

Hidráulica Básica [2015961]

Tema # 2: Análisis de sistemas de tuberías

Luis Alejandro Morales (Ph.D)
Profesor Asistente

Universidad Nacional de Colombia-Bogotá
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Contents

1	Sistemas de tuberías simples	1
1.1	Tipos de problema en sistemas de tuberías	2
1.2	Ecuaciones para la solución de problemas	3
1.3	Solución de la ecuación de Colebrook-White	4
1.3.1	Método de punto fijo	4
1.3.2	Método de Newton-Raphson	4
1.4	Comprobación de diseño	5
1.5	Cálculo de la potencia requerida	5
1.6	Diseño de la tubería	6
2	Sistemas de tuberías en serie	6
2.1	Ecuaciones para la solución de problemas	6
2.2	Comprobación de diseño	7
2.3	Cálculo de la potencia requerida	8
2.4	Diseño de la tubería	9
3	Tuberías con pérdida uniforme de caudal por unidad de longitud (Tubos porosos)	10
4	Sistemas de tuberías en paralelo	12
4.1	Ecuaciones para la solución de problemas	12
4.2	Comprobación de diseño	14
4.3	Cálculo de la potencia requerida	14
4.4	Diseño de tuberías en paralelo	15
5	Sistemas de tuberías ramificadas	15
6	Redes de distribución: Método de análisis de Cross	15
7	Redes de distribución: Método de análisis lineal	15

1 Sistemas de tuberías simples

Una tubería simple es aquella que tiene un diámetro y esta hecha de un solo material a lo largo de su longitud (ver figura 2). La energía que mueve el flujo dentro de la tubería es gracias a la acción de la gravedad (tanque a la entrada) o a una máquina (sistema de bombeo a la entrada). Dichas tuberías pueden tener cualquier tipo de accesorio a lo largo de su longitud lo que implica unas pérdidas menores. Las ecuaciones de Prandtl, Von-Karman y Darcy-Weisbach vistas en la Unidad 1, son utilizadas para el diseño de tuberías simples. Note que existe cierta dificultad para el diseño teniendo en cuenta que la ecuación de Colebrook-White para calcular el coeficiente de



Figure 1: Acueductos por gravedad.

rugosidad f es implícita y requiere un proceso iterativo para su solución. Los algoritmos que aquí se discutirán, constituyen las bases para el análisis y diseño de tuberías más complejos.

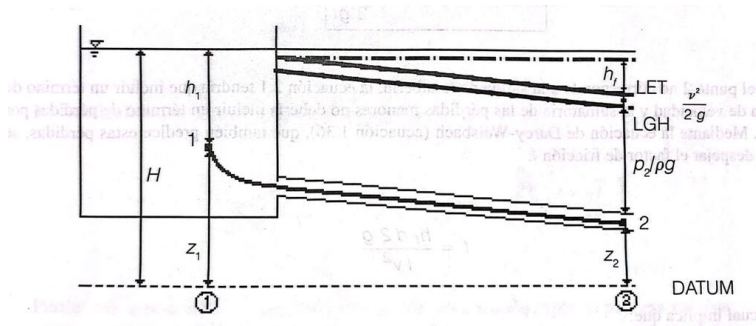


Figure 2: Tubería simple alimentada por un tanque de nivel constante y con descarga a la atmosfera (tomado de [1]).

1.1 Tipos de problema en sistemas de tuberías

Los problemas en sistemas de tuberías se clasifican de acuerdo con las variables desconocidas. Las variables involucradas en estos problemas se pueden clasificar como:

- *Características la tubería:* Diámetro (D), longitud (L), rugosidad absoluta (ε).
- *Propiedades del fluido:* Densidad (ρ) y viscosidad dinámica (μ) o cinemática (ν).
- *Variables relacionadas con el esquema del sistema:* Coeficientes de pérdidas menores (K) de todos los accesorios en el sistema.
- *Variables relacionadas con la energía impulsora del sistema:* Cabeza de energía ($H = E1 - E2$), entre la energía en el embalse de entrada ($E1$) y la energía salida del sistema ($E2$), o potencia de la bomba (P).
- *Propiedades del flujo:* Caudal (Q) y velocidad (V) del flujo.
- *Otras variables:* Aceleración de la gravedad (g).

De acuerdo con las variables involucradas en sistemas de tuberías, existen tres tipos de problemas:

1. **Comprobación de diseño:** En este tipo de problemas la tubería existe y se conoce su longitud, su diámetro, su rugosidad absoluta (material), al igual que todos los accesorios y sus coeficiente de pérdidas menores. También se conoce la energía impulsora, ya sea una cabeza de energía (gravitacional por diferencia de niveles) o una energía mecánica (suministrada por una bomba). Las propiedades del fluido como la densidad y la viscosidad absoluta son también conocidas. La incógnita es entonces el caudal o la velocidad del flujo en el sistema.

Variables conocidas	Incógnita
D, ε, H (o P), $\sum K, \rho, \mu, g, L$	Q (o V)

2. **Cálculo de la potencia requerida:** En este tipo de problemas, el sistema existe por lo que se conocen su longitud, su diámetro, su rugosidad absoluta (material), al igual que todos los accesorios y sus coeficiente de pérdidas menores. Las propiedades del fluido como la densidad y la viscosidad dinámica así como el caudal (o velocidad) que fluye por el sistema son también conocidas. La finalidad es determinar la potencia, ya sea mecánica o gravitacional, requerida para mover cierto caudal a través de la tubería dada.

