

CAPITULO II

FLUJO DE FLUIDOS

2.1. INTRODUCCION

El flujo y el comportamiento de los fluidos reviste gran importancia en muchas de las operaciones unitarias de ingeniería de proceso.

En las industrias de proceso, gran parte de los materiales están en forma de fluidos y deben almacenarse, bombearse y procesarse, por lo que resulta necesario familiarizarse con los principios que gobiernan el flujo de fluidos y también a los equipos utilizados.

En el presente Capítulo, de Flujo de fluidos, se encuentran contempladas las siguientes secciones:

2.2. Equipo y accesorios para el transporte de fluidos, 2.3 fluidos incompresibles, aquí se estudian las ecuaciones básicas del flujo de fluidos y la forma de calcular la fricción ocasionada por un fluido en las tuberías; en la Sección 2.4 están contenidas las prácticas de laboratorio, siendo la primera para determinar experimentalmente el factor de fricción de una tubería y compararlo con el dato teórico. La segunda es una práctica donde se propone un sistema de flujo, en el cual se hallan dispuestos los instrumentos de medición de gasto, esto es para hacer la calibración de los mismos. En la tercera práctica se propone una forma de obtener las curvas características de una bomba, en el mismo sistema utilizado en la primera práctica.

2.2. EQUIPO Y ACCESORIOS PARA EL TRANSPORTE DE FLUIDOS

2.2.1. Bombas

Los fluidos son transportados a través de tuberías, conexiones y equipo por medio de bombas, sopladores, ventiladores y compresoras. Sin embargo la función principal de ellos no es el transporte, sino agregar energía al fluido. Este incremento de energía puede ser usado para aumentar la presión, la velocidad o para transportar el fluido a una cierta altura.

Clasificación

Las bombas pueden ser clasificadas en dos grupos principales: Bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas. Las bombas de desplazamiento positivo, pueden ser del tipo reciprocantes o del tipo rotatorio. La principal característica de una bomba de desplazamiento positivo es que entrega una cantidad definida del líquido por cada carrera del pistón o revolución de la pieza movable principal. Solamente el tamaño de la bomba, su diseño y las condiciones de succión influirán en la cantidad del líquido que entrega. Por otra parte una bomba centrífuga puede entregar un volumen variable de fluido con diferente carga, para una velocidad constante.

Bombas Centrífugas

Las bombas centrífugas se usan ampliamente en los procesos industriales debido a la simplicidad de su diseño, bajo costo inicial, bajo mantenimiento y flexibilidad de aplicación. En su forma más simple, la bomba centrífuga consiste en un impulsor que gira dentro de una caja circular. El fluido entra a la bomba cerca del centro del impulsor rotatorio y es lle-

vado hacia arriba por acción centrífuga. La energía cinética del fluido se incrementa desde el centro del impulsor hasta las extremidades de las aspas; esta altura de velocidad es convertida a altura de presión al salir el fluido de la bomba.

Las características generales de una bomba centrífuga son las siguientes:

- Amplio rango de capacidad, presión y condiciones de operación.
- Requiere un área relativamente pequeña para su instalación.
- Se adapta fácilmente a motor, banda, etc.
- Tiene un costo relativamente bajo.
- Presenta dificultad para obtener flujos pequeños a presiones moderadas o altas.
- Desarrolla turbulencia en el fluido manejado.

Partes de una bomba centrífuga y su función

1. Impulsor. Es la pieza que imparte energía al fluido por medio de sus venas o álabes, desplazándolo a gran velocidad a la periferia por acción de la fuerza centrífuga. Pueden ser:
 - a) Abiertos: Usado para bajas cargas, fluido con sólidos suspendidos y flujos muy pequeños.
 - b) Semiabierto: Usado para fines especiales.
 - c) Cerrado: Usado para aplicaciones de cargas y flujos altos.
 - d) Especiales: Para usos específicos.
2. Flecha. Transmite la energía mecánica del medio motriz (polea, motor, etc.) al impulsor.
3. Carcaza. Da dirección al flujo proveniente del impulsor al mismo tiempo que convierte la energía de velocidad en energía de presión.

4. Estopero. Evita las fugas de líquido o entrada de aire alrededor de la flecha, permitiendo su rotación. Esta provista de un anillo o sello mecánico como empaque.
5. Baleros. Disminuyen al mínimo la fricción entre la flecha y la chumacera.

Capacidad, Carga y Potencia de una Bomba.

Capacidad. La capacidad de una bomba se define como la rapidez de flujo del líquido o suspensión que circula a través de la bomba. Se expresa en litros por minuto, litros por segundo o galones por minuto.

Los instrumentos para determinar la capacidad puede ser cualquiera de los medidores de área fija o área variable descritos en la sección 2.2.5. O simplemente se puede usar el método más elemental que consiste en tomar el tiempo que una bomba tarda en llenar cierto volumen.

Carga. La energía total que la bomba suministra al líquido se define como una carga o columna de líquido, es decir, como el número de metros de líquido que ejercen una presión igual a la presión suministrada al fluido por la bomba.

Por otra parte la carga total de una bomba está compuesta por la carga de succión y la carga de descarga, estas a su vez están compuestas por cargas estáticas, presiones, pérdidas dinámicas, etc.

La carga desarrollada por una bomba depende del peso específico del líquido que se maneja.

$$H = \frac{\Delta P}{\rho_e} ; \text{ metros de fluido} \quad (2.2-1)$$

donde

$$H = \text{carga total}$$

ΔP = cambio de presión

P_e = peso específico

$$\Delta P = P \text{ descarga} - P \text{ succión} \quad (2.2-1a)$$

Los instrumentos usados para la medición de cargas son: Manómetros, vacuómetros, tubos diferenciales de agua y tubos diferenciales de mercurio.

Los manómetros y vacuómetros son del tipo Bourdon y los segundos se usan solamente en el caso de bombas que trabajan con carga negativa de succión.

Potencia. Se define como el trabajo desarrollado por unidad de tiempo y usualmente se mide en HP; depende de la capacidad de trabajo y de la carga desarrollada por la bomba, expresándose por:

$$P = \frac{\dot{m} H g}{g_c} \quad (2.2-2)$$

donde:

\dot{m} = flujo másico

H = carga

Eficiencia.

La eficiencia de la bomba está dada por:

$$\eta = \frac{\text{potencia aprovechada}}{\text{potencia suministrada}} \times 100$$

Para medir la potencia suministrada a la bomba, se necesita conocer la potencia en la flecha del motor. Esta se determina directamente por medio de un dinamómetro o bien indirectamente por medio de un Wattmetro trifásico, que indique la potencia eléctrica que consume el motor, la cuál

será afectada por el valor de la eficiencia que indique la curva certificada del fabricante del motor. Este segundo método es el más usado.

En los sistemas de c - a, la potencia (o fuerza) en watts es:

$$\text{Potencia eléctrica} = V \times I \times f \times K \quad (2.2-4)$$

donde:

V = voltaje; volts

I = corriente; amperes

f = factor de potencia

K = constante

El factor de potencia f puede variar de 0 a 1.0 y K es 1 para sistemas de una fase; 2 para sistemas de dos fases y 4 alambres, y 1.732 para sistemas de tres fases.

Características de operación de las bombas centrífugas

Una bomba centrífuga generalmente opera a velocidad constante, y la capacidad de la bomba depende solamente de la presión total de descarga, el diseño y las condiciones de succión. La mejor manera de describir las características de operación de la bomba centrífuga es usando una curva característica. Figura 2.1.

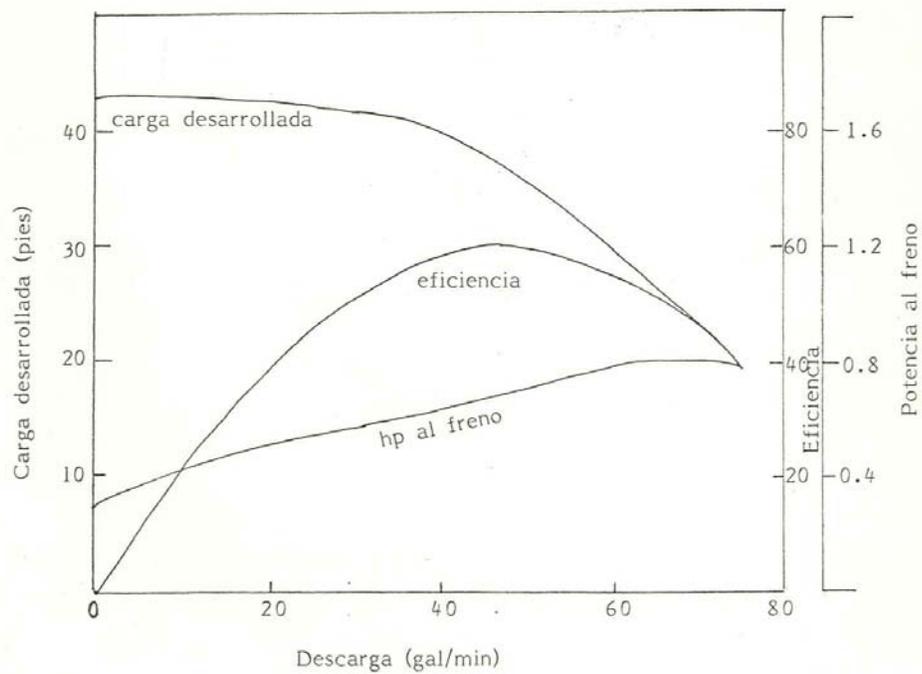


Fig. 2.1. Curvas características para una bomba centrífuga de una sola etapa.

