



**UC** | Chile

# **Termodinámica (FIS1523)**

## **Flujos másicos (cont.)**

**Felipe Isaule**  
felipe.isaule@uc.cl

Miércoles 14 de Mayo de 2025

# Resumen clase anterior

- Enunciamos la **conservación de la masa**:

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

- Definimos los **flujos másicos**:

$$\dot{m} = \int_{A_t} \rho v_n dA_t, \quad \dot{m} = \rho v_{n,\text{prom}} A_t.$$

- Revisamos la **energía** de los flujos másicos:

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

- Vimos el caso particular de **flujos estacionarios**:

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

# Clase 18: Flujos másicos (cont.)

- Dispositivos de flujo estacionario.
- Flujos no estacionarios.

- Bibliografía recomendada:
  - Cengel (5-4, 5-5).

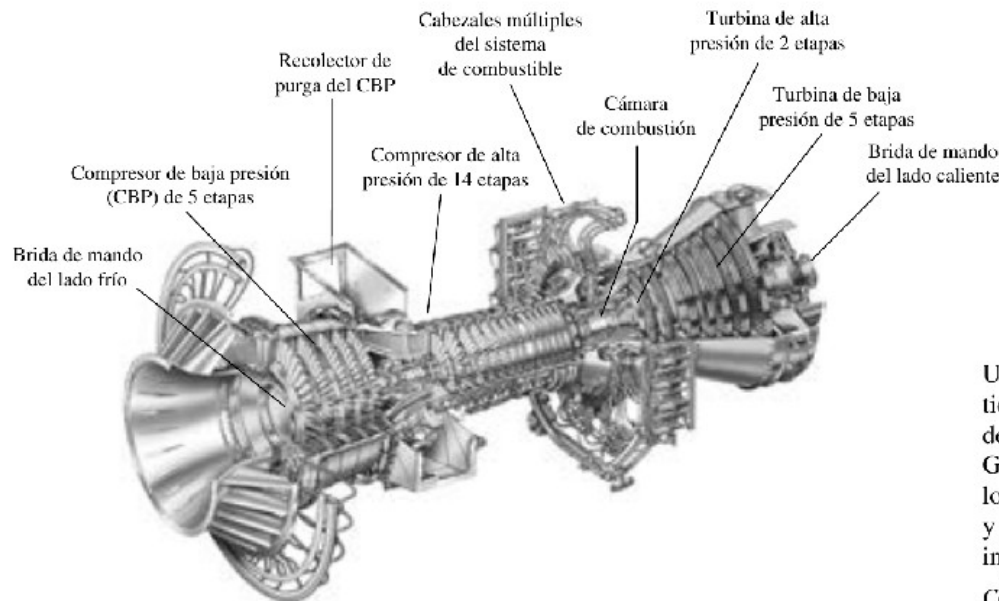
# Clase 18: Flujos másicos (cont.)

- **Dispositivos de flujo estacionario.**
- Flujos no estacionarios.

# Dispositivos de flujo estacionario

- Muchos **dispositivos** en ingeniería **funcionan** bajo las **mismas condiciones** por **mucho tiempo**.
- Si estos dispositivos se basan en un **flujo másico**, entonces se pueden considerar como **flujos estacionarios**

