

## ***Capítulo 4***

# ***MEDICION DE FLUJO DE FLUIDOS***

Un fluido es una sustancia que posee la propiedad de que una porción de la misma puede desplazarse respecto a la otra, es decir, puede fluir venciendo las fuerzas de atracción entre las moléculas, que originan una resistencia interna a este desplazamiento relativo. Los fluidos pueden ser un líquido, un gas o mezcla de éstos dos. El flujo indica lo rápido que una sustancia (fluido) está en movimiento.

Los sistemas de fluidos pueden ser de:

- Tubería cerrada.
- Semicerrados.
- Abiertos.

En cada caso, se pueden usar varios métodos de medición para determinar la velocidad de flujo requerida.

Las mediciones de flujo de fluidos son usadas en muchas aplicaciones que cubren un gran espectro de actividades tanto en la industria como la investigación. Las mismas pueden ser expresadas de tres formas: flujo volumétrico, flujo másico y velocidad de flujo.

### **4.1. DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS DEL CAPÍTULO**

En este capítulo se describen los transductores industriales más utilizados en la medición de flujo de fluidos. Se comienza con el concepto de flujo de fluidos, uso de

unidades, clases de flujo de fluidos, leyes asociadas a los cambios de flujo de fluidos, aplicaciones y tipos de medidores de flujo. Existen por lo menos cien tipos de medidores comerciales de flujo distribuidos dentro de las siguientes técnicas: presión diferencial, electromagnético, área variable, desplazamiento positivo, turbina y otros.

Las técnicas que se estudiarán para la medición de flujo de un fluido serán para el caso de tubería cerrada, debido a su importancia en los procesos industriales, laboratorios y plantas piloto. Todos estos métodos de medición serán estudiados y presentados así: principio de funcionamiento, características, ventajas, desventajas y aplicaciones.

Al terminar de estudiar este capítulo se deberá ser capaz de:

- Definir flujo de fluidos.
- Usar correctamente las unidades de medición de flujo de fluidos.
- Listar los tipos de flujo de fluidos.
- Definir las leyes asociadas a los cambios de flujo de fluidos.
- Desarrollar una lista de aplicaciones de la medición de flujo de fluidos en el ámbito industrial.
- Listar y describir los dispositivos que usan los métodos de flujo de fluidos.
- Elegir el transductor más apropiado para la medición de flujo de fluidos.
- Especificar el medidor de flujo de fluidos.

## 4.2. CLASES DE FLUJO DE FLUIDOS

En el estudio de mediciones de fluidos se toman los no viscosos como **fluidos ideales**. En ellos no existe disipación de energía debido a la fricción. En **fluidos reales** esta aproximación dará buenos resultados cuando la fricción es pequeña.

#### **4.2.1. Fluidos ideales**

Los fluidos ideales se clasifican en: compresibles e incompresibles. En estos últimos se asume la densidad constante o con pequeñas variaciones. Esta suposición nos limita a los fluidos de líquidos y gases, con pequeñas variaciones de presión y temperatura. En los gases, el flujo a alta velocidad se asocia con grandes variaciones de presión, temperatura y densidad, pero estas variaciones son pequeñas en flujos a baja velocidad, los cuales pueden ser estudiados como fluidos incompresibles ideales con bastante aproximación.

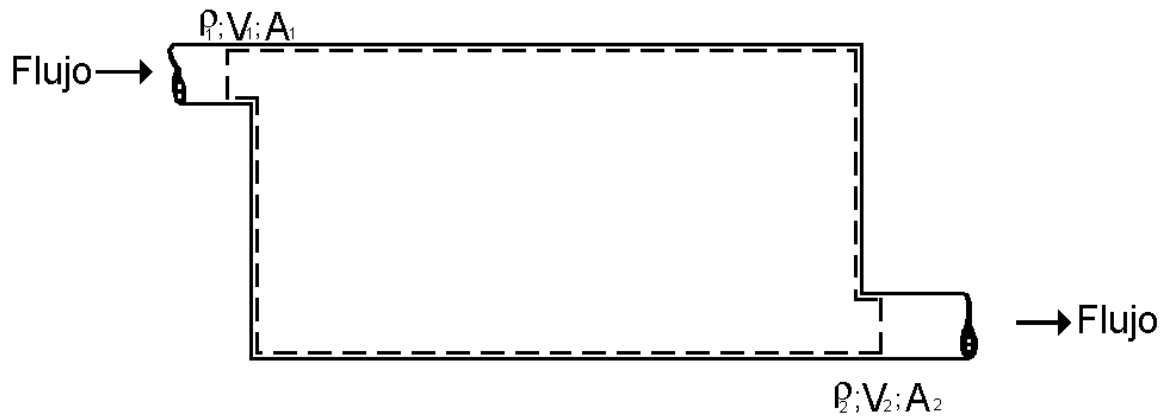
Siendo el caso de fluidos incompresibles ideales el más sencillo de estudiar, los sistemas de flujo de fluidos en general se tratan de aproximar para ser estudiados como tales dentro de lo posible. Los sistemas que no comprenden este caso se consideran con su correspondiente complejidad.

En el estudio de fluidos incompresibles ideales, es importante considerar si el fluido es de una, dos o tres dimensiones.

##### **4.2.1.1. Flujo de una dimensión**

Flujo de una dimensión se refiere al desplazamiento a lo largo de una línea de corriente de flujo individual, la cual posee solamente una dimensión. En estos, la variación de presión y velocidad ocurre a lo largo de la línea de corriente, Figura 4.1.

En los flujos de una dimensión, todas las propiedades y características del fluido son función de una coordenada en el espacio y el tiempo.

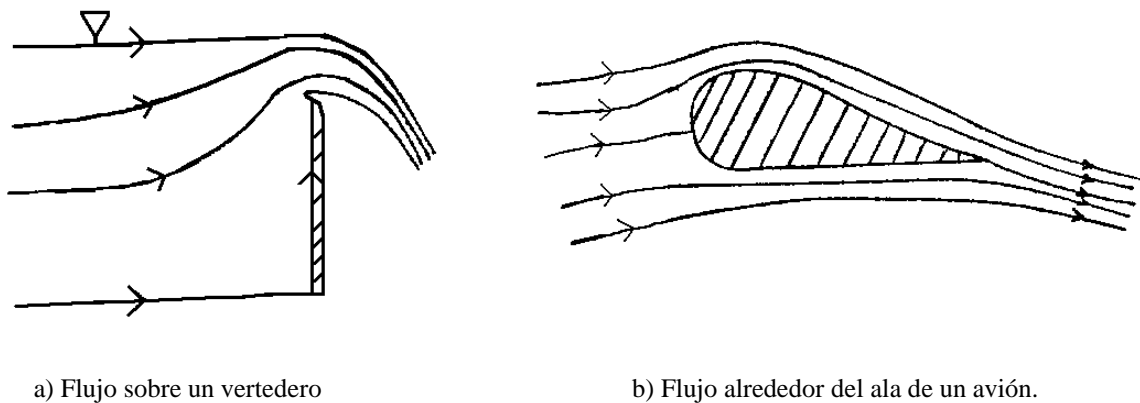


**Figura 4.1. Flujo de una dimensión.**

#### 4.2.1.2. Flujo de dos y tres dimensiones

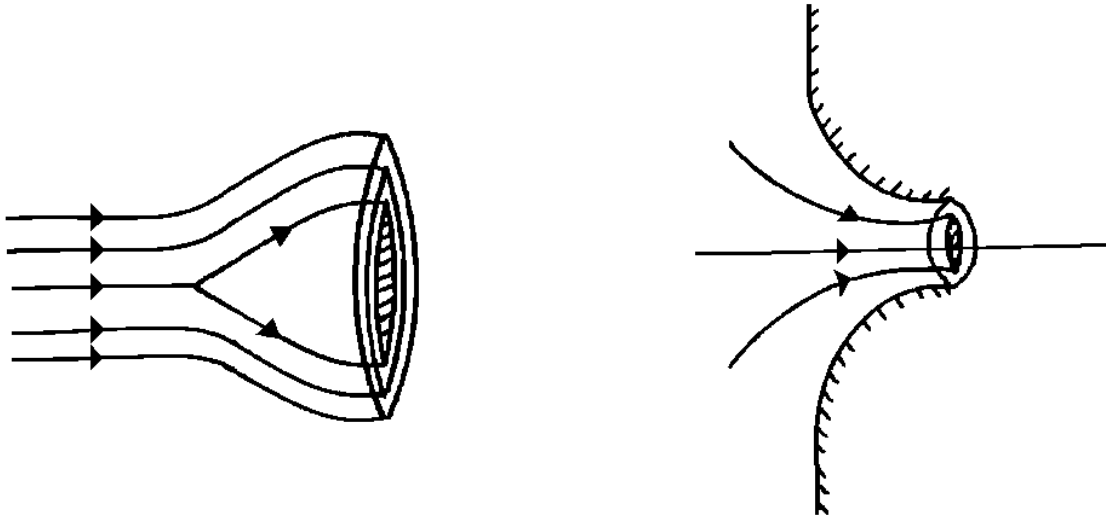
Flujos de dos y tres dimensiones son campos de velocidades de flujo. En el primero, el flujo es definido por las líneas de corrientes en un plano sencillo, mientras que el segundo está en el espacio.

Ejemplos de flujos de dos dimensiones son el flujo sobre un vertedero y el que se produce alrededor del ala de un avión, el cual se muestra en la Figura 4.2.



**Figura 4.2. Flujo de dos dimensiones.**

Dos ejemplos de flujos de tres dimensiones se muestran en la Figura 4.3. En estos casos, las líneas de corriente de flujo son realmente superficies de flujo y los tubos por donde circula éste son secciones transversales anulares.

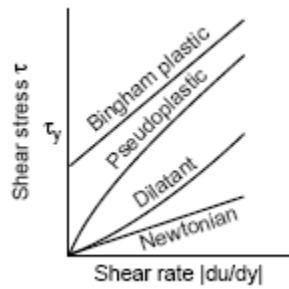


**Figura 4.3. Flujos de tres dimensiones asimétricos.**

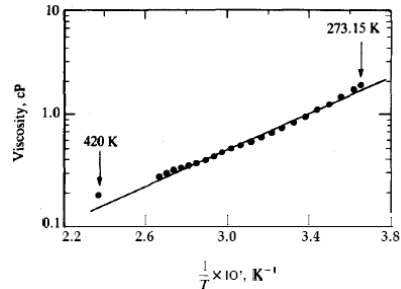
#### **4.2.2. Fluidos reales**

Los fluidos reales son fluidos donde se presenta disipación de energía, debido a la fricción producida por la viscosidad.

La viscosidad es una propiedad física que caracteriza la resistencia al flujo de los fluidos. De acuerdo con su viscosidad los fluidos pueden ser clasificados en fluidos newtonianos y no newtonianos. Los fluidos newtonianos son aquellos que poseen viscosidad constante en un rango de temperatura aceptable, entre ellos se encuentra el agua, el aceite; estos fluidos son los que se considerarán en este texto. Los fluidos no newtonianos son aquellos donde la viscosidad es función del esfuerzo cortante, la temperatura y la presión; entre estos se encuentra la pintura y la sangre. La viscosidad de un fluido tiene la tendencia a disminuir cuando la temperatura del mismo aumenta, en la Figura 4.4(a) se presentan algunos fluidos Newtonianos y en la Figura 4.4(b) se observa el comportamiento de la viscosidad con el inverso de la temperatura.



(a)



(b)

Figura 4.4 Fluidos reales: (a) Fluidos no newtonianos. (b) Influencia del inverso de la temperatura sobre la viscosidad.