Esta figura muestra la interrelación de la carga desarrollada o cabezal (H), capacidad (Q), eficiencia (η) y potencia suministrada (Relec.) para una bomba dada a una velocidad particular.

Cavitación

Cuando se opera una bomba centrífuga a alta capacidad, se desarrollan bajas presiones en el ojo del impulsor o en los extremos de las aletas. Cuando esta presión disminuye hasta un valor menor a la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo, puede presentarse vaporización en esos puntos. Las burbujas de vapor formado se mueven hasta la región de alta presión y se desbaratan. Esta formación y colapso de burbujas de vapor se llama cavitación.

La cavitación, además de producir un constante ruido por la explosión de las burbujas produce vibración en la flecha, lo que aumenta la fricción y disminuye la eficiencia, además de los choques repetidos contra las partes metálicas ocasionan una erosión que puede perforar y destruir en poco tiempo la carcasa.

Carga neta positiva de succión

El NPSH (Net positive suction head) o carga neta positiva de succión se puede definir como la carga que hace que el líquido fluya a través de la tubería de succión y supera los obstáculos internos de la bomba al flujo hasta llegar al ojo del impulsor y tenga una presión mayor a la presión del vapor que corresponda a la temperatura de operación.

El NPSH es un factor de gran importancia para la selección y operación de una bomba centrífuga, pues de ignorarse se puede reducir la capacidad

y la eficiencia de la bomba llegando a producir graves daños por cavitación.

Selección

Al seleccionar una bomba centrífuga para un trabajo específico, el Ingeniero debe tomar en cuenta las características específicas de la bomba, como son la capacidad, la energía o altura suministrada al fluido, la potencia requerida para mover la bomba y la eficiencia de la misma. Para obtener las mejores condiciones de la bomba, se requiere tener cierta información respecto al problema en particular y se necesita conocer lo siguiente:

1. Naturaleza del fluido que está siendo transportado, corrosividad, temperatura, presión de vapor, viscosidad y sólidos en suspensión.
2. Capacidad requerida, así como el rango de capacidad que la bomba puede descargar.
3. Condiciones de succión
4. Condiciones de descarga, incluyendo la presión requerida y la fricción del fluido que debe ser vencida.
5. El tipo de servicio, continuo o intermitente.
6. La naturaleza de la potencia disponible para manejar la bomba.
7. La localización de la bomba; el espacio disponible y el requerido.

2.2.2. Tuberías

Algunos procesos químicos frecuentemente se efectúan en estado fluído y usualmente el fluído se transporta de una parte del proceso a otra mediante tuberías de sección transversal circular. La tubería puede ser fabricada en cualquier material de construcción disponible, dependiendo de las propiedades corrosivas del fluído que va a ser manejado y de la presión de flujo. Tales materiales como el vidrio, concreto, asbesto, acero, plástico, madera y muchos otros son usados con frecuencia en la construcción. Mientras que el acero, fierro, cobre y latón son los materiales de tubería más comunes encontrados en la industria del proceso.

Las secciones de las tuberías pueden ser unidas por diferentes técnicas y así se encuentran tuberías roscadas, soldadas o bridadas. Ya que el tubo puede ser fabricado de diferentes diámetros y varios espesores, se necesita un método de identificación de tamaños de tuberías, el cual ha sido establecido por la "American Standards Association". Por convención, el tamaño de tubería y accesorios está definido en términos de diámetro nominal y un espesor de pared. El diámetro nominal no es ni el diámetro interno ni el externo, sino una aproximación al diámetro interno. Dado las diferencias de espesor en las tuberías, los tubos del mismo diámetro nominal tienen el mismo diámetro exterior y esto permite un intercambio de las conexiones.

El espesor de la pared de la tubería está especificado por un número, el llamado número de cédula el cual es función de la presión interna y la resistencia permisible. Aproximadamente

$$\text{No. de cédula} = 1000 \frac{P}{S}$$

donde:

P = presión interna de trabajo

S = resistencia permisible

Los espesores de la pared de la tubería se incrementan con el No. de cédula estos son: 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 y 160. La cédula 40 corresponde a la tubería estandar de acero comercial.

2.2.3. Conexiones

Para la instalación de equipo y tubería es necesario emplear conexiones; para ello se entiende una pieza de tubería que pueda:

1. Juntar dos piezas de tubería, por ejemplo coples y tuercas
2. Cambiar la dirección de la tubería: codos y tes
3. Terminar una tubería: tapones y válvulas
4. Cambiar el diámetro de la tubería, por ejemplo reducciones.
5. Controlar el flujo, o sea válvulas.

Estas se instalan en varias formas: roscadas, soldadas, bridadas, según las necesidades del proceso y el tamaño de la conexión.

Las conexiones para tubería de acero se hacen de hierro fundido o bien de hierro maleable, pudiendo obtenerse en varios espesores de pared.

2.2.4. Válvulas

Una válvula es también una conexión, pero tiene un cometido mucho más importante que el de simplemente juntar una tubería. Las válvulas se usan para controlar el gasto de flujo o para cerrarlo completamente. Las dos válvulas de uso mas amplio son las válvulas de compuerta y la válvula de globo.

La válvula de compuerta. Su uso principal es la de sellar o dete-

ner un flujo en virtud de que mediante ajustes laterales pequeños del disco, que corre normalmente al flujo se obtienen cambios muy grandes en el área de flujo.

La válvula de globo es más adecuada para controlar el flujo, aunque en ésta la pérdida de presión es mayor que el caso de las válvulas de compuerta.

Otras válvulas de uso común y corriente incluyen las válvulas de taponamiento de gallo, las válvulas de check para controlar la dirección del flujo, las válvulas de seguridad para controlar la presión y las válvulas de diafragma o fuelle que eliminan la necesidad de empaques.

2.2.5. Medidores de flujo

En la industria existen múltiples y variados medidores de flujo para controlar los procesos industriales; entonces es deseable conocer la cantidad que entra y sale del proceso. Debido a que la mayoría de los materiales son transportados en forma fluida, siempre que es posible, es importante medir la velocidad a la cuál esta pasando a través de una tubería o canal. Los métodos para medir las corrientes de flujo se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Medidores de pesada directa
2. Medidores dinámicos o de área fija
 - a) Medidor Venturi
 - b) Tubo de Pitot
 - c) Placa orificio
3. Medidores de área variable
 - a) Rotámetro

4. Medidores de corriente
 - a) Medidor de capa
 - b) Medidor de propela
5. Medidores de canal abierto
6. Medidores de desplazamiento positivo
 - a) Medidor de disco
 - b) Medidor de pistón
 - c) Medidor rotatorio
 - d) Medidor de diafragma
7. Medidores eléctricos
 - a) Magnéticos
 - b) Turbina

En este trabajo sólo se requiere el conocimiento de los medidores de área fija y área variable, por esta razón se ampliará solamente la teoría sobre dichos tipos de medidores de flujo.

A) Medidores de área fija

Los medidores dinámicos o de área fija son muy usados en la industria y consisten en medir una caída de presión provocada por una restricción en el flujo, proporcional al flujo volumétrico; los medidores más comunes de este tipo son: el medidor de orificio, medidor Venturi y tubo de Pitot.

Placa orificio

El medidor de orificio consiste en una placa perfectamente taladrada y mecanizada, con un orificio concéntrico con la tubería con la que está instalado. En la Figura 2.2. se representa un orificio con bordes rectos.

