

---

# Tema 4

## Interacción sólido-fluido

---

Bases de la Ingeniería Ambiental  
Ldo. Ciencias Ambientales  
Grupo C  
Curso 2009-2010



---

Circulación de fluidos por conducciones

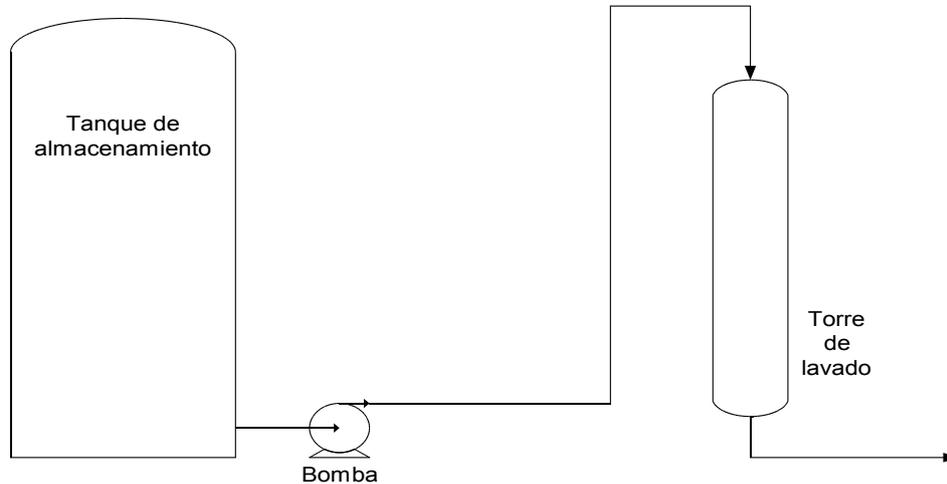
La **circulación de fluidos por conducciones** es quizá **la operación más común** para la ingeniería de procesos, ya sea en su rama química, ambiental o alimentaria.

En este tema se van a abordar las ecuaciones fundamentales que nos permiten estudiar esta operación, comenzando por identificar los diferentes regímenes de circulación de fluidos por dentro de las conducciones.

---

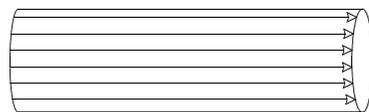
# ¿Cuál es el problema más común en la circulación de fluidos?

Generalmente a la hora de proyectar una instalación el ingeniero ambiental debe calcular la potencia de la bomba necesaria para impulsar un fluido a través de las conducciones y equipos de proceso.

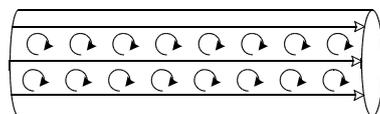


## Régimen de circulación de fluidos por conducciones

- **Laminar:** El fluido circula sin mezclarse en la dirección del radio. Podemos imaginarlo si dividimos el fluido en capas o "láminas", paralelas al eje del tubo. Estas capas o láminas circularán paralelamente todo el tiempo, sin mezclarse unas con otras.



- **Turbulento:** Existe mezcla en el fluido en la dirección del radio. Esta mezcla se debe a la formación de remolinos o "turbulencias".



# ¿Cómo se identifica el régimen de circulación de los fluidos?

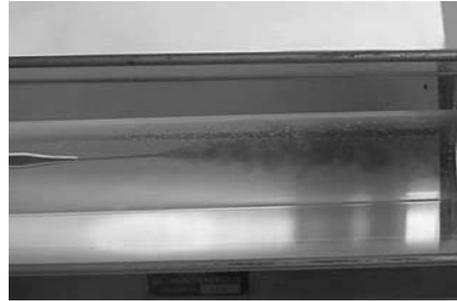


O. Reynolds  
(1842-1912)

- Visualmente (experimento de Reynolds):



Régimen Laminar



Régimen Turbulento

- Numéricamente (número de Reynolds):

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \left\{ \begin{array}{l} \bullet Re < 2100 \text{ Laminar} \\ \bullet 2100 < Re < 4000 \text{ Transición} \\ \bullet Re > 4000 \text{ Turbulento} \end{array} \right.$$

