

Mediciones en Mecánica de Fluidos

En el laboratorio de ingeniería y en muchas situaciones industriales es importante medir las propiedades de fluidos y diversos parámetros de flujo, como presión, velocidad y descarga. Ejemplos serían el requerimiento de medición de la razón de flujo en una tubería o canal de irrigación, las presiones máximas en la superficie de un rascacielos o los patrones de flujo alrededor de él; el arrastre sobre un automóvil o camión que viaja a gran velocidad; el campo de velocidad alrededor de un avión comercial, los movimientos de fluidos en las industrias agrícolas, petrolera, del gas, química y de las bebidas, así como el suministro de agua y la disposición de aguas de desecho. etc. La incertidumbre en las mediciones de éstos flujos pueden tener un impacto significativo sobre las consideraciones de materiales y costos.

Se han diseñado muchos dispositivos para medir parámetros de flujo, cada uno con un propósito específico y es importante definir con claridad la necesidad de medir un parámetro en particular. El conocimiento de la mecánica de fluidos es indispensable para seleccionar el instrumento apropiado y para realizar con éxito la medición. El propósito de este tema es ofrecer al lector una introducción básica a los conceptos y técnicas que los ingenieros aplican al medir parámetros de flujo ya sea en el laboratorio o en un entorno industrial. Se presentan métodos e instrumentos empleados para medir velocidad y descarga.

Medición de parámetros de flujo local

Una medición de flujo local implica que una cantidad se mide en un volumen de muestra del fluido relativamente pequeño. Por lo regular, el volumen es lo bastante reducido como para poder decir que la medición representa la magnitud de la cantidad en un punto del campo de flujo. Dos cantidades de flujo local importantes son la presión y la velocidad, otras son temperatura, densidad y viscosidad.

Respuesta dinámica y promediación

Las mediciones de flujo se pueden clasificar según la naturaleza del flujo: estable o inestable. Si la magnitud de una cantidad física se mantiene constante en el tiempo, decimos que se trata del valor en estado estable. Por otro lado si la cantidad cambia con el tiempo, la medición es transitoria, o inestable y exigen aparatos de medición altamente especializados y requieren cierto tiempo para responder a la cantidad física detectada y con un tiempo menor que el tiempo que tarda en ocurrir un cambio significativo en la cantidad física.

La elección de un medidor de flujo se ve afectada por la exactitud requerida, el intervalo de medición, el costo, la complicación, la facilidad de lectura o reducción de datos, así como la vida de servicio.

Métodos directos

Es posible emplear tanques para determinar el flujo de líquidos estables midiendo el volumen o masa del líquido recolectado durante un intervalo de tiempo conocido. Si el tiempo es lo suficientemente largo para que pueda ser medido con exactitud, el flujo puede determinarse en forma precisa. Si la medición se hace con cuidado, el método directo tiene la ventaja de no requerir calibración.

Clasificación de los transductores y características

Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de fluido, la precisión deseada, el control requerido y el tipo de caudal volumétrico o másico. En el presente capítulo, se nombrarán y se explicarán algunos de ellos, dándole más importancia a los medidores volumétricos que a los de caudal masa, pues los primeros son los que se utilizan más frecuentemente. Entre los transductores más importantes figuran los siguientes:

Medidores volumétricos

Presión diferencial

- De obstrucción: Placa orificio,
- Tobera y Tubo Venturi.
- Tubo Pitot.

Área variable Rotámetro.

Velocidad

- Turbina.
- Sondas ultrasónicas.

Tensión inducida : Medidor magnético.

Desplazamiento positivo

- Disco giratorio.
- Pistón alternativo.

Medidores de caudal masa

Térmico

- Diferencia temperaturas en dos sondas de resistencia.

El principio de funcionamiento de los medidores volumétricos de presión diferencial es que, cuando hay una obstrucción en un ducto o tubo, aparece un diferencial de presión a través de la obstrucción. Esta caída de presión se puede correlacionar con la descarga mediante una calibración, y después se puede utilizar la curva presión-descarga para determinar la descarga leyendo la presión diferencial. En este tema se estudiará la descarga de fluidos incompresibles en tuberías circulares.

