

Operaciones Unitarias I

Formulario de Transporte de Fluidos

1. Balance de Masa

Ecuación de Continuidad

$$W = A_1 u_1 \rho_1 = A_2 u_2 \rho_2 \quad (1.1)$$

$$Q = A u$$

$$G = u \rho \quad G = \frac{u}{v} \quad G = \frac{W}{A}$$

$$W = A u \rho$$

$$W = Q \rho$$

$$W = A G \quad (1.3)$$

En donde:

W	: flujo másico	kg/s	lb/s
A	: área transversal	m ²	pie ²
u	: velocidad media	m/s	pie/s
ρ	: densidad del fluido	kg/m ³	lb/pie ³
Q	: caudal, gasto	m ³ /s	pie ³ /s
G	: velocidad másica	kg/m ² .s	lb/pie ² .s

2. Balance de Energía

Ecuaciones Generales de Flujo (B-A)

$$\Delta U + \Delta \left(\frac{m u^2}{2g_c} \right) + \Delta \left(\frac{m g z}{g_c} \right) + \Delta (P V) = q - W \quad (1.4)$$

Como $\Delta H = \Delta U + \Delta (PV)$

$$\Delta H + \Delta \left(\frac{m u^2}{2g_c} \right) + \Delta \left(\frac{m g z}{g_c} \right) = q - W \quad (1.5)$$

U	: energía interna
m	: masa
u	: velocidad media fluido
g	: gravedad
z	: altura
P	: presión
V	: volumen
+q	: calor suministrado
-q	: calor recibido
-W	: trabajo realizado por el sistema
+W	: trabajo recibido por el sistema
H	: entalpía

3. Transporte de Fluidos Incomprensibles: Líquidos

Teorema de Bernoulli (A-B)

$$\frac{\Delta p}{\gamma} + \Delta \left(\frac{u^2}{2g} \right) + \Delta z - h_f = h_w \quad \frac{\Delta p}{\gamma} + \Delta \left(\frac{u^2}{2g} \right) + \Delta z - h_f = 0 \quad (1.12) \text{ para transporte de líquidos}$$

Tener en cuenta

$$\Delta H = m C_p \Delta T = m (C_v + R) \Delta T$$

$$\bar{V} = \frac{1}{\rho}$$

En donde:	h _f	: carga de fricción
	h _q	: carga de calor
	-h _w	: carga de trabajo (-) bomba
	+h _w	: carga de trabajo (+) turbina
	C _p	: capacidad calorífica Pcte
	C _v	: capacidad calorífica Vcte
	T	: temperatura
	R	: constante universal de gases
	V	: volumen específico

Constantes

$$g_c = 9.81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}} = 9.81 \frac{\text{Kg m}}{\text{s}^2 \text{ Kg}}$$

$$g_c = 32.2 \frac{\text{Poundal}}{\text{lb}}$$

$$J = 426 \frac{\text{Kg m}}{\text{Kcal}}$$

$$J = 778 \frac{\text{lb pie}}{\text{BTU}}$$

Relación de la Velocidad media y máxima

$$\frac{u}{u_{\text{máxima}}} = 0.5$$

Relación entre velocidad media y velocidad máxima en Flujo laminar

$$\frac{u}{u_{\text{máxima}}} = 0.81$$

Relación entre velocidad media y velocidad máxima en Flujo turbulento

Módulo o Índice de Reynold

$$Re = \frac{u D \rho}{\mu}$$

(1-14) Módulo de Reynold (adimensional)

Re < 2100	Flujo laminar
2100 < Re < 4000	Flujo transitorio
Re > 4000	Flujo turbulento

Pérdidas de Carga por Fricción h_f

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g}$$

(1-13) Pérdida de carga por fricción para una tubería recta de longitud L

Pérdidas de Carga por Fricción de los Accesorios

Hallar la Longitud Equivalente de accesorios en la Figura 1-2, y sumarla a la Longitud de la tubería recta para utilizar la fórmula (1-13)

Factor o coeficiente de Fricción

$$f = \frac{64}{Re} \quad (1-15) \text{ Factor de Fricción para Régimen o Flujo Laminar}$$

Factor de Fricción en Régimen Turbulento se determina en la Figura 1-4 llamado Diagrama de Moody, en función del Número de Reynold Re y de la Rugosidad Relativa del tubo

Rugosidad Relativa es el cociente entre el espesor de las irregularidades de la cara interna del tubo y el diámetro interno del mismo. Se puede encontrar estos valores en la Figura 1-3 para tubos construidos en materiales diversos en función del diámetro del tubo.

