

NÚCLEO 4

SISTEMAS DE CONDUCCIÓN HIDRÁULICA

4.1 CARÁCTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL SISTEMA

La conducción en un sistema de bombeo es uno de los elementos más importantes, ya que su función es precisamente formar un sistema que una a todos los equipos y conduzca al fluido entre ellos. De su dimensionamiento adecuado dependerán:

- Las pérdidas de carga del sistema
- El rendimiento energético del sistema
- La inversión necesaria para construir el sistema
- Las posibilidades de mantenimiento adecuado
- La existencia de fenómenos indeseables tales como: cavitación y golpe de ariete.

El ahorro de energía en la conducción de un sistema de bombeo, debe concebirse de tal forma que minimice las pérdidas de carga, tomando en cuenta que la inversión necesaria para construirlo resulte rentable, que se faciliten las tareas de mantenimiento y que se eviten fenómenos indeseables tales como la cavitación y al golpe de ariete.

El diámetro de la tubería de la conducción es un aspecto muy importante dentro del proyecto. Una conducción con diámetros pequeños, tendrá como consecuencias: baja inversión para instalar la conducción y altos consumos energéticos en bombeo.

Una conducción con diámetros mayores, tendrá como consecuencia: alta inversión para instalar la conducción, pero bajos consumos energéticos por bombeo. Estrictamente habrá que analizar los costes globales del sistema de bombeo empleando diferentes diámetros para la conducción y determinar con base en dicho análisis, el "diámetro óptimo" que conduzca al coste total mínimo.

En resumen, vemos que existe un compromiso entre el costo de inversión para construir la conducción (a mayor diámetro mayor costo), y el costo de la energía requerida para vencer las pérdidas por fricción (a mayor diámetro, menor costo). El diámetro óptimo será aquel que resuelva dicho compromiso al menor costo total.

4.2 PÉRDIDAS DE CARGA

Cuando un proceso precisa de la instalación de una bomba, lo primero es el diseño de la instalación; este punto debe estudiarse con cuidado para evitar detalles malignos, prestando especial interés en la línea de aspiración, evitando bolsas de aire, excesos de codos y malas disposiciones de éstos y correcto dimensionamiento de la tubería.

Acto seguido afrontaremos el cálculo del sistema teniendo muy presente que los datos en que nos basemos sean lo más exactos en cuanto a caudales, presiones necesarias en la descarga; fluctuaciones de nivel o presión en la aspiración, recorrido geométrico de la tubería, peso específico del fluido, viscosidad, temperatura, presión de vapor y cualquier otro parámetro que pueda influir en la determinación de la curva carga-capacidad del sistema. Si es preciso se calculará la carga neta positiva de succión disponible.

4.2.1 Carga Diferencial Total

Para determinar la carga total del sistema, se hace uso de la ecuación de Bernuolli, que aplicada al sistema mostrado en la siguiente figura, tiene la siguiente expresión:

$$P_1/\sigma + V_1^2 / 2g + Z_1 + \Delta H_b - \Delta H_{r\ 1-2} = P_2/\sigma + V_2^2 / 2g + Z_2$$

Donde: P_1, P_2 ; Presión sobre la superficie libre del líquido

V_1, V_2 ; Velocidad que experimenta cada una de las superficies libres del fluido. Y se consideran $V_1 = V_2 = 0$

Z_1, Z_2 ; Coordenadas de las superficies libres, medidas desde el eje de la bomba.

ΔH_b ; La carga total que la bomba tiene que desarrollar para conducir el fluido del depósito 1 al depósito 2 en una determinada Q.

$\Delta H_{r\ 1-2}$; Son las pérdidas totales de carga que el fluido experimenta en la tubería al ser conducido de un depósito a otro.

σ ; Peso específico del fluido a la temperatura de bombeo.

g ; Aceleración debida a la gravedad.

