

LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

APUNTES TEÓRICOS EXPERIENCIA: PÉRDIDAS DE CARGA

A medida que un fluido fluye a través de una cañería, tubo u otro conducto, este pierde energía debido al rozamiento que existe entre las paredes del ducto y el fluido. Esto generalmente se denomina “pérdidas de carga” y en la práctica implica un descenso de la presión entre dos puntos del sistema de flujo.

La **ecuación de Bernoulli**, en su modo más general, para dos puntos en un circuito de flujo, se puede expresar como:

$$\Delta \left(\frac{P}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} \right) = h_f \quad \text{Ec. 1}$$

Donde **h_f** corresponde a las **pérdidas de carga** (o pérdidas por fricción).

Para cuantificar las pérdidas por fricción se han desarrollado múltiples ecuaciones que, dependiendo del Reynolds y tipo de flujo, presentan un valor más cercano a la realidad.

Dentro de las más comunes, se encuentran las siguientes ecuaciones:

- Ecuación de Fanning:

$$h_f = f_F \frac{L V^2}{D 2} \quad \text{Ec. 2}$$

$$f_F = \frac{1}{4} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad \text{Ec. 3}$$

- Ecuación de Darcy:

$$h_f = f_D \frac{L V^2}{D 2} \quad \text{Ec. 4}$$

$$f_D = 4f_F \quad \text{Ec. 5}$$

Donde **f** corresponde al **factor de fricción** de cada ecuación, D es el diámetro interno del ducto, V es la velocidad promedio del fluido y L es el largo total de la cañería por donde fluye el fluido.

f , dependiendo de la ecuación y de la precisión que se requiera en los resultados, se puede calcular de distintos modos, sin embargo, la forma más común para obtener este valor es leyéndolo desde el **gráfico de Moody** (Ver Anexo). Para utilizar este gráfico se debe conocer el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa (ϵ/D) que depende del material de la tubería (Ver tabla en Anexo).

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 6}$$

Por otro lado, para el cálculo de pérdidas en tramos con presencia de accesorios se debe calcular las pérdidas de cada singularidad y luego sumarlas todas a la longitud de cañería recta para obtener la **longitud equivalente (L_{eq})**. Para su cálculo, utilizar las tablas adjuntas en Anexos de relaciones de longitud equivalente por tipo de accesorio.

$$h_L = f \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \quad \text{Ec. 7}$$

Una forma empírica de determinar las pérdidas de carga de una singularidad es aplicando la Ecuación de Bernoulli a la singularidad. Si tomamos un punto antes del accesorio y otro después y suponemos que ambos puntos se encuentran a la misma altura y que la velocidad del fluido no varía significativamente, es posible calcular las pérdidas con la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_f \quad \text{Ec. 8}$$

Esto quiere decir que las pérdidas de carga de una singularidad son proporcionales a la diferencia de presión entre los puntos sobre la densidad del fluido.

El efecto del tiempo sobre la rugosidad de una cañería es muy difícil de predecir y no se puede esperar un grado alto de seguridad al determinar el factor de fricción. Como regla general, para tuberías con un servicio promedio de 5 a 10 años se debe usar un factor de seguridad del 20% al 30% en el factor de fricción. Para cañerías con 15 o más años de servicio se puede usar un factor de seguridad del 50%.

PÉRDIDAS EN FLUJOS COMPRESIBLES

En el flujo de gases por tuberías, si la variación de presión es significativa, se produce una variación de la densidad del gas, que inhabilita el uso de la ecuación de Bernoulli. Una situación especial son los ductos de acondicionamiento de aire, donde los bajos flujos y caídas de presión permiten seguir considerando al aire como fluido incompresible, y por lo tanto emplear la ecuación de Bernoulli.

En el flujo de fluidos compresibles debe considerarse que a lo largo de la tubería la densidad del gas disminuye (proporcional a su presión), con lo cual su velocidad aumenta a expensas de su energía interna (o sea baja su temperatura), todo lo cual dificulta la integración del Balance de Energía Mecánica. No obstante, es posible aplicar el Balance de Energía Mecánica a un ducto de diámetro D constante y de longitud dL , tal como lo muestra la siguiente figura:

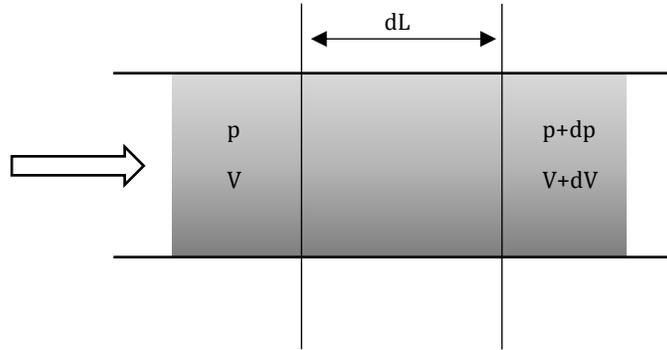


Figura 1. Sección de tubería de longitud dL

Fuente. [2]

$$\frac{(p + dp) - p}{\rho} + \frac{1}{2}[(V + dV)^2 - V^2] + dh_f = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

$$\frac{dp}{\rho} + VdV + 2f \frac{dL}{D} V^2 = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

Introduciendo la densidad de flujo másico $G = \rho V$, la cual permanece constante en la tubería,

$$\frac{dp}{G^2} \rho + \frac{1}{V} dV + 2f \frac{dL}{D} = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

E integrando, se obtiene:

$$\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + \frac{1}{G^2} \int \rho dp + 2f \frac{L}{D} = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

FLUJO COMPRESIBLE ISOTERMO

Considerando gas ideal, $\rho = p \cdot \frac{PM}{RT}$ se integra la densidad del gas:

$$\frac{1}{G^2} \int \rho dp = \frac{PM}{2RTG^2} (p_2^2 - p_1^2) \quad \text{Ec. 13}$$

Además, considerando que para gas ideal $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$,

$$\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) + \frac{PM}{2RTG^2} (p_2^2 - p_1^2) + 2f \frac{L}{D} = 0 \quad \text{Ec. 14}$$

Si $\frac{\Delta p}{p_1} \leq 0,20$, es posible eliminar el término $\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$, obteniéndose la ecuación de Waymouth:

$$p_1^2 - p_2^2 = 4f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{G^2 \cdot R \cdot T}{PM} \quad \text{Ec. 15}$$

Para resolver sin conocer la densidad de flujo másico ni el factor de fricción, es necesario realizar un tanteo dándose un valor inicial de f . Con ϵ/D determinar Re del gráfico de Moody, luego calcular G con la ecuación de Weymouth y finalmente recalculer Reynolds con $Re = G \cdot \frac{D}{\mu}$.

Repetir esto hasta obtener un Re aproximadamente constante.

REFERENCIAS

1. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. **Robert Perry**. 7ma Ed.
2. *Escurrimiento de Fluidos: Aplicaciones*. **Alejandro Reyes**. 1ra Ed.
3. *Handbook of Hydraulics*. **Horace King**. 7ma Ed.
4. *Principios de Operaciones Unitarias*. **Alan Foust y Leonard Wenzel**. 2da Ed.
5. *Mecánica de fluidos*. **Yunus Cengel**. 1ra Ed.
6. *Mecánica de fluidos*. **Robert Mott**. 7ma Ed.

ANEXO 1

Tablas de resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D y Rugosidad de tubería (valores de diseño). Fuente [6].