En general, en este tipo de medidores se considera que hay un flujo estable en un ducto circular que se topa con el orificio restrictor y sale como un chorro corriente abajo. En el caso del diafragma o placa orificio, las líneas de corriente convergen para formar un área de flujo mínimo, denominada vena contracta. Se colocan derivaciones de presión en dos posiciones: corriente arriba de la restricción en la región de flujo no perturbado (punto 1) y corriente abajo en algún punto cercano a la vena contracta (punto 2). Si suponemos un flujo ideal incompresible, la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad servirán para determinar la descarga ideal.

La descarga real difiere de la ideal por dos razones principales. Puesto que el flujo de fluido es real, la fricción hace que la velocidad en la línea central sea mayor que la velocidad media en cada sección transversal. En el caso de la placa orificio, debido a que se desconoce el área de la vena contracta, conviene usar el área de la obstrucción de diámetro d o D_o como se usa en algunas bibliografías. Estas anomalías se tienen en cuenta introduciendo un **coeficiente de descarga C** , que considera el efecto de la contracción y un coeficiente de velocidad. Se emplea un **coeficiente de flujo K** que considera el coeficiente de descarga y la relación de áreas o diámetros de la obstrucción y la tubería. Un análisis dimensional revelaría que C y K dependen del número de Reynolds. Sería conveniente evaluar el número de Reynolds ya sea en la región de aproximación o en la obstrucción.

Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido.

Hay que señalar que la medida de caudal en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran los caudalímetros de obstrucción.

Caudalímetros de obstrucción

Existen tres tipos de caudalímetros de obstrucción; el tubo Venturi, la tobera, y la placa orificio o diafragma. En cada caso, el medidor actúa como un obstáculo al paso del fluido provocando cambios en la velocidad. Consecuentemente, estos cambios de velocidad causan cambios en la presión. En los puntos donde la restricción es máxima, la velocidad del fluido es máxima y la presión es mínima.

Caudalímetros de obstrucción para fluidos incompresibles

Un fluido incompresible fluye a través de una tubería con una obstrucción como se muestra en la figura 1, la fórmula del caudal se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli en los puntos 1 y 2:

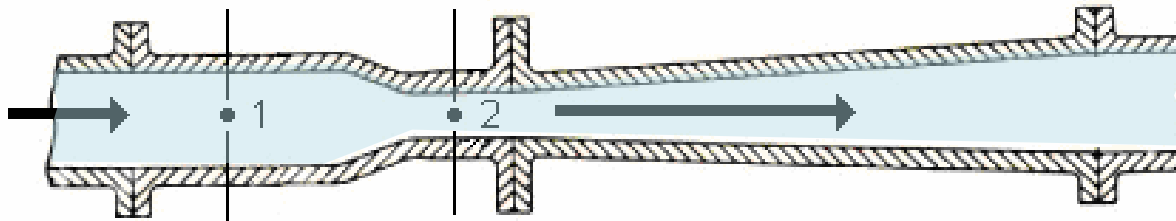


FIGURA 1. Fluido a través de una obstrucción en una tubería.

$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$, donde P_1 y P_2 son las presiones y V_1 V_2 velocidades en los puntos indicados en la figura

Además se puede plantear la ecuación de continuidad: $V_1 A_1 = V_2 A_2$, donde A_1 y A_2 son las secciones de la tubería en los puntos 1 y 2. Despejando V_1 : $V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2$, sustituyendo en la ecuación de Bernoulli y despejando V_2 :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}}$$

$Q_{ideal} = A_2 V_2$, sustituyendo V_2 :

$$Q_{ideal} = \frac{A_2 \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

La palabra ideal se refiere al hecho de que no se han considerado pérdidas debido a la rugosidad de la tubería y a la viscosidad del fluido. Para un caudalímetro A_1 y A_2 son valores definidos, de modo que conviene escribir:

$$M = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

Se define también el coeficiente de descarga $C = \frac{Q_{real}}{Q_{ideal}}$ para tener en cuenta las pérdidas a través del caudalímetro. De esta forma nos queda:

$$Q_{real} = C M A_2 \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Si entre los puntos de las derivaciones de presión 1 y 2 existe una diferencia de altura geodésica significativa Δz , la ecuación para la descarga real se puede escribir:

$$Q_{real} = CMA_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Donde: $h_1 = \frac{P_1}{\gamma} - z_1$ y $h_2 = \frac{P_2}{\gamma} - z_2$

El tubo Venturi

El tubo Venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido. Está compuesto por una tubería corta recta o garganta entre dos tramos cónicos, uno convergente y uno divergente o de descarga.