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

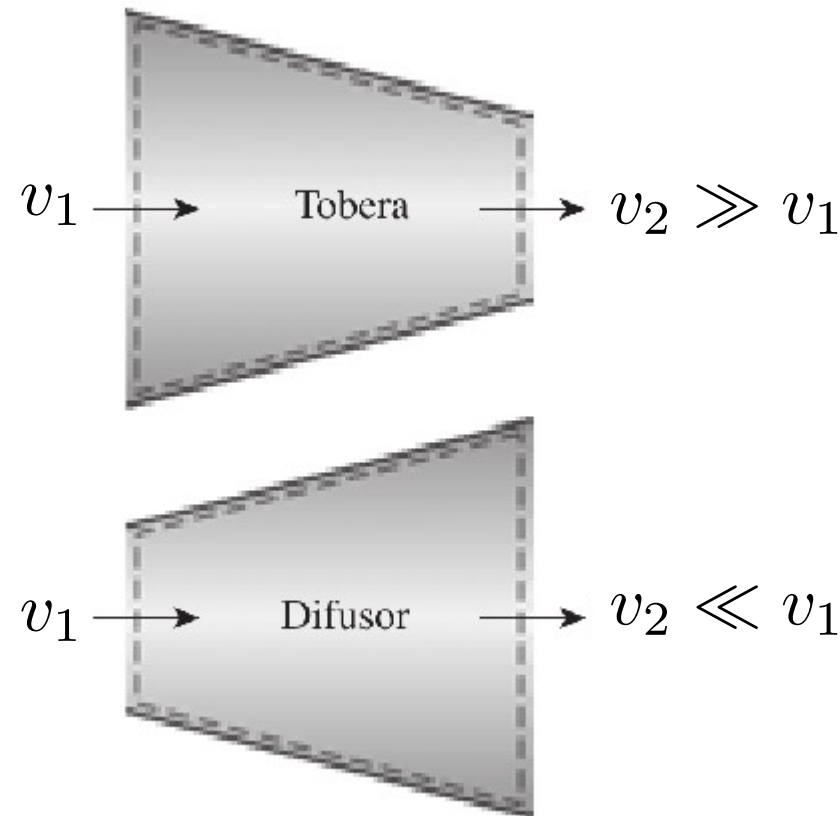


Una turbina moderna de gas basada en tierra que se utiliza para la producción de potencia eléctrica. Ésta es una turbina General Electric LM5000. Tiene una longitud de 6.2 m, pesa 12.5 toneladas y produce 55.2 MW a 3 600 rpm, con inyección de vapor.

*Cortesía de GE Power Systems*

# Toberas y difusores

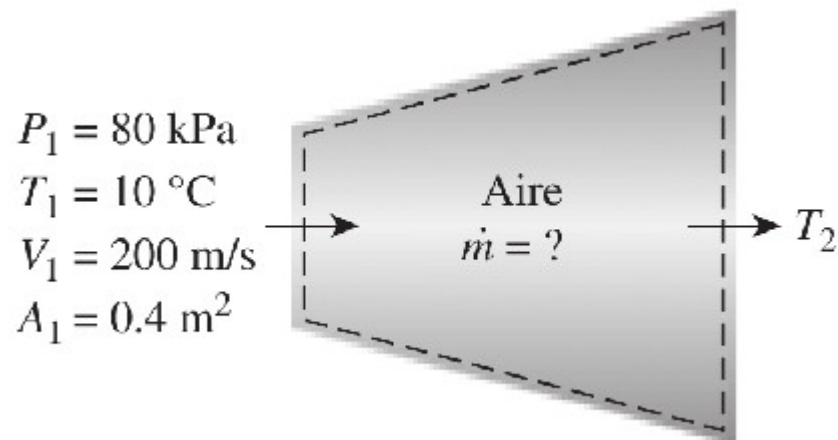
- Una **tobera** es un dispositivo que **incrementa la velocidad** de un fluido a **expensas de la presión**.
- Un **difusor** es un dispositivo que **incrementa la presión** de un fluido al **desacelerarlo**



- La **transferencia de calor** es **pequeña** ( $\dot{Q} \approx 0$ ) debido a las altas velocidades del fluido.
- *Normalmente* **no** implican **trabajo** ( $\dot{W} \approx 0$ ) y la **energía potencial** es **despreciable** ( $\Delta e.p. \approx 0$ ).
- Sin embargo, la **energía cinética** puede ser **importante** debido a las altas velocidades.

# Ejemplo 1:

- En el **difusor** de un motor de propulsión **entra** en **régimen estacionario** **aire** a **10 °C** y **80 kPa**, con una **velocidad** de **200 m/s**. El **área de entrada** al difusor es **0.4 m<sup>2</sup>**. El **aire sale** del difusor con una **velocidad** que es **muy pequeña comparada** con la **velocidad de entrada**. Determine el **flujo másico del aire** y la **temperatura del aire que sale** del difusor.



# Ejemplo 1:

- En el **difusor** de un motor de propulsión **entra** en **régimen estacionario** **aire** a **10 °C** y **80 kPa**, con una **velocidad** de **200 m/s**. El **área de entrada** al difusor es **0.4 m²**. El **aire sale** del difusor con una **velocidad** que es **muy pequeña comparada** con la **velocidad de entrada**. Determine el **flujo másico del aire** y la **temperatura del aire que sale** del difusor.