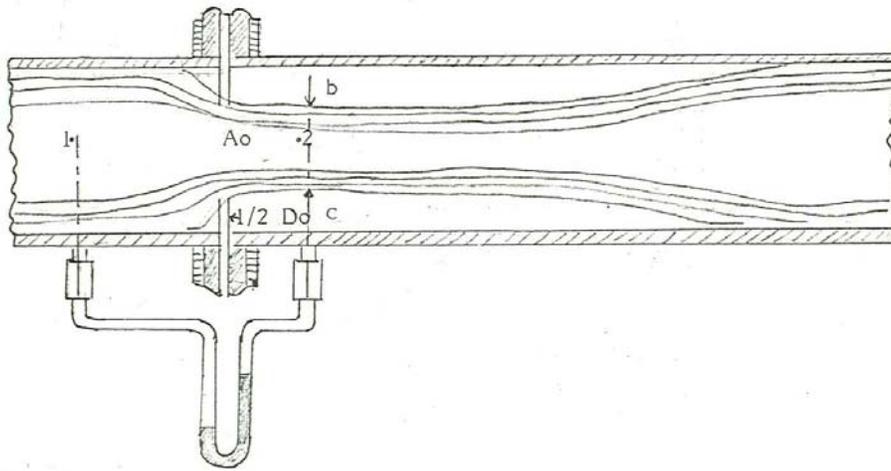


Fig. 2.2. Medidor de orificio

El orificio de la placa pueden estar biselados en la parte posterior. Se instalan la toma de presión, una anterior y la otra posterior a la placa y se conectan a un manómetro. La posición de las tomas es arbitraria y el coeficiente del aparato depende de la posición de dichas tomas. En la tabla 2.1 se describen tres formas de colocación de las tomas de presión. Las formas que se representan en la figura 2.2 son de vena contracta (corresponde al tipo de toma de presión de la placa orificio montada en el sistema del laboratorio de Ingeniería Química, figura 2.9)

Tipo de Toma	Distancia de la toma anterior desde la cara anterior del orificio	Distancia de la toma posterior desde la cara posterior del orificio
a la brida	1 pulgada	1 pulgada
De vena Contracta	1 diámetro de tubería (interior)	0.3 a 0.8 diámetros de tubería dependiendo de D_o/D_a
A la tubería	2 1/2 diámetros nominales de la tubería	8 diámetros nominales de la tubería

Tabla 2.1. Datos de tomas de presión de la placa orificio

La Ecuación de Bernoulli permite correlacionar el aumento de carga de velocidad, con disminución de la carga de presión.

El medidor orificio presenta una complicación importante. Debido a la brusquedad del orificio la corriente del fluido se separa en el lado posterior de la placa del mismo y forma un chorro libre apareciendo una vena contracta, como se indica en la figura 2.2. El chorro no está bajo el control de las paredes sólidas como en el caso del medidor Venturi y el área de chorro está comprendida entre la correspondiente a la abertura del orificio y a la vena contracta. El área en un punto posterior no se puede determinar fácilmente, de forma que es difícil relacionar la velocidad de chorro en la toma posterior, con el diámetro del orificio.

Para un diseño aproximado o preliminar se emplea satisfactoriamente la siguiente ecuación

$$V_o = C_v \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(1-\beta^4)}} \quad (2.2.-5)$$

donde:

V_o = Velocidad media real a través del orificio

β = Relación del diámetro del orificio al diámetro del tubo D_o/D_a

h = Carga en el orificio

ρ' = Densidad del líquido manométrico

ρ = Densidad del fluido

C_v = Coeficiente de velocidad

Coeficiente de velocidad

La velocidad real en el chorro es menor que la velocidad teórica, debido a la resistencia de fricción que se produce cuando el fluido entra al orificio y lo atraviesa. La razón de la velocidad media real (V_o) a la velocidad teórica de descarga (V_t) de un orificio es la que adquiere el cuerpo en caída libre en el vacío a lo largo de una altura igual a la carga en el orificio, sin fricción, se denomina coeficiente de velocidad (C_v)

$$C_v = \frac{V_o}{V_t} \quad (2.2-6)$$

$$V_t = \sqrt{2 g H} \quad (2.2-7)$$

donde:

H = altura = h

Coeficiente de contracción

En la figura 2.2 la Sección bc , donde cesa la contracción provocada por el orificio, se denomina vena contracta, para un orificio circular de bordes agudos, de diámetro D_o , se ha determinado que está a una distancia de aproximadamente $(1/2 D_o)$ del plano del orificio.

La razón del área transversal del chorro en la vena contracta (a) al área del orificio (A_o) se denomina coeficiente de contracción (C_c). Así

$$C_c = \frac{a}{A_o} \quad (2.2-9)$$

Si V_o es la velocidad media real, la descarga a través del orificio, en la vena contracta es:

$$Q = a \cdot V_o = C_c \cdot A_o \cdot V_o \quad (2.2-10)$$

combinando con la Ecuación (2.2-5)

$$Q = C_c \cdot C_v \cdot A_o \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.2-11)$$

Coeficiente de descarga :

Es habitual el reemplazo del producto C_c·C_v en la Ecuación (2.2-11) por un coeficiente simple C, denominado coeficiente de descarga; la ecuación para la descarga de un fluido a través de un orificio es:

$$Q = C \cdot A_o \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.2-12)$$

Como en la práctica, lo que se requiere casi siempre es la descarga de los orificios, el coeficiente de descarga tiene mayor valor para el Ingeniero. Este coeficiente C se puede calcular a partir de la ecuación (2.2-12), si se determinan el flujo (Q), el área del orificio (A_o) y la carga total (h).

Por lo común C no suele ser constante para un orificio dado, sino que varía con la carga, las condiciones de acercamiento y la viscosidad del fluido, como se ilustra en la figura 2.3.

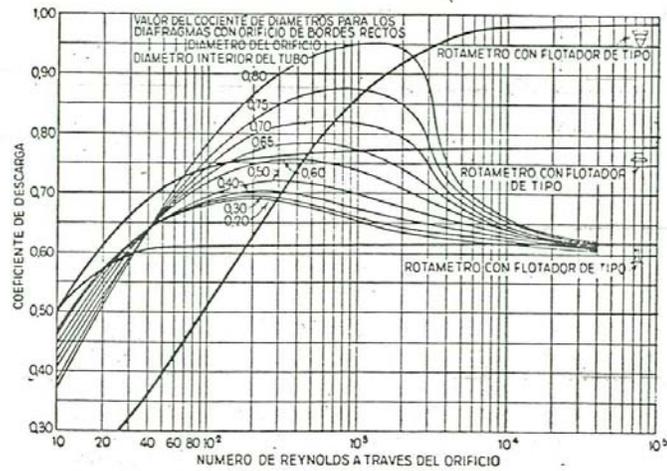


Fig. 2.3. Valores de coeficiente de descarga para la placa orificio

La determinación experimental de C_c y C_v es más difícil. El diámetro del chorro en un orificio circular se puede medir en la vena contracta con calibres y el coeficiente de contracción se calcula a partir de la relación (2.2-9). Si es difícil localizar la vena contracta, como en la figura 2.2, se debe escoger una ubicación arbitraria para determinar la contracción, como el plano b que está a $(1/2 D)$ del plano del orificio.

La velocidad en el chorro se puede calcular a partir del área de chorro (a) y el valor medido de (Q). Si se conoce la carga total (h) se podrá calcular el coeficiente de velocidad a partir de la ecuación

(2.2-6); la velocidad en el chorro (V_o) se puede medir también con bastante exactitud mediante el tubo de Pitot.

Medidor Venturi

El medidor Venturi proporciona una ilustración del uso práctico de la ecuación de energía. Este instrumento, se emplea para medir las descargas a través de tuberías, como velocidad promedio. En el medidor Venturi la velocidad aumenta a lo largo del cono anterior y la presión disminuye, localizándose en la garganta la velocidad máxima.

Si un fluido de densidad ρ fluye por una tubería de sección transversal A_1 , en la garganta el área se reduce a A_2 y se conecta a un manómetro diferencial, como en la figura 2.4 para medir la diferencia de presiones entre un punto del área A_1 y un punto del área A_2 .

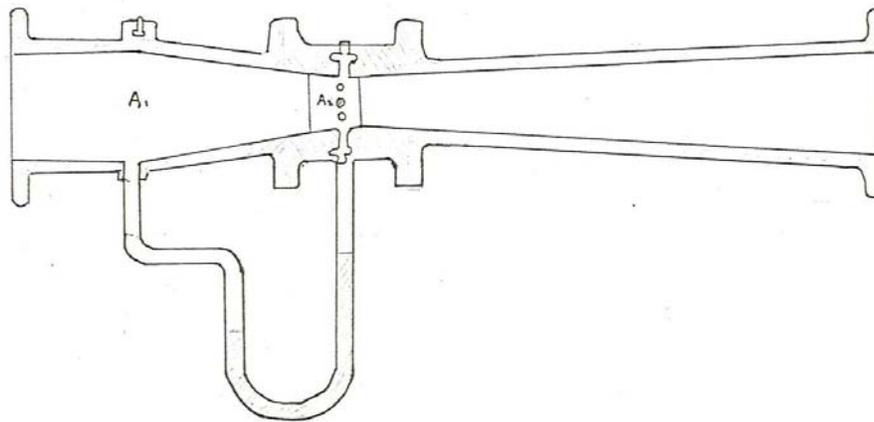


Fig. 2.4. Medidor Venturi

Pasado el estrechamiento la velocidad disminuye y se recupera en el cono posterior gran parte de la presión. La diferencia de presión no recuperada se debe a la fricción del aparato.