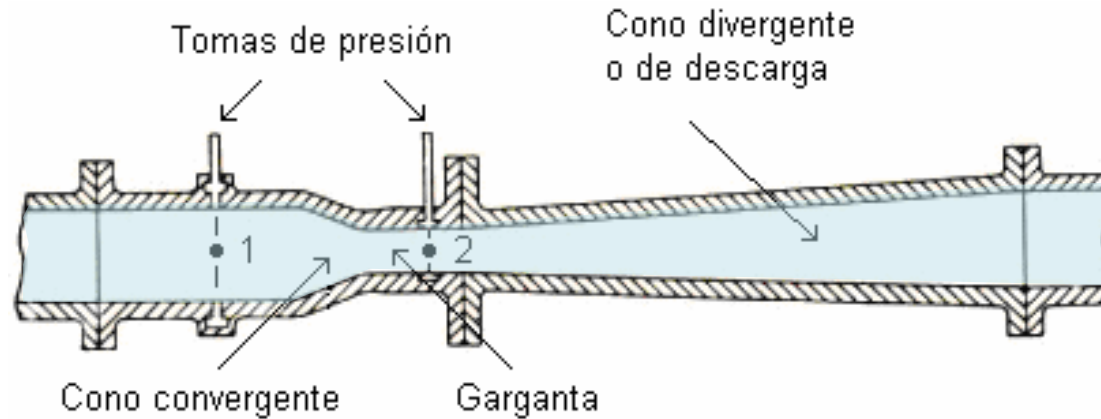


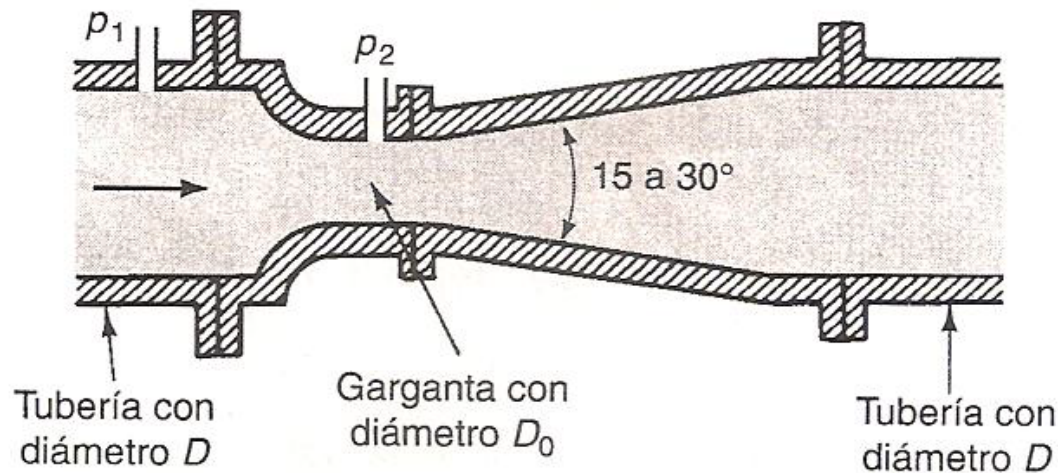
FIGURA 2. Tubo venturi

La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así al colocar un manómetro o un instrumento registrador en la garganta se puede medir la caída de presión y calcular el caudal. En el tubo Venturi, el flujo desde la tubería principal en la sección 1 se hace acelerar a través de la garganta, donde disminuye la presión del fluido. Después el flujo se expande a través del cono divergente al mismo diámetro que la tubería principal. En la pared de la tubería de la sección 1 y en la pared de la garganta, sección 2, se ubican las tomas de presión. En dichas tomas se puede conectar un manómetro de presión diferencial de tal forma que la deflexión h es una indicación de la diferencia de presión $P_1 - P_2$. La ecuación para el caudal en el tubo venturi es:

$$Q_{real} = CMA_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Los valores del coeficiente de descarga C se obtienen de curvas que son función del número de Reynolds haciendo la calibración adecuada. El tubo venturi posee una elevada precisión del orden de $\pm 0,75\%$, permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos. Presenta la desventaja de ser costoso.