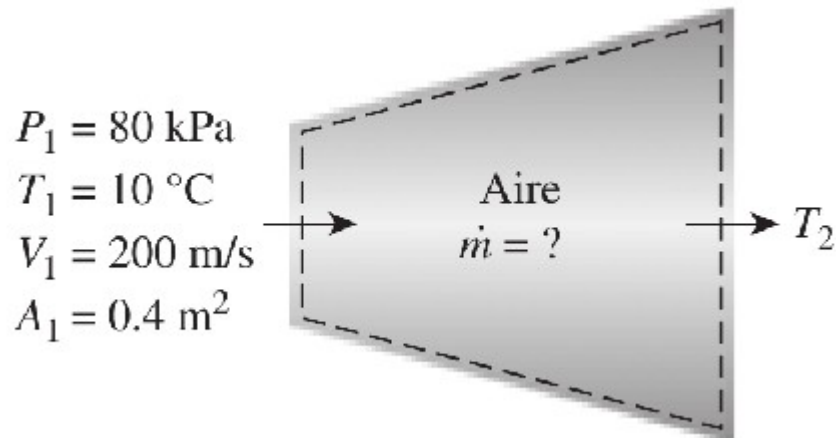
Primero necesitamos obtener el volumen específico. Utilizando la ec. de un gas ideal:

$$\begin{aligned}\nu_1 &= \frac{RT_1}{P_1} \\ &= \frac{10.287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} 283^\circ\text{K}}{80 \text{ kPa}} = 1.015 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\end{aligned}$$

El flujo másico:

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho_1 v_1 A_1 = \frac{v_1 A_1}{\nu_1} \\ &= \frac{200 \frac{\text{m}}{\text{s}} 0.4 \text{ m}^2}{1.015 \text{ m}^3/\text{kg}}\end{aligned}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{m} = 78.8 \text{ kg/s}}$$





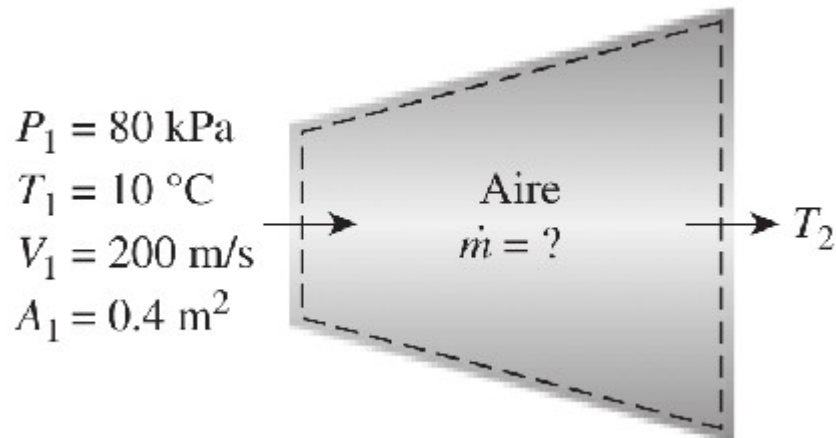
# Ejemplo 1:

- En el **difusor** de un motor de propulsión **entra** en **régimen estacionario** **aire** a **10 °C** y **80 kPa**, con una **velocidad** de **200 m/s**. El **área de entrada** al difusor es **0.4 m²**. El **aire sale** del difusor con una **velocidad** que es **muy pequeña comparada** con la **velocidad de entrada**. Determine el **flujo másico del aire** y la **temperatura del aire que sale** del difusor.

Para encontrar la temperatura vamos a calcular la **entalpía** de salida. Con ésta podremos encontrar la temperatura en las **tablas termodinámicas**.

Por ser flujo estacionario:

$$\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}} = 0 \quad \longrightarrow \quad \dot{E}_{\text{ent.}} = \dot{E}_{\text{sal.}}$$



Además, por ser un difusor:

$$\dot{Q} = \dot{W} = \Delta \text{e.p.} = 0$$

Corriente única:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

Entonces:

$$\dot{m} \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) = \dot{m} \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} \right)$$

$$\longrightarrow \quad h_2 = h_1 - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

$$\approx h_1 + \frac{v_1^2}{2}$$

Difusor:  $v_2 \ll v_1$

# Ejemplo 1:

- En el **difusor** de un motor de propulsión **entra** en **régimen estacionario** **aire** a **10 °C** y **80 kPa**, con una **velocidad** de **200 m/s**. El **área de entrada** al difusor es **0.4 m²**. El **aire sale** del difusor con una **velocidad** que es **muy pequeña comparada** con la **velocidad de entrada**. Determine el **flujo másico del aire** y la **temperatura del aire que sale** del difusor.

