Balance de energía en un diafragma

Objetivos de la práctica

- Estudiar el perfil de presiones que se produce a lo largo de una tubería en la que se encuentra instalado un diafragma.
- Determinar el coeficiente de descarga del diafragma mediante un balance de energía.

Fundamento teórico

La circulación de fluidos por conducciones produce una pérdida de energía debida al rozamiento con sus paredes. El cálculo de la energía necesaria para impulsar el fluido requerirá, pues, el conocimiento de esas pérdidas por rozamiento.

Cuando un fluido circula en **régimen turbulento**, las partículas de fluido se entremezclan al azar, macroscópicamente, desplazándose con continuos cambios de dirección, aunque en promedio se mantenga una trayectoria definida. El régimen de circulación de un fluido, se suele caracterizar mediante el denominado **número de Reynolds**, módulo adimensional definido como:

$$Re = \frac{v \, \rho \, D}{\mu}$$

donde:

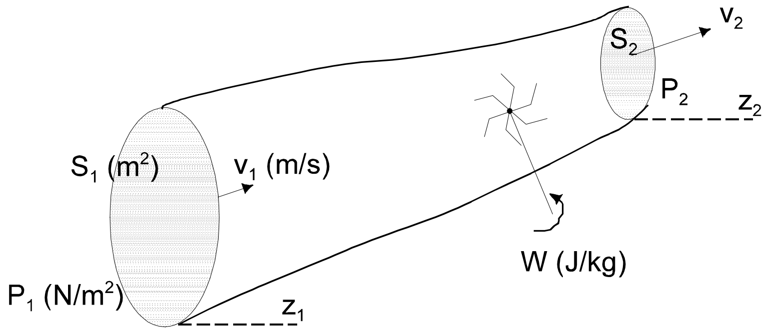
v: velocidad del fluido [$m \cdot s^{-1}$]

ρ: densidad del fluido [$kg \cdot m^{-3}$]

D: diámetro de la conducción [m]

μ: viscosidad del fluido [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]

Dos de las ecuaciones fundamentales que permiten el estudio y comprensión del comportamiento de los fluidos en circulación, son las que siguen. Para facilitar su formulación se considerará que el fluido en estudio es incompresible (densidad constante) y que circula en estado estacionario e isotermo.



- **Balance de materia (ecuación de continuidad)**

Un balance de materia aplicado a las secciones de entrada y salida de un elemento de conducción dará:

$$v_1 \ S_1 \ (\rho) \ = \ v_2 \ S_2 \ (\rho) \left[\left(\frac{m}{s} \right) (m^2) \left(\frac{kg}{m^3} \right) \right]$$

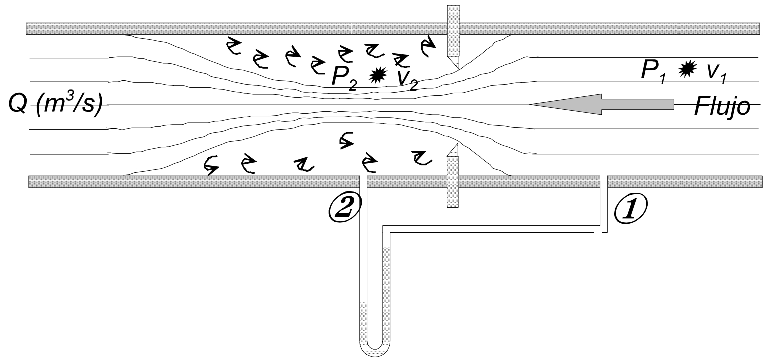
- **Balance de energía mecánica (ecuación de Bernuilli)**

Un balance de energía mecánica aplicado a las secciones de entrada y de salida de un elemento de conducción permite obtener:

$$\left(\frac{v_2^2}{2\alpha} - \frac{v_1^2}{2\alpha} \right) + g \, (z_2 - z_1) + \frac{1}{\rho} \, (P_2 - P_1) + \Sigma F = W \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Ecuación de Bernuilli en la que destacan los términos de energía cinética, trabajo de las fuerzas de gravedad, trabajo de las fuerzas de presión, energía perdida por rozamiento y trabajo necesario para la impulsión. El parámetro α, que contempla la forma del perfil de velocidades, tiene el valor **0,5** para régimen laminar y **1,0** para régimen turbulento.