### 4.3. UNIDADES DE FLUJO DE FLUIDOS

El flujo de fluidos pueden ser expresado de tres formas: flujo volumétrico, flujo másico y velocidad de flujo. Flujo volumétrico ( $Q$ ) indica el volumen de un fluido en movimiento que pasa por un punto en una unidad de tiempo. Flujo másico ( $Q_m$ ) está expresado en unidades de masa por unidad de tiempo. La velocidad de un material se denomina velocidad de flujo ( $Q_v$ ). Estas tres cantidades están relacionadas por:

$Q$  = Flujo volumétrico y se expresa en metro cúbico por segundo ó en galones por minuto

$Q_m$  = Flujo másico =  $\rho Q$  y se expresa en kilogramo por segundo

$Q_v$  = Velocidad de flujo =  $Q/A$  y se expresa en metro por segundo

donde:

$\rho$  = Densidad del fluido en kilogramo por metro cúbico

$A$  = Área transversal de la tubería en metro cuadrado

En la Tabla 4.1 se presentan las formas de expresar el flujo, con sus respectivas unidades en el Sistema Internacional.

**Tabla 4.1. Formas de expresar el flujo de fluidos.**

Forma de Expresar el Flujo de Fluidos	Notación	Unidades (SI)
Flujo Volumétrico	$Q$	m <sup>3</sup> /s
Flujo Másico	$Q_m$	kg/s
Velocidad de Flujo	$Q_v$	m/s
<b>Relaciones</b>		
$Q_m = \rho Q$	$Q_v = Q/A$	

#### 4.4. LEYES ASOCIADAS A LOS CAMBIOS DE FLUJO DE FLUIDOS

Las ecuaciones de flujo son representaciones matemáticas de las leyes físicas relacionadas con flujo de fluidos. Existen tres leyes básicas: conservación de la masa, momento y energía. Además, hay una ley adicional, la segunda ley de la termodinámica.

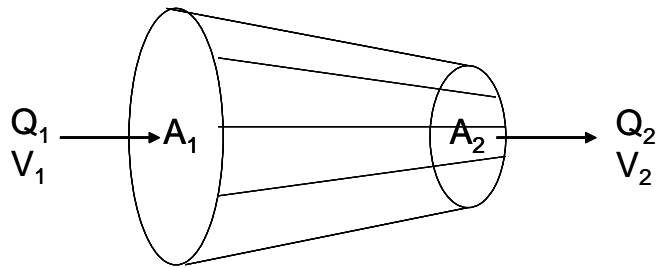
La representación matemática de los principios de conservación de masa, de momento y de energía (primera ley de la termodinámica) son las ecuaciones de continuidad, momento y energía (Bernoulli) respectivamente. Esta última es muy importante en el estudio de flujo de fluidos. Estas tres ecuaciones son aplicadas a fluidos ideales y reales.

La segunda ley de la termodinámica es importante en el estudio de fluidos compresibles a alta velocidad de flujo, los cuales no serán estudiados en este capítulo.

##### 4.4.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad o de la conservación de la masa de fluido a través de dos secciones (sean éstas  $A_1$  y  $A_2$ ) de un conducto o tubería establece que: la masa que entra es igual a la masa que sale, Figura 4.5.

Esto se cumple cuando entre las dos secciones de la conducción no se acumula masa, es decir, siempre que el fluido sea incompresible y por lo tanto su densidad sea constante. Esta condición la satisfacen todos los líquidos y, particularmente, el agua.



**Figura 4.5. Representación de la ecuación de continuidad.**

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (4.1)$$

donde:

$Q$  = Rata de flujo volumétrico

$V_1$  = Velocidad en el punto 1

$A_1$  = Área de sección transversal en el punto 1

$V_2$  = Velocidad en el punto 2

$A_2$  = Área de sección transversal en el punto 2

**Ejemplo # 1.** Un fluido con una densidad constante de  $900 \text{ kg/m}^3$ , tiene una velocidad de  $5 \text{ m/s}$  cuando pasa por una tubería de área transversal de  $1 \text{ m}^2$ . Determina la velocidad del fluido cuando circula por una tubería que posee un área transversal de  $0,7 \text{ m}^2$ .

De la ecuación de continuidad se obtiene:

$$V_2 = \frac{\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1}{\rho_2 \cdot A_2}$$



$$V_2 = \frac{(900 \text{ kg/m}^3)(5 \text{ m/s})(1 \text{ m}^2)}{(900 \text{ kg/m}^3)(0,7 \text{ m}^2)} = 7,14 \text{ m/s}$$

La velocidad del fluido a través de la tubería de área transversal  $0,7 \text{ m}^2$  es de  $7,14 \text{ m/s}$ .

#### 4.4.2. Ecuación de Bernoulli y la Primera Ley de la Termodinámica

La ecuación de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

1. Cinético: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
2. Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.
3. Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La siguiente ecuación conocida como "Ecuación de Bernoulli" consta de estos mismos términos.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante}$$

donde:

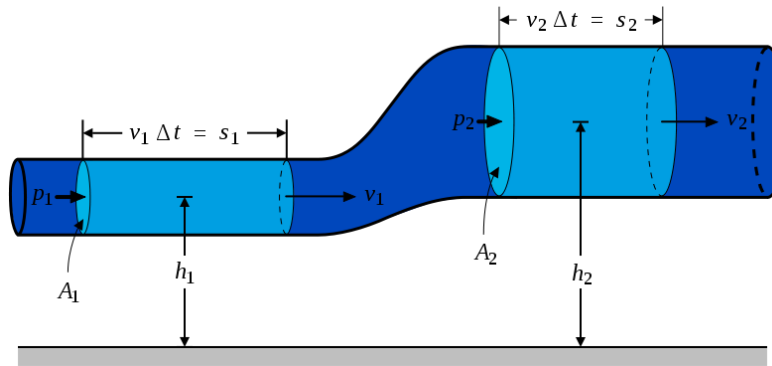
$V$ = velocidad del fluido

$g$ = aceleración gravitatoria

$z$ = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

$P$ = presión a lo largo de la línea de corriente

$\rho$ = densidad del fluido



**Figura 4.6. Esquema del principio de Bernoulli.**

De la primera ley de la termodinámica se puede concluir una ecuación estéticamente parecida a la ecuación de Bernoulli anteriormente señalada, pero conceptualmente distinta. La diferencia fundamental yace en los límites de funcionamiento y en la formulación de cada fórmula. La ecuación de Bernoulli es un balance de fuerzas sobre una partícula de fluido que se mueve a través de una línea de corriente, mientras que la primera ley de la termodinámica consiste en un balance de energía entre los límites de un *volumen de control* dado, por lo cual es más general ya que permite expresar los intercambios energéticos a lo largo de una corriente de fluido, como lo son las pérdidas por fricción que restan energía, y las bombas o ventiladores que suman energía al fluido. La forma general de ésta es:

$$\frac{P1}{\gamma} + \frac{V1^2}{2g} + Z1 + h_{ft} = \frac{P2}{\gamma} + \frac{V2^2}{2g} + Z2 \quad (4.2)$$

donde:

$\gamma$ = Peso específico.

#### 4.4.3. Número de Reynolds

Se ha determinado que los factores de flujo más importantes pueden ser correlacionados juntos en un factor adimensional llamado Número de Reynolds, el cual describe el flujo para todas las velocidades, viscosidades y diámetros de tubería. En general, el Número de Reynolds define la relación de la velocidad del fluido en función a su viscosidad, expresándose a través de la siguiente ecuación:

$$Re = Dv(\rho/\mu) \quad (4.3)$$

donde:

$D$ = Diámetro interno de la tubería

$v$  = Velocidad del fluido

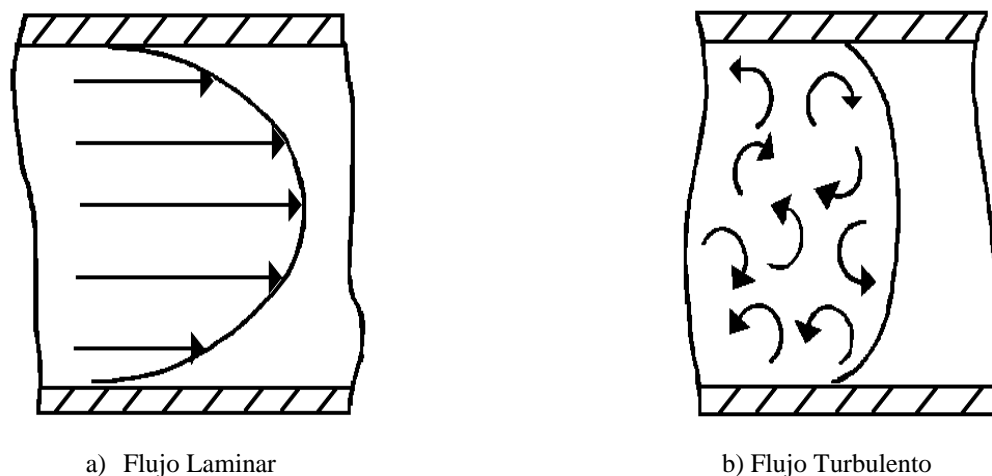
$\rho$ = Densidad

$\mu$ = Viscosidad

A bajas velocidades o altas viscosidades,  $Re$  es bajo y el fluido fluye en forma de suaves capas o láminas con la velocidad más alta en el centro de la tubería y velocidades bajas cerca de la pared de la tubería donde las fuerzas viscosas lo retienen. Este tipo de flujo es llamado "Flujo Laminar" y está representado por Números de Reynolds menores a 2 000. Una característica significativa del flujo laminar es la forma parabólica de su perfil de velocidad como puede verse en la Figura 4.7a.

A altas velocidades o bajas viscosidades el flujo se descompone en turbulentos remolinos con la misma velocidad promedio en toda la tubería. En este "Flujo Turbulento" el perfil de velocidad tiene una forma mucho más uniforme. El flujo turbulento está representado por Números de Reynolds mayores de 4 000. En la zona de transición entre

2 000 y 4 000 el flujo puede ser laminar o turbulento. Estos Números pueden alcanzar valores hasta 13 000 dependiendo de la rugosidad de la tubería, de la temperatura y valores mayores para flujo laminar, si se agrega calor a la tubería. El flujo turbulento se puede ver en la figura 4.7b.



**Figura 4.7. Perfil de velocidad de flujo de fluidos.**

**Ejemplo # 2.** Determinar el número de Reynolds del agua a través de una tubería de 8 in (D.I = 0,2134 m) con una velocidad de  $3,11 \times 10^{-2}$  m/s, y en una tubería de 30 in (D.I= 0,7430 m) donde su velocidad es  $2,56 \times 10^{-3}$  m/s. Suponer densidad del agua de 1 kg/L, y viscosidad de 1 cP.

Para la tubería de 8 in:

$$Re = \frac{(0,2134 \text{ m})(1000 \text{ kg/m}^3)(3,11 \times 10^{-2} \text{ m/s})}{0,001 \text{ kg/ms}} = 6\,636,74$$

El régimen del fluido es Turbulento

Para una tubería de 30 in:

$$Re = \frac{(0,7430 \text{ m})(1000 \text{ kg/m}^3)(2,56 \times 10^{-3} \text{ m/s})}{0,001 \text{ kg/ms}} = 1\,902,08$$

El régimen del fluido es Laminar

Un aumento en el diámetro de la tubería produce una disminución de la velocidad del fluido, traduciéndose en un número de Reynolds más bajo, y para algunos casos un cambio en el perfil de velocidad del fluido.

#### **4.5. APLICACIONES DE LAS MEDICIONES DE FLUJO DE FLUIDOS**

Los Medidores de Flujos de fluidos pueden ser utilizados en muchas aplicaciones tecnológicas y aplicaciones de la vida diaria, donde conociendo su funcionamiento y su principio de operación se puede entender de una manera más clara la forma que puede ayudar a solventar o solucionar problemas o situaciones comunes.

Los medidores de flujo se emplean en operaciones tan diversas, como son el control de procesos, balances de energía, distribución, emisión de contaminantes, metrología legal, indicación de condición y alarma, transferencia de custodia de fluidos como el petróleo y sus derivados.