De datos de **tabla** a  $T=283^\circ\text{K}$ :

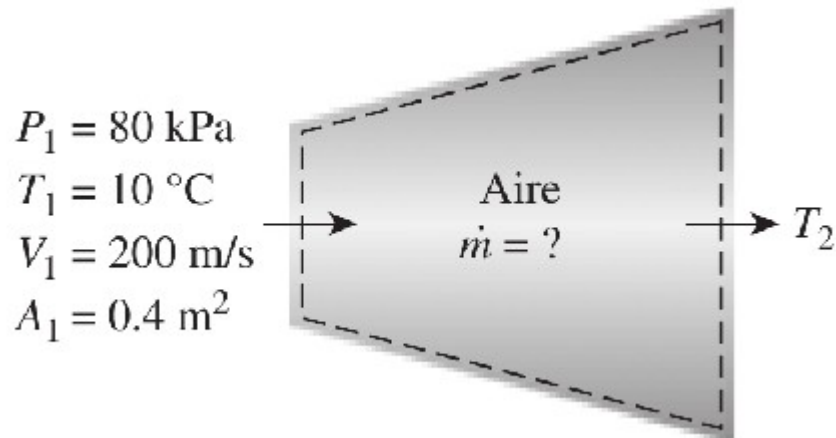
$$h_1 = 283.14 \text{ kJ/kg}$$

Entonces:

$$h_1 = 283.14 \times 10^3 \text{ J/kg} + \frac{(200 \text{ m/s})^2}{2} \longrightarrow h_2 = 303.14 \text{ kJ/kg}$$

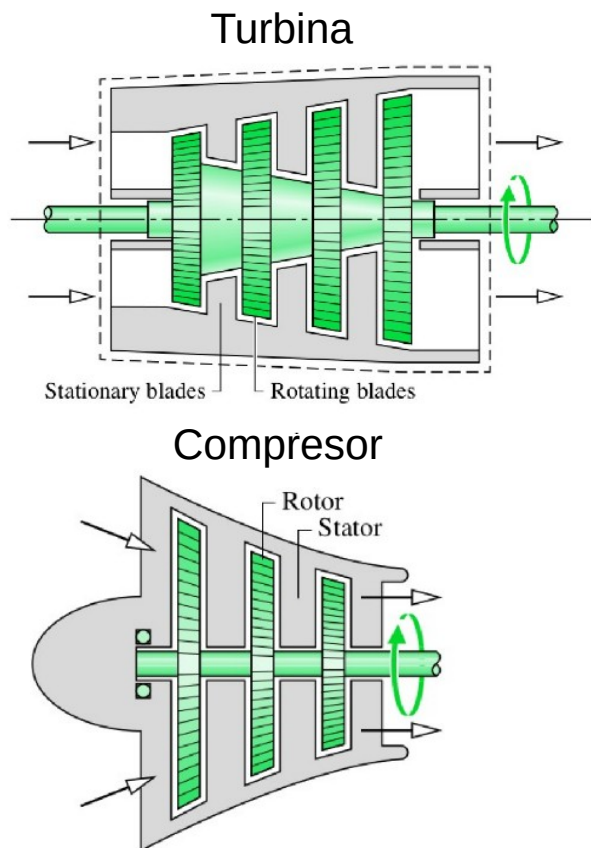
Buscando en las **tablas**, encontramos que esta entalpía corresponde a una temperatura de:

$T_2 = 303^\circ\text{K}$



# Turbinas y compresores

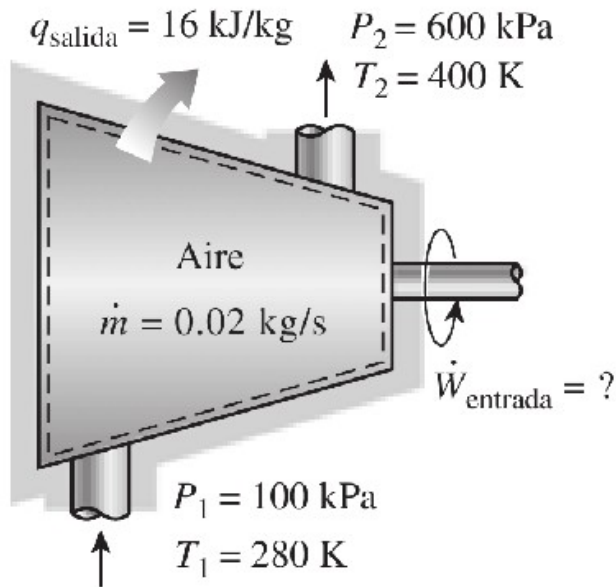
- Una **turbina** convierte la **energía mecánica** proveniente de un líquido o vapor.
- Los **compresores** se utilizan para **aumentar la presión** al **inyectar trabajo** a través de un **eje giratorio**.