Por otra parte, un diafragma (o medidor de orificio) es un dispositivo de medida del caudal de un fluido por un método indirecto: se mide la variación de presión producida por una variación de velocidad al oponer al fluido un obstáculo en la conducción. El diafragma es una placa que se inserta en la conducción, perpendicular al flujo, y que tiene un orificio en su centro; al producirse un estrechamiento de la conducción, se produce una caída de presión que se mide con un manómetro en U, cuyas ramas se conectan a ambos lados del diafragma, según se muestra en la figura.



Aplicando la ecuación de Bernuilli a sendos lados del diafragma, en el caso del sistema en estudio:

- Como el tubo es horizontal:

$$z_1 = z_2$$

- Considerando despreciable el rozamiento:

$$\sum F = 0$$

- Al no haber impulsión externa:

$$W = 0$$

Queda, pues, la ecuación simplificada:

$$\frac{v_2^2}{2\alpha} - \frac{v_1^2}{2\alpha} + \frac{1}{\rho}\left(P_2 - P_1\right) = 0$$

Utilizando la ecuación de continuidad para relacionar ambas velocidades:

$$Q\left[\frac{m^3}{s}\right] = S_1 v_1 = S_2 v_2$$

de donde:

$$v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2 = \frac{D_2^2}{D_1^2} v_2 = \beta^2 v_2$$

ecuación en la que se ha designado como **β** el cociente entre diámetros.

Sustituyendo:

$$\frac{1}{\rho}\left(P_1 - P_2\right) = \frac{v_2^2}{2\alpha} - \frac{\beta^4 v_2^2}{2\alpha} = \frac{v_2^2}{2\alpha}\left(1 - \beta^4\right)$$

de donde:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\,\alpha\,(P_1 - P_2)}{\rho\,(1 - \beta^4)}}$$

Si la caída de presión se mide como diferencia de altura de líquido manométrico y éste es el mismo que circula por la conducción (igual densidad):

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho\, g\, \Delta h$$

y, por tanto:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\,\alpha\, g\, \Delta h}{1 - \beta^4}}$$

El caudal en función de la caída de presión se obtiene, finalmente, teniendo en cuenta su definición:

$$Q = S_2 v_2 = S_2 \sqrt{\frac{2\,\alpha\, g\, \Delta h}{1 - \beta^4}} = \left(S_2 \sqrt{\frac{2\,\alpha\, g}{1 - \beta^4}} \right) \sqrt{\Delta h}$$

No obstante, esta ecuación no es exacta, ya que, por un lado, la toma de presión posterior no coincide con la sección del orificio, porque no es físicamente viable, y por otro lado, en las zonas muertas posteriores al orificio se forman unos remolinos y turbulencias que determinan una pérdida de energía por rozamiento, que no ha sido considerada. Por todo ello es necesario corregir la ecuación anterior introduciendo un coeficiente empírico, denominado **"coeficiente de descarga", C_D**, dependiente del número de Reynolds y del diámetro del orificio. Se tendrá así, en definitiva:

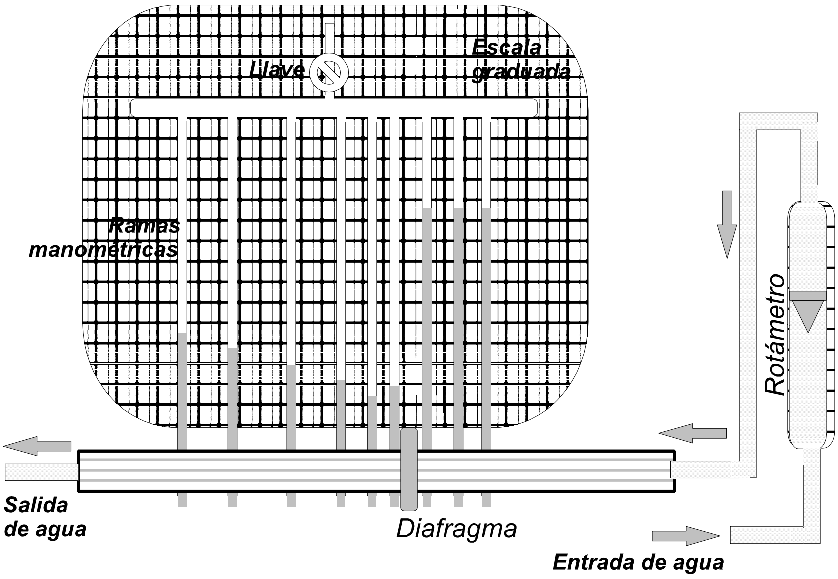
$$Q_{real} = C_D \left(S_2 \sqrt{\frac{2\,\alpha\, g}{1 - \beta^4}} \right) \sqrt{\Delta h}$$

Midiendo la máxima caída de presión que provoca un fluido que circula a través de un diafragma con un caudal determinado (establecido mediante otro medidor de caudal), puede determinarse el coeficiente de descarga del diafragma si se conocen los parámetros geométricos y de flujo del sistema.

