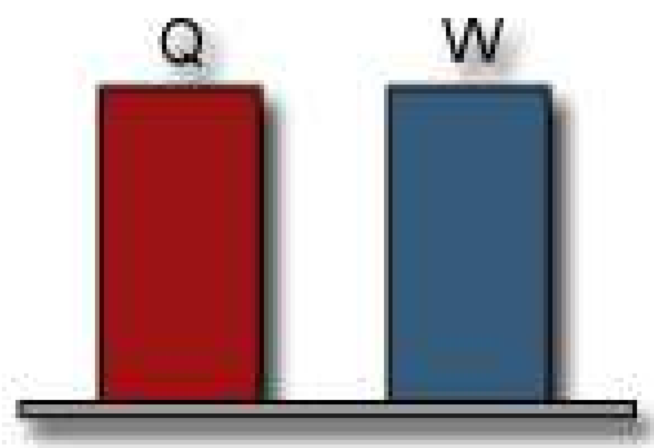


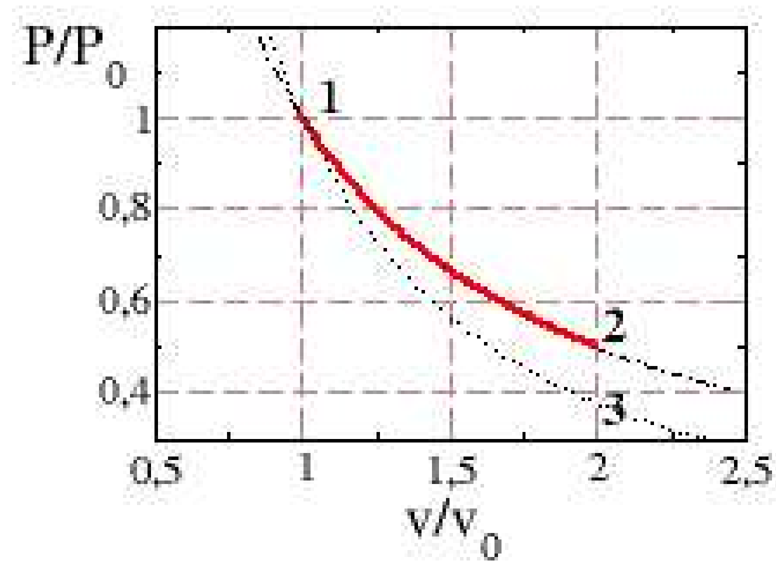
$$\oint \delta W = \oint \delta Q$$

[sigue]