Variables conocidas	Incógnita
D, ε , Q (o V), $\sum K$, ρ , μ , g, L	P (o H)

3. **Diseño de la tubería:** En este tipo de problemas se conoce el caudal o la velocidad de flujo y la potencia disponible (mecánica o gravitacional), algunas características de la tubería como la longitud, los accesorios y sus coeficientes de pérdida y las propiedades del fluido como la densidad y la viscosidad dinámica. Se desconoce el diámetro necesario para permitir el paso de el caudal demandado. En cuanto a la rugosidad absoluta, se debe cambiar el tipo de tubería (rugosidad absoluta) con el fin de obtener la mejor opción.

Variables conocidas	Incógnita
ε , Q (o V), P (o H), $\sum K$, ρ , μ , g, L	D

1.2 Ecuaciones para la solución de problemas

A continuación se presentan las ecuaciones necesarias para resolver los tres problemas ya mencionadas. Estas ecuaciones fueron discutidas en el capítulo anterior.

Si se tiene una tubería simple cuya entrada es en la sección 1 y cuya salida es en la sección, aplicando la ecuación de Bernoulli entre 1 y 2, de manera general, se tiene:

$$\frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + h_f + \sum h_e - h_b + h_t \quad (1)$$

donde h_b es la cabeza de energía suministrada por la bomba y h_t es la cabeza de energía sustraída por la turbina. La energía total en una sección (e.g. 1 o 2) de flujo se puede expresar como $E = \frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\gamma}$, por lo tanto la ecuación 1 se puede expresar como:

$$E_1 - E_2 = h_f + h_e - h_b + h_t \quad (2)$$

en donde h_f son las pérdidas por fricción estimadas con la ecuación de Darcy-Weisbach como:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

y h_e son las perdidas por accesorios, las cuales se pueden calcular como:

$$h_e = \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

El factor de fricción f en la ecuación 3, se calcula usando el diagrama de Moody o numéricamente usando la ecuación Colebrook-White como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

donde el número de Reynolds (Re) se calcula como

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

Si se reemplaza las ecuaciones 3 y 4 en la ecuación 2, se tiene:

$$E_1 - E_2 = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + \sum K \frac{V^2}{2g} - h_b + h_t \quad (7)$$

despejando V en la ecuación 7, se tiene:

$$V = \sqrt{2g \frac{E_1 - E_2 + h_b - h_t}{f \frac{L}{D} + \sum K}} \quad (8)$$

En los tres tipos de problemas, el objetivo es usar las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 8 para su solución. Note que la ecuación 5 es una ecuación implícita que requiere del uso de algún método iterativo o numérico para su solución. Note que la ecuación 8 se usa en particular para la solución de problemas de *comprobación de diseño* y de *diseño de tuberías*.

1.3 Solución de la ecuación de Colebrook-White

1.3.1 Metodo de punto fijo

Consiste en el siguiente procedimiento:

1. Leer la información de entrada: ε , ρ , μ o ν , V o Q , D
2. Calcular el Re usando la ecuación 6
3. Si $Re < 2000$ (Flujo laminar), calcular f como:

$$f = Re/64 \quad (9)$$

y luego ir a 6. Si $Re > 2000$ continuar.

4. Asumir un valor inicial de f_i (e.g. $f = 0.01$).
5. Usando la siguiente forma de la ecuación 5, calcular un valor f_{i+1} :

$$f_{i+1} = \left[-2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52}{Re \sqrt{f_i}} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

6. Si $|f_i - f_{i+1}| \leq \eta$, donde η es un error (e.g. $\eta = 1 \times 10^{-6}$), ir a 6. Si $|f_i - f_{i+1}| > \eta$, hacer $f_i = f_{i+1}$ e ir a 6, para calcular un nuevo valor f_{i+1} .
7. Imprimir f

1.3.2 Método de Newton-Raphson

El método de Newton-Rapson es un método numérico para la solución de ecuaciones implícitas. Converge más rápido que el método de punto fijo. Algunas condiciones para poder aplicar el método son para un intervalo l del dominio:

- $f(x)$ debe estar definida en l .
- La función de iteración de $f(x)$ deber ser continua en l .
- La función implícita $f(x)$ debe ser diferenciable ($f'(x)$) en l .

En general la ecuación de Colebrook-White cumple estas condiciones. El método consiste en el siguiente procedimiento:

1. Leer la información de entrada: ε , ρ , μ o ν , V o Q , D
2. Calcular el Re usando la ecuación 6

3. Si $Re < 2000$ (Flujo laminar), calcular f como:

$$f = Re/64 \quad (11)$$

y luego ir a 6. Si $Re > 2000$ continuar.

4. Asumir un valor inicial de f_i (e.g. $f = 0.01$).

5. Calcular

$$x_i = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (12)$$

6. Calcular

$$f(x_i) = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52x_i}{Re} \right) \quad (13)$$

7. Calcular

$$f'(x_i) = \left[\frac{-2}{\ln 10} \right] \left[\frac{\frac{2.52}{Re}}{\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52x_i}{Re}} \right] \quad (14)$$

8. Calcular el nuevo valor de x_{i+1} como:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i) - x_i}{f'(x_i) - 1} \quad (15)$$

9. Si $|x_i - x_{i+1}| \leq \eta$, donde η es un error (e.g. $\eta = 1 \times 10^{-6}$), ir a 6. Si $|x_i - x_{i+1}| > \eta$, hacer $x_i = x_{i+1}$ e ir a 6, para calcular un nuevo valor x_{i+1} .

10. Imprimir f , donde:

$$f = \frac{1}{x_{i+1}^2} \quad (16)$$

1.4 Comprobación de diseño

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar el valor de V o Q .

1. Leer la información de entrada: ε , ρ , μ o ν , L , D , $\sum K$, $E1$, $E2$, h_b y h_t .
2. Aplicar el procedimiento descrito en la sección 1.3.1 o en la sección 1.3.2. Note que lo único que cambia dentro de estos procedimientos es que la velocidad V es calculada usando la ecuación 8; ya no es un dato de entrada.
3. Imprimir V y f .