#### **4.6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FLUJO DE FLUIDOS**

Existen muchos métodos confiables y precisos para medir flujo. Unos son aplicables solamente a líquidos, otros a gases y vapores, y algunos a líquidos, gases y vapores. El fluido puede ser limpio o sucio, seco o húmedo, erosivo o corrosivo. Las condiciones del proceso tales como: tipo de fluido, presión, temperatura, densidad, viscosidad, pueden variar. Todos estos factores afectan la medición y deben ser tomados en cuenta en el momento de seleccionar un medidor de flujo. Es necesario por lo tanto, conocer el principio de operación y características de funcionamiento de los diferentes medidores de flujo disponibles.

Existen por lo menos cien tipos de medidores comerciales de flujo distribuidos dentro de las siguientes técnicas de medición:

Presión diferencial	66 %
Electromagnético	9 %
Área variable	8 %
Desplazamiento positivo	6 %
Turbina	5 %
Otros (vortex, ultrasonido, etc.)	6 %

Esta clasificación varía entre industrias y países, pero el de presión diferencial es usado entre seis o siete veces más que cualquier otra técnica.

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de medición de flujo se clasifican en: de tubería cerrada, semicerrados y abiertos. En esta parte se discutirán algunas técnicas para la medición de flujo de un fluido en el caso de los sistemas de tubería cerrada, debido a su importancia en los procesos industriales, laboratorio y plantas piloto.

Entre los métodos de medición de flujo para sistemas de tubería cerrada se encuentran:

### **Presión diferencial**

Elemento primario

**Placa de Orificio**

Tubo Venturi

Tubo de Pitot

**Área variable**

Elemento secundario

Tubo de Bourdon

Diafragma

Fuelle

**Desplazamiento positivo**

**Velocidad**

**Turbina**

**Vortex**

**Electromagnético**

Ultrasónico

Laser

Másico:

Coriolis

Térmico

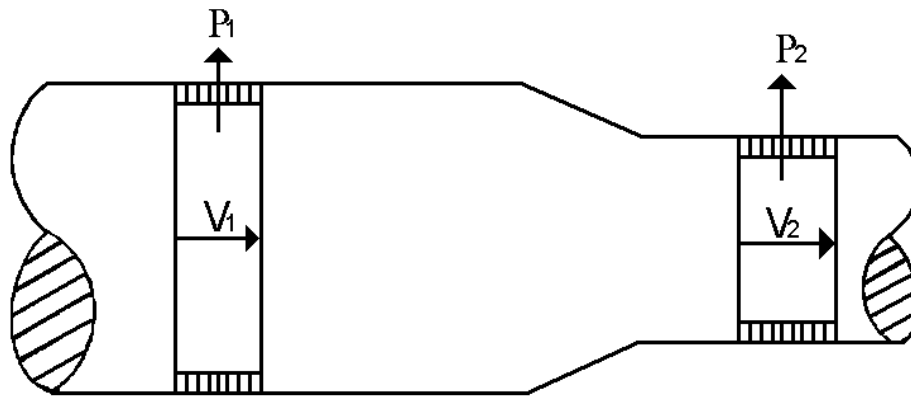
De ellos se estudiarán, los de **presión diferencial**: orificio, área variable; **desplazamiento positivo**; **velocidad**: turbina, vortex, electromagnético, debido a que estas técnicas son las de mayor aplicabilidad en la industria.

#### **4.6.1. Medidores de flujo de presión diferencial**

Los medidores de flujo de presión diferencial son las unidades más comunes en uso hoy en día. Hay estimados en un 66 % de todas las aplicaciones de mediciones de flujo, usan este tipo de medidor.

El principio de operación básico del medidor de flujo de presión diferencial se basa en la premisa de que la disminución de presión en el medidor es proporcional al cuadrado de

la velocidad de flujo. Estos medidores, como en la mayoría de los medidores de flujo, tienen un elemento primario y otro secundario. El elemento primario como la placa de orificio causa un cambio en la energía cinética, la cual crea la presión diferencial en la tubería. El elemento secundario como el tubo de Bourdon registra la presión diferencial y provee la señal necesaria para realizar la medición o lectura.



**Figura 4.8. Puntos para medición de flujo.**

La representación matemática para la medición de flujo por el método de presión diferencial, es obtenida por aplicación simultánea de las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli en dos puntos diferentes como se muestra en la Figura 4.8.

La ecuación de continuidad con densidad constante viene expresada por:

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (4.4)$$

El caudal para un fluido incompresible ideal está definida por:

$$Q = \left( A_2 / \sqrt{1 - (A_2/A_1)^2} \right) \sqrt{2g \left( (P_1/\gamma) + z_1 - (P_2/\gamma) - z_2 \right)} \quad (4.5)$$

Para propósitos de estudio se considera que la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad de flujo,  $C \cdot v_1^2$ , por lo que la disminución de presión cuando el fluido entra a la parte más angosta de la tubería, es proporcional a la energía cinética. Así,



$$P_1 - P_2 = K \cdot C \cdot v_I^2 \quad (4.6)$$

donde  $K$  es una constante de proporcionalidad y  $C$  es una constante que depende de la relación entre las áreas transversales de la tubería aguas arriba y la parte más angosta. Como consecuencia, no es práctico reducir el diámetro de la tubería más que una pequeña diferencia para medir flujo debido a que la energía perdida por fricción aumenta en proporción con el cuadrado de la velocidad.

Para flujo de fluidos reales, la velocidad será menor que el flujo de fluidos incompresibles ideales debido a los efectos de fricción. En este caso la velocidad de flujo se obtiene utilizando las mismas ecuaciones que para fluido incompresible ideal multiplicado por un coeficiente  $C_v$  determinado experimentalmente.

#### **4.6.1.1. Elemento primario**

El elemento primario en los medidores de flujo de presión diferencial causa un cambio en la energía cinética, el cual genera la presión diferencial localizada en una sección de la tubería.

El elemento debe ser adecuadamente adaptado al tamaño de la tubería y a las condiciones y propiedades del fluido.

Además, la exactitud de la medida hecha por el elemento debe ser buena en un rango razonable. Estos elementos primarios incluyen placas de orificios, tubos de venturi, tubos de pitot y dispositivos de medición basados en área variable.

##### **4.6.1.1.1. Placa Orificio**

La placa orificio (PO) consiste en un plato delgado perforado, el cual se instala en la tubería, Figura 4.9. El orificio puede ser concéntrico, excéntrico ó segmental. La placa

orificio es el elemento de medición de flujo más empleado frecuentemente, debido a su simplicidad, bajo costo y a la gran cantidad de datos disponibles para la investigación que predicen su comportamiento.

El caudal de flujo viene expresado por:

$$Q = \left( (C_v C_c A) / \sqrt{1 - (C_c^2 (A/A_1)^2)} \right) \sqrt{2g \left( (P_1/\gamma) + z_1 - (P_2/\gamma) - z_2 \right)} \quad (4.7)$$

donde:

$C_c$  = Coeficiente de Contracción.

$C_v$  = Coeficiente determinado experimentalmente.

Esta ecuación usualmente es escrita como:

$$Q = \frac{\pi k_o \beta^2 D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g \Delta p}{\gamma}} \quad (4.8)$$

donde  $\beta = d/D$  y se recomienda  $0.4 < \beta < 0.7$

$k_o$  : Coeficiente de flujo

$$k_o = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (4.9)$$

$C$  : Coeficiente de descarga para la placa de orificio (se aproxima por lo general a 0.98).

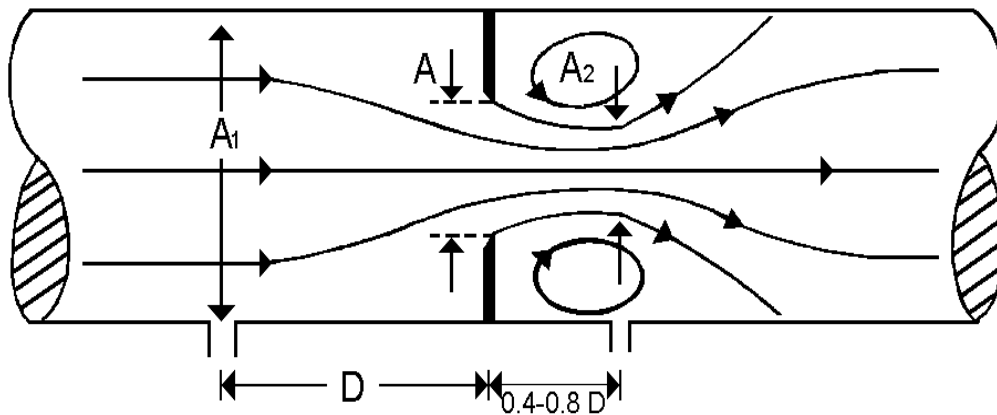


Figura 4.9. Medidor de flujo de placa orificio (PO).

#### 4.6.1.1.1. Características

- Relación de rango: 4 : 1
- Escala: raíz cuadrada
- Pérdida de presión: alta
- Presión máxima: 1 500 psi
- Temperatura máxima: 500 °C
- Repetibilidad:  $\pm 0,25$  %
- Exactitud típica:  $\pm 1$  % fe
- Tubería requerida aguas arriba/aguas abajo: (15 a 60) D/5 D
- Efecto de la viscosidad: alto
- Costo relativo: bajo
- No requiere calibración

#### 4.6.1.1.2. Ventajas

- Bajo costo.
- Fácil instalación y/o reemplazo.

- Cambios de capacidad cambiando el tamaño del plato.
- Disponible en un amplio rango de tamaños y modelos.
- Apropiado para la mayoría de gases y líquidos.
- Se aplica en un amplio rango de temperaturas y presiones.
- No tiene componentes móviles.
- Precio virtualmente independiente del tamaño de la tubería.
- Ampliamente establecido y aceptado.
- Simple.

#### **4.6.1.1.1.3. Desventajas**

- Relación cuadrática de presión/flujo.
- Limitado rango de flujo.
- Baja exactitud.
- Pérdida de exactitud con la corrosión y densidad.
- Pérdida de presión alta y constante.
- La viscosidad afecta el rango del flujo.
- Requiere mantenimiento.
- Baja relación de rango.
- No se usa en sistemas con “slurry” o con baja presión.

#### **4.6.1.1.1.4. Aplicaciones**

- Líquidos, gases y vapores.

#### 4.6.1.1.2. Área Variable

Los medidores de flujo de área variable (AV) son mayormente constituidos por la familia de rotámetros y consisten básicamente de un tubo de forma recta o cónica y un flotador con diversas formas, con densidad superior a la del fluido, como se muestra en la Figura 4.10. Su operación se basa en el principio de área variable, donde el flujo del fluido hace subir al flotador dentro del tubo, aumentando el área para el paso del fluido. A mayor flujo, el flotador alcanza mayor altitud. La posición del flotador varía directamente con la velocidad de flujo. Este dispositivo permite caídas de flujo relativamente constantes.

El caudal para los rotámetros convencionales viene expresado por :

$$Q = C_c \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot V_f}{A_f} \cdot \left[ \frac{\lambda_f}{\lambda} - 1 \right]} \quad (4.10)$$

y la velocidad de flujo :

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot V_f \cdot (\rho_f - \rho_{liq})}{C_d \cdot \rho_{liq} \cdot A_f}} \quad (4.11)$$

donde:

$Q$  = Volumen de la velocidad de flujo

$A_f$  = Área del flotador

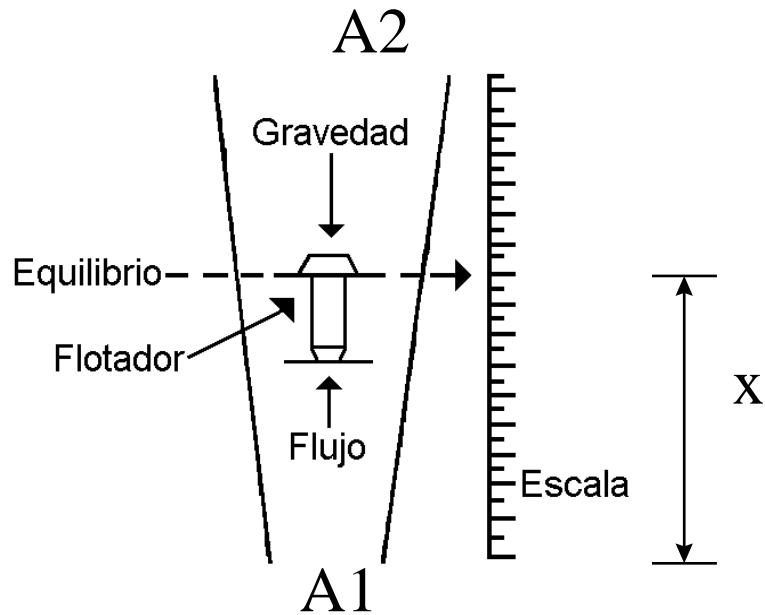
$A_2$  = Área anular entre el flotador y el tubo

$C_c$  = Coeficiente de contracción

$C_d$  = Coeficiente de arrastre, (depende de la viscosidad)

$V_f$  = Volumen del flotante,

$\gamma$  = peso específico.