El tubo venturi contemporáneo , que se muestra en la figura, consiste en una sección de entrada de tobera de flujo estándar y una expansión de salida cónica de no más de 30° . Su gama recomendada de número de Reynolds es limitada de 1.5×10^5 a 2×10^6 . En el caso del tubo venturi la vena contracta no está presente y por ello el coeficiente de descarga se mantiene cercano a la unidad.



La tobera

La tobera consta de un tubo corto cuyo diámetro disminuye en forma gradual de un extremo al otro. También posee dos tomas de presión, una ubicada del lado anterior y otra ubicada del lado posterior de la tobera, en las que se puede conectar un manómetro de presión diferencial como se muestra en la figura 3.

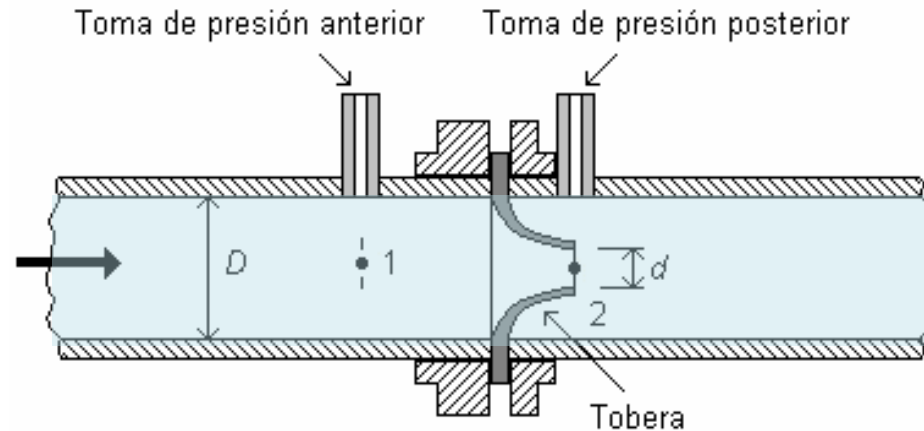


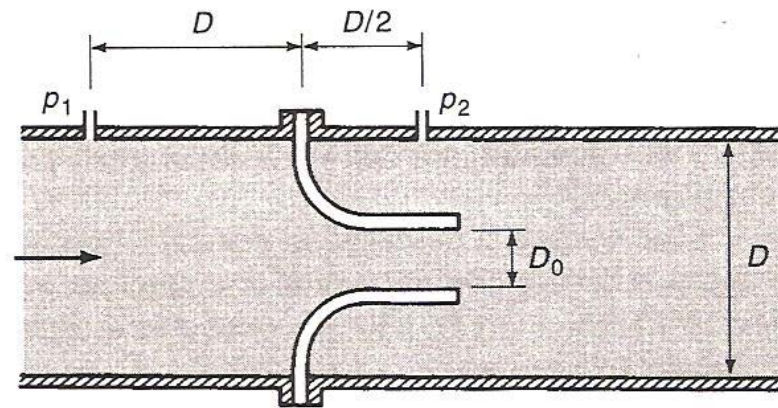
FIGURA 3. Tobera

D es el diámetro interno de la tubería. d es el diámetro de salida de la tobera.