1.5 Cálculo de la potencia requerida

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar la cabeza de energía de la bomba (h_b) y su potencia (P).

1. Leer la información de entrada: ε , ρ , μ o ν , L , D , $\sum K$, Q , $E1$, $E2$, h_t y η .
2. Calcular la velocidad como $V = Q/A$.
3. Aplicar el procedimiento descrito en la sección 1.3.1 o en la sección 1.3.2 para calcular f .
4. Calcular h_f usando la ecuación 3.
5. Calcular h_e usando la ecuación 4.

6. Calcular la cabeza de energía de la bomba (h_b) despejándola de la ecuación 2.
7. Calcular la potencia P como:

$$P = \frac{\rho Q g h_b}{\eta} \quad (17)$$

donde η es la eficiencia de la bomba.

8. Imprimir h_b y P .

1.6 Diseño de la tubería

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar el diámetro óptimo comercial de la tubería.

1. Leer la información de entrada: ε , ρ , μ o ν , L , D , $\sum K$, Q , $E1$, $E2$, h_t y η .
2. Asumir un diámetro comercial inicial D_i para la tubería. El D_i inicial debe ser pequeño (e.g. 1 pulg.) pero no tan pequeño ya que el procedimiento no converge.
3. Aplicar el procedimiento descrito en la sección 1.3.1 o en la sección 1.3.2. Note que lo único que cambia dentro de estos procedimientos es que la velocidad V es calculada usando la ecuación 8; ya no es un dato de entrada. De aquí sale un valor de f y V .
4. Calcular el nuevo caudal $Q_n = VA$ usando D_i , donde $A = \frac{\pi D_i^2}{4}$.
5. Si $Q_n \geq Q$ ir a 6. Si $Q_n < Q$ tomar el siguiente diámetro comercial superior D_{i+1} e ir a 3.
6. Imprimir D .

El diseño óptimo busca, en la mayoría de los casos, la solución más económica. Por lo tanto es necesario muchas veces diseñar con otros materiales (diferente valor de ε) para encontrar la mejor solución.

2 Sistemas de tuberías en serie

Las tuberías en serie son dos o mas tuberías conectadas una tras de otra con diferente diámetro o rugosidad (material) o ambos (ver figura 3). Estas tuberías son muy comunes en sistemas de riego localizado de alta frecuencia o en líneas de conducción para acueductos veredales. Al igual que en la sección 1, aquí se describirán las ecuaciones generales para resolver problemas relacionados con tuberías en serie y se explicarán los procedimientos para resolver los tres problemas en tuberías: 1) Comprobación de diseño, 2) cálculo de la potencia y 3) diseño de las tuberías.

2.1 Ecuaciones para la solución de problemas

Teniendo en cuenta las tuberías en serie de la figura 3, se plantean las siguientes ecuaciones:

- Conservación de la energía

$$\Delta E = E1 - E2 = H_T = z_1 - z_2 = h_e + h_{f_1} + h_{m_1} + h_{f_2} + h_{m_2} + h_{f_3} + h_{m_3} + h_s \quad (18)$$

donde H_T es la diferencia de niveles entre los dos tanque (la energía total disponible en el sistema), h_e pérdidas menores de entrada, h_{f_i} pérdidas por fricción en el tubo i , h_{m_i} pérdidas menores (por válvulas, uniones, etc) en la tubería i y h_s pérdidas por salida.

Para un numero n de tuberías en serie la ecuación 18 se puede escribir como:

$$H_T = h_e + \sum_{i=1}^n h_{f_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{m_{i,j}} + h_s \quad (19)$$

donde m es numero de accesorios en la tubería i ; m puede ser variable. La ecuación 19 establece que la energía disponible en el sistema se disipa en pérdidas a lo largo de la tubería. Puede haber el caso en el cual tengamos, por ejemplo, una tubería horizontal por lo cual una bomba sería necesaria para impulsar el flujo por lo que en

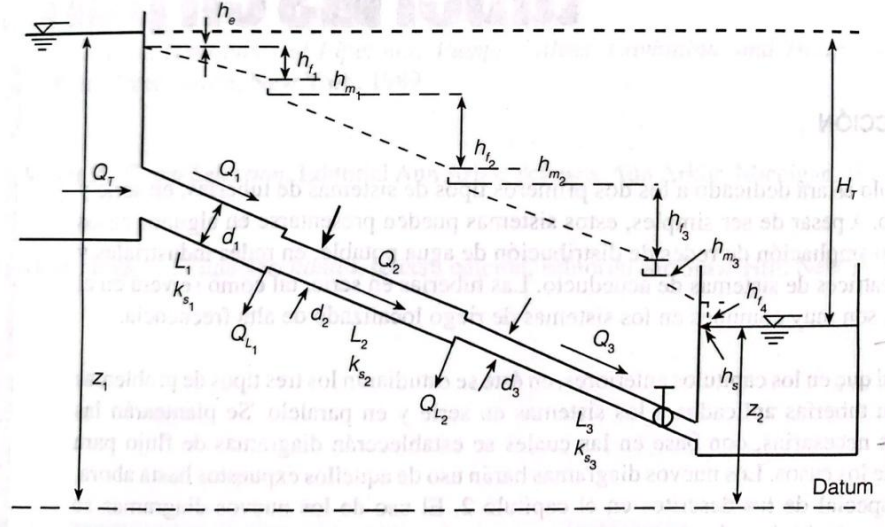


Figure 3: Tres tuberías en serie conectando dos tanques en donde Q_{L_i} representa un caudal lateral de salida al final de la tubería i (tomado de [1]).

la parte izquierda de la ecuación 18 tendríamos $H_T = h_b$. También se puede dar el caso de una turbina en alguna sección de la tubería por lo que habría que sumarle a la derecha de la ecuación h_t .