- Normalmente la **energía potencial y cinética** son **despreciables** ( $\Delta e.p. = \Delta e.c. \approx 0$ ).
- En muchos casos (pero no siempre) la **transferencia de calor** es **pequeña** ( $\dot{Q} \approx 0$ ) ya que suelen estar bien aislados.

## Ejemplo 2:

- Aire a 100 kPa y 280 °K se comprime en régimen estacionario hasta 600 kPa y 400 °K. El flujo másico del aire es 0.02 kg/s y ocurre una pérdida de calor de 16 kJ/kg durante el proceso. Si se supone que los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes, determine la entrada de potencia necesaria al compresor.



## Ejemplo 2:

- Aire a 100 kPa y 280 °K se comprime en régimen estacionario hasta 600 kPa y 400 °K. El flujo másico del aire es 0.02 kg/s y ocurre una pérdida de calor de 16 kJ/kg durante el proceso. Si se supone que los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes, determine la entrada de potencia necesaria al compresor.

Por ser un flujo estacionario se tiene que:

$$\dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}}$$

$$\dot{W}_{\text{entrada}} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{m}h_2$$

$$\longrightarrow \dot{W}_{\text{entrada}} = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

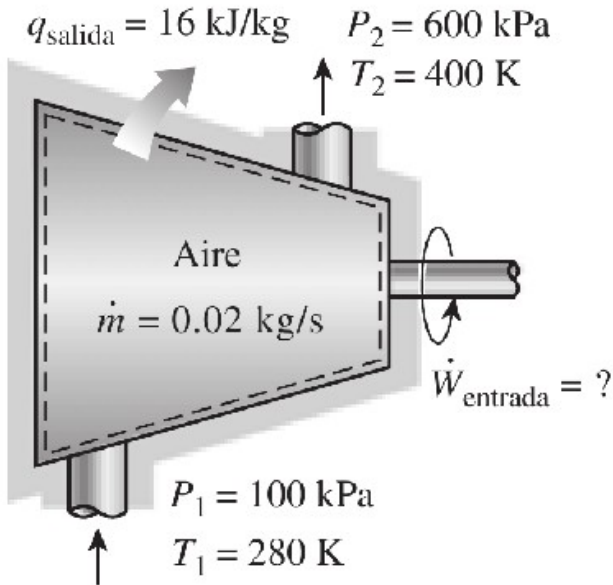
De los datos de tabla a 280 °K y 400 °K:

$$h_1 = 280.13 \text{ kJ/kg}, \quad h_2 = 400.98 \text{ kJ/kg}$$

Entonces:

$$\dot{W}_{\text{entrada}} = 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (400.98 - 280.13) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{W}_{\text{entrada}} = 2.74 \text{ kW}}$$



# Válvulas de estrangulamiento

- Las **válvulas de estrangulamiento** son dispositivos que restringen el flujo de un fluido provocando una **caída** relevante de **presión**.
- Suelen provocar una gran **disminución** de la **temperatura**, por lo tanto son también **usados en refrigeración**.



a) Válvula ajustable



b) Tapón poroso



c) Tubo capilar

- Normalmente son **adiabáticos** (  $\dot{Q} \approx 0$  ) y **no se realiza trabajo** (  $\dot{W} \approx 0$  ).
- También, la **energía potencial y cinética** suelen ser **despreciables** (  $\Delta e.p. = \Delta e.c. \approx 0$  ).
- Por tanto, éstos son dispositivos **isentálpicos**:

$$h_1 = h_2 \quad \longrightarrow \quad u_1 + P_1 \nu_1 = u_2 + P_2 \nu_2$$

## Ejemplo 3:

- Al **tubo capilar** de un refrigerador entra **refrigerante 134a** como **líquido saturado** a **0.8 MPa**, el cual se **estrangula** a una **presión** de **0.12 MPa**. Determine la **calidad** del refrigerante en el **estado final** y la **disminución de temperatura** durante este proceso.

## Ejemplo 3:

- Al **tubo capilar** de un refrigerador entra **refrigerante 134a** como **líquido saturado** a **0.8 MPa**, el cual se **estrangula** a una **presión** de **0.12 MPa**. Determine la **calidad** del refrigerante en el **estado final** y la **disminución de temperatura** durante este proceso.