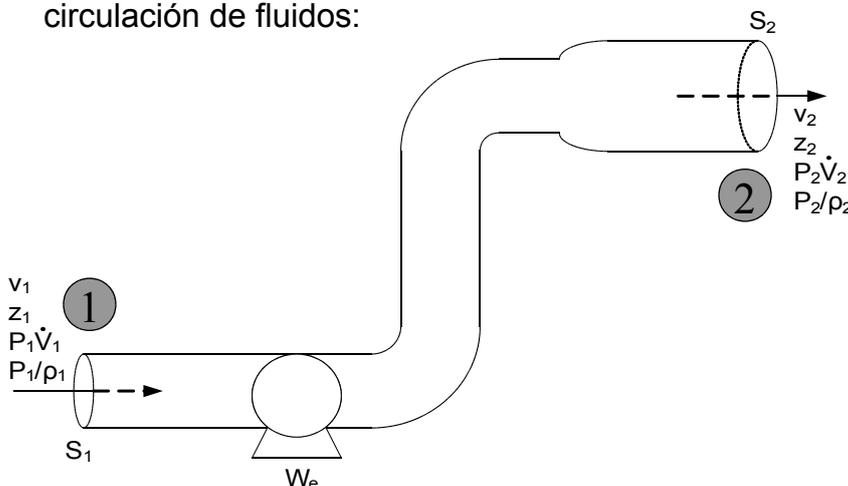
D, diámetro de la conducción (m), v velocidad del fluido (m/s), ρ densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>) y μ viscosidad del fluido en (kg/m·s)

# Ecuaciones fundamentales de la circulación de fluidos



D. Bernoulli  
(1700-1782)

La ecuación fundamental para la circulación de fluidos por conducciones es la llamada **ecuación de Bernoulli**, la cual se puede deducir a partir del balance de energía mecánica aplicado entre dos puntos de un sistema en el que existe circulación de fluidos:



## Formas de energía (J/kg)

$$Ec = \frac{1}{2} \cdot v^2$$

$$Ep = g \cdot z$$

$$P \cdot \dot{V} = \frac{P}{\rho} \text{ (trabajo de flujo)}$$

$$W_e \text{ (trabajo de eje)}$$

# Ecuación de Bernouilli

$$\underbrace{\frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2\alpha}}_{1} + \underbrace{g(z_2 - z_1)}_{2} + \underbrace{\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1}}_{3} + \underbrace{\sum F}_{4} = \underbrace{W_e}_{5}$$

1- Energía cinética (J/kg)

2- Energía potencial (J/kg)

3- Energía de flujo (J/kg)

4- Rozamiento (J/kg)

5- Trabajo “de eje” (bomba) (J/kg)

- Si se trata de un fluido incompresible (líquido):  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

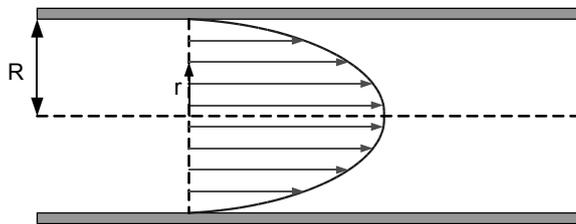
$$\frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2\alpha} + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum F - W_e = 0$$

- En términos de altura (cargas):

$$\frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2g\alpha} + (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{g\rho} + h_F - \frac{W_e}{g} = 0$$

## Cálculo de la energía cinética: el significado de $\alpha$

Cuando un fluido circula en régimen laminar, la velocidad de circulación del mismo no es uniforme en toda la sección del tubo, sino que existe lo que se conoce como un perfil de velocidades. Esto quiere decir que la velocidad es una función del radio.



$$r = 0 \Rightarrow v = v_{\max}$$

$$r = R \Rightarrow v = 0$$

Entonces se pueden definir:

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ velocidad media: } \bar{v} = \frac{Q}{S} \\ \bullet \text{ velocidad eficaz: } v_e^2 = \frac{Ec}{\frac{1}{2} \cdot m} \end{array} \right\} v_e = \frac{\bar{v}}{\sqrt{\alpha}} \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Laminar: } \alpha = \frac{1}{2} \\ \bullet \text{ Turbulento: } \alpha = 1 \end{array} \right.$$

Nota:  $Q$  y  $Ec$  se calculan por integración;  $m$  es el caudal másico (kg/s) del fluido

## Estimación de las pérdidas por rozamiento (pérdidas de carga).

- Régimen Laminar (ecuación de Hagen- Poiseuille):

$$\sum F = \frac{\Delta P}{\rho} = 128 \frac{m \cdot \mu \cdot L}{\pi \cdot D^4 \cdot \rho^2}, \frac{J}{kg}$$

- Régimen Turbulento (ecuación de Fanning):

$$\sum F = 2f \frac{L \cdot v^2}{D}, \frac{J}{kg}$$

$f$  es el llamado factor o coeficiente de fricción de Fanning, y a su vez es función del Reynolds y de la rugosidad relativa ( $\epsilon/D$ ). Se debe determinar experimentalmente, si bien existen en bibliografía representaciones gráficas que permiten su cálculo, la más importante de las cuales es el llamado “Gráfico de Moody”

$m$  caudal másico del fluido (kg/s),  $L$  longitud de la conducción (m),  $D$  diámetro de la conducción (m),  $\rho$  densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>) y  $\mu$  viscosidad del fluido en (kg/m·s)