Termodinámica (FIS1523)

Flujos másicos

Felipe Isaule
felipe.isaule@uc.cl

Lunes 12 de Mayo de 2025

Clase 17: Flujos másicos

- Conservación de la masa y flujos másicos.
- Trabajo y energía de un fluido.
- Flujos estacionarios.

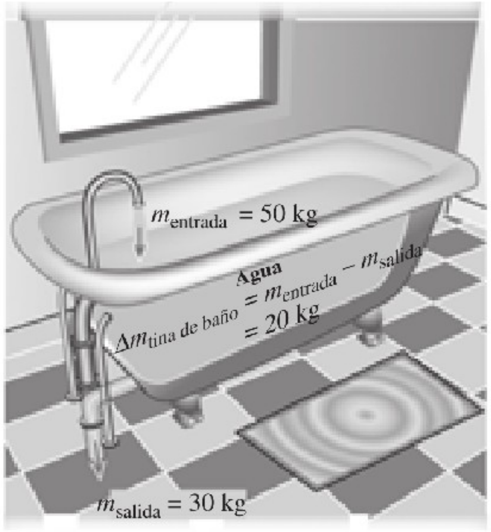
- Bibliografía recomendada:
  - Cengel (5-1, 5-2, 5-3).

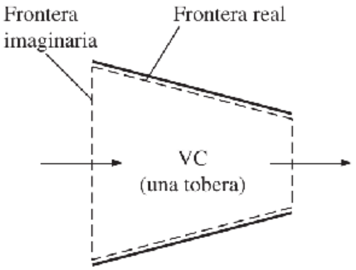
Clase 17: Flujos másicos

- **Conservación de la masa y flujos másicos.**
- Trabajo y energía de un fluido.
- Flujos estacionarios.

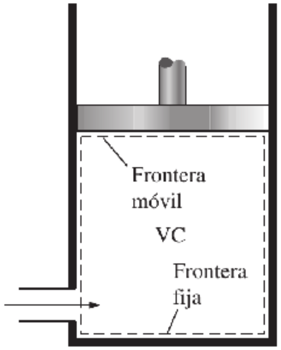
Conservación de la masa

- Un principio fundamental de la naturaleza es la **conservación de la masa**.
- En sistemas cerrados la conservación de masa ya se encuentra incluída (no hay cambio de masa).
- En esta unidad utilizaremos esta conservación para estudiar **flujos másicos** en **sistemas abiertos** (volúmenes de control).





a) Un volumen de control con fronteras real e imaginaria



b) Un volumen de control con fronteras fija y móvil

Balance de masa

- La **conservación del masa** la podemos escribir como:

$$\boxed{m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = \Delta m.}$$

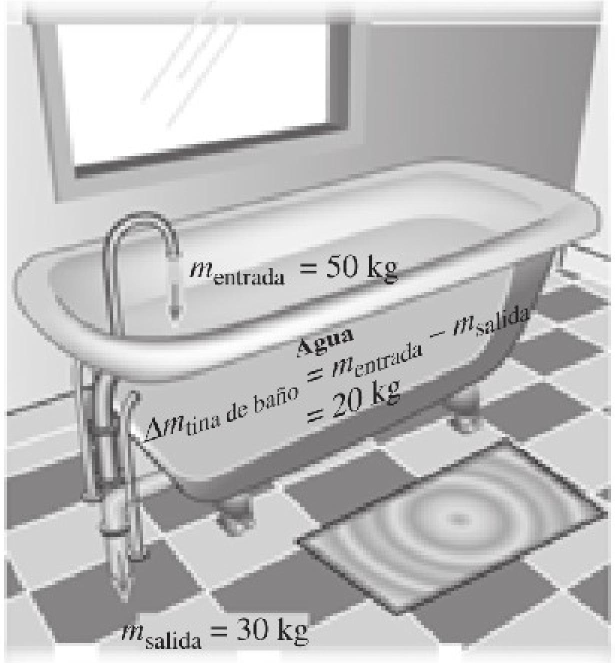
- En forma de tasas:

$$\dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{salida}} = \frac{dm}{dt}.$$

- Estas dos ecuaciones comunmente son llamadas **balances de masa**.