De **tablas**, líquido saturado a  $P_1=0.8$  MPa:

$$T_1 = 31.31^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 95.47 \text{ kJ/kg}$$

En la salida, a  $P_2=0.12$  MPa:

$$T_2 = -22.32^\circ\text{C}$$

Si es líquido saturado:

$$h_{f,2} = 22.49 \text{ kJ/kg}$$

Mientras que si es vapor saturado:

$$h_{g,2} = 236.97 \text{ kJ/kg}$$

Como es un proceso **isentálpico**:

$$h_1 = h_2 = 95.47 \text{ kJ/kg}$$

Debido a que:

$$h_{f,2} < h_2 < h_{g,2},$$

tenemos una **mezcla saturada**.

La calidad:

$$x = \frac{h_2 - h_{f,2}}{h_{g,2} - h_{f,2}} = \frac{h_2 - h_{f,2}}{h_{g,2} - h_{f,2}} \longrightarrow \boxed{x = 0.340}$$

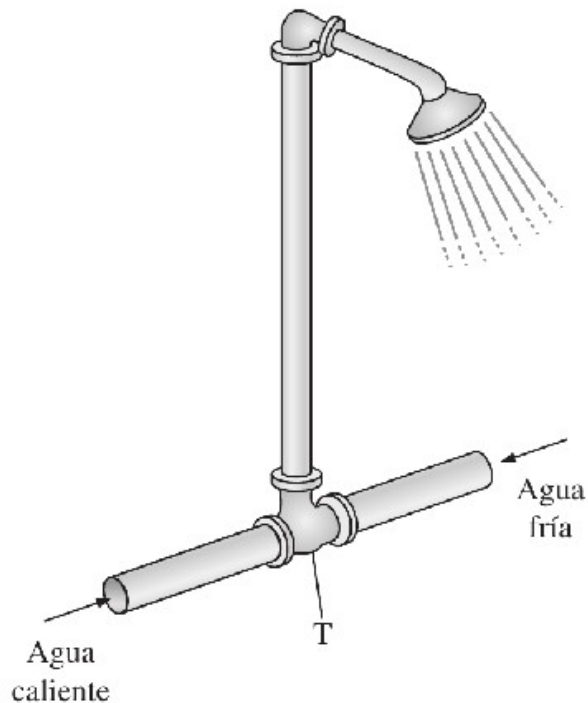
La disminución de temperatura:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \longrightarrow \boxed{\Delta T = -53.63^\circ\text{C}}$$



# Cámaras de mezclado

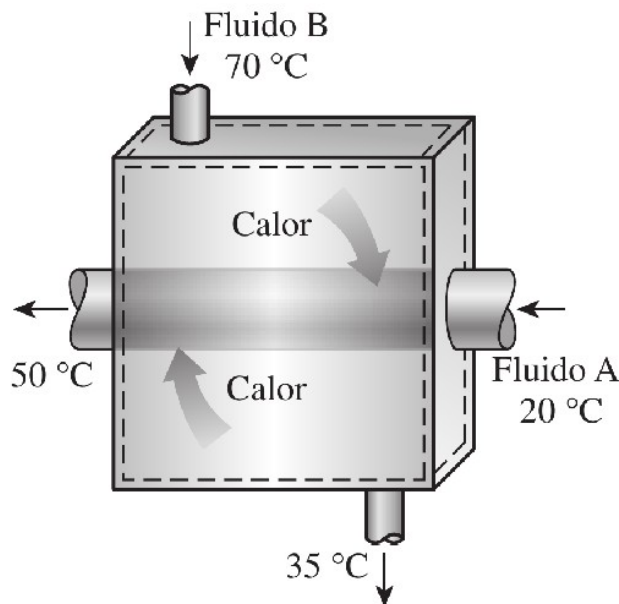
- Una **cámara de mezclado** es un aparato donde se **mezclan múltiples fluidos**.
- Por **balance de masa**, la suma de las **masas entrantes** debe ser **igual** a la suma de **masas salientes**.



- Normalmente están bien **aisladas** ( $\dot{Q} \approx 0$ ) y **no se realiza trabajo** ( $\dot{W} \approx 0$ ).
- También, la **energía potencial y cinética** suelen ser **despreciables** ( $\Delta e.p. = \Delta e.c. \approx 0$ ).
- Se requiere que la suma de **energía entrante** sea **igual** a la suma de **energía saliente**.