Despejando de la ecuación anterior el término ΔH_b y teniendo presente lo anterior tenemos:

$$\Delta H_b = (P_2 - P_1) / \sigma + (V_2^2 - V_1^2) / 2g + (Z_2 - Z_1) + \Delta H_{r\ 1-2}$$

Cabe aclarar que las pérdidas en carga $\Delta H_{r\ 1-2}$ son las pérdidas totales, las cuales están compuestas por lo siguiente:

- a) Las pérdidas primarias, imputadas al rozamiento que el fluido experimenta con la pared de la tubería por la que circula (capa límite), el rozamiento que existe entre capas de fluido (régimen laminar), y el rozamiento generado por el choque de partículas de fluido (régimen turbulento). A todas estas pérdidas en conjunto se les denomina "primarias".
- b) Al segundo tipo, se les denomina "secundarias", que se verifican debido a transiciones (extensiones o estrechamientos) codos, válvulas, derivaciones y toda clase de accesorios que la instalación contenga; así como también las pérdidas que se verifican en la succión y entrada de la tubería E y la salida S.

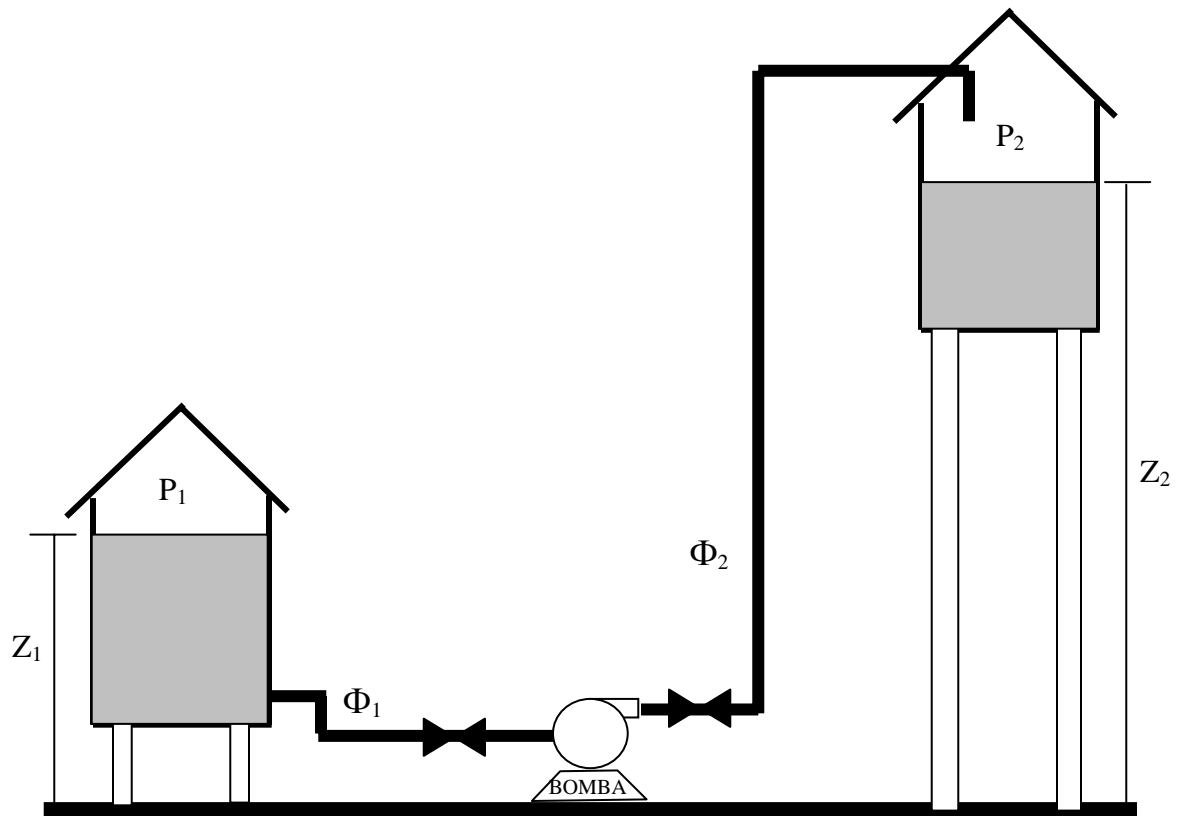


Figura 4.1. Sistema hidráulico de dos depósitos en elevación

4.2.2 Pérdidas Primarias

El flujo de cualquier fluido está acompañado de dos tipos de fricción: fricción interna causada por el frotamiento de las partículas del fluido unas contra otras; y la fricción externa causada por el frotamiento de las partículas de fluido contra las paredes del tubo o contra la capa estática del líquido adherido a las paredes. Se tiene que gastar energía para vencer esta fricción.