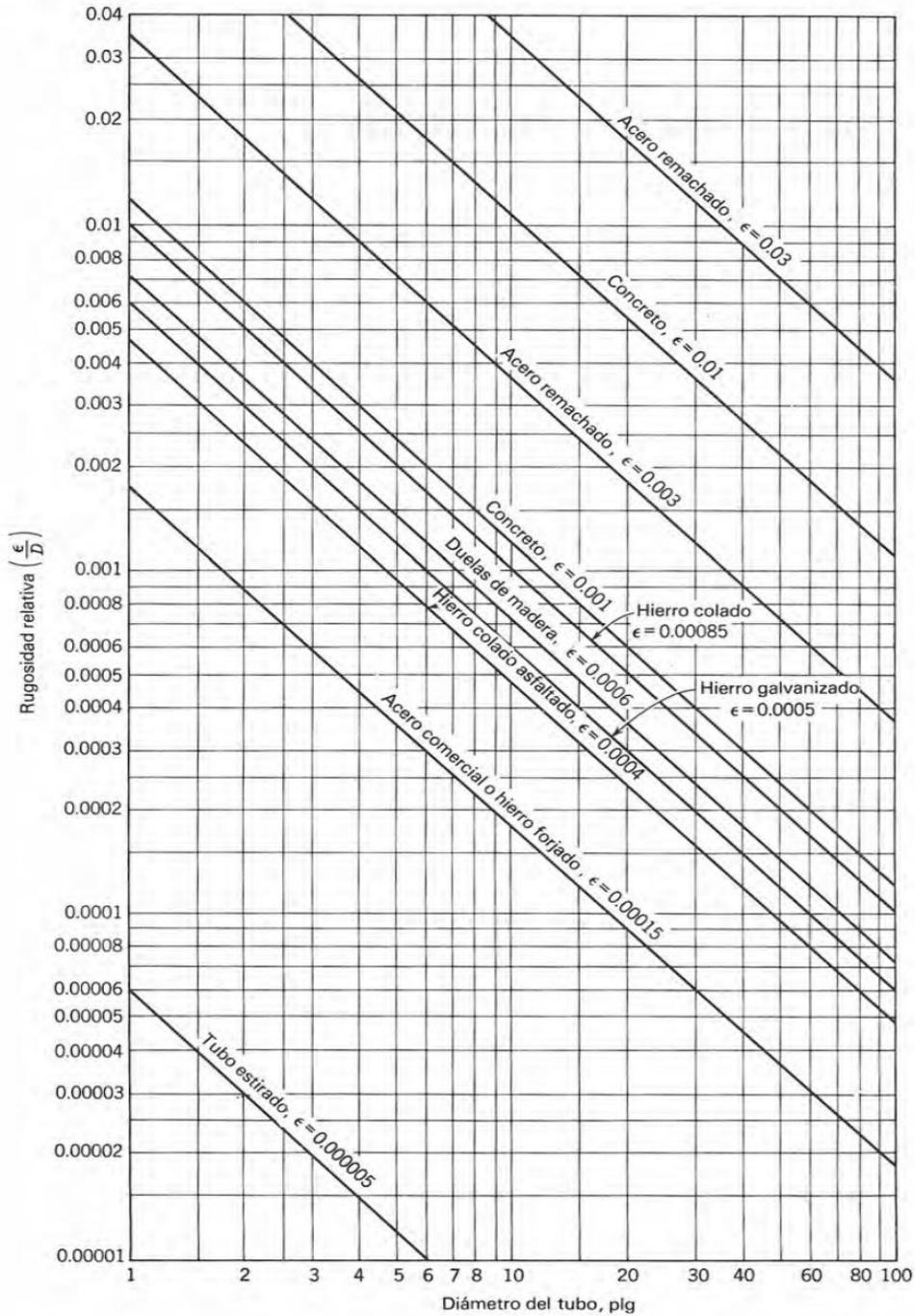
| Tipo | Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D |
|---|--|
| Válvula de globo —totalmente abierta | 340 |
| Válvula de ángulo —totalmente abierta | 150 |
| Válvula de compuerta —totalmente abierta | 8 |
| —abierta $\frac{3}{4}$ | 35 |
| —abierta $\frac{1}{2}$ | 160 |
| —abierta $\frac{1}{4}$ | 900 |
| Válvula de retención —tipo oscilante | 100 |
| Válvula de retención —tipo bola | 150 |
| Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in | 45 |
| —10-14 in | 35 |
| —16-24 in | 25 |
| Válvula de pie —tipo disco de vástago | 420 |
| Válvula de pie —tipo disco de bisagras | 75 |
| Codo estándar de 90° | 30 |
| Codo de 90° y radio largo | 20 |
| Codo de 90° para calle | 50 |
| Codo estándar de 45° | 16 |
| Codo de 45° para calle | 26 |
| Doblez de retorno cerrado | 50 |
| Te estándar —con flujo por la línea principal | 20 |
| —con flujo por la ramificación | 60 |

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

| Material | Rugosidad ϵ (m) | Rugosidad ϵ (ft) |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Vidrio | Liso | Liso |
| Plástico | 3.0×10^{-7} | 1.0×10^{-6} |
| Tubo estirado; cobre, latón, acero | 1.5×10^{-6} | 5.0×10^{-6} |
| Acero, comercial o soldado | 4.6×10^{-5} | 1.5×10^{-4} |
| Hierro galvanizado | 1.5×10^{-4} | 5.0×10^{-4} |
| Hierro dúctil —revestido | 1.2×10^{-4} | 4.0×10^{-4} |
| Hierro dúctil —sin revestir | 2.4×10^{-4} | 8.0×10^{-4} |
| Concreto, bien hecho | 1.2×10^{-4} | 4.0×10^{-4} |
| Acero remachado | 1.8×10^{-3} | 6.0×10^{-3} |

ANEXO 2

Diagrama de rugosidad relativa en función del diámetro para tubos de varios materiales. Fuente [4].



ANEXO 3

Diagrama de Moody.