Desarrollando la ecuación 19, se tiene:

$$H_T = K_e \left(\frac{V^2}{2g} \right)_1 + \sum_{i=1}^n \left(f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \right)_i + \sum_{i=1}^n \left(\frac{V^2}{2g} \right)_i \sum_{j=1}^m K_j + K_s \left(\frac{V^2}{2g} \right)_n \quad (20)$$

- Conservación de la masa o ecuación de continuidad:

$$Q_T = Q_1 = Q_2 + Q_{L1} = Q_3 + Q_{L1} + Q_{L2} \quad (21)$$

Donde Q_i es el caudal que viaja por la tubería i y Q_{L_i} es el caudal derivado de la tubería i . La ecuación 21 se puede expresar de forma mas compacta como:

$$Q_T = Q_i + \sum_{j=1}^{i-1} Q_{L_j} \quad (22)$$

En caso de que no existiera derivaciones ($Q_{L_i} = 0$) la ecuación 22 queda como:

$$Q_T = Q_1 = \dots = Q_i = \dots = Q_n \quad (23)$$

2.2 Comprobación de diseño

Se desea calcular el valor de $Q_T = Q_1$. Antes de describir el proceso de cálculo, deduciremos una ecuación que se utilizará para resolver este tipo de problemas.

De la ecuación de Darcy-Weisbach, despejando el factor de fricción se tiene que:

$$f = \frac{h_f D 2g}{L V^2} \quad (24)$$

Sacando raíz cuadrada e invirtiendo los términos a ambos lados se tiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{V\sqrt{L}}{\sqrt{h_f D 2g}} \quad (25)$$

Igualando a la ecuación de Colebrook-White, se tiene:

$$\frac{V\sqrt{L}}{\sqrt{h_f D 2g}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (26)$$

Reemplazando $Re = \frac{VD}{\nu}$ y la ecuación 25 en la ecuación 26 y despejando la velocidad, se tiene:

$$V = \frac{-2\sqrt{2gDh_f}}{\sqrt{L}} \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52\nu\sqrt{L}}{D\sqrt{2gDh_f}} \right) \quad (27)$$

Note que la ecuación 27 es explícita para la velocidad V .

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar $Q_T = Q_1$.

1. Leer: ρ , μ o ν , K_e (coef. de pérdidas a la entrada), K_s (coef. de pérdidas a la salida), $E1$ y $E2$. También, para cada tubería i , leer: ε_i , L_i , D_i , $\sum K_i$, Q_{L_i} , h_{b_i} , h_{t_i} y η_i (eficiencia de la bomba o turbina). Esta lectura se debe hacer para las n tuberías del sistema.
2. Para llevar a cabo este proceso es necesario, para la primera iteración, asumir un valor inicial de h_{f_1} . Se ha encontrado que $h_f \propto \frac{L}{D^5}$, de acuerdo con esto, [1] ha establecido que este valor inicial de h_{f_1} se puede expresar como:

$$h_{f_1} = H_T \frac{L_1/D_1^5}{\sum_{i=1}^n L_i/D_i^5} \quad (28)$$

3. Para la tubería $i = 1$: calcular el valor de V_1 usando la ecuación 27, calcular el caudal $Q_T = Q_1 = V_1 A_1$, calcular el valor de f_1 usando uno de los dos procedimientos descritos en la secciones 1.3.1 y 1.3.2, calcular h_{f_1} utilizando la ecuación 3 y h_{m_1} utilizando la ecuación 4.
4. Para el resto de tuberías $i = 2 \dots n$: calcular el caudal Q_i usando la ecuación 22, calcular la velocidad $V_i = Q_i/A_i$, f_i usando uno de los dos procedimientos descritos en la secciones 1.3.1 y 1.3.2, calcular h_{f_i} utilizando la ecuación 3 y h_{m_i} utilizando la ecuación 4.
5. Calcular la pérdida de energía total estimada \hat{H}_T usando la ecuación 19. Si $|\hat{H}_T - H_T| \leq \eta$ donde η es un error (e.g. $\eta = 1 \times 10^{-6}$), ir a 6. Si $|\hat{H}_T - H_T| > \eta$, actualizar el valor de h_{f_1} , como:

$$h_{f_1}^t = h_{f_1}^{t-1} + \Delta h_{f_1} \quad (29)$$

donde Δh_{f_1} , se calcula como

$$\Delta h_{f_i} = (H_T - \hat{H}_T) \frac{L_1/D_1^5}{\sum_{i=1}^n L_i/D_i^5} \quad (30)$$

Una vez calculado el nuevo h_{f_1} ir a 3.

6. Imprimir Q_i donde $i = 1 \dots n$.

2.3 Cálculo de la potencia requerida

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar la cabeza de energía de la bomba (h_b) y su potencia (P).

1. Leer: ρ , μ o ν , K_e (coef. de pérdidas a la entrada), K_s (coef. de pérdidas a la salida), $E1$, $E2$ y $Q_T = Q_1$. También, para cada tubería i , leer: ε_i , L_i , D_i , $\sum K_i$, Q_{L_i} , h_{t_i} y η_i (eficiencia de la bomba o turbina). Esta lectura se debe hacer para las n tuberías del sistema.
2. Utilizando la ecuación 22, calcular el valor de Q_i para $i = 2 \dots n$.

3. Para cada una de las tuberías $i = 1...n$, calcular: la velocidad como $V_i = Q_i/A_i$, f_i usando uno de los dos procedimientos descritos en la secciones 1.3.1 y 1.3.2, calcular h_{f_i} utilizando la ecuación 3 y h_{m_i} utilizando la ecuación 4.
4. Calcular la cabeza de energía de la bomba (h_b) despejandola de la ecuación 2. Note que en esta ecuación, h_f es la sumatoria de todas h_{f_i} y h_m es la sumatoria de todas las h_{m_i} .
5. Calcular la potencia P usando la ecuación 17.
6. Imprimir h_b y P .