**Figura 4.10. Medidor de flujo de área variable (AV).**

Existe una gran variedad de formas y tamaños para flotadores de rotámetros que son intercambiables, permitiendo un amplio rango de velocidades de flujo que pueden ser medidos usando el mismo tubo. Los tubos son hechos de vidrio o plástico para permitir la observación directa de la posición del flotador, que indica el caudal mediante un sistema graduado. Cuando se requiere mayor exactitud se usan rotámetros donde la posición del flotador se detecta en forma magnética.

#### **4.6.1.1.2.1. Características**

- Relación de rango: 10:1
- Escala: lineal
- Pérdida de presión: baja
- Exactitud:  $\pm 1\%$  fe
- Repetibilidad:  $\pm 0,25$  fe
- Máxima temperatura de operación: 200 °C para vidrio y 400 °C para metal

- Máxima presión: (150 psi a 4 MPa) para vidrio y (1 000 psi a 40 MPa) para metal
- Dimensiones: (4,75 a 15,25) in de longitud; (1,375 a 2,25) in de diámetro
- Tubería requerida aguas arriba/aguas abajo: 0 D/0 D
- Efecto de la viscosidad: medio
- Costo relativo: bajo
- No requiere calibración

#### **4.6.1.1.2.2. Ventajas**

- Bajo costo.
- Simplicidad.
- Conveniente para muy pequeña velocidad de flujo.
- Pérdida de presión baja y constante.
- Indicación visual directa.
- No requiere fuente de poder.
- Mide líquidos y gases.
- Amplia relación de rango.
- No tiene limitaciones de aguas arriba o aguas abajo.
- Para fluidos con densidad y viscosidad variable (compensación dada con el diseño del flotador).

#### **4.6.1.1.2.3. Desventajas**

- No es recomendable para presiones y temperaturas altas.
- Debe ser montado verticalmente.
- El elemento es de un tamaño relativamente espacioso.
- Aplicación en fluidos limpios solamente.

- El costo aumenta considerablemente con los accesorios.
- Sedimentos sobre el tubo de vidrio producen dificultad en la lectura.

#### **4.6.1.1.2.4. Aplicaciones**

- Líquidos limpios y viscosos.

#### **4.6.1.2. Elemento Secundario**

El elemento secundario mide la diferencia de presión y provee la señal de salida. Los indicadores de Bourdon, diafragma y fuelle son elementos secundarios y fueron estudiados anteriormente.

#### **4.6.2. Medidores de Flujo de Desplazamiento Positivo**

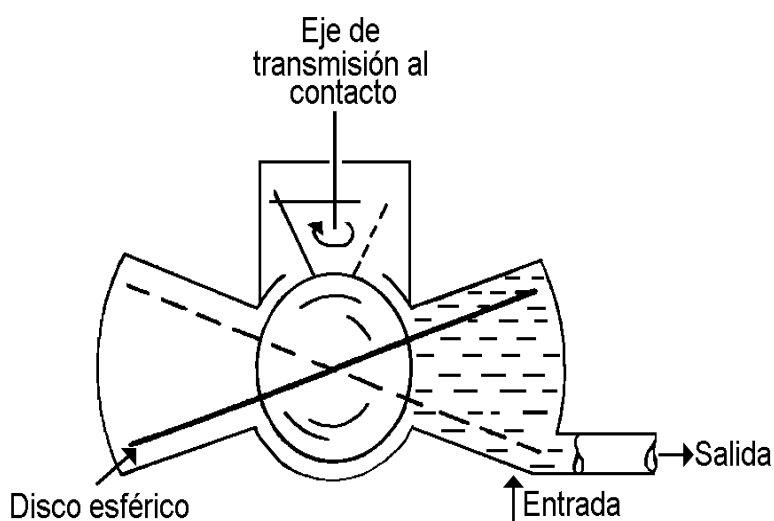
Los medidores de este tipo, toman el caudal del fluido, contando o integrando volúmenes separados del mismo. Son dispositivos que separan la corriente de flujo en segmentos volumétricos individuales. Un volumen conocido del fluido se aísla mecánicamente en el elemento del medidor, y es pasado desde la entrada de este hasta su salida, llenando y vaciando alternadamente los compartimientos o cámara del medidor. Las partes mecánicas del medidor se mueven aprovechando la energía del fluido. El volumen total del fluido que pasa a través del medidor en un periodo de tiempo dado, es el producto del volumen de la muestra por el número de muestras.

Los medidores de flujo de desplazamiento positivo (DP) se usan cuando se necesita una alta exactitud en condiciones de flujo estable. Existen cuatro tipos básicos de medidores de desplazamiento positivo: disco oscilante, pistón oscilante, pistón alternativo y rotativo.



#### 4.6.2.1. Tipos

**4.6.2.1.1. Medidor de disco Oscilante:** El sistema de disco oscilante dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado con una ranura en la que se encuentra intercalada una placa fija. Esa placa, separa la entrada y la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. El movimiento del disco será similar al de una moneda a punto de cesar su giro en el piso o en una mesa. De esta forma, en cada vuelta, se desplaza un volumen conocido del líquido en cuestión. El movimiento del eje es transmitido a un magneto el cual se usa para mover una magneto externa al medidor. Esta rotación puede utilizarse para conducir el mecanismo de un registrador o un transmisor. La operación de este medidor se muestra en la Figura 4.11.



**Figura 4.11. Medidor de Disco Oscilante.**

Como este medidor atrapa o encierra una cantidad fija del flujo cada vez que el eje rota, entonces el caudal es proporcional a la velocidad de rotación del mismo. Este tipo de medidor encuentra su mayor aplicación en agua y en servicios donde la precisión no es de mayor importancia.

**4.6.2.1.2. Medidor de Pistón Oscilante:** Consiste en una cámara cilíndrica con una salida y una placa divisoria que separa esta salida en dos. El funcionamiento de las diferentes fases del ciclo se describe mediante la Figura 4.12.

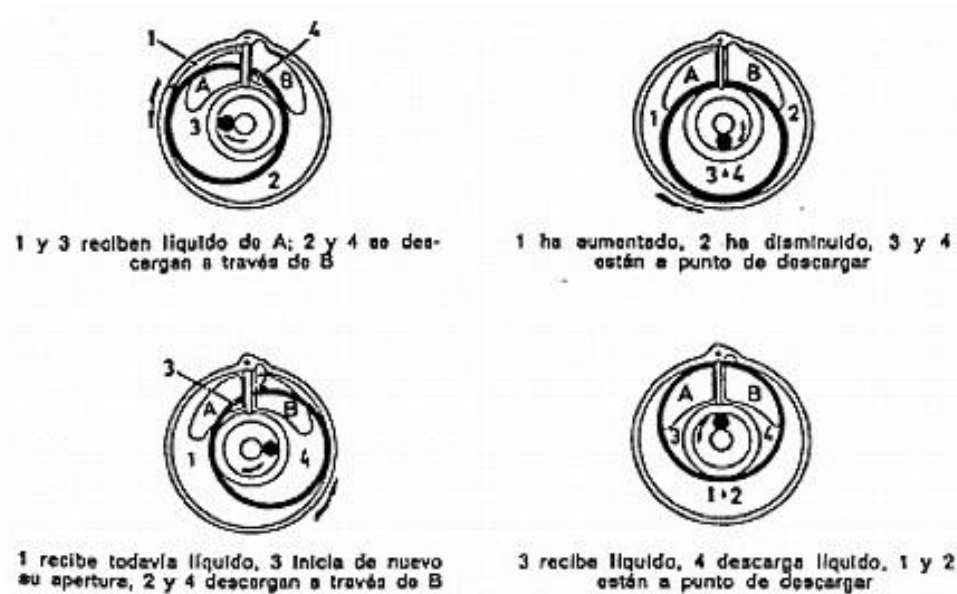


Figura 4.12. Ciclo de un Medidor de Pistón Oscilante.

**4.6.2.1.3. Medidor de Pistón Alternativo:** Es uno de los primeros elementos de medición de caudal por desplazamiento positivo. Es generalmente aplicado a fluidos que operan en fase líquida. El pistón se mueve alternativamente y permite el paso de fluido desde un extremo a otro, como se muestra en la figura 4.13.

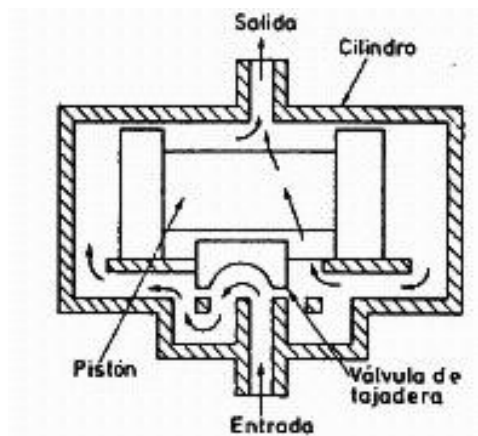
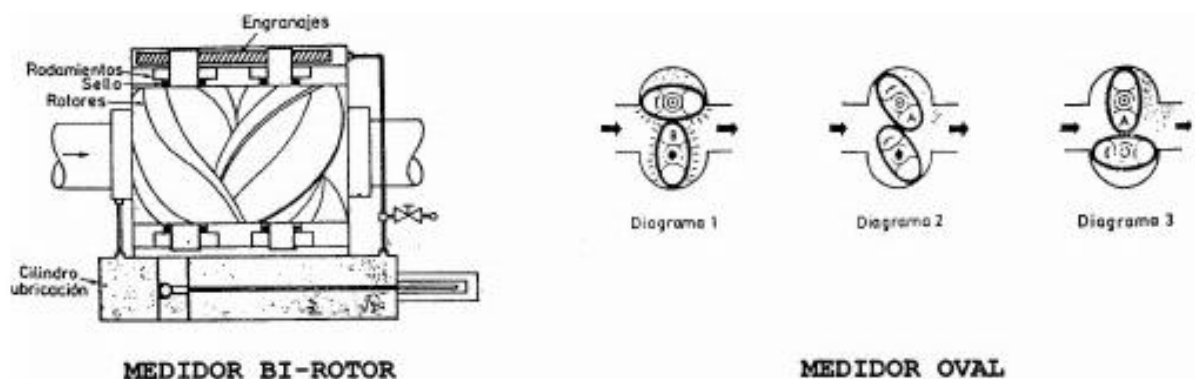


Figura 4.13. Medidor de Pistón Alternativo.

**4.6.2.1.4. Medidor Rotativo:** Son de muchos tipos, y son los más usados en la actualidad, dentro de la categoría de desplazamiento positivo. Su funcionamiento es muy sencillo y su mantenimiento bajo. Pueden manejar fluidos pesados algo viscosos en una gran gama de caudales.

Lo constituyen los medidores que poseen una serie de cámaras, que transportan el líquido en forma incremental desde la entrada hasta la salida. En la Figura 4.14 se describen gráficamente los principales sistemas de este tipo, entre los principales medidores de este tipo se encuentran: Medidores de Lóbulos, birrotores y de paletas.