10a. proceso cíclico: etapa 1-2

etapa 1-2: expansión isoterma



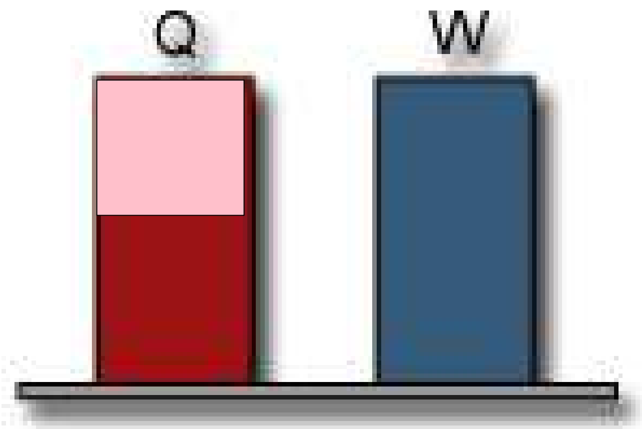


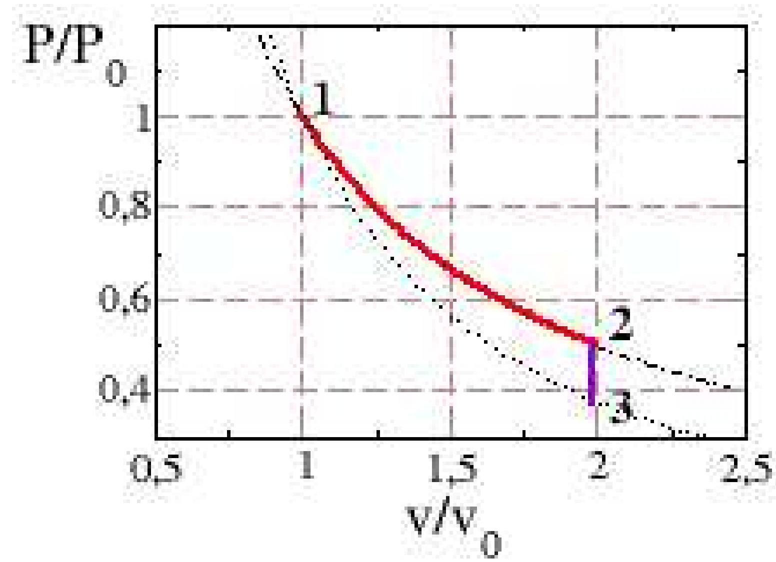
$$\int_1^2 \delta Q = \int_1^2 \delta W > 0$$

[sigue]

10b. proceso cíclico: etapa 2-3

etapa 2-3: enfriamiento isócoro



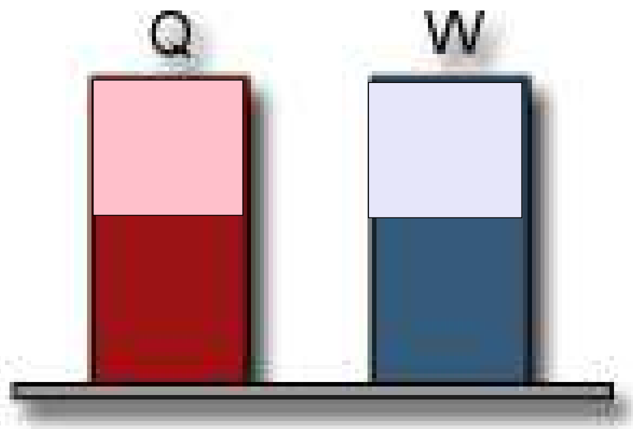


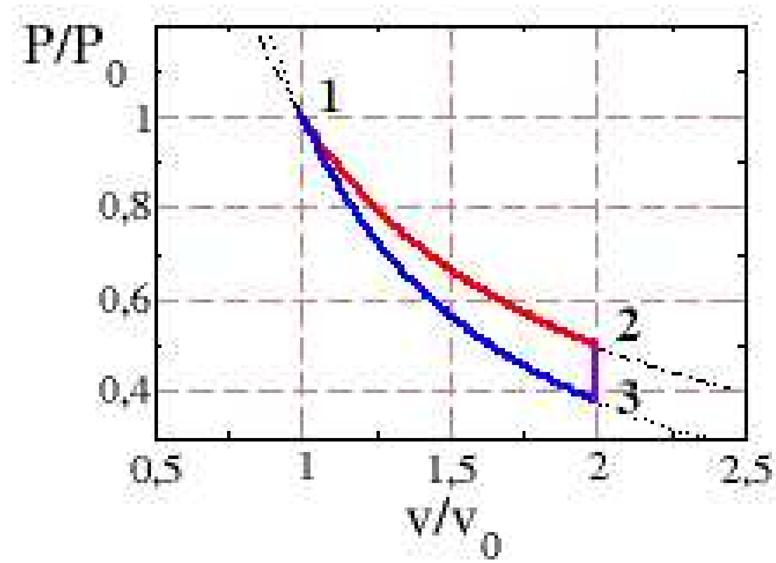
$$\int_2^3 \delta Q < 0 \qquad \int_2^3 \delta W = 0$$

[sigue]

10c. proceso cíclico: etapa 3-1

etapa 3-1: compresión adiabática





$$\int_3^1 \delta Q = 0 \qquad \int_3^1 \delta W < 0$$

11. primera ley: procesos cíclicos

Experimentalmente, se comprueba que el calor y el trabajo intercambiados en cualquier proceso cíclico son iguales,

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

de modo que la cantidad $dE \equiv \delta Q - \delta W$ es un diferencial exacto,

$$\oint dE = \oint (\delta Q - \delta W) = 0$$

La variable de estado E es la energía total del sistema.