Aplicando la Ecuación de Bernoulli a los puntos 1 y 2 de la figura 2.2

$$\frac{V_1^2}{2g_c} + \frac{P_1}{\rho} + F = \frac{V_2^2}{2g_c} + \frac{P_2}{\rho} \quad (2.2-13)$$

Por la ecuación de continuidad se tiene

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2.2-14)$$

Combinando las ecuaciones (2.2-13) y (2.2-14) queda para

$$V_1 = A_2 \sqrt{\frac{2g_c (P_2 - P_1)}{\rho (A_2^2 - A_1^2)} - F} \quad (2.2-15)$$

Como la diferencia de presiones se registra como un diferencia de niveles del líquido manométrico (h), (Figura 2.4), la podemos describir como:

$$P_2 - P_1 = h (\rho' - \rho) \frac{g}{g_c} \quad (2.2-16)$$

ρ' = Densidad del líquido manométrico

ρ = Densidad del fluido

Sustituyendo la Ecuación (2.2-16) en la (2.2-15)

$$V_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) g h}{\rho (A_2^2 - A_1^2)} - F} \quad (2.2-17)$$

En la Ecuación (2.2-17), todos los términos que aparecen pueden determinarse, a excepción de las pérdidas de energía por fricción, de tal manera que para obtener una verdadera equivalencia entre la presión medida por el manómetro y la velocidad del flujo se introduce una constante específica C_v que es el coeficiente del medidor venturi

$$V_1 = C_v A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) g h}{\rho(A_2^2 - A_1^2)}} \quad (2.2-18)$$

El gasto volumétrico está dado por

$$Q = C_v \cdot A_2 \cdot A_1 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) g h}{\rho(A_2^2 - A_1^2)}} \quad (2.2-19)$$

Para buenos diseños del medidor Venturi tiene un valor de alrededor de 0.98 para tuberías de diámetro de 2 a 8 pulgadas y alrededor de 0.99 para diámetros mayores.

El ángulo de convergencia es de 25 a 30° y el de divergencia no excede de 7°.

Las principales características del tubo Venturi son las siguientes:

- Requiere poco mantenimiento
- Presenta mayor dificultad en su instalación que la placa orificio
- Permite el paso de 1.6 veces más fluido que la placa orificio (bajo la misma caída de presión).

Tubo de Pitot

El tubo de Pitot es un instrumento usado para medir la velocidad puntual a lo largo de una línea de corriente. En la figura 2.5 se muestra un esquema de un tubo de Pitot estándar formado por dos tubos concéntricos en el que el tubo interno tiene la abertura dirigida a la corriente del fluido, mientras que el tubo exterior tiene pequeñas perforaciones en la pared, por medio de las cuales se transmite la presión estática (P_1). Por medio de la abertura en el tubo interno se transmite la presión del fluido (P_2) más la equivalente a la energía cinética del fluido en movimiento de tal forma que la diferencia de presión entre los dos tubos concéntricos será

proporcional a la velocidad de impacto en el punto 2.

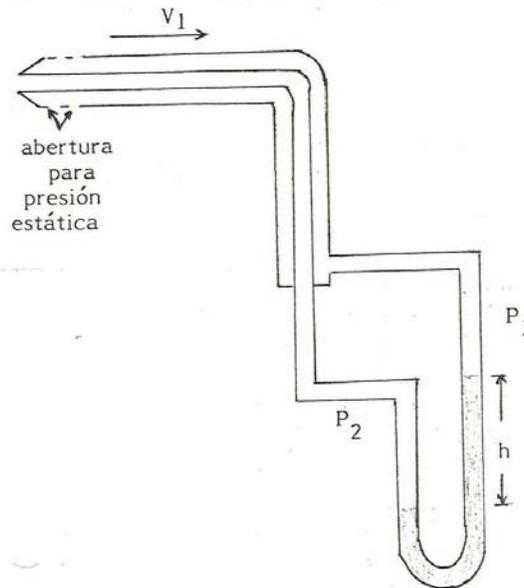


Fig. 2.5 Tubo de Pitot

La desventaja del tubo de Pitot es que mide sólo velocidades puntuales, por lo que es más adecuado su empleo en flujo de gases.

Aplicando la Ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 obtenemos

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g_c} = \frac{P_2}{\rho} + F \quad (2.2-20)$$

donde:

ρ = Densidad del fluido

V = Velocidad del fluido

La diferencia de presiones ($P_2 - P_1$), como en el caso anterior está dado por

$$P_2 - P_1 = h (\rho' - \rho) \frac{g}{g_c} \quad (2.2-16)$$

Combinando las Ecuaciones (2.2-16) y (2.2-20)

$$V = \sqrt{\frac{2gh(\rho' - \rho)}{\rho} + F} \quad (2.2-21)$$

Haciendo la consideración igual que el caso del medidor Venturi, como las pérdidas por fricción no se pueden determinar entonces se introduce un factor, el coeficiente del tubo de Pitot (C_p):

$$V = C_p \sqrt{\frac{2gh(\rho' - \rho)}{\rho}} \quad (2.2-22)$$

el coeficiente del tubo de Pitot es cercano a la unidad para buenos diseños

El gasto volumétrico (Q) esta dado por

$$Q = C_p A \sqrt{\frac{2gh(\rho' - \rho)}{\rho}} \quad (2.2-23)$$

donde:

A = Area de sección transversal de la tubería

Las desventajas del tubo de Pitot son:

- No da una velocidad promedio directamente
- La lectura para gases son extremadamente pequeñas

Un procedimiento para obtener la velocidad promedio del fluido en la tubería es, tomando lecturas en posiciones conocidas a través de la sección transversal de la tubería para calcular las velocidades locales y obtener la velocidad promedio para la sección entera, por integración gráfica.

B) Medidor de área variable

Otra clase de medidor, el llamado de área variable, es un aparato en el cual la caída de presión es constante o casi constante y el área a través de la cual el fluido fluye, varía conforme avanza éste.

Rotámetro

El más importante medidor de área variable es el Rotámetro mostrado en la figura 2.6. Consta principalmente de un tubo de vidrio de sección cónica, montado sobre un cuerpo metálico denominado carcasa. Dentro de este tubo se encuentra el elemento de medición llamado flotador. En los extremos de la carcasa se encuentran dos cabezales metálicos generalmente del mismo material de la tubería a la que están montados dos topos, superior e inferior para que el flotador no escape por efecto de la corriente del fluido y respectivos sellos para evitar fugas.

En este aparato el fluido entra por la parte inferior del tubo vertical cónico, lo cual origina que el disco o flotador se desplace hacia arriba. El desplazamiento vertical cesará en el punto en que la fuerza de arrastre iguale la magnitud de la fuerza de flotación y el peso del disco. En estas condiciones, la posición del disco dentro del tubo será una indicación del gasto, ya que el tubo de vidrio está graduado con una escala que puede indicar directamente el gasto o el por ciento del mismo, tomando como referencia la capacidad de medida del instrumento.

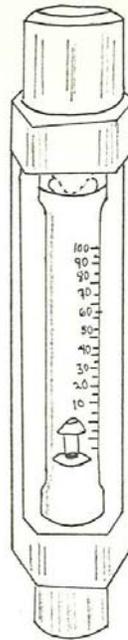


Fig. 2.6. Rotámetro

El rotámetro se instala siempre en posición vertical, de esta manera, el flotador permanecerá suspendido, mientras el flujo se mantenga constante. La calibración debe efectuarse en base a la lectura en la escala del tubo de vidrio.

Es posible encontrar rotámetros con tubos que no sean de vidrio para casos como el de líquidos opacos, líquidos calientes o cuando se tienen altas presiones que puedan dañar el vidrio. En este caso el flotador está provisto de un indicador que hace posible la medición.

Este medidor opera bajo el principio físico de la fuerza de arrastre, efectuando un análisis de equilibrio de fuerzas que interactúan en el flotador y considerando el punto 1 en la parte inferior y el punto 2 en la parte superior, se tiene

$$P_1 A_F - P_2 A_F + V_F \rho - V_F \rho_F = 0 \quad (2.2-24)$$

donde:

A_F = Area del flotador

V_F = Volumen del flotador

ρ = Densidad del fluido

ρ_F = Densidad del flotador

Despejando $(P_1 - P_2)$, la caída de presión que genera el flotador, se obtiene:

$$P_1 - P_2 = \frac{V_F}{A_F} (\rho_F - \rho) \quad (2.2-25)$$

Para un medidor operando sobre un fluido definido, el lado derecho de la última Ecuación es constante, por lo tanto la caída de presión es independiente del gasto manejado.