**Figura 4.14. Medidores Rotativos.**

#### **4.6.2.2. Características**

- Relación de rango: 20 : 1
- Escala: lineal
- Pérdida de presión: media
- Exactitud:  $\pm 0,5 \%$
- Repetibilidad:  $\pm 0,05 \%$
- Presión máxima: 1 500 psi
- Temperatura máxima: 250 °C

- Tubería requerida aguas arriba/aguas abajo: OD/OD
- Costo relativo: alto
- Requiere calibración

#### **4.6.2.3. Ventajas**

- Respuesta rápida.
- Buena exactitud y relación de rango.
- Muy buena repetibilidad.
- Usado para fluidos con alta viscosidad.
- Medidor local con opción de pulsos de salida.
- Lectura directamente en unidades de volumen.
- No necesita fuente de alimentación.
- Exactitud no afectada por incremento de viscosidad y condiciones de tubería aguas arriba.

#### **4.6.2.4. Desventajas**

- Pérdida de presión alta.
- Partes móviles sujetas a corrosión.
- Requiere mantenimiento regularmente.
- Costoso, especialmente en diámetros grandes.
- No aplicable para fluidos con sólidos en suspensión o abrasivos.

#### **4.6.2.5. Aplicaciones**

- Líquidos limpios y viscosos, y gases.

### 4.6.3. Medidores de flujo basados en el principio de Velocidad

Operan linealmente con respecto a la velocidad del volumen de flujo. Su relación de rango es mayor porque no tienen relación cuadrática. Estos medidores de flujos comprenden, entre otros, turbina, vortex y magnético.

#### 4.6.3.1. Turbina

El medidor de turbina (MT) emplea un elemento rotativo el cual gira en proporción a la velocidad del fluido que pasa a través del mismo. Un detector magnético es usado para captar la velocidad del rotor. La señal de salida es un tren de pulsos continuos en onda senoidal, en el que cada pulso representa un volumen discreto del flujo medio, lo que permite medir flujo laminar y turbulento. La señal de salida y la velocidad de flujo son proporcionales en un factor K definido por:

$$K = 60(f/Q) \quad (4.12)$$

donde:

$f$  = Pulsos por segundo.

$Q$  = Flujo en galones por minuto.

$K$  = Pulsos por galón.

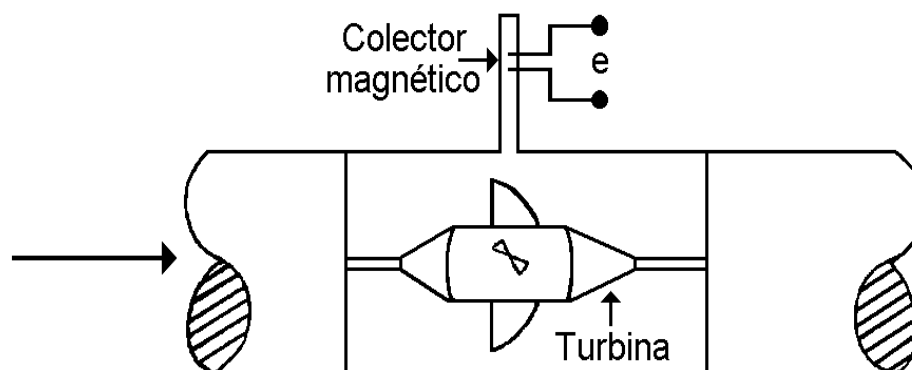


Figura 4.15. Medidor de flujo de turbina (MT).

#### **4.6.3.1.1. Características**

- Relación de rango: 30 : 1
- Escala: lineal
- Pérdida de presión: baja
- Exactitud:  $\pm 0,25$  % de la velocidad del flujo del líquido.
- Tubería requerida aguas arriba/aguas abajo: 10D/5D
- Efecto de la viscosidad: alto.
- Costo relativo: alto.
- Linealidad:  $\pm 0,05$  % de la velocidad de flujo.
- Repetibilidad:  $\pm 0,02$  % de la velocidad de flujo.
- Presión máxima: 1 500 psi
- Temperatura máxima: 400 °C
- Rango de voltaje de salida: (10 a 100) mV
- Respuesta de frecuencia: (100 a 2 000) Hz
- Rango de flujo: (0,1 a 30 000) gpm para líquidos  
(0,1 a 15 000) ft<sup>3</sup>/min para aire
- Las paletas de la turbina son hechas de un material ferroeléctrico
- Requiere calibración

#### **4.6.3.1.2. Ventajas**

- Alta exactitud.
- Muy buena repetibilidad.
- Rango de flujo 30 : 1.

- Más económico que desplazamiento positivo.
- Salida digital lineal.
- Respuesta rápida.
- Fácil instalación.
- Baja pérdida de presión.
- Muy poca energía absorbida por el elemento de medición.
- Capacidad para mediciones a presión alta y flujo alto en un amplio rango de temperatura.

#### **4.6.3.1.3. Desventajas**

- No aplicable a fluidos con altas viscosidades.
- Requiere calibración.
- Relativamente costoso.
- Puede sufrir daño por operación fuera de rango.
- Partes móviles sujetas a corrosión.
- Es afectado por las condiciones del fluido aguas arriba.
- Con fluidos sucios requiere filtros adecuados.

#### **4.6.3.1.4. Aplicaciones**

- Líquidos limpios y viscosos, y gases.

#### **4.6.3.2. Vortex**

Cuando la corriente de un fluido fluye alrededor de un cuerpo (vortex shedder), produce vórtices aguas abajo debido a los efectos relacionados con la viscosidad. Los vórtices

se esparcen de un lado y del otro del cuerpo en forma regular como se muestra en la Figura 4.16.

La frecuencia del vórtice y la velocidad de flujo están relacionadas por:

$$f = S_t(v/d) \quad (4.13)$$

donde:

$f$  = Frecuencia a medir del cuerpo esparcidor.

$v$  = Velocidad del flujo.

$d$  = ancho del Shedder (espaciador).

$S_t$  = Número de Strouhal el cual es función del número de Reynolds.

Si para un cuerpo esparcidor (vortex shedding) dado, el valor  $S_t$  es conocido, el flujo puede ser medido en función de la frecuencia del cuerpo esparcidor.

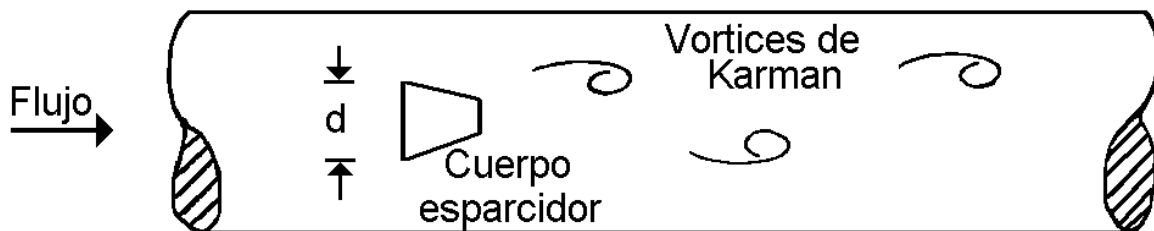


Figura 4.16. Medidor Vortex (MV).

#### 4.6.3.2.1. Características

- Relación de rango: 20 : 1
- Escala: lineal
- Pérdida de presión: baja
- Exactitud:  $\pm 1$  % de la velocidad de flujo
- Repetibilidad:  $\pm 0,2$  % de lectura



- Tubería requerida aguas arriba/aguas abajo:  $(10 \text{ a } 30)D/5D$
- Efecto de la viscosidad: medio
- Costo relativo: medio
- Temperatura máxima:  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Presión máxima: 1 000 psi
- Frecuencia del vórtice a velocidad de flujo máximo: (200 a 500) Hz
- Respuesta de frecuencia a cambios de la velocidad de flujo: aproximadamente 1 Hz
- No requiere calibración

#### **4.6.3.2.2. Ventajas**

- Bajo costo de instalación.
- Buena exactitud.
- Buena linealidad en el rango utilizable.
- Buena repetibilidad con el tiempo.
- Amplia relación de rango.
- Salida lineal con la velocidad de flujo.
- Mínimo mantenimiento.
- No requiere calibración.
- Para gas y líquido es posible usar un mismo modelo.
- Intercambiable (partes).
- Poca pérdida de presión.
- Compacto y de peso liviano.
- Sensor y fluido no están en contacto.

- Construcción sencilla con partes no móviles.
- La salida no es afectada por la temperatura, presión, densidad o viscosidad del fluido.

#### **4.6.3.2.3. Desventajas**

- Requiere de por lo menos 10D aguas arriba.
- Apreciable pérdida de presión.
- No apto para fluidos abrasivos o sucios.
- Limitada presión máxima y temperatura.
- Limitada selección de materiales de construcción.
- Intrusivo.
- Limitado rango.

#### **4.6.3.2.4. Aplicaciones**

- Líquidos, gases y vapor.

#### **4.6.3.3. Electromagnéticos**

La operación del medidor de flujo electromagnético (ME) está basada en la ley de Faraday. Un campo magnético pasa a través de una tubería no conductiva perpendicular a la dirección en la cual un líquido conductivo está fluyendo como se muestra en la Figura 4.17. La tensión inducida en los terminales de los electrodos es dada por:

$$E_s = K \cdot B \cdot D \cdot v \quad (4.14)$$

donde:

$K$  = Proporcionalidad

$B$  = Densidad del flujo magnético

$D$  = Diámetro interno de la tubería

$v$  = Velocidad del líquido

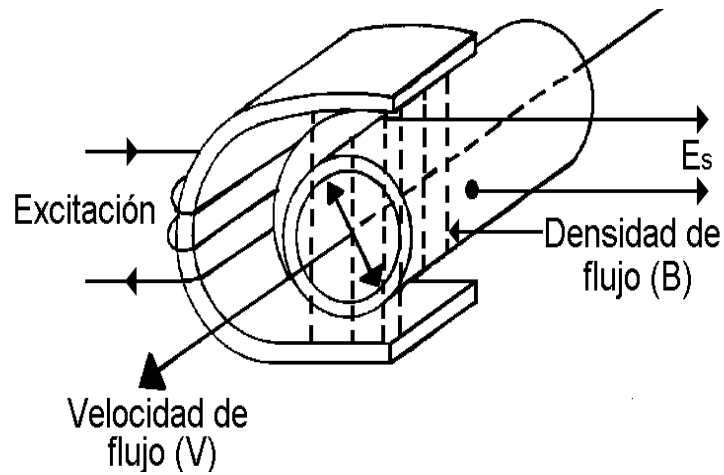


Figura 4.17. Medidor de flujo electromagnético (EM).

#### 4.6.3.3.1. Características

- Relación de rango: 40 : 1
- Escala: lineal
- Pérdida de presión: ninguna
- Exactitud:  $\pm 0,5$  % de la velocidad de flujo
- Repetibilidad:  $\pm 0,25$  %
- Tubería requerida aguas arriba/aguas abajo: 5D/0D
- Efectos de la viscosidad: ninguno
- Costo relativo: alto
- Rango de salida: (0,1 a 10) mV
- Conductividad del líquido:  $> \text{alrededor } 10^{-8} \Omega^{-1}/\text{cm}^3$
- Temperatura máxima: 200 °C
- Presión máxima: 1 000 psi
- Velocidad de flujo: (0,3 a 10) m/s

- Señal de salida: (4 a 20) mA con 600  $\Omega$
- No requiere calibración

#### **4.6.3.3.2. Ventajas**

- No es afectado por la densidad, viscosidad, presión y temperatura.
- Puede medir líquidos corrosivos, “slurries” o abrasivos.
- Puede medir en ambas direcciones con igual exactitud.
- Mide flujo dinámico.
- No restringido por el número de Reynolds.
- No es intrusivo.
- Variedad de tamaños y rangos de flujo.
- Buena exactitud y amplia relación de rango.

#### **4.6.3.3.3. Desventajas**

- Pueden ser sensibles al perfil de flujo asimétrico.
- Líquidos deben ser eléctricamente conductivos.
- No para gases.
- Costoso, especialmente en los de diámetros pequeños.
- Requiere fuente de alimentación.
- Requiere calibración.
- Burbujas de gas en el líquido causan errores.