Si el flujo es turbulento, la fricción desarrollada dependerá en parte de la rugosidad de las paredes. Debido a que las superficies interiores de los tubos del mismo material son prácticamente las mismas cualquiera que sea el diámetro, las tuberías más pequeñas son relativamente más ásperas que las grandes. Así para velocidades iguales, mientras mayor sea el diámetro de la tubería, menor será la pérdida por fricción. La rugosidad de la pared del tubo también dependerá del material del que está hecho el tubo, y después que éste ha estado en servicio, de cualquier cambio que ocurra en la superficie interior.

Cuando las tuberías son nuevas, las pérdidas por fricción por cada 100 pies de tubería de acero al carbón cedula 40 y hierro forjado, se muestran en anexo A. Esta tabla está basada en la siguiente fórmula:

$$h_{fp} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

- h_{fp} = Pérdidas primarias de carga, en pies de líquido o (m.c.a)
- L = Longitud de la tubería, en pies o (m)
- D = Diámetro interior de la tubería, en pies o (m)
- V = Velocidad en la tubería, en pies por segundo o (m/seg)
- g = Aceleración debida a la gravedad, en pies/seg² (m/seg²)
- f = coeficiente de fricción (dependiendo de la rugosidad relativa de la tubería y del número de Reynolds)

Un parámetro importante en la determinación del tipo de régimen, es el número de Reynolds el cual involucra la velocidad, la viscosidad del fluido y el diámetro interno de la tubería.

El número de Reynolds se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$Re = \frac{VD}{\mu}$$

- donde: R = Número de Reynolds (adimensional)
- V = Velocidad promedio del fluido en la tubería (m/s)
- D = Diámetro interior de la tubería (m)
- μ = Viscosidad cinemática en (m²/s)

Las viscosidades absoluta y cinemática del agua se muestran en el anexo D

Los valores del número de Reynolds son los que sirven para caracterizar el tipo de flujo. Está claro que, para elevados números de Reynolds, el flujo es turbulento y para valores bajos es laminar. Sin embargo, la caracterización del flujo de transición en la zona de los números de Reynolds medios, difiere en función de las fuentes consultadas. Aquí vamos a dar algunos valores comúnmente aceptados:

Flujo laminar	R > 0 = 2000
Flujo de transición	2000 < R < 4000
Flujo turbulento	R > 4000

Para estimar las pérdidas primarias es necesario contar con los datos de rugosidad y el diámetro interno de la tubería.

Con estos datos se calcula el valor de la rugosidad relativa (ϵ) por medio de la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{\epsilon}{D}$$

donde: ϵ es la rugosidad absoluta (mm)
D diámetro (mm)

Los valores de ϵ para diferentes tuberías se muestran en la siguiente tabla:

Valores de ϵ para diferentes tubería

	ϵ (mm)
Acero remachado	0.9 - 9
Concreto	0.3 - 3
Madera cepillada	0.18 - 0.9
Hierro fundido	0.25
Hierro galvanizado	0.15
Hierro fundido asfaltado	0.12
Acero comercial o hierro forjado	0.046
Tubería estirada (PVC)	0.0015

Con los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa, se procede a determinar el coeficiente de rozamiento en el diagrama de Moody (anexo E).

4.2.3 Pérdidas Secundarias

La determinación de las pérdidas secundarias, puede ser llevada a cabo por varios métodos. Durante el presente, sólo mencionaremos el método de longitud de tubería recta equivalente.

Este método consiste en evaluar la caída de presión que se genera a través de un accesorio de tubería y determinar una longitud de tubería recta que genere la misma cantidad de pérdida.