2.4 Diseño de la tubería

Como se habia mencionado anteriormente, el diseño, y en este caso, de tuberías en serie es un problema complejo por que eso implica buscar, en la mayoría de los casos, la solución optima desde el punto de vista economico. Por esto, no solo basta con determinar el diametro si no tambien el material de la tubería. A esto hay que sumarle que los coeficiente de perdida dependen del material de la tubería, esta es otra variable que hay que tener en cuenta. Esto quiere decir que pueden existir multiples soluciones para un mismo problema.

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar el diametro óptimo comercial D_i de la tubería para $i = 1...n$. En este proceso se asume que el material es un dato dado.

1. Leer: ρ , μ o ν , K_e (coef. de pérdidas a la entrada), K_s (coef. de pérdidas a la salida), $E1$, $E2$ y $Q_T = Q_1$. También, para cada tubería i , leer: ε_i , L_i , $\sum K_i$, Q_{L_i} , h_{b_i} , h_{t_i} y η_i (eficiencia de la bomba o turbina). Esta lectura se debe hacer para las n tuberías del sistema.
2. Utilizando la ecuación 22, calcular el valor de Q_i para $i = 2...n$.
3. Inicializar h_{f_i} para cada tubería $i = 1...n$. I-pai Wu en 1975 encontró la siguiente ecuación para inicializar h_{f_i} antes de iniciar las iteraciones:

$$h_{f_i} = H_T \frac{L_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n L_i \cos \theta_i} \quad (31)$$

donde θ_i es el angulo formado entre la horizontal y la tubería. Usualmente este angulo es el mismo para todas las tuberías ya que todas tienen la misma pendiente, por lo tanto $\theta = \frac{z_1 - z_2}{\sum_{i=1}^n L_i}$, donde z_1 es la altura a la entrada del sistema y z_2 es la altura a la salida del sistema.

4. Para cada tubería $i = 1...n$
 - (a) Asumir un diámetro comercial inicial D_i . El D_i inicial debe ser pequeño (e.g. 1 pulg.) pero no tan pequeño ya que el procedimiento no converge.
 - (b) Aplicar el procedimiento descrito en la sección 1.3.1 o en la sección 1.3.2. Note que lo único que cambia dentro de estos procedimientos es que la velocidad V es calculada usando la ecuación 8; ya no es un dato de entrada. De aquí sale un valor de f y V .
 - (c) Calcular el nuevo caudal $Q_{n_i} = V_i A_i$ usando D_i , donde $A_i = \frac{\pi D_i^2}{4}$.
 - (d) Si $Q_{n_i} \geq Q_i$ ir a 5. Si $Q_{n_i} < Q_i$ tomar el siguiente diámetro comercial superior D_{i+1} e ir a 4a.
5. Para cada tubería $i = 1...n$, calcular la velocidad real como $V_{R_i} = Q_i/A_i$
6. Para cada tubería $i = 1...n$, y con el D_i y V_{R_i} , calcular f_i usando el procedimiento descrito en la sección 1.3.1 o en la sección 1.3.2.
7. Para cada tubería $i = 1...n$, calcular $h_{f_{R_i}}$ utilizando la ecuación 3 y $h_{m_{R_i}}$ utilizando la ecuación 4. Usar en estas ecuaciones D_i y V_{R_i} .
8. La energía del sistema a la salida de la tubería n suele ser superior a la energía requerida del sistema allí ($E2$), por lo que usualmente se utiliza una valvula para hacer caer la energía a $E2$. Dicha caída h_{m_v} , se calcula como:

$$h_{m_v} = H_T - \sum_{i=1}^n h_{f_{R_i}} - \sum_{i=1}^n h_{m_{R_i}} \quad (32)$$

9. Si $h_{m_v} > 0$ y $h_{m_v} \approx E2$, ir a 10. Si $h_{m_v} >> E2$, para cada tubería $i = 1 \dots n$, actualizar el valor de h_{f_i} para la siguiente iteración como:

$$h_{f_i} = h_{f_{Ri}} + h_{m_v} \quad (33)$$

Luego ir a 4.

10. Imprimir D_i para $i = 1 \dots n$.

Es importante revisar que h_{m_v} sea positivo, de lo contrario esto supondría presiones negativas que podrían generar cavitación en el sistema. El procedimiento anterior puede ser repetido para diferentes materiales de tubería (diferentes valores de ε) con el fin de escoger el diseño más económico.

3 Tuberías con pérdida uniforme de caudal por unidad de longitud (Tubos porosos)

En sistemas de riego moderno existen sistemas de tuberías que están diseñados para entregar un caudal por unidad de longitud con el objetivo de lograr uniformidad en el riego (ver figura 5). Estas tuberías se conocen como *tubos porosos* o *mangueras exudantes*.



Figure 4: Sistema de riego con tubería porosa.

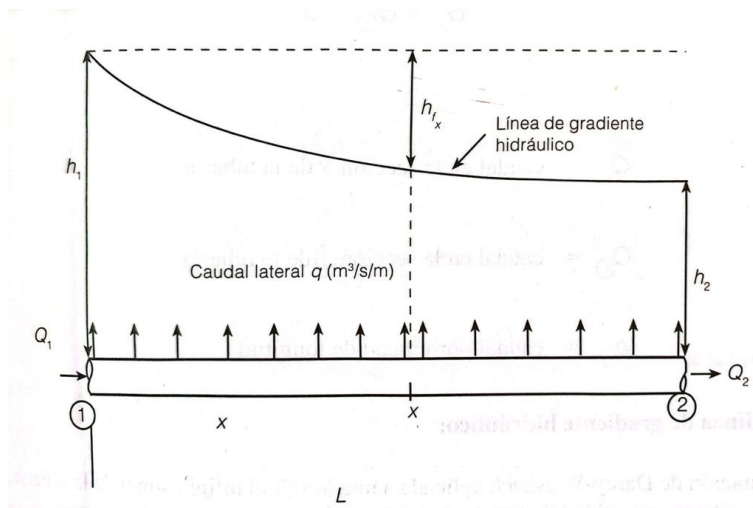


Figure 5: Tubería porosa con entrega de caudal por unidad de longitud (q) y su línea de gradiente hidráulico (tomado de [1]).