- Notar que en un sistema cerrado:

$$\frac{dm}{dt} = 0.$$



Conservación de la masa

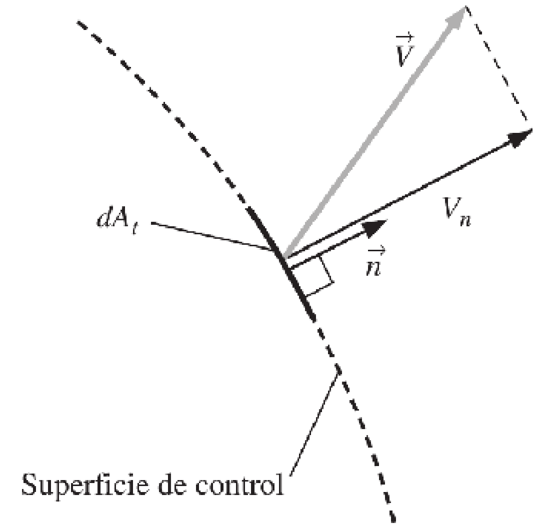
- La **masa se puede convertir en energía** debido a la **equivalencia masa-energía**:

$$E = mc^2.$$

- Esto significa que, en estricto rigor, sólo la energía se conserva.
- Sin embargo, en la vida cotidiana en la **vida cotidiana** podemos asumir que la **masa** y **energía** se **conservan** de manera **independiente**.
- Lo anterior es porque, a excepción de reacciones nucleares, conversiones masa-energía son insignificantes.

Flujo másico

- La cantidad de **masa** que pasa por una **sección transveral** por **unidad de tiempo** se llama **flujo másico**.



- El **flujo másico diferencial**:

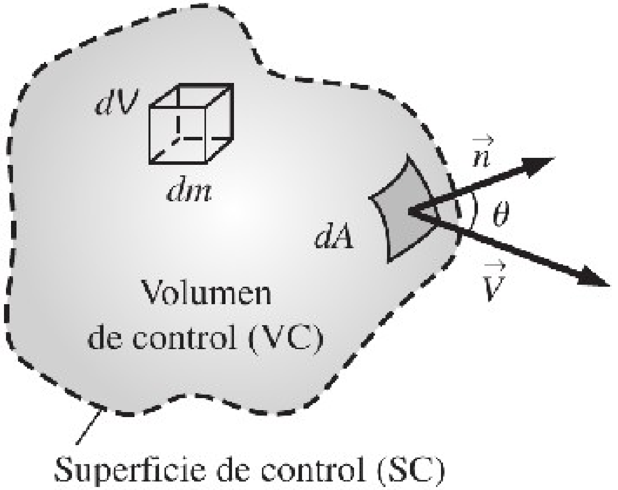
$$\boxed{\delta\dot{m} = \rho v_n dA_t,}$$

donde ρ es la densidad, dA_t es el diferencial del area transversa, y v_n es la velocidad ortogonal a la superficie

$$v_n = v\cos\theta = \vec{v}\cdot\vec{n}.$$

- El **flujo másico total**:

$$\dot{m} = \int_{A_t} \rho v_n dA_t.$$



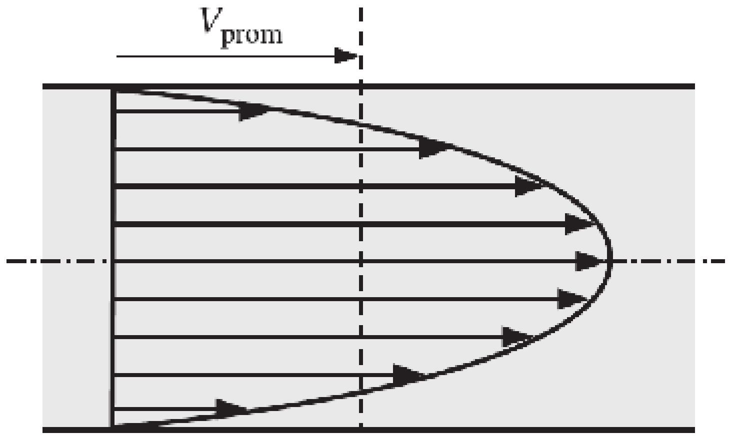
Flujo másico

- En muchos casos la **densidad** ρ se puede asumir **constante**.
- Además, si bien la velocidad nunca es constante, se puede aproximar por una **velocidad** constante **promedio**:

$$v_{n,\mathrm{prom}} = \frac{1}{A_t}\int_{A_t} v_n dA_t.$$

- En este caso, podemos escribir el flujo másico como:

$$\boxed{\dot{m} = \rho v_{n,\mathrm{prom}} A_t.}$$



La velocidad promedio V_{prom} se define como la rapidez promedio a través de una sección transversal.

Flujo volumétrico

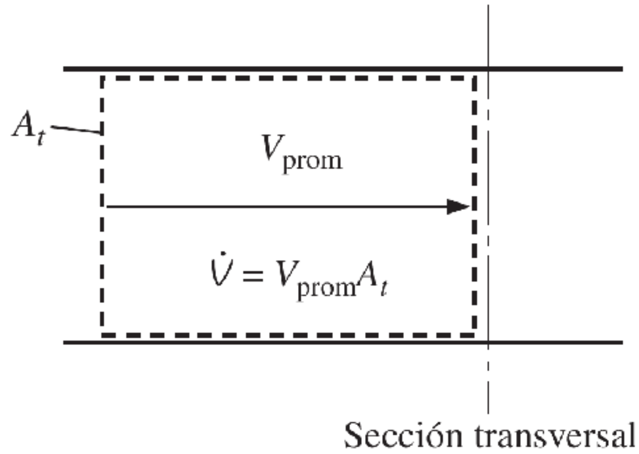
- De manera análoga al flujo másico podemos definir el **flujo volumétrico** como:

$$\dot{V} = \int_{A_t} v_n dA_t \quad \longrightarrow \quad \dot{V} = v_{n,\mathrm{prom}} A_t.$$

- Se tiene la relación:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{\nu},$$

donde ν es el volúmen específico.



El flujo volumétrico es el volumen de fluido que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo.

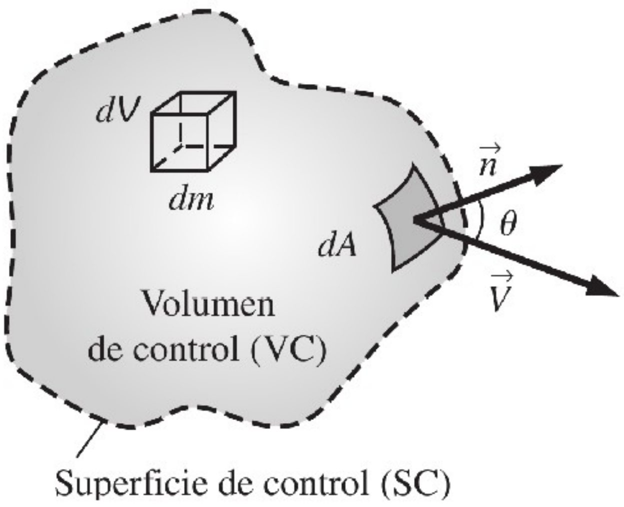
Balance de masa

- La **masa total** dentro de un volumen de control:

$$m = \int_V \rho dV.$$

- Entonces, la **tasa** (“rapidez”) de **cambio de la masa**:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}\int_V \rho dV.$$