2.3. FLUIDOS INCOMPRESIBLES

2.3.1 Ecuaciones basicas del flujo de fluidos

Las relaciones básicas que describen el movimiento de fluido están comprendidas en las ecuaciones para los balances totales de masa, energía y momento; aquí sólo se tratarán los dos primeros.

Estos balances totales (o macroscópicos) se aplicarán a un recipiente finito o volumen fijo en el espacio. Usamos el término "total", debido a que deseamos describir estos balances con respecto al exterior del recipiente, no estamos interesados en los detalles que ocurren dentro del recipiente; por ejemplo, en un balance total se consideran velocidades de entrada y salida promedio.

Balance de material

Ecuación de continuidad

En flujo estacionario (estable) la velocidad de entrada de masa en el sistema de flujo es igual a la salida. Consideramos una corriente de fluido como la mostrada en la figura 2.7 que fluye por un tubo de corriente de sección transversal A_1 a la entrada y A_2 a la salida.

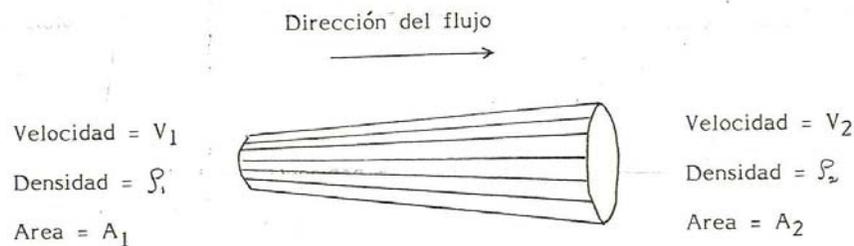


Fig. 2.7 Continuidad

La velocidad y la densidad a la entrada V_1 y ρ_1 respectivamente y las cantidades correspondientes a la salida con V_2 y ρ_2 respectivamente.

La velocidad del flujo másico a la entrada del tubo debe ser igual al flujo másico a la salida.

La masa de fluido entrando y saliendo del tubo por unidad de tiempo es:

$$\dot{m} = V_1 A_1 \rho_1 = V_2 A_2 \rho_2 \tag{2.3-1}$$

donde

\dot{m} = flujo másico o masa por unidad de tiempo

Para un tubo de corriente:

$$\dot{m} = VA\rho = \text{constante} \tag{2.3-2}$$

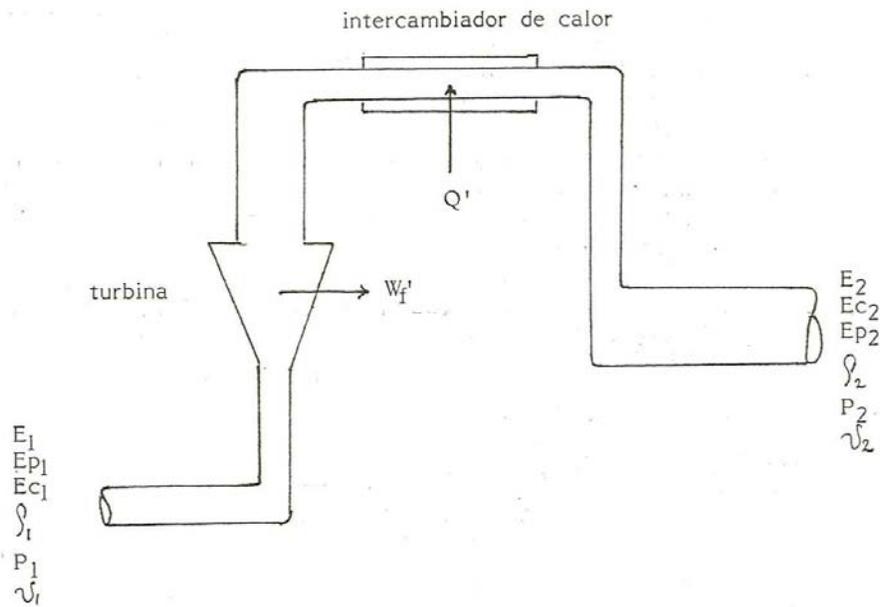
La Ecuación (2.3-2) es llamada Ecuación de Continuidad. Esta se aplica a fluidos compresibles o no compresibles.

Balance de energía mecánica

El balance de energía en un sistema que está fluyendo es la relación de los diversos tipos de energía implicada en el sistema de flujo abierto (Fig. 2.8) que bajo las condiciones de estado estable requiere que:

- a) El fluido que entra y sale del sistema sea uniforme en cuanto a propiedades y velocidad, y que éstas sean invariables con el tiempo.
- b) Las propiedades físicas del fluido en cualquier punto dentro del sistema son constantes con respecto al tiempo. Las condiciones de salida no serán forzosamente idénticas a las de entrada.

- c) La cantidad de masa que entra y sale del sistema es constante
- d) El calor añadido y el trabajo dado son constantes



Nomenclatura

- | | |
|---|---|
| E = Energía interna | E_c = Energía cinética |
| E_p = Energía potencial | v = Velocidad promedio del fluido |
| V = Volumen específico | P = Presión del fluido |
| ρ = Densidad del fluido | Q = Calor absorbido por el material de flujo. |
| W_f' = Trabajo transferido por el fluido al exterior. | |

Fig. 2.8. Balance de energía en un sistema de flujo

El balance de todas las energías incluidas en el sistema de flujo de la figura 2.8 puede escribirse como

$$E_1 + E_{c1} + E_{p1} + R_1 V_1 + Q' = E_2 + E_{c2} + E_{p2} + R_2 V_2 + W_p' \quad (2.3-3)$$

La suma de todos los términos a la izquierda de la ecuación (2.3-3) representa la energía transferida al sistema, y los términos a la derecha significan la energía transferida del sistema o por el sistema hacia los alrededores.

La elección de los puntos de referencia es arbitraria, pero tal elección define el sistema y los efectos de energía entre los dos puntos deben ser considerados.

El balance total de energía puede escribirse también en forma diferencial, así por unidad de masa, la ecuación (2.3-2) se transforma en:

$$\Delta E + \Delta(PV) + \Delta E_c + \Delta E_p = Q' - W_p' \quad (2.3-3)$$

2.3.2. Fricción

El Balance de Energía y la Fricción del Fluido

Consideremos un sistema de flujo, en el cual el fluido no está sujeto a tensión cortante durante el movimiento y está fluyendo bajo condiciones isotérmicas. Este tipo de fluido se llama fluido perfecto en el que solamente son significativas las formas de energía mecánica y para este caso tan restringido el balance de energía se transforma en

$$R_1 V_1 + E_{p1} + E_{c1} = R_2 V_2 + E_{p2} + E_{c2} \quad (2.3-4)$$

La Ecuación (2.3-4) es la que generalmente se llama Ecuación de Bernoulli y su significado es que en ausencia de energía no mecánica la

suma de la energía debida a la presión, la energía cinética y la energía potencial permanece constante para un fluido perfecto. Pero desgraciadamente esta ecuación sólo tiene interés teórico y la suma de las energías en el punto 2 es siempre menor que la suma de los mismos términos en el punto 1, y esto es debido a las fuerzas de fricción.

Como resultado del flujo, la fricción del fluido tiene lugar en cualquier parte en donde exista una tensión sobre el fluido. Esta fricción convertirá efectivamente la energía mecánica en calor, así que todo el trabajo realizado por el fluido no se transferirá a los alrededores. La pérdida de energía aparecerá en el fluido como calor; así que:

$$Q = Q' + \Sigma F \quad (2.3-5)$$

$$W_f' = W - \Sigma F \quad (2.3-6)$$

donde:

Q = Calor absorbido por el fluido

Q' = Calor transferido al ambiente

W = Trabajo total hecho por el fluido

W_f' = Trabajo transferido al medio

ΣF = Fricción total del fluido

Sustituyendo la ecuación (2.3-5) en la ecuación (2.3-4), tenemos

$$\Delta E + \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta(PV) = Q - \Sigma F - W_f' \quad (2.3-7)$$

Por la primera Ley de la Termodinámica

$$\Delta E = Q - W = Q - \int_{v_1}^{v_2} P dv \quad (2.3-8)$$

también tenemos

$$\Delta(PV) = \int_{v_1}^{v_2} P dv + \int_{P_1}^{P_2} V dP \quad (2.3-9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.3-8) y (2.3-9) en la (2.3-7) queda :

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \int_{v_1}^{v_2} v dv + \sum F = -W_p \quad (2.3-10)$$

Tipos de Fricción

La fricción del fluido puede ser agrupada en dos clasificaciones muy amplias: La fricción debido a la forma (F_f) y la fricción debida a la superficie (F_s), entonces

$$\sum F = F_f + F_s \quad (2.3-11)$$

La fricción del fluido es una función de la aspereza de la tubería, el tamaño de la misma, de las propiedades del fluido y la velocidad del mismo. La aspereza o rugosidad de la tubería esta relacionada con la configuración de la superficie; la presencia de conexiones y cambios de dirección en el flujo ocasiona la rugosidad debido a la forma.