Cuando no se dispone de gráficas puede efectuarse el cálculo del **Factor de Fricción** acudiendo a fórmulas empíricas tales como las indicadas a continuación:

$$4f = 0.0056 + 0.500(Re)^{0.32} \quad (1-16) \quad f = 0.0140 + 1.056 Re^{-0.42} \quad (1-18)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log(Re \sqrt{f}) - 0.80 \quad (1-17) \quad f = 0.16 Re^{-0.16} \quad (1-19)$$

Pasos para el Cálculo de h_f en Flujo Turbulento:

1. Determinar u (velocidad) a partir del diámetro y el caudal
2. Calcular Re
3. Determinar e/D en la figura 1-3
4. Determinar f en la figura 1-4
5. Determinar la **Longitud Equivalente** de accesorios en la figura 1-2
6. Calcular h_f en la ecuación 1-13

Pasos para el cálculo del Caudal

1. Se calcula $Re \sqrt{f}$ aplicando la ecuación (1-21) número de Karman
2. Con D determinar e/D en la figura 1-3
3. con $Re \sqrt{f}$ y e/D Determinar $\frac{1}{\sqrt{f}}$ en la figura 1-5
4. Se calcula el valor de u a partir de la ecuación (1-20)
5. Se calcula el **caudal** a partir de la velocidad y el diámetro $Q = u.A$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{u}{\sqrt{2g(D/L)h_f}} \quad (1-20) \quad Re \sqrt{f} = \frac{D\rho}{\mu} \sqrt{\frac{2gDh_f}{L}} \quad (1-21)$$

Pasos para el cálculo del Diámetro Mínimo, Suponiendo f (conociendo h_f y Q)

1. Se halla la velocidad en función del diámetro en la ecuación: $u = \frac{4Q}{\pi D^2}$ (1-22)
2. Se efectúa el cálculo por tanteo suponiendo un valor f_1 y determinando D_1 por la Ecuación (1-23)
3. Se determinan Re_1 y $(e/D)_1$ para el valor de D_1
4. Se determina el valor de f en función de Re_1 y $(e/D)_1$ con ayuda de la figura (1-4). En el caso de que este valor de f coincida con el valor supuesto f_1 , el diámetro D_1 es el buscado; en caso contrario será necesario efectuar un nuevo tanteo, suponiendo ahora para f_2 el valor calculado en el primer tanteo.

Pasos para el cálculo del Diámetro Mínimo, Suponiendo D (para diámetros estimados pequeños y conociendo h_f y Q)

1. Suponiendo D_1 se calcula u_1 en la ecuación: $u = \frac{4Q}{\pi D^2}$ (1-22)
2. Con el D_1 hallamos $(e/D)_1$ en la figura 1-3
3. Con u_1 se determinan Re_1
4. Con Re_1 y $(e/D)_1$ hallamos f_1 con ayuda de la figura (1-4)
5. Luego hallamos h_{f1} y lo comparamos con h_f conocido, si los valores coinciden el diámetro D_1 es el buscado; en caso contrario será necesario efectuar un nuevo tanteo, suponiendo ahora un D_2 y repetimos el procedimiento.

4. Transporte de Fluidos Comprensibles: Gases y Vapores (B-A)

Suponiendo un flujo horizontal y que no realiza trabajo ni se suministra vapor, y considerando f como la media aritmética de los valores extremos:

$$\frac{G^2}{g} \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{g_c}{g} \int_1^2 \frac{dp}{V} + f \frac{G^2}{2g} \frac{L}{D} = 0 \quad (1.28) \text{ para transporte de fluidos incomprensibles}$$

Flujo isoterma de un gas ideal:

$$\frac{G^2}{g} \ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{g_c}{g} \frac{P_2^2 - P_1^2}{2P_1V_1} + f \frac{G^2}{2g} \frac{L}{D} = 0 \quad (1.30) \text{ flujo isoterma de un gas ideal}$$

$$\frac{G^2}{g} \ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{g_c}{g} \frac{P_2 - P_1}{V_m} + f \frac{G^2}{2g} \frac{L}{D} = 0 \quad (1.32) \text{ flujo isoterma de un gas ideal, } V_m \text{ volumen específico medio}$$

Si la caída presión a lo largo de la tubería es pequeña en relación con la presión total, entonces la variación de la energía cinética del fluido será despreciable, por lo tanto:

$$P_2 - P_1 = V_m \cdot f \frac{G^2}{2g_c} \frac{L}{D} = V_m \cdot f \frac{1}{2g_c} \frac{u_m^2}{V_m^2} \frac{L}{D} = f \frac{1}{2g} u_m^2 \gamma_m \frac{L}{D} \quad (1.34)$$

En donde: u_m y γ_m del fluido a la presión media.

De la ecuación (1.30) despreciando el primer término y haciendo $P_1V_1 = \frac{zRT}{M}$, tenemos:

$$P_2 - P_1 = -f \frac{L}{D} \frac{G^2}{g_c} \frac{zRT}{M} \quad (1.35) \text{ en donde } M \text{ es peso molecular}$$

También tenemos que:

$$G = u\rho = \frac{W}{A} = \frac{Q\rho}{A}$$

$$\text{Re} = \frac{GD}{\mu} = \frac{u\rho D}{\mu}$$

La potencia del compresor se calcula por la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia Compresor} = \frac{\Delta P W}{\gamma_m} = \frac{\Delta P A G}{\gamma_m}$$