Cabe indicar finalmente que a veces se utiliza también el concepto de "porcentaje de pérdida de carga permanente", definido como la relación entre la pérdida de presión que no se recupera respecto a la pérdida de presión inicial.

Dispositivo experimental

Para estudiar la pérdida de carga a través de un diafragma, se dispone de la instalación experimental esquematizada en la siguiente figura:



En un tubo de **2,54 cm** de diámetro interno hay instalado un diafragma que tiene un orificio de **1,3 cm** de diámetro. Aguas arriba del diafragma hay tres tomas de presión y aguas abajo hay otras seis, que permitirán obtener el perfil de presiones. Cada una de esas tomas está conectada a una rama manométrica cuyas salidas están todas unidas con objeto de poder establecer la altura de la columna de agua de todas las ramas con una sola llave.

La tubería se alimenta con agua de la red, midiéndose su caudal con un rotámetro convenientemente calibrado o, en su caso (de forma redundante), con un contador mecánico de paletas y un cronómetro.

Realización práctica

Mediante la escala graduada horizontal del panel se miden las distancias relativas de las ramas manométricas respecto a la que se encuentra más cerca de la salida del rotámetro, ya que dichas ramas manométricas se han fijado al panel a una escala 2,5:1 respecto a las que se encuentran las tomas de presión en la conducción. Se abre la llave general de agua, situada delante del contador mecánico. En el caso de que haya que llenar las columnas manométricas de agua (se recomienda que el líquido manométrico tenga una altura de unos 30 cm cuando el agua no se encuentre en circulación), se abre la llave situada en la parte superior del ramal de tubos y se deja pasar agua por la tubería, abriendo la llave situada a la entrada del rotámetro y cuidando de que el caudal de circulación sea muy bajo. Cuando todas las ramas hayan alcanzado la altura de agua deseada (vasos comunicantes), se cierra la llave del ramal de tubos, quedando el sistema listo para su operación.

Se abre la llave de alimentación de agua y se fija un caudal en el rotámetro, cuidando de que se mantenga constante. Se miden las alturas manométricas teniendo en cuenta que la rama de referencia será correspondiente a la toma más cercana a la entrada del diafragma. Se llevan a cabo las medidas a cuatro valores del caudal (lecturas del rotámetro de 20, 25, 30, 35; obsérvese que el factor de calibrado del rotámetro es de **0,25 l/min**).

Presentación de los resultados

1. Representar sobre el mismo gráfico la presión manométrica en función de la distancia para cada una de los caudales estudiados.
2. Sabiendo que el fluido que circula por la conducción es agua (**ρ = 10^3 kg/m^3; μ = 10^{-3} kg/(m·s)**), determinar el régimen de circulación mediante el cálculo del número de Reynolds y definir el factor α de la ecuación de Bernuilli.
3. Calcular el coeficiente de descarga del diafragma para cada caudal. Obtener su valor medio.
4. Calcular el porcentaje de pérdida de carga permanente para cada uno de los caudales. ¿Es constante este valor?
5. Normalmente se utilizan gráficas de calibrado doble logarítmicas **Q - Δh** para trabajar con diafragmas. Estas gráficas son rectas de pendiente aproximadamente igual a 0,5. ¿Por qué?
6. Comparar el valor del caudal de circulación medido con el rotámetro con los calculados a partir del contador mecánico de paletas.

Bibliografía

- Calleja, G. (ed.); “Introducción a la Ingeniería Química”, Ed. Síntesis, Madrid (1999).
- Costa, E. y otros; “Ingeniería Química I. Conceptos generales”, Ed. Alhambra, Madrid (1983).
- Costa, J. y otros; “Curso de Química Técnica”, Ed. Reverté, Barcelona (1988)
- McCabe, W.L. y Smith, J.C.; “Operaciones básicas de Ingeniería Química”, Ed. Reverté, Barcelona (1973).