# Intercambiadores de calor

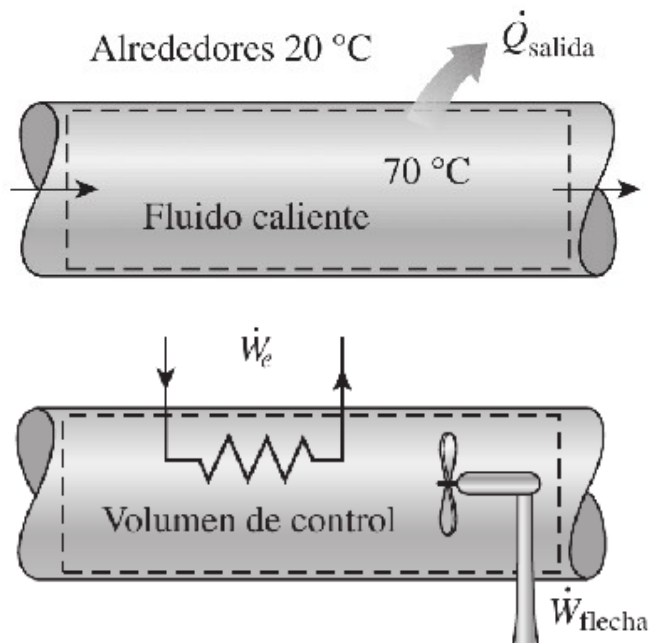
- Los **intercambiadores de calor** son dispositivos donde **dos corrientes** de fluido en movimiento **intercambian calor sin mezclado**.
- Naturalmente, la suma de los **flujos entrantes** debe ser **igual** a la suma de los **flujos salientes**.



- Comunmente **trabajo** **no** **está involucrado** ( $\dot{W} \approx 0$ ).
- También, la **energía potencial y cinética** suelen ser **despreciables** ( $\Delta e.p. = \Delta e.c. \approx 0$ ).
- **El calor se transfiere entre los fluidos.**

# Flujo en tuberías y ductos

- Los flujos en **tuberías** o ductos usualmente son **flujos estacionarios**.
- El **intercambio de calor** puede ser **importante** (e incluso deseable) cuando las tuberías son largas.
- Sin embargo, también es posible aislar las tuberías. En tales casos el intercambio de calor es pequeño ( $\dot{Q} \approx 0$ ).



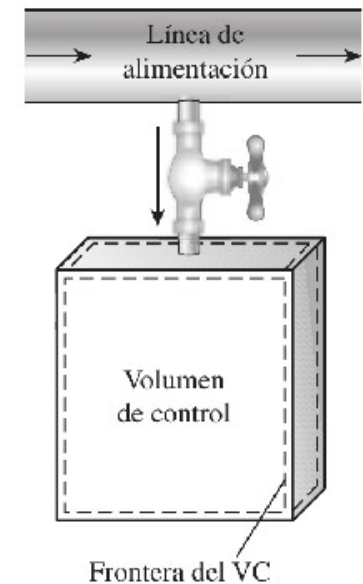
- De igual manera, el **trabajo, energía cinética, y energía potencial, pueden ser o no importantes** dependiendo de cómo se construyó la tubería.

# Clase 18: Flujos másicos (cont.)

- Dispositivos de flujo estacionario.
- **Flujos no estacionarios.**

# Flujos no estacionarios

- En ciertos procesos ocurren **cambios** dentro del **volumen de control** con el **paso del tiempo**.
- Estos procesos se llaman **flujos no estacionarios** o **flujos transitorios**.
- Los flujos no estacionarios **ocurren** dentro de un **intervalo de tiempo**  $\Delta t$ .
- Los flujos no estacionarios **pueden tener fronteras móviles**.



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.

# Flujos no estacionarios

- Por **balance de masa**:

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = (m_2 - m_1)_{\text{VC}}.$$

1: estado inicial  
2: estado final  
VC: vol. control

- Por **conservación de la energía**:

$$\left( Q_{\text{entrada}} + W_{\text{entrada}} + \sum_{\text{entrada}} m\theta \right) - \left( Q_{\text{salida}} + W_{\text{salida}} + \sum_{\text{salida}} m\theta \right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{\text{sistema}},$$

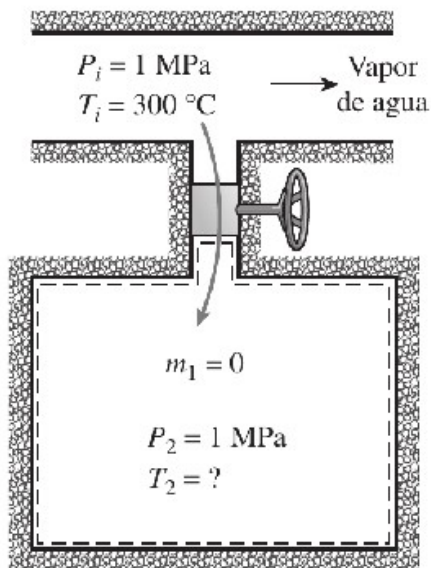
donde  $e = u + e.c. + e.p$  y  $\theta = h + e.c. + e.p$ .