La pérdida de fricción a través de las conexiones, expansiones y reducciones se obtiene más fácilmente en términos de longitud equivalente de una tubería recta.

La longitud equivalente es un término que representa una longitud hipotética de tramo de tubo recto, que originaría la misma pérdida de energía por fricción que la que da lugar al accesorio que se trate.

El término que mide la longitud equivalente de un accesorio en unidades de longitud de tubo recto se denomina longitud equivalente absoluta (L_e) en tanto que si se expresa como diámetros de tubo se denomina longitud equivalente relativa (L_e/D) y es adimensional. De esta última forma es común encontrar datos en la literatura para válvulas y accesorios (apendice A - 2).

A la longitud de tubería recta se le suma la longitud equivalente para dar la longitud total del sistema. La ventaja de esta aproximación es que tanto la tubería como conexiones están expresadas en términos de longitud total equivalente de la misma aspereza relativa.

La aspereza relativa o rugosidad relativa se define como la relación adimensional de la rugosidad absoluta del tubo (ϵ) al diámetro interno del mismo (D), es decir

$$\text{rugosidad relativa} = \frac{\epsilon}{D}$$

El Apéndice A - 1 muestra las variaciones de los factores de aspereza relativa para varios tipos de tubería de diferentes tamaños nominales.

Factor de Fricción

La fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes sólidas puede ser de dos tipos: Cuando el fluido está en reposo tiene una magnitud definida y cuando esta en movimiento se puede expresar como sigue

$$F = A E f' \quad (2.3-12)$$

siendo A el área característica en donde el fluido ejerce la fuerza, E es una cantidad de energía cinética por unidad de volumen y f' el llamado factor fricción, una cantidad adimensional.

Generalmente para el flujo a través de tubería A es la superficie mojada y E es $\frac{1}{2} v^2 \rho$; para tubo de radio R y longitud L , se tiene:

$$F = 2 \pi R L \frac{\rho v^2}{2g_c} f' \quad (2.3-13)$$

Puesto que experimentalmente sólo se puede conocer la caída de presión que ejerce un fluido a través de una tubería, se hace uso de la definición de presión

$$F = (\Delta P) \pi R^2 \quad (2.3-14)$$

Sustituyendo esta ecuación en la (2.3-13) se tiene

$$f' = \frac{\Delta P D g_c}{2L v^2 \rho} \quad (2.3-15)$$

Se ha encontrado experimentalmente que el factor de fricción de Fanning (f') es función del No. de Reynolds y la aspereza relativa

$$f' = \phi \left[Re, \frac{\epsilon}{D} \right]$$

de acuerdo con la Ecuación de Bernoulli la pérdida de energía por fricción del fluido (ΣF) con las paredes del tubo, puede medirse experimentalmente a partir de la caída de presión que se origina en dicho tubo. Lo anterior se obtiene fácilmente cuando se aplica la ecuación a un sistema comprendido entre dos puntos de una tubería. Analizando cada término y despejando ΣF de la ecuación (2.3-10) se tiene

$$v(P_1 - P_2) = \Sigma F \quad (2.3-16)$$

también
$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho} = \Sigma F$$

La ecuación (2.3-16) da la pérdida por fricción a partir de la caída de presión experimental del tramo de tubo analizado.

La ecuación (2.3-15) también se puede expresar de la siguiente forma, combinándola con la ecuación (2.3-16)

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \Sigma F = \frac{2f' v^2 \Sigma L}{D g_c} \quad (2.3-17)$$

también

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \Sigma F = \frac{f v^2 \Sigma L}{D g_c} \quad (2.3-18)$$

Donde f' es el factor fricción de Fanning y f el factor de fricción de Darcy, que tiene un valor cuatro veces mayor que el de Fanning.

Frecuentemente se encuentra en la literatura la gráfica del factor de Darcy (f) contra No. de Reynolds y rugosidad relativa como parámetro (Apéndice A - 4)

$$f = \frac{2 \Sigma F f_c D}{\gamma^2 \Sigma L} = \phi \left[Re, \frac{\epsilon}{D} \right] \quad (2.3-19)$$

donde

f = Factor de fricción de Darcy

ΣF = Fuerzas de fricción

D = Diámetro de la tubería

γ = Velocidad promedio del fluido

ΣL = Longitud total equivalente

2.4. PRACTICAS DE LABORATORIO

2.4.1. Práctica No. 1. Determinación del Factor de Fricción en tubería recta y una tubería con accesorios.

Introducción

En el sistema de líneas de tubería del laboratorio de Ingeniería Química se pueden realizar varias prácticas relacionadas con la mecánica de fluidos. En esta se determinó la caída de presión a través de un tramo de tubería recta, así como también la provocada por diferentes accesorios, haciendo circular agua por medio de una bomba. Teniéndose como objetivo determinar el factor de fricción experimental a partir de la ecuación de Bernoulli y el factor de fricción teóricos; esto con los datos de No. de Reynolds y factor de aspereza.

Descripción del equipo

El equipo utilizado es el sistema descrito en la figura 2.9 consta de:

- Manómetro diferencial
- Bomba centrífuga
- Rotámetro
- Tanque de alimentación
- Tubería y accesorios

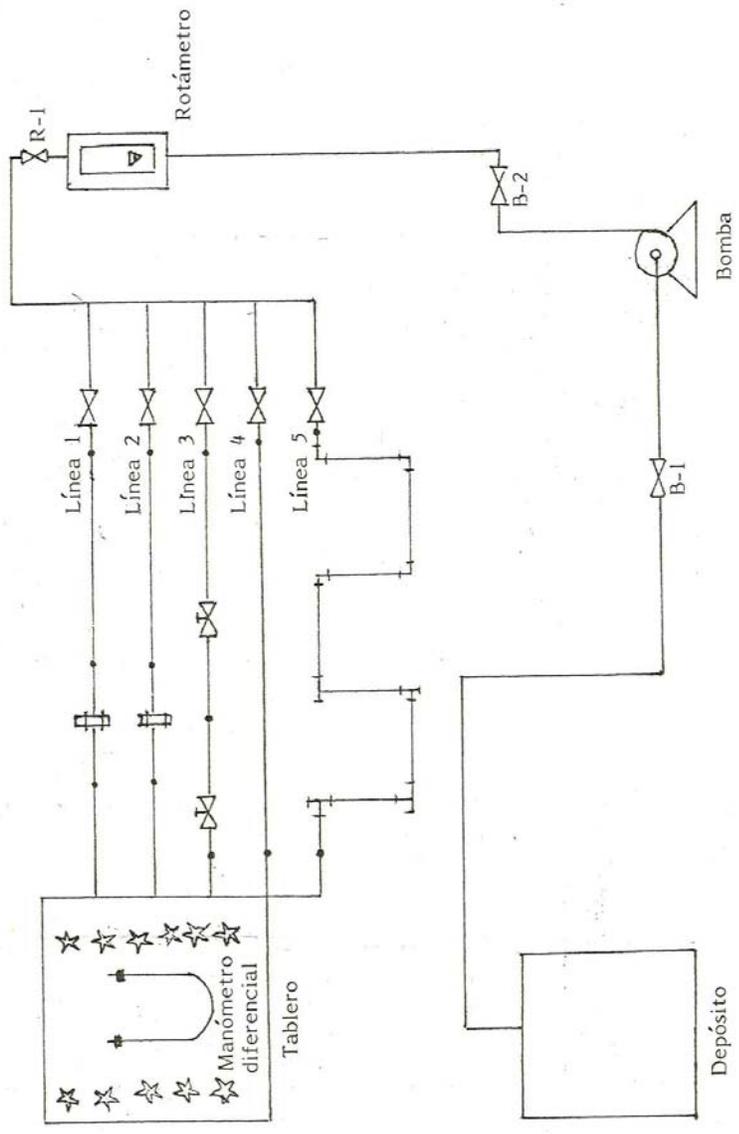


Fig. 2.9. Sistema de líneas de tubería

Procedimiento

1. Calibrar el manómetro (que el líquido manométrico este al mismo nivel en ambos lados).
2. Verificar que todas las válvulas del tablero esten cerradas.
3. Verificar que todas las válvulas de las líneas esten cerradas.
4. Abrir las válvulas del tablero que comunican el manómetro con las tomas de presión de las líneas con la cual se va a trabajar
5. Abrir la válvula de la línea con la que se va a trabajar.
6. Abrir la válvula B-1, R-1 y R-2.
7. Encender el motor de la bomba.
8. Medir para diferentes flujos la caída de presión causada (el flujo se varía con la válvula R-1).
9. Apagar el motor de la bomba.
10. Cerrar las válvulas.