En el anexo B se muestra un nomograma con diversos accesorios de tubería, el cual consta de tres escalas.

Uniéndolo con una recta el punto de la escala izquierda correspondiente al accesorio en cuestión, con el punto de la escala derecha, correspondiente al diámetro interior de la tubería. El punto de intersección de esta recta con la escala central, nos indica la cantidad de tubería recta equivalente del accesorio.

Una vez que hemos obtenido la longitud equivalente del o los accesorios, procedemos a determinar la caída de presión o pérdidas secundarias por medio de la siguiente expresión:

$$h_{fs} = f \frac{\Sigma L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Siendo ΣL ; la suma de todas las longitudes equivalentes cuyo diámetro es igual.

Los valores para las longitudes equivalentes para los accesorios mostrados en el anexo B, son valores típicos. En realidad, los valores de caída de presión a través del accesorio, dependerá del diseño particular del fabricante.

El valor de las pérdidas totales, será la suma de las pérdidas primarias y secundarias, sin embargo el uso de las ecuaciones anteriores supone una rugosidad absoluta igual en tubería y

accesorio, de modo que se puede tener una sola expresión que es la siguiente:

$$h_{ft} = f \frac{(\Sigma L_e + \Sigma L_r)}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde: ΣL_e = Suma de todas las longitudes equivalentes de los accesorios
 ΣL_r = Suma del total de tramos rectos de tubería.

Resumiendo lo anterior expuesto, el valor en carga H_b , desprendida de la ecuación de Bernoulli para el sistema mostrado en la figura 4.1 queda de la siguiente manera:

$$\Delta H_b = (P_2 - P_1) / \sigma + (V_2^2 - V_1^2) / 2g + (Z_2 - Z_1) + \Delta H_{r_{1-2}}$$

$$\Delta H_b = \frac{P_2 - P_1}{\sigma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + \frac{f_1 (\Sigma L_{e1} + \Sigma L_{r1}) V_1^2}{2g D_1} + \frac{f_2 (\Sigma L_{e2} + \Sigma L_{r2}) V_2^2}{2g D_2}$$

Donde: Los subíndices 1 y 2, corresponden a las características del sistema en la tubería de aspiración y tuberías de impulsión respectivamente.

El valor de la carga determinado con la ecuación anterior, debe ser desarrollado por la bomba a las condiciones de caudal especificado, siempre y cuando, los valores de rugosidad absoluta de la tubería no cambien sustancialmente; ya sea por problemas de corrosión o incrustación. En caso contrario, se deben hacer estimaciones del posible incremento de pérdidas de carga cuando la tubería envejezca. Este valor es difícil de predecir, debido al comportamiento inestable que presentan algunos materiales de que están fabricadas las tuberías. Cuando no se disponga de una base de comparación, un aumento en el coeficiente de fricción de un 25% con el tiempo, será una tolerancia razonable.

EJEMPLO: Se tiene agua a 15 °C bombeada a través de una tubería de hierro forjado a una capacidad de 160 m³/h hasta un depósito situado a una altura geométrica de 34 metros. El sistema de tubería esta compuesto de la siguiente manera:

-Tramos rectos de tubería	183 m
-Diámetro de tubería	8"
-Codos de 90°	24
-Codos de 45°	6
-Válvulas de compuerta	1

- Calcular:
- 1) Las pérdidas totales en m.c.a. del sistema
 - 2) La carga dinámica total en m.c.a.
 - 3) La potencia de la bomba para estas características, suponiendo que tendrá una eficiencia de 70%

4.3 CURVAS CARGA-CAPACIDAD DEL SISTEMA

Una vez que se ha calculado el valor de ΔH_b a la capacidad de operación, es conveniente llevar a cabo, una gráfica de carga capacidad del sistema, en la cual se muestren: las pérdidas totales en carga, las cargas estáticas y la diferencia en presiones sobre los puntos de suministro y captación de la instalación. Como ya habíamos puntualizado anteriormente, las pérdidas por rozamiento varían con la capacidad manejada por el sistema, permaneciendo constantes; las cargas estáticas y de presión. Cabe aclarar, que esta curva se lleva a cabo, evaluando las cargas ΔH_b para diferentes valores de capacidad.