Usualmente se descompone en términos de energía cinética, potencial e interna,

$$E = E_c + E_p + U$$

12. primera ley: sistema cerrado (masa de control)

Para un proceso diferencial en una masa de control,

$$dE = \delta Q - \delta W$$

o, para un proceso finito,

$$\Delta E = E_2 - E_1 = Q - W$$

También se puede expresar en forma instantánea, como

$$\dot{E} = \dot{Q} - \dot{W}$$

donde

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt}, \quad \dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt}, \quad \dot{W} = \frac{\delta W}{dt}$$

13. sistema abierto

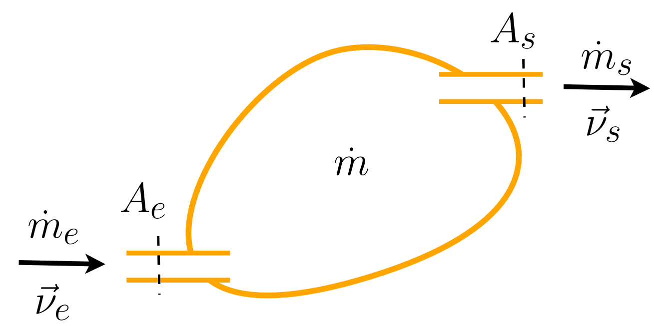
conservación de la masa

un flujo másico $\dot{m}$ de velocidad $\vec{\nu}$ a través de una sección transversal A representa un caudal νA. La relación es

$$\dot{m}_e = \rho_e \nu_e A_e, \quad \dot{m}_s = \rho_s \nu_s A_s$$

para la entrada o salida, con $\rho = 1/v$, la densidad del fluído.

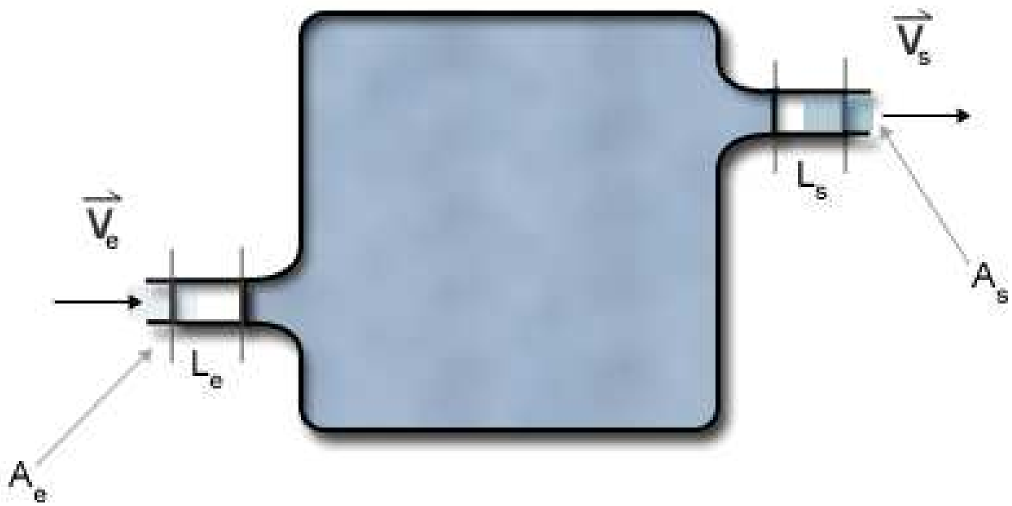
$$\dot{m} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$$



Se supone que el fluído tiene propiedades bien definidas y uniformes en la sección de entrada y salida.