Cálculos y Resultados

A.1. Determinar el factor de fricción experimental y compararlo con el factor de fricción teórico en la tubería recta (línea 4 del sistema, figura 2.9).

Datos:

Densidad del agua = 995.62 kg/m^3 a 32°C , 1 atm

Viscosidad del agua = $8 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{seg}$ a 32°C , 1 atm

Diámetro nominal = $3/4 \text{ plg.}$, acero comercial, cédula 40

Diámetro interior DI = $0.824 \text{ plg} = 0.0209 \text{ m}$ (Ap. A-5).

Area de sección transversal $A = 0.00371 \text{ pies}^2 = 3.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Longitud de tubería recta $L = 1$ m, no hay accesorios

Longitud total equivalente $L = 1$ m

H Plg Hg	Q G PM	ΔH m H ₂ O	Q m ³ /seg
0.6	2.2	0.207	1.38×10^{-4}
0.4	2.0	0.138	1.26
0.2	1.6	0.069	1.01
0.1	1.0	0.034	0.63

Tabla 2.2. Datos obtenidos durante la práctica 2.4.1. (A.1)

$V=Q/A$ m/seg	Re	$f_{\text{exp.}}$ Ec. (2.3-22)	$f_{\text{teórico}}$ Gráfica Ap.A-4	$\frac{f_{\text{exp.}}}{f_{\text{teórico}}}$
0.401	1.04×10^5	0.527	0.0250	21.08
0.366	9.51×10^4	0.422	0.02505	16.84
0.293	7.6×10^4	0.329	0.02515	13.08
0.183	4.75×10^4	0.416	0.0254	16.37

Tabla 2.3. Resultados de la práctica 2.4.1. (A.1)

El factor de fricción F experimental es calculado a partir de la ecuación (2.3-19) donde

$$\Sigma F = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\Delta H g}{g_c}$$

Esto es aplicando la ecuación (2.3-10) entre los puntos 1 y 2 de la línea 4 figura 2.6 da por resultado la ecuación (2.3-16), además

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\Delta H g}{g_c} = \Sigma F$$

Es el único cambio de energía entre los puntos 1 y 2.

El factor de fricción f teórico se determina en la gráfica del apéndice A-4, con el No. de Reynolds y el factor de aspereza para el acero comercial $\frac{\epsilon}{D} = 0.0021$, esta es en el apéndice A-1.

A.2. Determinar el factor de fricción experimental y compararlo con el factor de fricción teórico en la tubería con accesorios (línea 5 del sistema, figura 2.9).

Datos:

Los mismos anteriores y

Longitud de tubería recta $L = 1.39$ m

Cálculo de la longitud equivalente

Accesorios	L/D Ap-A-2	Le Ap-A-3
4 codos Normal 90°	30 X 4	2.508
4 tes con flujo a través de la rama	60 X 4	5.016
		$\Sigma Le = 7.524$ m

Tabla 2.4. Datos para el cálculo de longitud equivalente

experimental es hasta 10 veces mayor que el teórico.

Estos diferencias se pueden atribuir a la longitud de la tubería para experimentación, ya que cuando ésta es más larga (línea 5) el valor experimental se acerca un poco al valor teórico, pero no es suficiente.

Para tener más aproximación se debe realizar la práctica en un sistema de tuberías con más longitud para estabilizar más la caída de presión.

También se puede determinar las pérdidas por fricción en las válvulas y placa orificio instaladas en los otras líneas del sistema (Fig. 2.9) siguiendo el mismo procedimiento aquí mostrado.

2.4.2. Práctica No. 2. Medición de gasto

Introducción

La medición de gasto es importante en aplicaciones que van desde la medición de la rapidez del flujo sanguíneo en una arteria humana, hasta la medición del gasto del oxígeno líquido en un cohete. En algunos casos se requiere gran precisión en su medición, mientras que en otros es suficiente una medición burda. La selección de un instrumento para una aplicación particular depende de muchos factores, incluyendo el costo. El ingeniero en la industria está vitalmente interesado en la medición exacta de gastos, debido a las repercusiones que puede tener ésto sobre el estudio financiero de la compañía.

Los medidores de gasto frecuentemente necesitan mediciones exactas de temperatura y presión para poder determinar el gasto adecuadamente.

El objetivo de esta práctica es presentar una discusión de la medición de gasto, indicar el principio de operación y aprender la calibración de algunos aparatos que se utilizan comúnmente; aquí se va a tratar con el medidor Venturi, tubo de Pitot, placa orificio y rotámetro.

El principio de operación de los medidores de área fija es la disminución de la energía de presión y el aumento de la energía cinética al pasar el fluido por una restricción o garganta, conservándose constante la energía total del fluido y en este caso la caída de presión es proporcional a la velocidad al cuadrado. Contrariamente, el rotámetro presenta una caída de presión constante debido a un equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre el flotador.

RBC T. 1991

Equipo Utilizado

- Un medidor Venturi
- Una placa orificio
- Un tubo de Pitot
- Un manómetro diferencial
- Un rotámetro
- Depósito del fluido
- Bomba centrífuga

Los medidores de área fija se disponen en paralelo conectados al manómetro y el rotámetro, para medir el gasto que pasa por cada uno de ellos, se encuentra colocado a la salida común. (Fig.2.10)

Procedimiento

La operación del equipo descrito consiste en hacer fluir agua por cada uno de los medidores y determinar experimentalmente el gasto y teóricamente (con el rotámetro). Además medir la pérdida de presión del fluido al pasar por cada uno de los instrumentos.

1. Identificar la línea del sistema con que se va a trabajar, con las válvulas que comunican al manómetro y abrir éstas (MV-1 MV-2 o MV-3).
2. Abrir totalmente la válvula de alimentación (V-1), al tanque alimentador (T-1) para llenarlo.
3. Abrir totalmente la válvula de alimentación al sistema (V-2) permaneciendo de ésta forma durante toda la operación.
4. Abrir totalmente la válvula de succión de la bomba (V-3) y mantenerla así durante toda la operación.

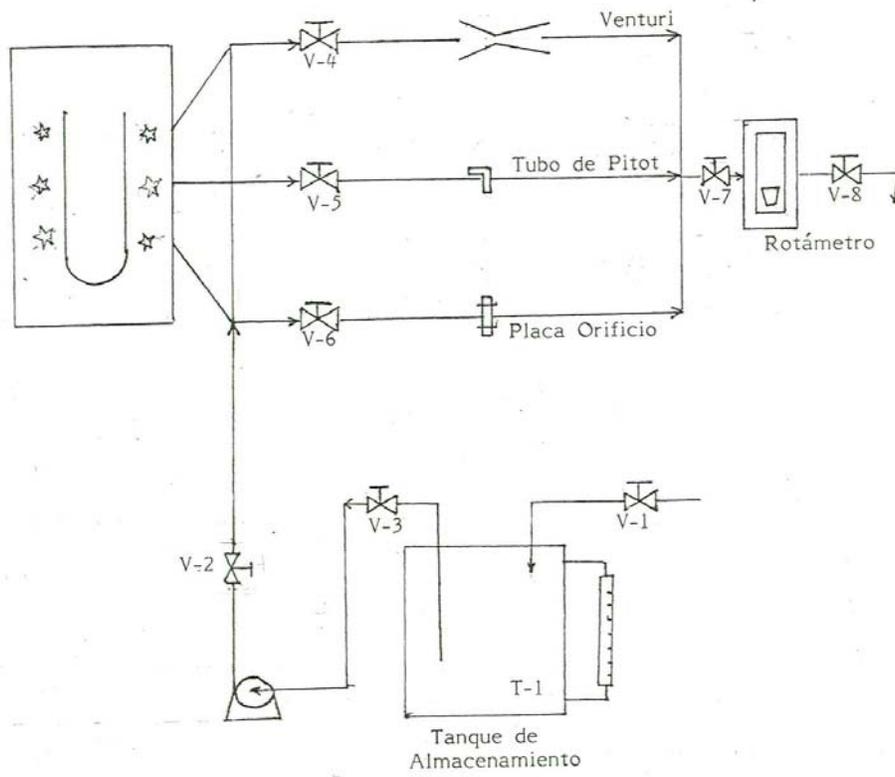


Fig. 2.10 Sistema para la medición de gasto

5. Abrir totalmente la válvula que permite el paso del flujo a través del medidor que se desea calibrar, (V-4, V-5 o V-6).
6. Abrir la válvula (V-7) que permite el paso al flujo a través del rotámetro.
7. Abrir la válvula de descarga general de sistema (V-8).
8. Asegúrese de que las demás válvulas del sistema estén cerradas.
9. Encender la bomba con la que se alimenta al sistema.
10. Regular el flujo hasta una cierta lectura en el rotámetro.
11. Medir la pérdida de presión correspondiente al instrumento que se está trabajando.
12. Medir el gasto volumétrico, puede ser de la siguiente manera:
 - a) Medir el volumen del líquido usado durante la operación de un instrumento.
 - b) Medir el tiempo de operación (El tiempo para gastar determinado volumen de líquido).