#### **4.6.3.3.4. Aplicaciones**

- Líquidos claros, sucios, viscosos conductivos y “slurries”.

#### **4.7. SELECCIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO**

Cada uno de los medidores de flujo descritos anteriormente tienen ventajas y desventajas individuales, pero ninguno incorpora todas las características de los demás. Como consecuencia, todos estos medidores deben ser usados en aplicaciones donde mejor sean adaptados. Luego, la pregunta que se debe responder es: ¿Cuál medidor de flujo es el más indicado para una aplicación en particular?

La selección no es fácil debido a:

- El continuo incremento del número de dispositivos de medición disponibles en el mercado.
- Los diferentes requisitos de instalación.
- La falta de información en cuanto a comparación entre las características de los diferentes dispositivos de medición de flujo.

Para completar la selección del instrumento, se debe hacer uso de las normas recomendadas para el tipo de instrumento específico seleccionado.

## ***Anexo A***

# ***PLACA ORIFICIO***

### **A.1. INTRODUCCIÓN**

La placa orificio consiste en una placa delgada perfectamente taladrada y mecanizada, la cual se instala en la tubería utilizando bridas especiales. Generalmente se construye de Acero inoxidable o de Monel y Níquel, cuando se necesita prevenir la corrosión o contaminación.

El orificio, de borde agudo o afilado opera como si prácticamente no existiera fricción, por lo cual la resistencia debida a la viscosidad del fluido tiene muy poco efecto. Para asegurar resultados consistentes de medición, la cara corriente arriba de la placa con orificio debe ser plana y perpendicular al eje del tubo una vez que queda instalada. El borde corriente arriba del orificio debe ser a escuadra, en un corte limpio.

Cuando se van a emplear presiones de línea muy altas, se usa un anillo para sujetar el orificio con el objeto de soportar la placa de orificio. El anillo de soporte se monta entre las bridas y le proporciona una resistencia adicional a la placa de orificio y al sello.

Las placas de orificio casi siempre se montan en pares de bridas. Las bridas van atornilladas al tubo o soldadas en él, según el tamaño de éste y la presión de línea de sistema.

## A.2. DIMENSIONES DE LAS PLACAS DE ORIFICIO

Al fabricar una placa de orificio para una instalación real, se debe determinar el diámetro exterior correcto, la ubicación y el tamaño de los orificios de drenaje o venteo y la longitud de la lengüeta de identificación, Figura A.1.

Dimensiones:

A = Diámetro del círculo de perno de la brida menos diámetro de perno de la brida.

L = A1 menos 3 in (7,6 cm) para tamaños de tuberías hasta 3 in.

L = A1 menos 5 in (12,7 cm) para tamaños de tuberías mayores de 3,5 in (8,9 cm).

$$H = \frac{\text{Diámetro interno de la tubería (D)} - \text{Diámetro del orificio de drenaje (B)}}{2}$$

Se perfora un solo hueco de drenaje o venteo, arriba para el flujo de líquido (Drenar el líquido), abajo para el flujo de gas o vapor (Ventear el gas). Si el diámetro del orificio es menor o igual a 7/8 in (0,875 in = 2,2 cm), no se perfora el hueco B.

**Tabla A.1. Tamaño del diámetro B de acuerdo al diámetro de la tubería.**

Diámetro de la tubería (pulgadas)	Diámetro B (pulgadas)
1 1/2 a 4	1/16
5 y 6	3/32
8, 10 y 12	1/8
14 a 20	5/32

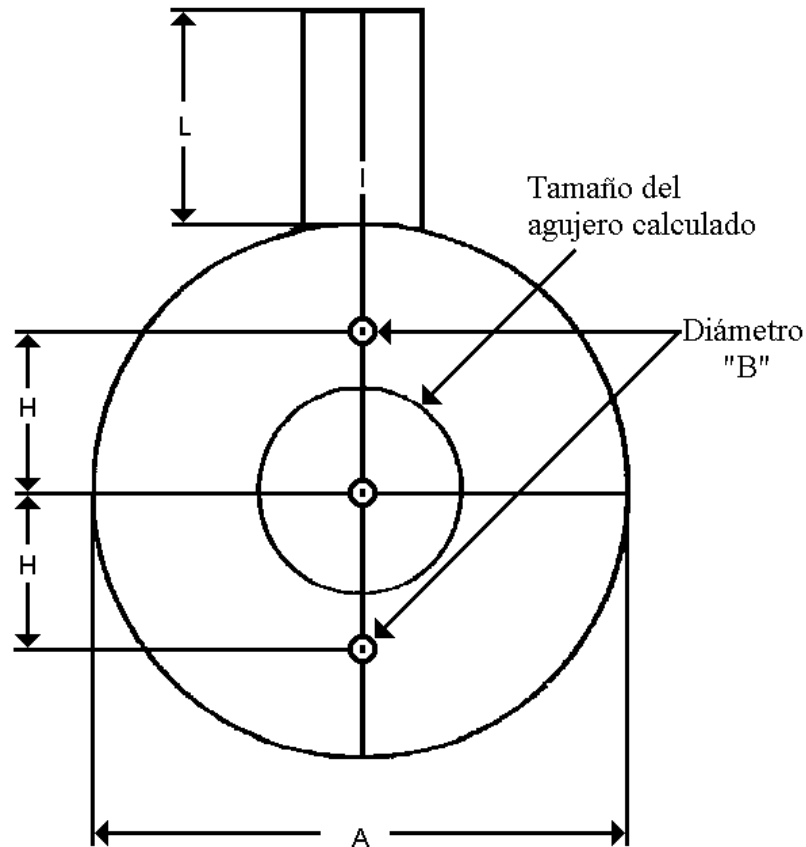


Figura A.1. Dimensiones de la placa de orificio.

### A.3. LA VENA CONTRACTA

El medidor de 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; el área del chorro está comprendida entre la correspondiente a la abertura del orificio y la de la vena contracta, Figura A.2.

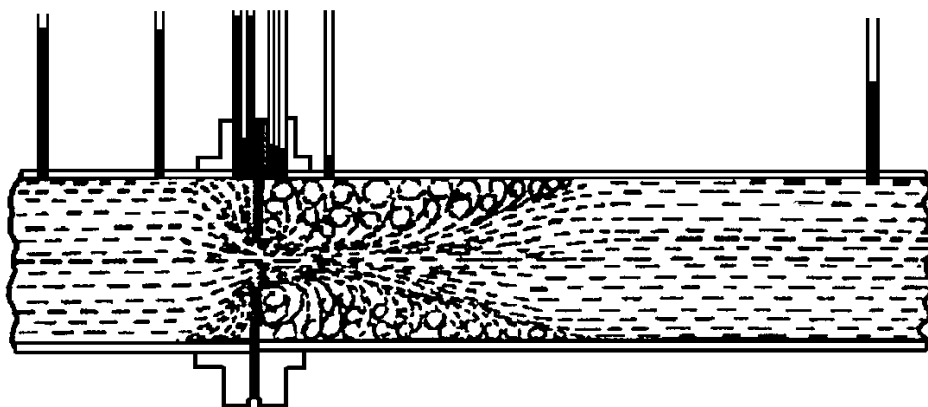
### A.4. RECUPERACIÓN DE PRESIÓN

A causa de las elevadas pérdidas por fricción, debido a los remolinos que se generan en la expansión del chorro, una vez sobrepasada la vena contracta, la recuperación de presión en un medidor de orificio es muy deficiente y se presenta una caída permanente de

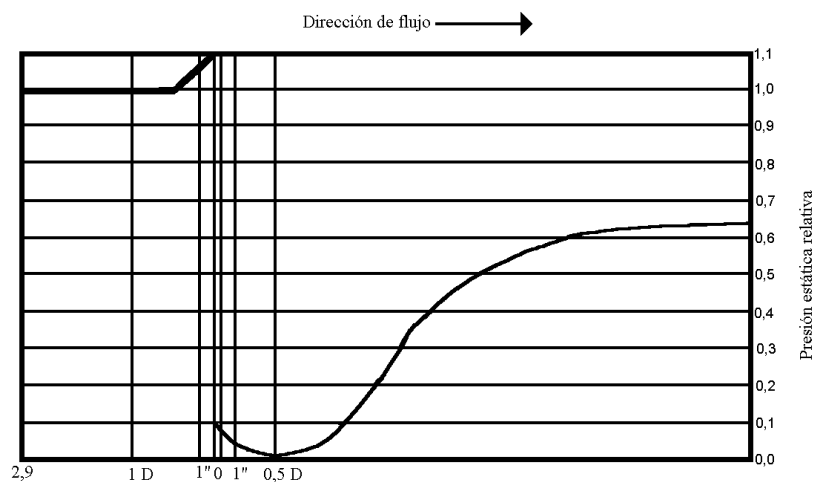


presión que es la tendencia entre la presión aguas arriba de la placa y la presión aguas abajo una vez que se haya restituido el flujo uniforme, Figuras A.2 y A.3.

La pérdida de presión permanente usualmente está en el rango del 10% de la caída de presión en los alrededores de la placa. Esta pérdida permanente es función de la relación Beta ( $\beta$ ) entre el diámetro del orificio y la tubería.

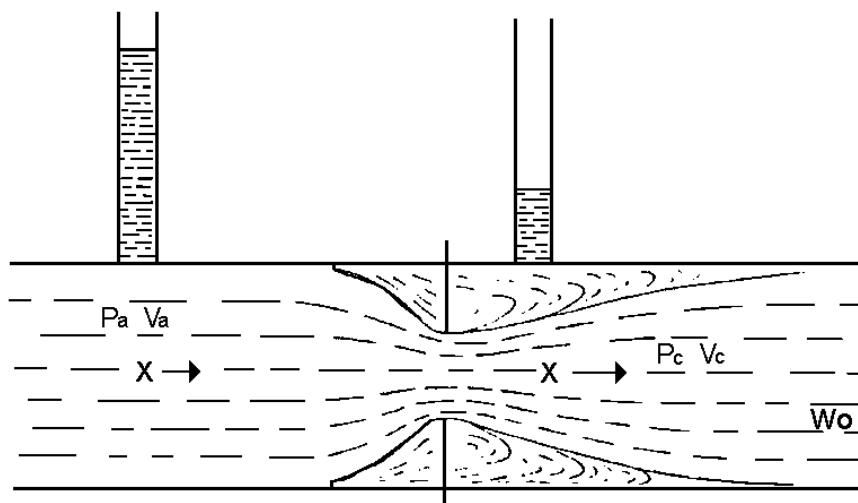


a) Vena contracta.

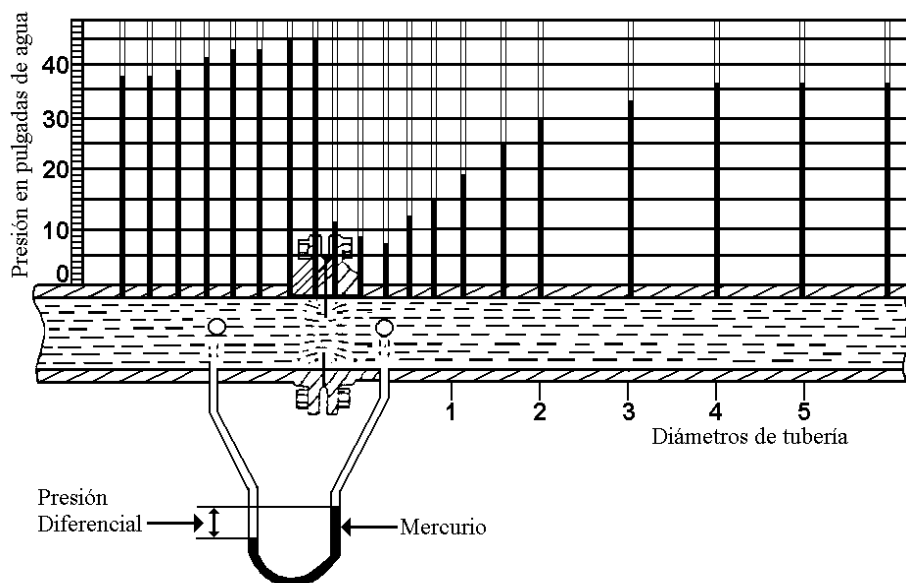


b) Distancia de las tomas de presión.