Balance de masa

- Utilizando las definiciones anterior, la **conservación de la masa** toma la siguiente forma:

$$\boxed{\frac{d}{dt}\int_V \rho dV + \int_A \rho(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = 0.}$$

- Separando el flujo de entrada y de salida:

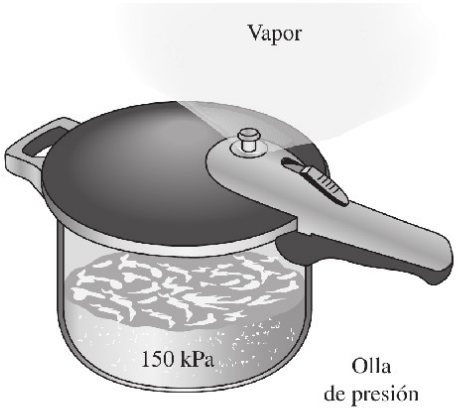
$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV + \sum_{\text{salida}} \rho|v_n|dA - \sum_{\text{entrada}} \rho|v_n|dA = 0$$

- De manera equivalente, también se puede escribir:

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV = \sum_{\text{entrada}} \dot{m} - \sum_{\text{salida}} \dot{m}.$$

Ejemplo 1 (parte i):

- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - El **flujo másico** del **vapor** y la **velocidad de salida**.



Ejemplo 1 (parte i):

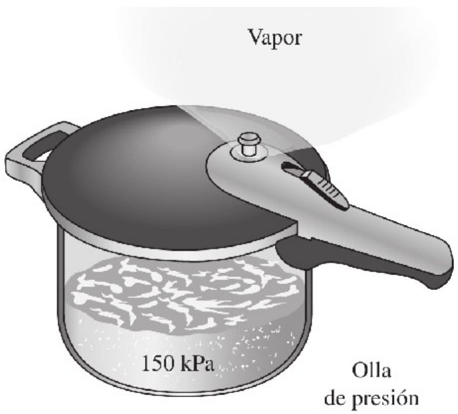
- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - El **flujo másico** del **vapor** y la **velocidad de salida**.

La masa de líquido evaporado:

$$\nu = V/m \quad \longrightarrow \quad m = V/\nu$$

Revisando la **tabla** las propiedades de **agua saturada** a 150 kPa:

$$\text{Líquido saturado}: \ \nu_f = 0.001053 \ \mathrm{m^3/kg}.$$



$$\longrightarrow \quad m = \frac{V}{\nu} = \frac{0.6 \ \mathrm{L}}{0.001053 \ \mathrm{m^3/kg}} = \frac{0.6 \times 10^{-3} \ \mathrm{m^3}}{0.001053 \ \mathrm{m^3/kg}}$$

$$\longrightarrow \quad m = 0.57 \ \mathrm{kg}$$

Entonces, la tasa:

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} = \frac{0.57 \ \mathrm{kg}}{40 \ \mathrm{min}} = \frac{0.57 \ \mathrm{kg}}{40 \times 60 \ \mathrm{s}} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\dot{m} = 2.37 \times 10^{-4} \ \mathrm{kg/s}}$$

Ejemplo 1 (parte i):

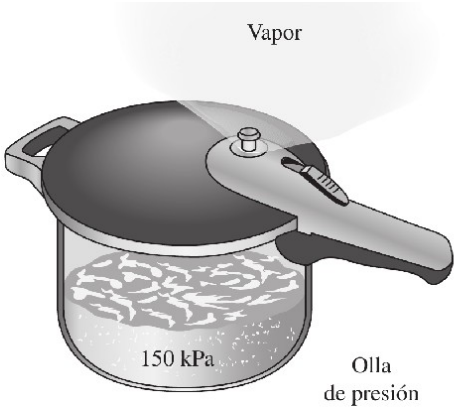
- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - El **flujo másico** del **vapor** y la **velocidad de salida**.