Si se analiza la tubería de la figura 5, se sabe que la presión disminuye a lo largo de la tubería debido a las pérdidas así como la velocidad ya que el caudal disminuye por unidad de longitud. De la figura 5, tenemos:

- Conservación de la masa

$$Q_x = Q_1 - qx \quad (34)$$

donde Q_x es el caudal en la tubería a una distancia x de la sección de entrada 1, q es el caudal descargado por la tubería por unidad de longitud, Q_1 es el caudal a la entrada (1) de la tubería.

- Pendiente de la línea de gradiente hidráulico Aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach (para pérdidas por fricción), e ignorando pérdidas menores, para una longitud infinitesimal de tubería dx , en donde no existe salida de caudal, se tiene:

$$dh_f = f_x \frac{dx}{D} \frac{V_x^2}{2g} \quad (35)$$

donde dh_f es la pérdida de energía a lo largo de dx , f_x es el factor de fricción en dx y V_x es la velocidad en dx . Expresando la ecuación 35 en términos del caudal Q_x , se tiene:

$$\frac{dh_f}{dx} = \frac{f_x}{2g} \frac{Q_x^2}{DA^2} \quad (36)$$

o

$$\frac{dh_f}{dx} = \frac{8f_x Q_x^2}{\pi^2 g D^5} \quad (37)$$

reemplazando la ecuación 34 en la ecuación 37, se tiene:

$$\frac{dh_f}{dx} = \frac{8}{\pi^2 g D^5} f_x (Q_1 - qx)^2 \quad (38)$$

Integrando la ecuación 38 para calcular las pérdidas a lo largo de la longitud de la tubería (L), se tiene:

$$h_f = \frac{8}{\pi^2 g D^5} \int_0^L f_x (Q_1 - qx)^2 dx \quad (39)$$

donde f_x esta dado por la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f_x}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.52\nu}{V_x D \sqrt{f_x}} \right) \quad (40)$$

Note que la ecuación 39 no se puede resolver analíticamente ya que el valor de f_x , coeficiente de fricción a una distancia x , se calcula a través de la ecuación implícita 40. Sin embargo la ecuación 39 se puede resolver aproximadamente utilizando los métodos siguientes:

1. Factor de fricción constante

Si se supone que f_x es constante y se calcula como el promedio del factor de fricción a la entrada (f_1) y a la salida (f_L):

$$f_x = \frac{f_1 + f_L}{2} \quad (41)$$

integrando la ecuación 39 para x , se tiene:

$$h_f = \frac{8f_x}{\pi^2 g D^5} \left(Q_1^2 x - Q_1 q x^2 + \frac{q^2 x^3}{3} \right) \Bigg|_{x=0}^{x=L} \quad (42)$$

en donde se obtiene:

$$h_f = \frac{8f_x}{\pi^2 g D^5} \left(Q_1^2 L - Q_1 q L^2 + \frac{q^2 L^3}{3} \right) \quad (43)$$

2. Factor de fricción constante tramo a tramo

Para utilizar este método se supone que la tubería de longitud L está dividida en n tramos de igual longitud $l = L/n$. Por lo tanto se calculan las pérdidas para cada tramo de la tubería suponiendo que f_x es constante en el tramo, y luego se suman. Las pérdidas de energía h_{f_i} para un tramo i donde $i = 1 \dots n$ son:

$$h_{f_i} = \frac{8f_{x_i}}{\pi^2 g D^5} \left(Q_{1_i}^2 l - Q_{1_i} q l^2 + \frac{q^2 l^3}{3} \right) \quad (44)$$

donde Q_{1_i} es el caudal transportado por el tramo i e igual a $Q_{1_i} = Q_1 - q l(i - 1)$. Note que f_{x_i} es el promedio entre tramos:

$$f_{x_i} = \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \quad (45)$$

Las pérdidas totales a lo largo de la tubería se calculan como:

$$h_f = \sum_{i=1}^n h_{f_i} \quad (46)$$

El procedimiento para el calculo de la pérdida de energía en una tubería porosa de describe a continuación.

1. Calcular el caudal de entrada a la tubería (Q_1) de longitud L como:

$$Q_1 = qL \quad (47)$$

2. Cálculo de la zona laminar. Debido a que la manguera o tubería va perdiendo caudal su velocidad disminuye y el flujo, en algún punto, se convierte en laminar. Para calcular ese punto, se asume un número de Reynolds crítico (donde cambia a laminar) igual a $Re_c = 2000$. Dicho caudal, para el cual ocurre Re_c , se calcular como:

$$Q_c = \frac{Re_c \pi D \nu}{4} \quad (48)$$

la distancia desde el final de la tubería en donde el flujo cambia a laminar, se calcula como:

$$L_c = \frac{L_c Q_c}{Q_1} \quad (49)$$

Teniendo en cuenta que en los últimos tramos de la tubería ($x < x_c$) el número de Reynolds tiende a cero, el f tiende a infinito. Por esto, es necesario dejar cierta longitud de la tubería en donde no se calculan pérdidas. En estos ultimos tramos, las pérdidas son muy pequeñas por lo tanto no influyen en el resultado final. Dicho valor puede ser el 0.3% de L .

3. Implementar cualquiera de los dos métodos descritos: 1) factor de fricción constante para la tubería y 2) factor de fricción constante tramo a tramo.