**Figura A.2. Representación gráfica del flujo a través de una placa de orificio.**



a) Teorema de Bernouilli.



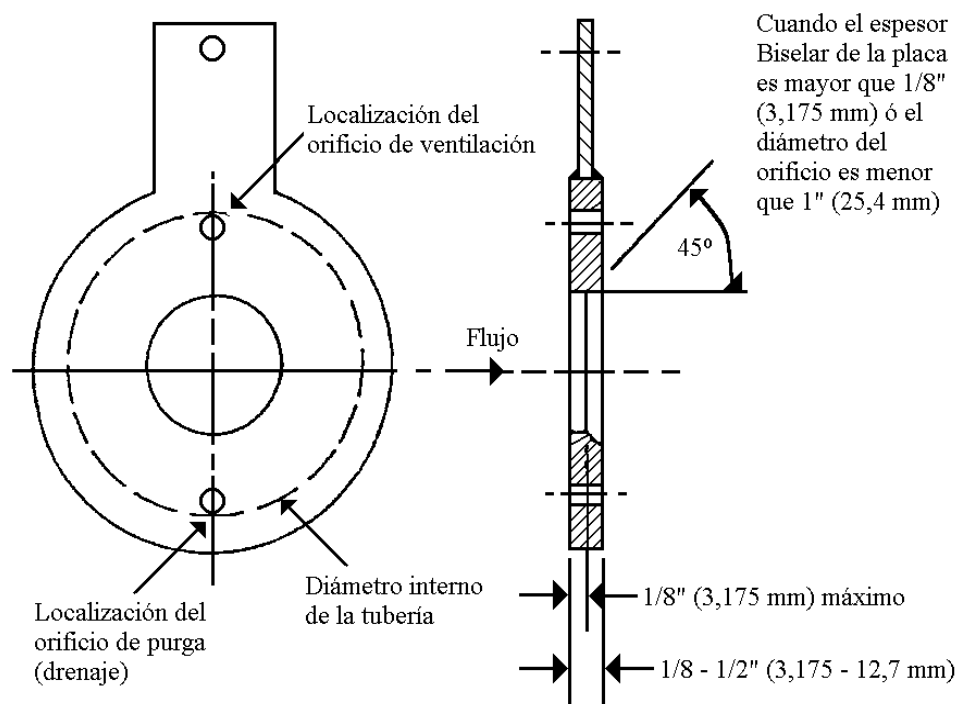
b) Presión diferencial creada por la placa de orificio.

**Figura A.3. Recuperación de presión.**

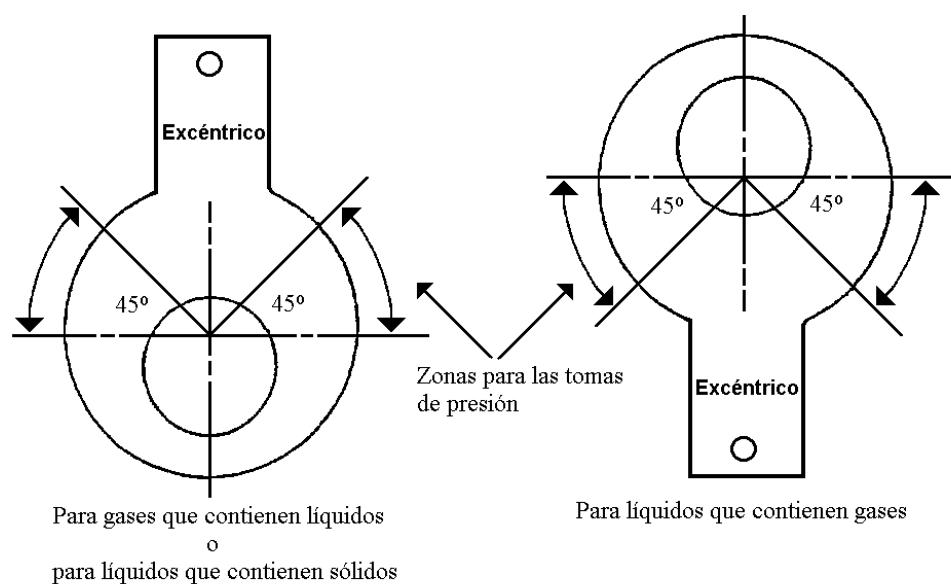
## A.5. TIPOS DE PLACAS DE ORIFICIO

El orificio de la placa puede ser concéntrico, excéntrico o segmentado, con un pequeño orificio de purga para los pequeños arrastres sólidos o gaseosos que pueda llevar el

fluido. Orificio de purga en la parte superior para gases disueltos en líquidos y en la parte inferior para líquidos en gases, Figuras A.4, A.5 y A.6.



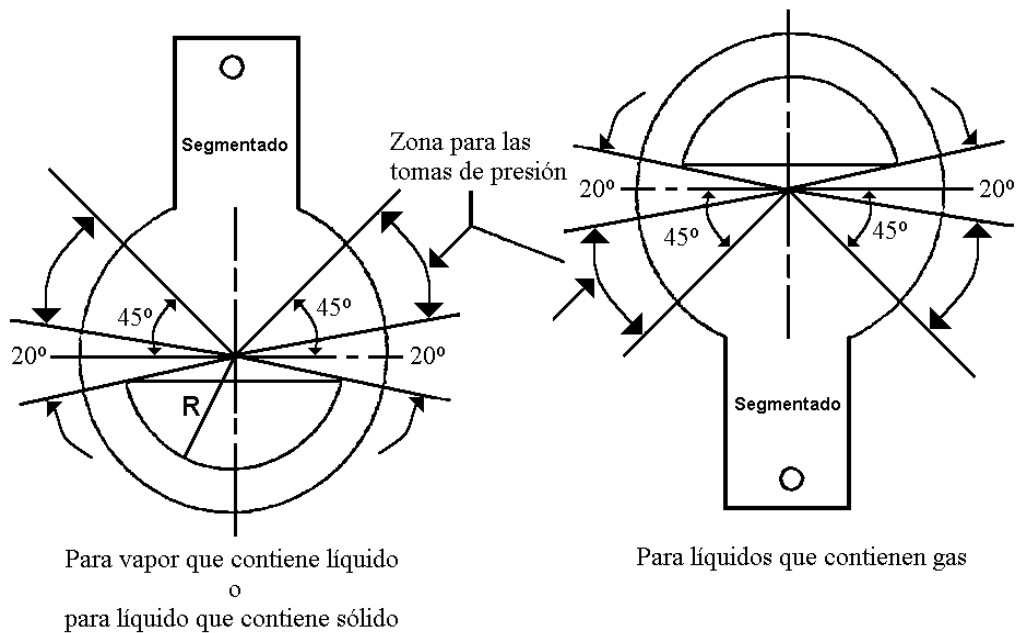
**Figura A.4. Placa con orificio concéntrico.**



**Figura A.5. Placa con orificio excéntrico.**

### Recomendación:

Las tomas de presión deben estar siempre localizadas en el área sólida del plato y el centro de línea (centerline) de la toma no sea menor que  $20^\circ$  del punto de intersección de la cuerda y el arco.



**Figura A.6. Placa con orificio segmental.**

Para la placa de orificio concéntrico puede predecirse bien su exactitud, debido a que la American Society of Mechanical Engineering (ASME) ha acumulado numerosos datos de su funcionamiento que cubren un amplio rango de velocidades de flujo, tamaños de tuberías, presiones diferenciales y otros factores relacionados con su uso.

El orificio concéntrico en placa delgada puede ser usado para cualquier fluido homogéneo limpio (líquido, vapor o gas), el cual esté en el rango turbulento normal. En general los líquidos no deben exceder viscosidades de 300 poise a  $15^\circ\text{C}$  y los gases y vapores no tienen limitaciones.

Los líquidos que contengan sólidos, no abrasivos, pueden ser medidos con placa de orificio segmentado o excéntrico. Los orificios segmentados y excéntricos también tienen la característica de que bajo algunas condiciones dadas, permiten que la toma de baja presión pueda situarse más separada de la placa de lo que sería posible con un orificio concéntrico. La tendencia que tiene esta clase de materia suspendida a acumularse en el lado corriente arriba de las placas de orificio concéntrico origina lecturas erráticas.

Las placas con orificios casi siempre se instalan de manera que el orificio esté dentro de un margen de  $0,025\text{ in}$  ( $635 \times 10^{-6}\text{ m}$ ), de la base de la tubería. Esto reduce a un mínimo el peligro de atascamiento. Los cálculos y los factores de flujo de los orificios concéntricos no se aplican a las placas excéntricas ni a las segmentadas.

## A.6. TOMAS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Las tomas de presión diferencial (taps) pueden ser ubicadas en diferentes sitios, Figura A.7.

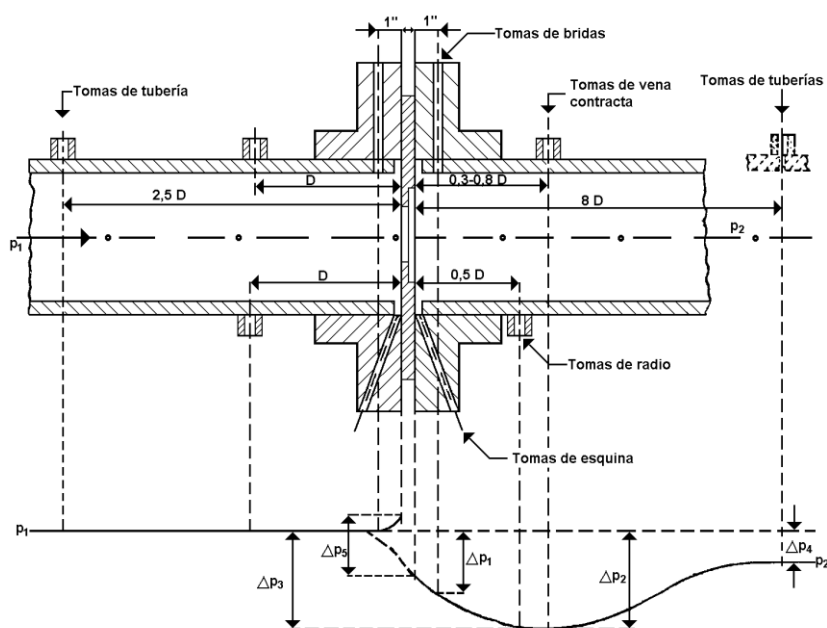


Figura A.7. Elección de las tomas de presión.

Hay cinco diferentes formas de instalar las derivaciones de presión cuando se usa la placa de orificio que son:

Tomas de bridas:  $\Delta p_1$ .

Tomas de vena contracta:  $\Delta p_2$ .

Tomas de radio:  $\Delta p_3$ .

Tomas de tubería:  $\Delta p_4$ .

Tomas de la esquina:  $\Delta p_5$ .

- **Tomas de Bridas (Flange Taps):** Las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1 in (2,5 cm) aguas abajo (baja presión) y a 1 in aguas arriba (alta presión). Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda, pero no se recomienda para diámetros de tubería menores de 2 in, debido a que la vena contracta puede estar a menos de 1 in de la placa de orificio.

- **Tomas de Vena Contracta (Vena Contracta Taps):** La toma posterior está situada en un punto donde la alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetro y se presenta aproximadamente a 0,5 diámetros de tubería aguas abajo. La toma aguas arriba se sitúa a 1 diámetro de tubería.

Este tipo de tomas se usa para tuberías mayores de 4 in, debido a que para diámetros menores existe interferencia entre la brida y la toma aguas abajo. La ubicación exacta se corregirá mediante tablas.