Finalmente, la velocidad de salida: $\nu = 1/\rho$

$$\dot{m} = \rho v A_t \quad \longrightarrow \quad v = \frac{\dot{m}}{\rho A_t} = \frac{\dot{m}\nu}{A_t}$$

Revisando la **tabla** las propiedades de **vapor saturado** a 150 kPa:

$$\text{Vapor saturado}: \; \nu_g = 1.1594 \text{ m}^3/\text{kg}$$



$$\longrightarrow \quad v = \frac{2.37 \times 10^{-4} \text{ kg/s } 1.1594 \text{ m}^3/\text{kg}}{8 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{v = 34.3 \text{ m/s}}$$

Clase 17: Flujos másicos

- Conservación de la masa y flujos másicos.
- **Trabajo y energía de un fluido.**
- Flujos estacionarios.

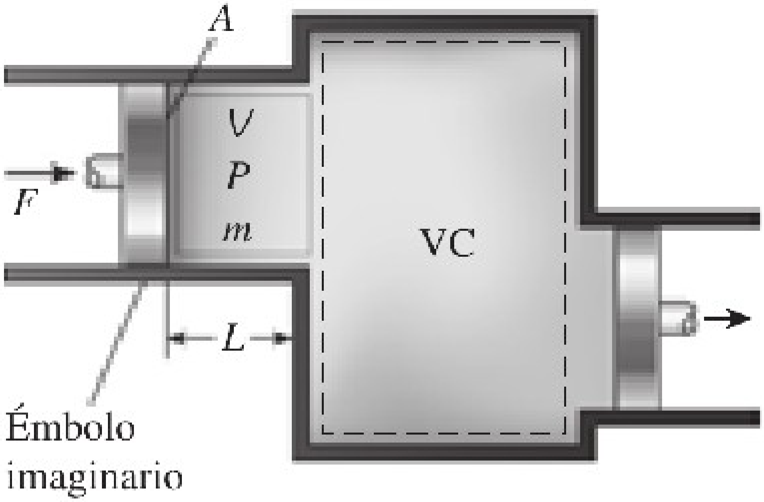
Trabajo de flujo

- A diferencia de los sistemas cerrados, en los volúmenes de control hay **flujo de masa**.
- Para **introducir** o **sacar** este **flujo** es necesario **realizar trabajo**.
- Este trabajo toma la siguiente forma:

$$\boxed{W_{\text{flujo}} = PAL = PV.}$$

$$F = PA$$

- La magnitud del trabajo de flujo es la misma para masa que sale o entra del sistema.



Energía de un fluido

- La **energía por unidad de masa** θ de un **fluido en movimiento** es:

$$\theta = P\nu + e$$

$$= \underbrace{P\nu}_{\text{Energía de flujo}} + (\underbrace{u}_{\text{Energía interna}} + \underbrace{\mathrm{ec}}_{\text{Energía cinética}} + \underbrace{\mathrm{ep}}_{\text{Energía potencial}}).$$

- Recordando las definiciones de energía cinética y potencial y que la **entalpía** es $h = P\nu + u$, obtenemos:

$$\boxed{\theta = h + \frac{v^2}{2} + gz.}$$

Energía transportada

- Como θ es la energía por unidad de masa, la energía total es simplemente $m\theta$.

- Entonces, la **cantidad de energía transportada** por una masa m es:

$$\boxed{E_{\mathrm{masa}} = m\left(h + \frac{v^2}{2} + gz\right).}$$

- La tasa:

$$\dot{E}_{\mathrm{masa}} = \dot{m}\left(h + \frac{v^2}{2} + gz\right).$$

- Si la energía cinética y potencial son insignificantes:

$$E_{\mathrm{masa}} = mh, \qquad \dot{E}_{\mathrm{masa}} = \dot{m}h.$$

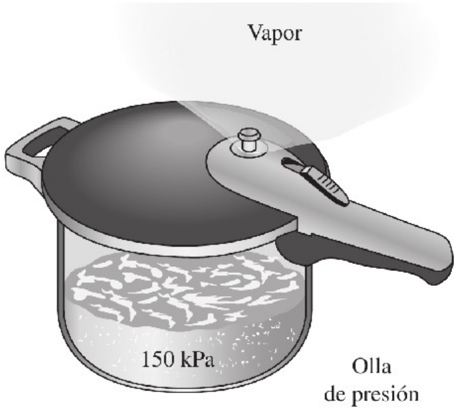
Energía transportada

- Las propiedades en un volumen de control pueden cambiar con el tiempo y sección tranversal.
- En estos casos en las expresiones anteriores sólo podemos considerar **masas pequeñas**.
- En tales casos debemos **integrar** masas pequeñas δm.
- En una entrada tendríamos:

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{masa,entrada}} &= \int_{m,\mathrm{entrada}} \theta_{\mathrm{entrada}} \delta m \\ &= \int_{m,\mathrm{entrada}} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{\mathrm{entrada}} \delta m. \end{aligned}$$

Ejemplo 1 (parte ii):

- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - La **energía total** y de **flujo** del vapor por **unidad de masa**.
  - La **tasa** a la cual **sale la energía** de la olla con el vapor.



Ejemplo 1 (parte ii):

- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - La **energía total** y de **flujo** del vapor por **unidad de masa**.

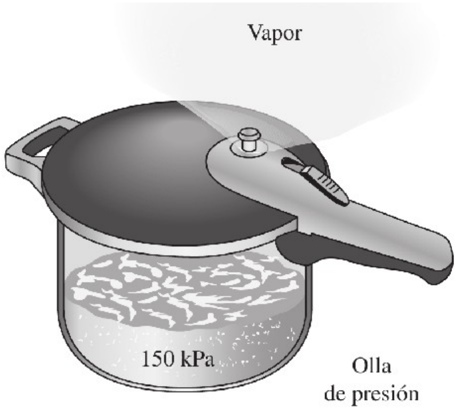
La energía total:

$$\theta = h + \frac{v^2}{2} + gz.$$

La energía potencial la podemos despreciar.

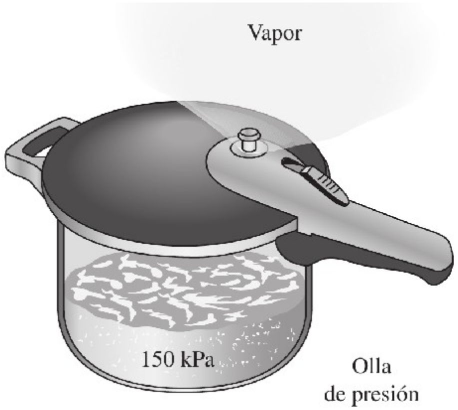
La energía cinética es:

$$\mathrm{ec} = \frac{v^2}{2} = \frac{(34.3\ \mathrm{m/s})^2}{2} = 0.588\ \mathrm{kJ/kg}$$



Ejemplo 1 (parte ii):

- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - La **energía total** y de **flujo** del vapor por **unidad de masa**.



Ahora necesitamos la energía interna y entalpía. De la **tabla**:

$$\text{Vapor saturado}: \; u_g = 2519.2 \text{ kJ/kg}, \; h_g = 2693.1 \text{ kJ/kg}$$

La entalpía:

$$h = h_g = 2693.1 \text{kJ/kg} \gg \text{ec}$$

Entonces:

$$\theta \approx h \quad \longrightarrow \quad \boxed{\theta = 2693.1 \text{ kJ/kg}}$$

La energía de flujo:

$$e_{\text{flujo}} = P\nu = h - \underset{h_g}{u} = 2693.1 \text{ kJ/kg} - 2519.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{e_{\text{flujo}} = 173.9 \text{ kJ/kg}}$$

Ejemplo 1 (parte ii):