Cada punto en la curva tendrá coordenadas (Q,H) y deberán ser una cantidad suficiente como para lograr el trazo total de la curva.

La figura siguiente muestra la gráfica de un sistema como el mostrado en la figura 4.1

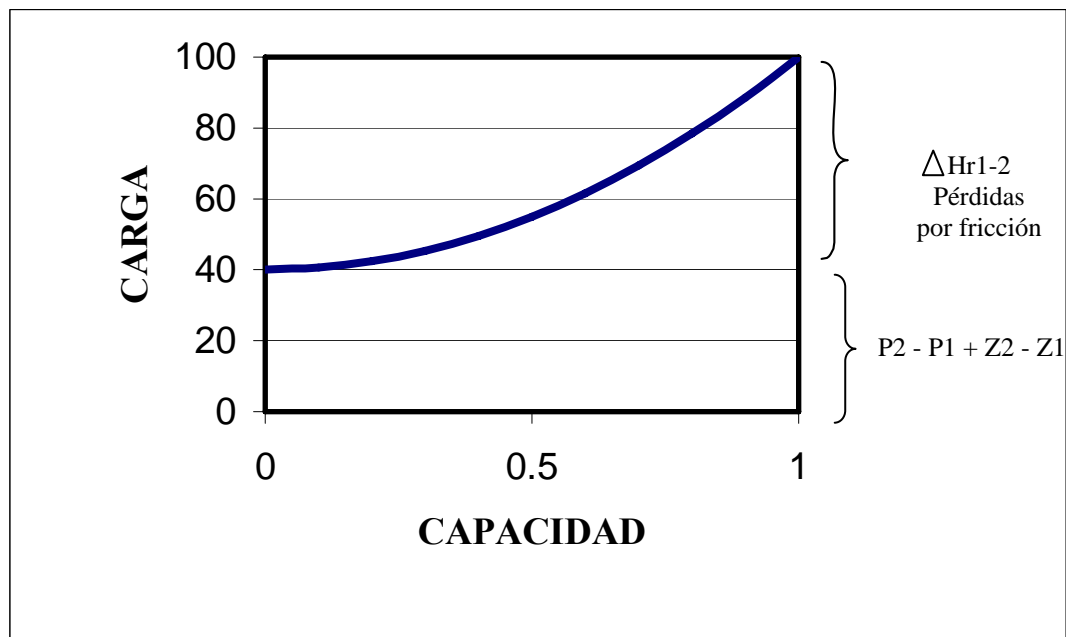


Figura 4.2 curva carga capacidad del sistema hidráulico en dos depósitos en elevación, abiertos a la presión atmosférica

Esta curva resulta útil, pues se pueden determinar parámetros importantes tales como:

- Determinar fácilmente la carga ΔH_b para valores en capacidad diferentes a los empleados en su construcción.
- Cuantificar la relación de las pérdidas totales de carga con respecto a las cargas de presión estáticas.

Y en un momento dado, saber si el uso de otra tubería con valores de diámetro y rugosidad diferentes, puede ayudarnos a disminuir los costos de operación del sistema, ya que en la mayoría de los casos sucede que el solo vencimiento de estas pérdidas, resulta ser varias veces superior a la suma de los diferenciales de presión y carga estática presentes en el sistema.

Desde luego que el tipo de tubería y material será determinado por las condiciones del servicio, el líquido manejado y el análisis económico; tanto en costo inicial del equipo como el de operación.