- **Tomas de Tubería (Pipe Taps):** Se ubican 2,5 diámetros de tubería aguas arriba y 8 diámetros de tubería aguas abajo. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de

medición de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas está en un lugar menos sensible a la medición.

- **Tomas de Radio (Radius Taps):** Son parecidas a las tomas de Vena Contracta, pero fijando siempre la toma anterior a 1 diámetro (aguas arriba) y la toma posterior a 0,5 diámetro (aguas abajo) de la tubería.

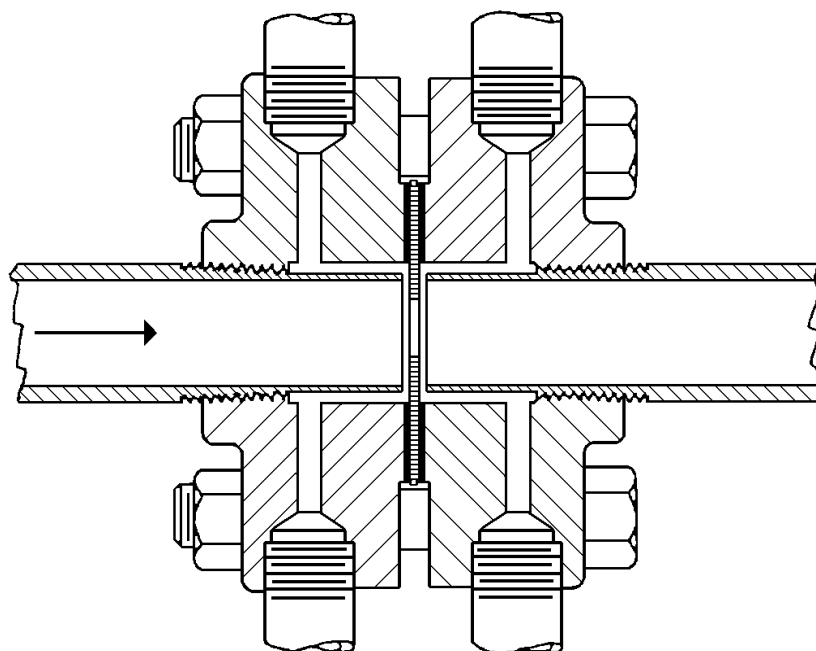
- **Tomas en la Cámara Anular (Tomas de la esquina) (Corner Taps):** Las tomas están situadas inmediatamente antes y después de la placa y requieren el empleo de una cámara anular especial, Figura A.8, son de amplio uso en Europa.

Las distancias en las tomas antes mencionadas son normas establecidas, pero si por necesidad (de espacio físico) no se pueden colocar las tomas en dichas posiciones, se pueden colocar arbitrariamente; tomando en cuenta que a mayor distancia la diferencia de presión medida será menor, lo cual se puede aplicar para la calibración.

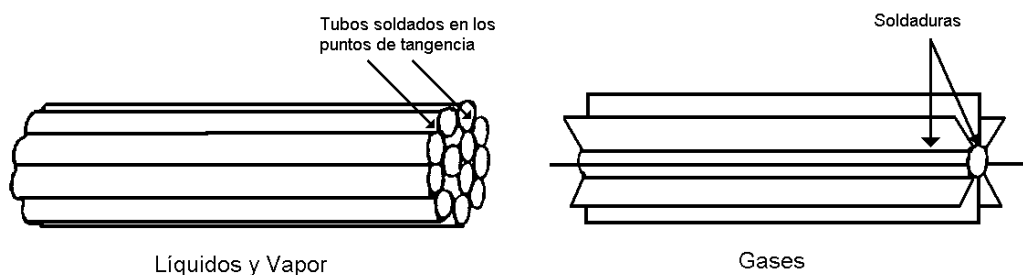
Es muy importante que antes y después del orificio exista suficiente longitud de tubería recta con el fin de que el tipo de flujo sea normal y no esté distorsionado por válvulas, accesorios u otros aparatos. Si no ocurre así, la distribución de velocidad es anormal y el coeficiente del orificio es afectado en una forma que no se puede predecir.

Cuando no se dispone de la longitud necesaria de tubería recta aguas arriba del orificio, se pueden instalar paletas de enderezamiento, con lo que la longitud mínima aguas arriba entre las paletas y el orificio se reduce a 6 diámetros de tubería. Otra forma más conveniente, consiste en introducir en la tubería un haz de pequeños tubos, que llenan completamente la sección transversal. El diámetro máximo de un tubo ha de ser de 0,25 veces el diámetro de la tubería y la longitud por lo menos, diez veces su diámetro. Las

paletas de enderezamiento destruyen las corrientes transversales y de esta forma ayudan a restablecer la distribución normal de velocidad, Figura A.9.



**Figura A.8. Instalación de las tomas en la cámara anular.**



**Figura A.9. Enderezadores.**

## **A.7. RECOMENDACIONES**

En el diseño y uso de las placas de orificio se deben seguir algunas recomendaciones para asegurar una medición lo más exacta posible:

- El borde aguas arriba del orificio debe ser afilado y recto.



- En aplicaciones convencionales se utilizan espesores de material de 1/16 in, para tamaños de tubería hasta 4 in, 1/8 in de espesor para tuberías hasta 16 in, y 1/4 in de espesor para diámetros de tubos superiores a 16 in.

- En general, el espesor de la placa en el borde del orificio no debe exceder:

1/30 del diámetro interno del tubo (D)

1/8 del diámetro del orificio (bore) (d)

Use el mínimo de estos requerimientos. Si el espesor real de la placa debe exceder este mínimo, el borde aguas abajo puede ser biselado a un ángulo de 45° ó menos con la cara de la placa. Cuando se hace esto, la placa debe ser instalada de manera que el borde recto, afilado esté aguas arriba y por consiguiente este tipo de placa no se puede usar para medir flujo inverso, Figura A.4.

- Como una regla general, independientemente del tipo de tomas de presión diferencial (taps) empleadas, es deseable para una mejor exactitud en una instalación normal, mantener la relación de orificio ( $\beta$ ) dentro de 0,20 a 0,50 para tuberías entre 1 1/2 a 2 in, y dentro de 0,20 a 0,60 en tuberías de 2 1/2 a 3 in.

Los coeficientes publicados para placas de orificio concéntricas tienen una tolerancia de  $\pm 0,5$  % para tomas a la vena contracta cuando la relación (d/D) está dentro de 0,20 a 0,70.

Para tomas de brida la tolerancia es de  $\pm 0,55$  % para relaciones de diámetros de 0,20 a 0,70 y para diámetros de tuberías mayores o iguales a 2 in.

- Cuando se mide flujos de vapor de agua y líquidos, las tomas se ubican a los lados de la tubería. Cuando se mide flujo de gas, las tomas se ubican en el tope de la tubería.

## A.8. CÁLCULO Y SELECCIÓN

Existen diversos métodos para la selección y diseño de placas de orificio, toberas y tubos de Venturi, sin embargo, en esta parte del texto se explicara el método más sencillo para el cálculo y selección de placa orificio.

Este se basa en la siguiente ecuación fundamental:

$$Q = Y \cdot M \cdot C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = k \sqrt{\Delta h} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \right) \quad (\text{A.2})$$

donde:

Q = Caudal volumétrico.

Y = Factor de super compresibilidad de los gases

= 1 si el fluido fuera líquido.

C = Factor de geometría.

= 0,62 para placa orificio

= 0,98 para Toberas.

= 1,00 para Tubos de Venturi.

A = Área de sección de la tubería.

g = Gravedad.

h = Diferencial de presión.

M = Representa a la siguiente función:

$$M = 1 / \sqrt{1 - \beta^4} \quad (\text{A.3})$$

para:

$$\beta = d/D \quad (\text{A.4})$$

donde:

$d$  = Diámetro de la restricción.

$D$  = Diámetro interno de la tubería.

Para el cálculo de  $Y$ , en el caso de que el fluido sea un gas, será necesario el uso de una tabla que contenga las constantes críticas, presión y temperatura, y el método que se presenta a continuación:

- 1) Con los valores de la presión y la temperatura absolutas, y las constantes críticas de presión y temperatura, se determinan los parámetros de **Presión y Temperatura Reducidas**.

Las relaciones a usar para este fin son:

$$P_r = P_a/P_c \quad (A.5)$$

$$T_r = T/T_c \quad (A.6)$$

donde:

$P_r$  = Presión reducida

$P_a$  = Presión absoluta

$P_c$  = Presión crítica

$T_r$  = Temperatura reducida

$T$  = Temperatura absoluta

$T_c$  = Temperatura crítica

- 2) Con estos valores ya calculados, se puede entrar a una curva de coeficientes de compresibilidad, donde para el eje de las  $X$ , se encuentra el valor de  $P_r$  calculado, luego se sube a la curva correspondiente de iso temperatura reducida,  $T_r$  y de allí, en el eje de las  $Y$ , se obtiene el valor de  $Z$ , el factor de compresibilidad de los gases.

3) Luego, para determinar el valor de Y, se utiliza la siguiente relación:

$$Y = 1/\sqrt{Z} \quad (A.7)$$

Existen dos variedades de problemas posibles de esta índole que pueden presentarse al ingeniero instrumentista, que son:

- a) El más sencillo, que consistirá en calcular el caudal para una placa, tobera o Venturi, existentes, conocidos: el diferencial de presión, la relación Beta y por supuesto, las características del fluido.
- b) El determinar la relación Beta y el Diferencial de presión más idóneo, para el caudal de un fluido de características conocidas. Como se tiene una sola ecuación y dos incógnitas, se tiene implícito un cálculo iterativo, para el cual las restricciones recomendadas son:

$$0,4 < \beta < 0,7$$

$$50 \text{ in H}_2\text{O} < \Delta h < 250 \text{ in H}_2\text{O}.$$

## A.9. EJEMPLOS

### Ejemplo 1:

En una tubería de DN = 4" y Schedule 40, se instala una placa de orificio con tomas en las bridas, y por ella circula un flujo de agua a 60 °F y se obtiene una medida de presión de 50" de H<sub>2</sub>O. Determinar el caudal que atraviesa la tubería.

$$\text{DN} = 4'' \quad \text{Dint} = 4.020''$$

$$T_{\text{agua}} = 60 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta P = 50'' \text{ de H}_2\text{O}$$

Para tomas en las bridas, y DN = 4" se recomienda  $0.20 < \beta < 0.70$ .

$$\beta = 0.45$$

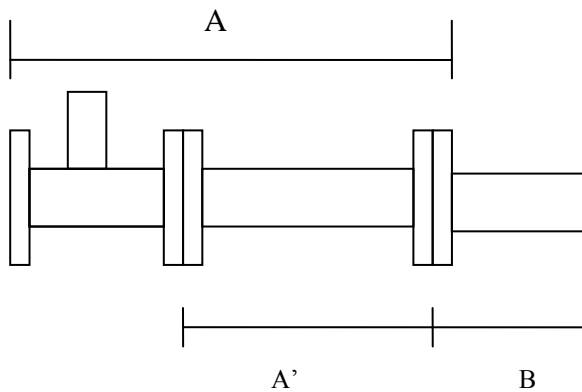
$$Q = \frac{\pi * \beta^2 * D}{4\sqrt{1 - \beta^4}} * \sqrt{\frac{2g * \Delta P}{\gamma}}$$

$$Q = \frac{\pi * 0.45^2 * 0.335 \text{ ft}}{4 * \sqrt{1 - 0.45^4}} * \sqrt{\frac{2 * 32.1739 * 260.083}{62.42}}$$

$$Q = 0.891 \text{ ft}^3/\text{s}$$

### Ejemplo 2 :

Calcular los tramos mínimos para la instalación de una placa de orificio en el siguiente caso.



$$\beta = d/D$$

$$D \text{ para DN} = 3'' \quad D = 3.067$$

$$\beta = 1.45'' / 3.067'' = 0.4727''$$

$$A = 6.5D = 6.5 * 3.067 = 19.936''$$

$$B = 3D = 3 * 3.067 = 9.201''$$