14a. sistema abierto: trabajo de flujo

Se requiere trabajo para mover el fluido a través del volumen de control,



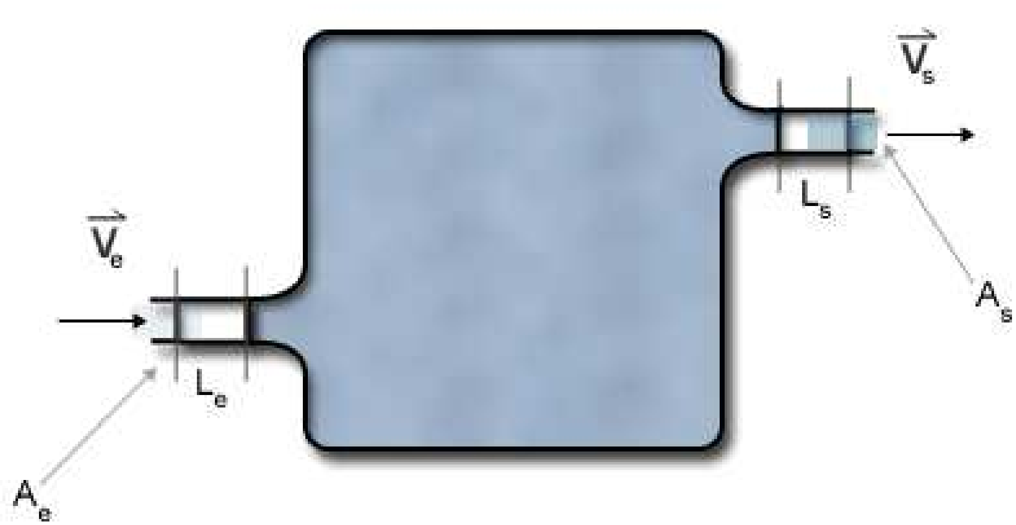
En un tiempo dt, ingresa al volumen de control un elemento de fluido dm_e y se intercambia trabajo a una tasa,

[sigue]

$$\dot{W}_e = -P_e \frac{dV_e}{dt} = -\dot{m}_e P_e v_e < 0$$

14b. sistema abierto: trabajo de flujo

Se requiere trabajo para mover el fluido a través del volumen de control,

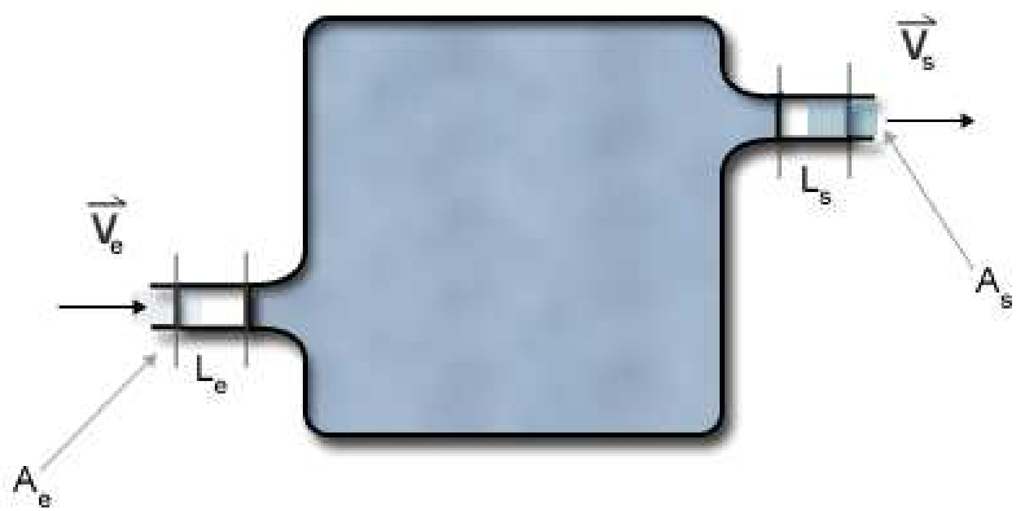


En un tiempo dt, sale del volumen de control un elemento de fluido dm_s y el sistema realiza trabajo para expulsar el fluido a una tasa [sigue]

$$\dot{W}_s = P_s \frac{dV_s}{dt} = \dot{m}_s P_s v_s > 0$$

14c. sistema abierto: trabajo de flujo

Se requiere trabajo para mover el fluido a través del volumen de control,



En un tiempo dt, el trabajo por unidad de tiempo asociado a la circulación del fluido, es