4 Sistemas de tuberías en paralelo

Las tuberías en paralelo son un conjunto de dos tuberías o mas las cuales se derivan de un nodo común (nodo de entrada) y convergen hacia otro nodo (nodo de salida). Esto implica que, de acuerdo a la *ley de conservación de la masa*, la suma de los caudales que viajan por cada una de las tuberías debe ser igual aguas arriba del nodo de entrada y aguas abajo del nodo de salida; esto implica que el caudal de entrada y de salida de las tuberías es le mismo. En casos prácticos y cotidianos, los sistemas de tuberías en paralelo están limitados a máximo 3 o 4 tuberías, y son mas comunes los sistemas de dos tuberías. En estos sistemas, cada tubería puede tener longitudes, diámetros, accesorios y materiales diferentes.



Figure 6: Aumento de la capacidad de un acueducto veredal mediante la construcción de una tercera tubería.

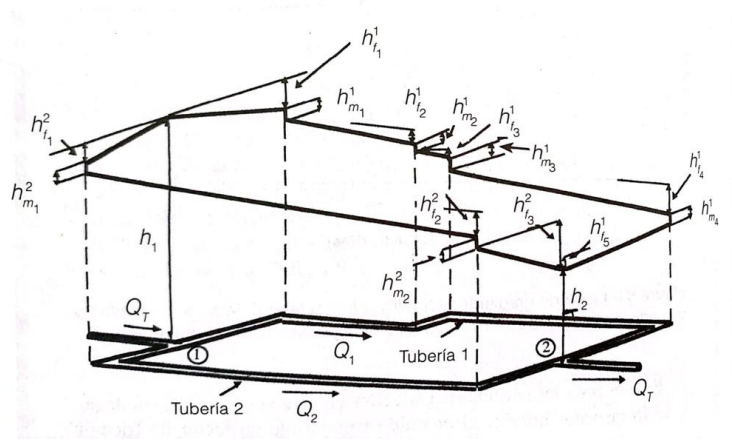


Figure 7: Esquema tridimensional de dos tuberías en paralelo y sus líneas de energía, con un nodo de entrada 1 y un nodo de salida 2. (tomado de [1]).

4.1 Ecuaciones para la solución de problemas

Teniendo en cuenta las tuberías en paralelo de la figura 7, se plantean las siguientes ecuaciones:

- Conservación de la energía

$$\Delta E = E1 - E2 = H_T = h_{f_1}^1 + h_{m_1}^1 + h_{f_2}^1 + h_{m_2}^1 + h_{f_3}^1 + h_{m_3}^1 + h_{f_4}^1 + h_{m_4}^1 + h_{f_5}^1 \quad (50)$$

donde H_T es la diferencia de energía entre el nodo de entrada (E1) y el nodo de salida (E2); la energía total disponible en el sistema, $h_{f_i}^j$ son las pérdidas por fricción en el tramo $i = 1 \dots 5$ de la tubería $j = 1$ y $h_{m_i}^j$ son las pérdidas menores (por válvulas, uniones, etc) en el tramo $i = 1 \dots 4$ de la tubería $j = 1$.

La ecuación 50 puede expresarse de forma más compacta como:

$$H_T = \sum_{i=1}^{n_j} h_{f_i}^j + \sum_{i=1}^{m_j} h_{m_i}^j \quad (51)$$

donde n_j es el número de tramos de la tubería $j = 1$ y m_j es el número de accesorios en la tubería $j = 1$. Note que la ecuación 51 aplica también para la tubería $j = 2$.

De acuerdo con la *ley de conservación de la energía*, esto implica que las pérdidas de energía en la dirección del flujo a través de la tubería 1 y 2 es la misma. De acuerdo con esto, la ecuación 51, se escribe como:

$$H_T = \sum_{i=1}^{n_1} h_{f_i}^1 + \sum_{i=1}^{m_1} h_{m_i}^1 = \sum_{i=1}^{n_2} h_{f_i}^2 + \sum_{i=1}^{m_2} h_{m_i}^2 \quad (52)$$

- Conservación de la masa De acuerdo con la *ley de conservación de la masa*, el caudal que entra al nodo de entrada (Q_T), debe ser igual a la suma de los caudales que se distribuyen en las tuberías e igual al caudal en el nodo de salida. Para el esquema de la figura 7, se tiene que:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad (53)$$

donde Q_1 es el caudal que transporta la tubería 1 y Q_2 es el caudal que transporta la tubería 2. En general para un numero n de tuberías en paralelo, se tiene:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (54)$$

4.2 Comprobación de diseño

Para este caso se conocen las características físicas de n tuberías, los accesorios en cada una de ellas, la energía disponible en el sistema y las propiedades del fluido circulante. Se desea entonces conocer los caudales individuales en cada tubería (Q_i). A continuación se presenta el procedimiento de cálculo:

1. Leer: ρ , μ o ν , h_b (Cabeza de la bomba), E_1 y E_2 . También, para cada tubería i , leer: ε_i , L_i , D_i , $\sum K_i$, h_{t_i} y η_i (eficiencia de la turbina). Esta lectura se debe hacer para las n tuberías del sistema.
2. Para cada una de las n tuberías en paralelo, hacer la comprobación de diseño para tuberías simples descrito en la sección 1.4. Se obtendrán n caudales Q y n velocidades V para cada tubería.
3. El caudal total Q_T se obtendra usando la ecuación 54.

4.3 Cálculo de la potencia requerida

A continuación se describe el proceso para solucionar este tipo de problemas que consiste en determinar la presión en el nodo de entrada (1) o en el nodo de salida (2) de las tuberías en paralelo. Con esto es posible calcular la potencia consumida por el flujo a través de las tuberías en paralelo.