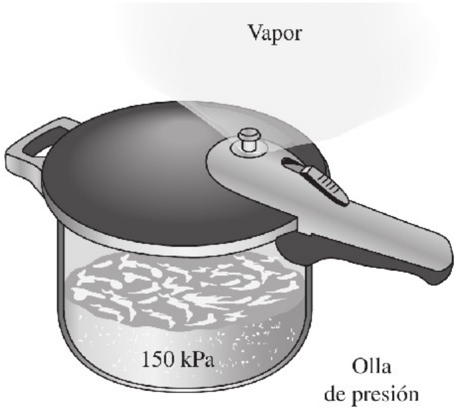
- **Sale vapor de agua** de una olla de presión de 4 L cuya **presión** de operación es **150 kPa**. Se observa que la **cantidad de líquido** en la olla **disminuyó 0.6 L** en 40 minutos después de imponerse **condiciones estacionarias** de operación, y que el **área** de la **sección transversal** de la abertura de salida es **8 mm²**. Determine:
  - La **tasa** a la cual **sale la energía** de la olla con el vapor.

La tasa es simplemente:

$$\dot{E}_{\mathrm{masa}} = \dot{m}\theta$$

$$= 2.3710^{-4}\ \mathrm{kg/s}\ 2693.1\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{\dot{E}_{\mathrm{masa}} = 0.638\ \mathrm{kW}}$$



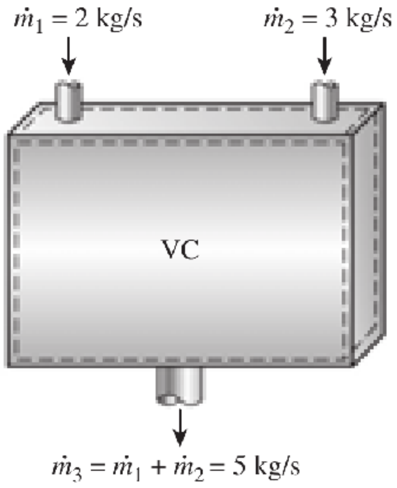
Clase 17: Flujos másicos

- Conservación de la masa y flujos másicos.
- Trabajo y energía de un fluido.
- **Flujos estacionarios.**

Flujo estacionario

- Cuando la cantidad de **masa** contenida en un sistema abierto **no cambia**, entonces hablamos de un **flujo estacionario**.

$$\frac{dm}{dt} = 0.$$

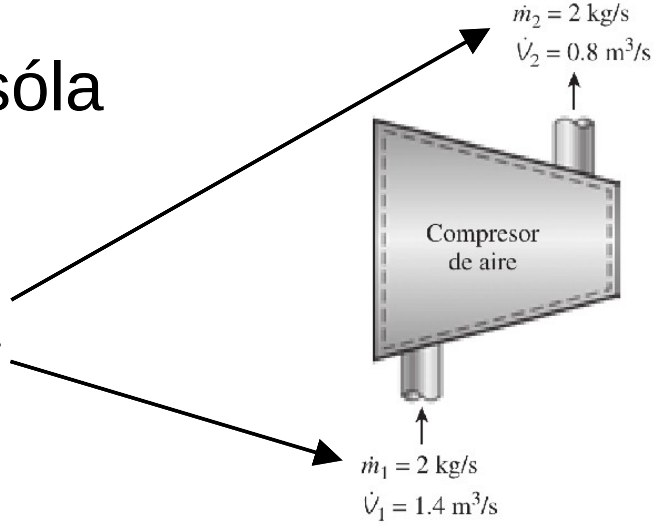


- El **balance de masa** toma la forma:

$$\boxed{\sum_{\text{entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{salida}} \dot{m}.}$$

- En el caso particular cuando hay una sóla corriente (**corriente única**) se tiene

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad \longrightarrow \quad \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2.$$



Flujo estacionario incompresible

- En el caso particular de un **fluido incompresible** se tiene que $\rho = \mathrm{cte}$. Entonces:

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{V} = \sum_{\text{salida}} \dot{V}.$$

- Si además la **corriente** es **única**:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad \longrightarrow \quad v_1 A_1 = v_2 A_2.$$

Ejemplo 2:

- Se usa una manguera de jardín acoplada a una boquilla para llenar una cubeta **de 40 litros**. El **diámetro interior** de la **manguera** es de **2 cm** pero se **reduce a 0.8 cm** en la **salida de la boquilla**. Asumiendo que el agua es **incompresible** y que el **flujo es estacionario**, si toma **50 s** llenar con agua la cubeta, determine
  - Los **flujos volumétrico** y **másico** de agua por la **manguera**.
  - La **velocidad promedio** del agua en l**a salida de la boquilla**.

Ejemplo 2:

- Se usa una manguera de jardín acoplada a una boquilla para llenar una cubeta **de 40 litros**. El **diámetro interior** de la **manguera** es de **2 cm** pero se **reduce a 0.8 cm** en la **salida de la boquilla**. Asumiendo que el agua es **incompresible** y que el **flujo es estacionario**, si toma **50 s** llenar con agua la cubeta, determine
  - Los **flujos volumétrico** y **másico** de agua por la **manguera**.

El flujo volumétrico:

$$\dot{V} = \frac{V}{\Delta t} = \frac{40 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^3}{50s} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\dot{V} = 0.0008\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}}$$

El flujo másico:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 1000 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} 0.0008 \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\dot{m} = 0.8\ \mathrm{kg/s}}$$

Ejemplo 2:

- Se usa una manguera de jardín acoplada a una boquilla para llenar una cubeta **de 40 litros**. El **diámetro interior** de la **manguera** es de **2 cm** pero se **reduce a 0.8 cm** en la **salida de la boquilla**. Asumiendo que el agua es **incompresible** y que el **flujo es estacionario**, si toma **50 s** llenar con agua la cubeta, determine
  - La **velocidad promedio** del agua en l**a salida de la boquilla**.

Debido a que el flujo volumétrico es constante, entonces:

$$\dot{V} = vA \quad \longrightarrow \quad v_{\text{salida}} = \dot{V}/A_{\text{salida}}$$

Ya tenemos el flujo volumétrico. El área es:

$$A_{\text{salida}} = \pi r^2_{\text{boquilla}} = \pi \times 0.04^2 = 0.5027 \times 10^{-4}\text{m}^2$$

Entonces:

$$v_{\text{salida}} = \frac{0.0008 \text{ m}^3/\text{s}}{0.5027 \times 10^{-4}\text{m}^2} \quad \longrightarrow \quad \boxed{v_{\text{salida}} = 15.9 \text{ m/s}}$$

Análisis de energía en flujos estacionarios

- En un flujo estacionario la **tasa de energía no cambia**. Entonces:

$$dE/dt = 0 \quad \longrightarrow \quad \dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}}.$$

- Este **balance de energía** lo podemos escribir como:

$$\dot{Q}_{\text{entr.}} + \dot{W}_{\text{entr.}} + \sum_{\text{entr.}} \dot{m}\left(h + \frac{v^2}{2} + gz\right) = \dot{Q}_{\text{sal.}} + \dot{W}_{\text{sal.}} + \sum_{\text{sal.}} \dot{m}\left(h + \frac{v^2}{2} + gz\right).$$

- En casos de **corriente única**:

$$\dot{Q} \pm \dot{W} = \dot{m}\left(\Delta h + \underbrace{\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)}_{\text{Despreciables en muchos casos.}}\right).$$

Signo depende de si es trabajo neto de entrada o de salida.

Conclusiones

- Enunciamos la **conservación de la masa**.
- Vimos en detalle el **flujo másico**.
- Revisamos el caso particular del **flujo estacionario**.
- Próxima clase:
  - Dispositivos de flujo estacionario.
  - Flujos no estacionarios.