$$\dot{W}_{flujo} = \dot{m}_s P_s v_s - \dot{m}_e P_e v_e$$

15. primera ley – sistema abierto

A partir de la primera ley para una masa de control, resulta el balance de energía para un sistema abierto. En forma diferencial,

$$dE = \sum_e dm_e \tilde{h}_e - \sum_s dm_s \tilde{h}_s + \delta Q - \delta W$$

o, en forma instantánea,

$$\dot{E} = \sum_e \dot{m}_e \tilde{h}_e - \sum_s \dot{m}_s \tilde{h}_s + \dot{Q} - \dot{W}$$

donde $\dot{W}$ incluye todas las formas de trabajo intercambiado con el entorno, excepto el trabajo de flujo y

$$\tilde{h} \equiv h + e_c + e_p = e + Pv$$

es la **entalpía generalizada** por unidad de masa.

16a. primera ley – modelo EUFU

EUFU: estado uniforme, flujo uniforme

- estado en el volumen de control es uniforme
- flujos másicos que atraviesan la superficie de control tienen propiedades uniformes en las secciones transversales correspondientes,

la integral en el tiempo entre $[t_i, t_f]$ de la primera ley para abiertos es

$$\Delta E = m_f e_f - m_i e_i = \sum_e m_e \bar{\tilde{h}}_e - \sum_s m_s \bar{\tilde{h}}_s + Q - W$$

donde

[sigue]

16b. primera ley – modelo EUFU

$$\Delta E = m_f e_f - m_i e_i = \sum_e m_e \bar{\tilde{h}}_e - \sum_s m_s \bar{\tilde{h}}_s + Q - W$$

- i, f indican propiedades iniciales y finales en el volumen de control.
- $Q, (W)$ representa el calor (trabajo) neto intercambiado en el proceso.
- $m_e(m_s)$ es la masa total que entro (salió) del volumen de control en el intervalo de tiempo considerado.

[sigue]

16c. primera ley – modelo EUFU

- Si las propiedades del flujo varían se consideran sus valores medios en el proceso, por ejemplo, para una propiedad x del flujo entrante

$$m_e \bar{x}_e = \int_{t_i}^{t_f} \dot{m}_e(t) x_e(t)\, dt = \int_0^{m_e} x(m'_e) dm'_e \approx \frac{1}{2}\left(x_i + x_f\right)$$

y similar para una propiedad x_s asociada al flujo saliente. La expresión en negro es exacta.

- la aproximación lineal

$$m_e \bar{x}_e \approx \frac{m_e}{2}\left(x_i + x_f\right)$$

puede no ser adecuada en aplicaciones concretas donde la variación de las propiedades es significativa y no lineal.

17. primera ley: modelo RPFE

RPFE = régimen permanente, flujo estable

- las propiedades del volumen de control no varían en el tiempo.
- los flujos másicos y las propiedades del flujo entrante/saliente no varían en el tiempo.
- el calor y el trabajo se intercambian a tasas constantes.

la conservación de la masa en el modelo RPFE implica

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s$$

y, dado que $\dot{E} = 0$, la primera ley se reduce a

$$\sum_s \dot{m}_s \tilde{h}_s - \sum_e \dot{m}_e \tilde{h}_e = \dot{Q} - \dot{W}$$

18. primera ley – RPFE

una entrada - una salida (1-1)

en este caso, por conservación de la masa,

$$\dot{m} = \dot{m}_e = \dot{m}_s$$

y se puede expresar la primera ley por unidad de masa circulante

$$\Delta' \tilde{h} \equiv \tilde{h}_s - \tilde{h}_e = q - w$$

donde

$$q \equiv \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \qquad\qquad w \equiv \frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

son cantidades por unidad de masa circulante.

La ecuación de Bernoulli para un flujo adiabático reversible sin trabajo, es un caso particular de esta expresión. Vea la ficha 6c de entropía, donde se ve que para éste caso: $\tilde{h} = u + Pv + e_c + e_p =$cte.