Uno de los problemas es que, a pesar de que el caudal total Q_T es un dato dado en el problema, no se sabe como éste se distribuye a través de las tuberías. Para esto se ha encontrado la siguiente ecuación a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$Q_1^k = Q_T \frac{d_1^{5/2}/\sqrt{l_1}}{\sum_{i=1}^n d_i^{5/2}/\sqrt{l_i}} \quad (55)$$

en donde l_1 es la longitud de la tubería 1 y d_1 es el diámetro de la tubería 1. La ecuación 55 sirve para inicializar el caudal Q_1^k en la tubería 1. Con este caudal Q_1^k es posible calcular la energía (presión) en el nodo 1 o nodo 2 siguiendo el algoritmo de la sección 1.5. Una vez se tiene la energía disponible en el sistema ($E_1 - E_2$), es posible calcular el caudal en cada una de las otras $n - 1$ tuberías siguiendo el algoritmo de la sección 1.4. Sin embargo, es posible que la sumatoria de los n caudales no se sea igual a Q_T , por lo que es necesario corregir la suposición inicial de Q_1 como:

$$Q_1^{k+1} = Q_1^k \frac{Q_T}{Q_T^*} \quad (56)$$

donde

$$Q_T^* = \sum_{i=1}^n Q_i^k \quad (57)$$

es el caudal total estimado para la iteración k . El proceso de iteración termina cuando $Q_T = Q_T^*$.

A continuación se describe el algoritmo para encontrar la presión (energía) en el nodo de entrada o de salida al sistema y la potencia disipada.

1. Leer: ρ , μ o ν , h_b (Cabeza de la bomba), Q_T y $E1$ o $E2$. También, para cada tubería i , leer: ε_i , L_i , D_i , $\sum K_i$, h_{t_i} y η_i (eficiencia de la turbina). Esta lectura se debe hacer para las n tuberías del sistema.
2. Inicializar el caudal transportado por la tubería 1 (Q_1) usando la ecuación 55.
3. Con base en el caudal Q_1 determinar la energía en el nodo 1 (E_1) o en el nodo 2 (E_2) siguiendo el algoritmo de la sección 1.5.
4. Una vez calculada la energía en el nodo 1 (E_1) o en el nodo 2 (E_2) para cada una de las $n - 1$ tuberías restantes, calcular el caudal Q siguiendo el procedimiento descrito en la sección 1.4.
5. Una vez calculado el caudal Q en cada tubería, calcular el caudal total estimado Q_T^* para la iteración k . Si $|Q_T - Q_T^*| \leq \eta$, donde η es un error (e.g. $\eta = 1 \times 10^{-6}$), ir a 6. Si $|Q_T - Q_T^*| > \eta$, corregir Q_1 usando la ecuación 56 e ir a 3.
6. Imprimir $E1$ o $E2$ y Q_i donde $i = 1 \dots n$. Con base en las pérdidas a lo largo de la tubería i , calcular la potencia disipada en el sistema.

4.4 Diseño de tuberías en paralelo

En la práctica en ingeniería no es común diseñar sistemas de tuberías en paralelo debido a su ineficiencia a nivel hidráulico ya que el perímetro mojado de 2 o más tuberías es mayor que el perímetro mojado de una sola tubería. Este diseño solo se justifica si el diámetro de diseño es mayor al diámetro comercial disponible. De ser así, cada tubería se diseña como una tubería simple para un caudal Q_T/n , donde n es el número de tuberías en paralelo. Sin embargo, lo que sí es común es la ampliación de un sistema conformado por una tubería simple ya existente debido a un incremento en la demanda, lo cual es común en acueductos y sistemas de riego. Para esta ampliación se diseña y se construye una tubería paralela a la ya existente para la cual se conocen sus características. Para este diseño se conoce el nuevo caudal total Q_T , la energía en el nodo de entrada al sistema y las características de las tuberías. Las incógnitas son el diámetro de la nueva tubería y la energía en el nodo de salida del sistema. Note que la energía en el nodo final será diferente a la energía inicial para este nodo (antes de la ampliación) ya que la hidráulica de la tubería existente se modifica también.

A continuación se presenta un algoritmo para el diseño de la nueva tubería (número 2), en donde la tubería 1 es existente.

1. Leer: ρ , μ o ν , h_b (Cabeza de la bomba), Q_1 , Q_T , $E1$ (energía del nodo a la entrada) y $E2$ (energía del nodo a la salida. Esta energía cambia durante el proceso). También, para cada tubería i , leer: ε_i , L_i , $\sum K_i$, h_{t_i} y η_i (eficiencia de la turbina) donde $i = 1 \dots 2$.
2. Calcular el caudal por la tubería 2: $Q_2 = Q_T - Q_1$.
3. Diseñar la tubería 2 como una tubería simple siguiendo el procedimiento descrito en la sección 1.6. Teniendo en cuenta que, debido a que el diámetro comercial siempre deja pasar más caudal, Q_2 es mayor al caudal deseado (caudal inicial), la energía en el nodo 2 aumenta y por lo tanto el caudal Q_1 cambia también.
4. De aquí en adelante se vuelve un problema de cálculo de la potencia requerida para dos tuberías en paralelo partiendo del numeral 2 en el procedimiento descrito en la sección 4.3.

5 Sistemas de tuberías ramificadas

En la práctica, los sistemas de tuberías suelen ser más complejos que tuberías simples, en serie o en paralelo, por lo que las tuberías suelen estar conectadas unas con otras formando diferentes configuraciones. Las tuberías ramificadas o *redes abiertas de tuberías* suelen ser las tuberías principales

6 Redes de distribución: Método de análisis de Cross

7 Redes de distribución: Método de análisis lineal

References

- [1] Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama. Hidráulica de tuberías. abastecimiento de agua, redes, riegos. *Editorial Alfaomega, Ediciones Uniandes*, 2007.