Cálculos

Primero se va a obtener la ecuación de la curva de calibración del rotámetro, con ésta se va a calcular el gasto real y este dato usarlo en las ecuaciones de los instrumentos (Pitot, Venturi y placa orificio) y así determinar los coeficientes de cada uno de ellos.

Los datos experimentales se pueden recopilar en una tabla de la siguiente forma:

Corrida No.	Lectura del rotámetro Q_t (lit/min.)	Volumen desalojado (litros)	Tiempo de descarga (minutos)	Q_r (lit/min)
1				
2				
3				
4				

Tabla 1. Datos experimentales para la calibración del Rotámetro.

(El número de corridas es a criterio del practicante)

Calibración del Rotámetro

Con los datos de la práctica 1, calcular el caudal real (Q_r)

$$Q_r = \frac{\text{volumen descargado}}{\text{tiempo de descarga}}$$

La ecuación de la curva de calibración se obtiene con los datos de caudal teórico (Q_t en el eje X) y caudal real (Q_r en el eje Y).

Los datos de Q_t y Q_r se ajustan a la ecuación de una línea recta por el método de mínimos cuadrados (Apendice B-1).

$$Q_r = mQ_t + B$$

Calibración de los instrumentos

1. Cálculo del coeficiente del medidor Venturi (C_v).

$$Q_v = C_v A_2 A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) \rho g h}{\rho (A_1^2 - A_2^2)}} \quad (2.2-19)$$

2. Cálculo del coeficiente del tubo de Pitot (C_p)

$$Q_v = C_p A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) \rho g h}{\rho (1 - \beta^4)}} \quad (2.2-23)$$

3. Cálculo del coeficiente de descarga de la placa orificio (C)

$$Q_v = C A_o \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) \rho g h}{\rho (1 - \beta^4)}} \quad (2.2-12)$$

Datos adicionales:

- Diámetro del tubo
- Diámetro de la garganta o estrangulamiento del medidor Venturi
- Diámetro del orificio del medidor orificio
- Densidad del fluido
- Densidad del líquido manométrico

Presentación de Resultados

Los resultados obtenidos en el desarrollo de la práctica, se presentan tabulados y/o graficados para varias corridas en cada medidor; una forma puede ser la siguiente:

	Qt lit/min	Qr l it/min	h M H ₂ O	Coeficiente
Medidor Venturi				
Tubo de Pitot				
Placa orificio				

Tabla 2 Resultados de la práctica

Gráfica 1. Gasto volumétrico real contra gasto volumétrico teórico.

Las Unidades escritas en las tablas pueden variar según el sistema que se este manejando.

2.4.3. Práctica No. 3. Curvas características de una bomba Centrifuga

Introducción

La industria química presenta la variedad más amplia de problemas de bombeo y de diferentes líquidos para bombear que cualquier otra industria hoy en día. Las materias en forma líquida por lo general se entregan a las plantas químicas en carros tanques y deben transferirse a depósitos. Posteriormente se transfieren a la planta y se bombean de una parte a otra del proceso.

Las bombas centrífugas se usan en aproximadamente 90% de todas las aplicaciones que consisten en el manejo de líquidos corrosivos en las plantas químicas.

A continuación se describe el procedimiento de una práctica, donde el equipo principal es una bomba centrífuga. Se hace fluir agua a diferentes flujos por medio de la bomba a un sistema de tubería, registrándose en manómetros la presión de succión y descarga para cada flujo. Con estos datos se va a calcular la carga o cabezal de la bomba y la potencia desarrollada. Además se va a cuantificar la potencia suministrada a la bomba por medio de un wattímetro. También se va a calcular la eficiencia de la bomba para cada capacidad. Con estos datos se va a contruir la gráfica de las curvas características de la bomba.

Equipo utilizado

El sistema consta de:

- Bomba centrífuga
- Tanque de almacenamiento con nivel
- Rotámetro

- Manómetros
- Válvulas
- Tanque receptor de líquidos con nivel
- Tubería y accesorios
- Cronómetro
- Wattmetro.

El sistema propuesto se muestra en la figura 2.11.

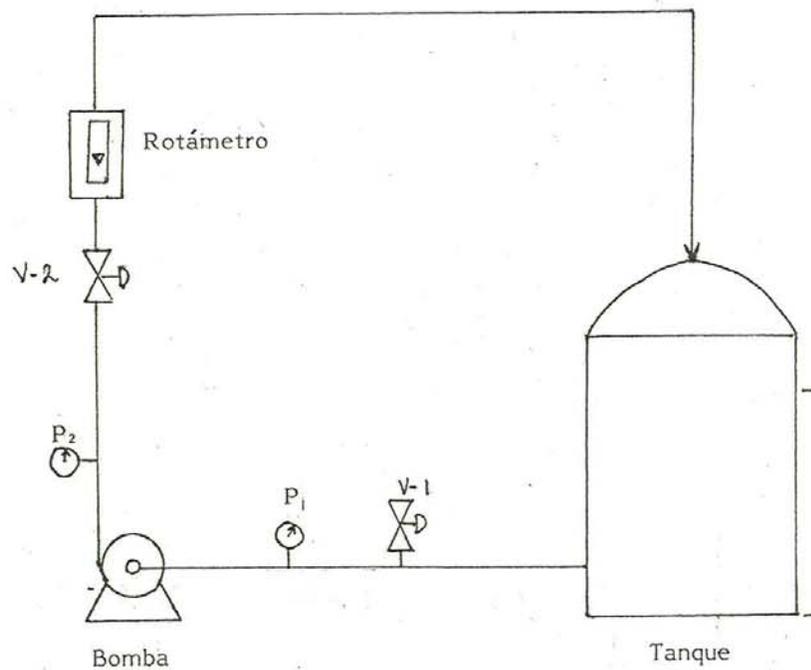


Fig. 2.11. Sistema para determinar las curvas características de una bomba Centrífuga.

Procedimiento

1. Llenar el tanque de almacenamiento
2. Abrir las válvulas V-1 y V-2 (succión y descarga)
3. Encender el motor de la bomba
4. Tomar las lecturas de los manómetros y el rotámetro.
5. Variar el gasto y repetir las anotaciones.

Nota: Se debe determinar previamente la curva de calibración del rotámetro como se indica en la práctica 2.4.2., para obtener el gasto real (Q_r).

Cálculos

1. Capacidad de operación = Gasto real

$$Q_r = M \cdot Q_t + b \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}$$

2. Flujo másico (\dot{m})

$$\dot{m} = Q_r \rho$$

3. Presión suministrada a la bomba

$$P = P_{\text{descarga}} - P_{\text{succión}} \quad (2.1-1a)$$

4. Carga suministrada por la bomba

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (2.1-1)$$

5. Potencia desarrollada por la bomba

$$P = \dot{m} H \frac{g}{g_c} \quad (2.1-2)$$

6. Potencia eléctrica = Potencia suministrada

$$P_{\text{elect.}} = V \times I \times f \times K \quad (2.1-4)$$

7. Eficiencia

$$\eta = \frac{\text{Potencia desarrollada}}{\text{Potencia suministrada}} \quad (2.1-3)$$

Presentación de Resultados

Los datos obtenidos durante la práctica se presentan tabulados; una forma puede ser la siguiente:

Q_r gal/min	\dot{m} lbm/seg	P_{des} lbf/plg ²	P_{suc} lbf/plg ²	ΔP lbf/plg ²	H pie	P lbf-pie

Tabla 1

P Watts	I amp	P elect Watts	eficiencia %

Tabla 2

La gráfica de las curvas características de la bomba se construye con los datos anteriores y tiene la forma de la figura 2.1.

Datos adicionales

- Peso específico del fluido (agua).
- Voltaje del motor de la bomba
- Factor del wattmetro
- Constante del wattmetro