- Si la energía cinética y potencial son despreciables:

$$Q \pm W = \sum_{\text{salida}} mh - \sum_{\text{entrada}} mh + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{\text{sistema}}.$$

## Ejemplo 4:

- Un recipiente rígido, aislado, que al inicio se evacúa, está conectado mediante una válvula a una línea de suministro que lleva vapor de agua a 1 MPa y 300 °C. Se abre la válvula y se permite que el vapor fluya de manera lenta al recipiente hasta que la presión alcanza 1 MPa, punto en el que se cierra la válvula. Determine la temperatura final del vapor en el recipiente.



# Ejemplo 4:

- Un recipiente rígido, aislado, que al inicio se evacua, está conectado mediante una válvula a una línea de suministro que lleva vapor de agua a 1 MPa y 300 °C. Se abre la válvula y se permite que el vapor fluya de manera lenta al recipiente hasta que la presión alcanza 1 MPa, punto en el que se cierra la válvula. Determine la temperatura final del vapor en el recipiente.

Primero, por balance de masa:

$$m_{\text{entrada}} - \cancel{m_{\text{salida}}} = m_2 - \cancel{m_1} \longrightarrow m_{\text{entrada}} = m_2 = m$$

No sale masa

No hay masa inicialmente

Por conservación de la energía:

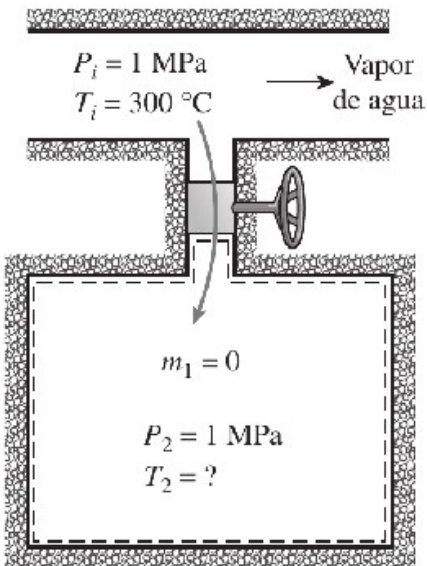
$$\cancel{Q} \pm \cancel{W} = m h_{\text{entrada}} - \cancel{m h_{\text{salida}}} + (m u_2 - \cancel{m u_1})$$

No hay trabajo ni calor

Al terminar no sale entalpía

Inicialmente el sistema está vacío

$$\longrightarrow h_{\text{entrada}} = u_2$$





## Ejemplo 4:

- Un recipiente rígido, aislado, que al inicio se evacúa, está conectado mediante una válvula a una línea de suministro que lleva vapor de agua a 1 MPa y 300 °C. Se abre la válvula y se permite que el vapor fluya de manera lenta al recipiente hasta que la presión alcanza 1 MPa, punto en el que se cierra la válvula. Determine la temperatura final del vapor en el recipiente.

De tablas para vapor de agua a 1 MPa y 300 °C :

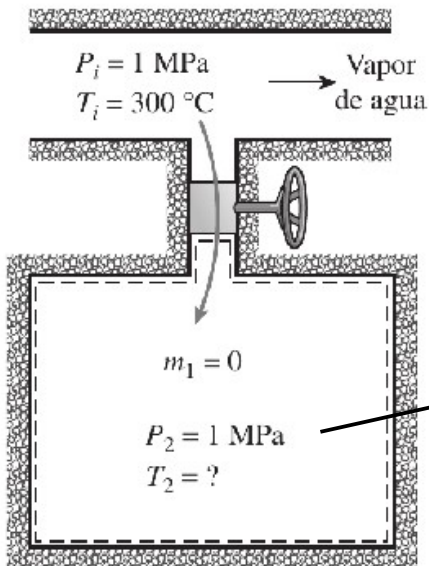
$$h_{\text{entrada}} = 3051.6 \text{ kJ/kg}$$

Entonces:

$$u_2 = 3051.6 \text{ kJ/kg}$$

Buscando la temperatura en **tabla** para  $P_2=1 \text{ Mpa}$  y  $u_2=3051.6 \text{ kJ/kg}$ :

$$T_2 = 456.1 \text{ °C}$$



# Conclusiones

- Vimos **aplicaciones** de **flujos estacionarios**.
- Revisamos casos de **flujos no estacionarios**.
- Próxima clase:
  - Segunda Ley de la termodinámica.