- c) Cuantificar el rango de carga-capacidad que la bomba es capaz de desarrollar con respecto al sistema, con solo sobreponer ésta a la correspondiente curva carga-capacidad de la bomba y de este modo, determinar la compatibilidad de la bomba con el sistema

4.4 DIÁMETRO ÓPTIMO DE LA CONDUCCIÓN

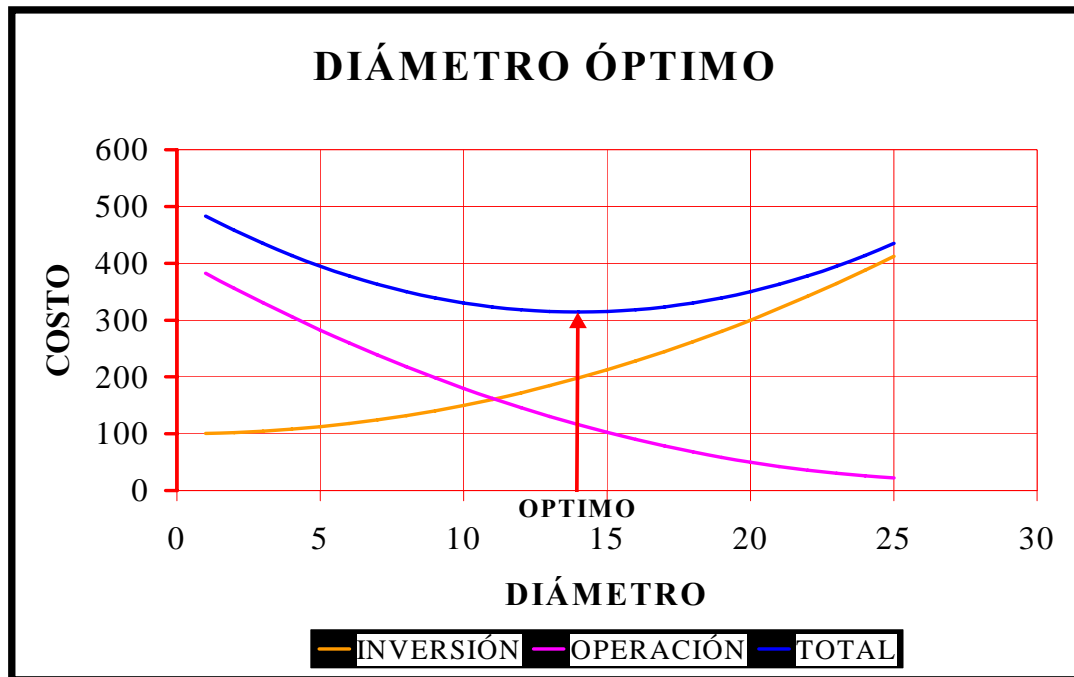


Fig. 4.3. Diámetro del Sistema de Conducción

La determinación del diámetro óptimo en un sistema de conducción es un problema esencialmente económico, en el que habrá que resolver para aquel diámetro que reduzca al mínimo el costo total del proyecto, entendiendo como costo total a la suma del costo de inversión y el costo de operación (costo de la energía)

El procedimiento para determinar el diámetro óptimo de una conducción en particular, atiende a la siguiente metodología:

- Paso 1.-** Determinar las condiciones de operación deseadas (carga, capacidad y horas de operación)
- Paso 2.-** Proponer un diámetro para el sistema
- Paso 3.-** Calcular la longitud equivalente del sistema
- Paso 4.-** Calcular las pérdidas de carga
- Paso 5.-** Calcular la energía necesaria para compensar las pérdidas
- Paso 6.-** Calcular el costo de operación.
- Paso 7.-** Calcular el costo de inversión
- Paso 8.-** Determinar el costo total (inversión + operación)
- Paso 9.-** Repetir el proceso para 4 o 5 diámetros diferentes

EJEMPLO.- Determinar los costos de operación para diferentes diámetros de un sistema de conducción con tubería de acero cédula 40, con las siguientes características:

Gasto	Q = 0.062 m ³ /s
Altura geométrica	Hg = 16.4 m
Longitud	L = 3,000 m
Válvulas de cierre	= 2
Codos de 90°	= 8
Codos de 45°	= 3

Considere los siguientes costos de construcción del sistema de conducción, para los diferentes diámetros:

Diámetro	Monto de Inversión
4	285,000
6	342,000
8	427,000
10	556,000
12	750,000

Considere los siguientes datos para la evaluación financiera:

Duración del proyecto:	n = 20 años
Tasa de interés fija:	i = 14 %