$$Q_{real} = KA_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

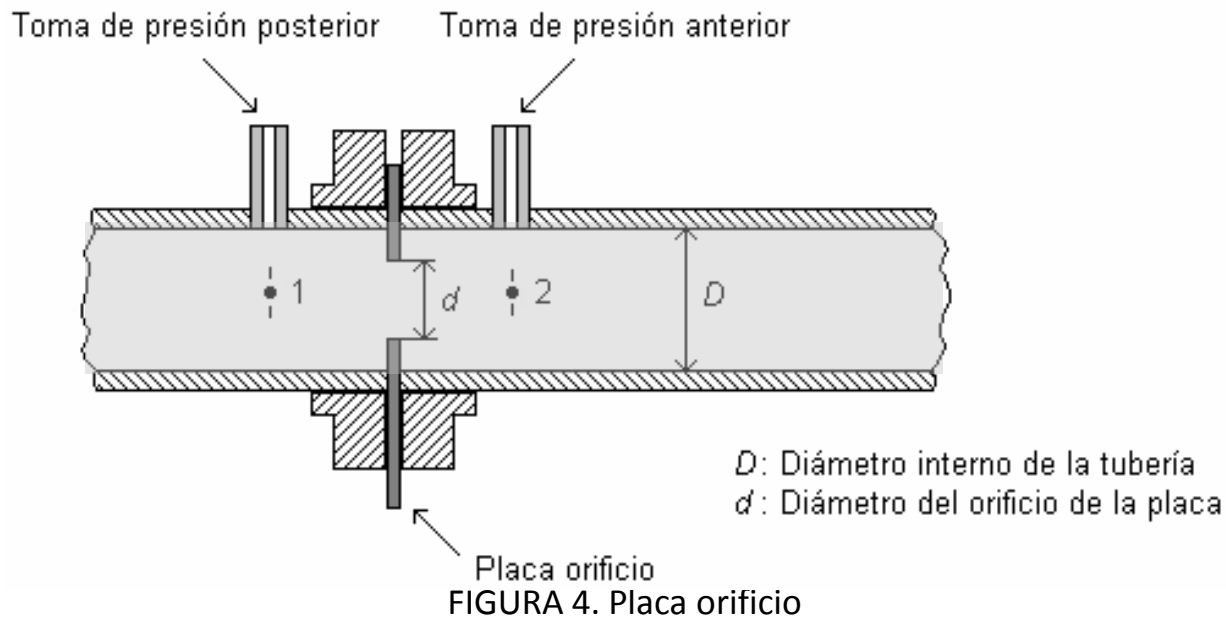
A_2 es el área que corresponde al menor diámetro de la tobera. $K = CM$, los valores del coeficiente de descarga se obtienen de curvas que son función del número de Reynolds y que tienen como parámetro a la relación de los diámetros $= d/D$. La tobera se la puede emplear para medir caudal de fluidos con dos fases, de vapor o líquidos viscosos, para líquidos que tengan una pequeña cantidad de sólidos en suspensión. Sin embargo, no debe emplearse para líquidos con concentraciones de sólidos mayores que puedan llegar a obturarla. El costo de la tobera es de 8 a 16 veces el de la placa orificio y su precisión es del orden de $\pm 0.95\%$ a $\pm 1,5\%$.

En la tobera las derivaciones de presión por lo regular se colocan un diámetro corriente arriba de la entrada y medio diámetro corriente abajo. Hay dos formas estándar, la de radio largo y la de radio corto. En virtud de la ausencia de una sección de expansión corriente debajo de la tobera, la pérdida de carga total es similar a la de una placa de orificio excepto que la vena contracta se elimina casi totalmente y el coeficiente de descarga es cercano a la unidad. La tobera tiene una ventaja respecto de la placa de orificio, en cuanto es menos susceptible a erosión y desgaste; y, en comparación con el medidor venturi, es menos costosa y más sencilla de instalar.



Placa orificio o diafragma

La placa orificio consiste en una placa perforada ubicada en el interior de una tubería. Posee además, dos tomas de presión, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa, a las cuales se conecta un manómetro de presión diferencial como se muestra en la figura 4.



La placa orificio hace que la obstrucción al paso del fluido por la tubería sea de forma abrupta, esto provoca que la vena fluida presente una sección inferior a la del estrechamiento que se denomina "vena contracta" y que se encuentra corriente abajo del mismo (figura 5). El efecto de la vena contracta no sucede cuando el estrechamiento de la sección de la cañería es de forma gradual.

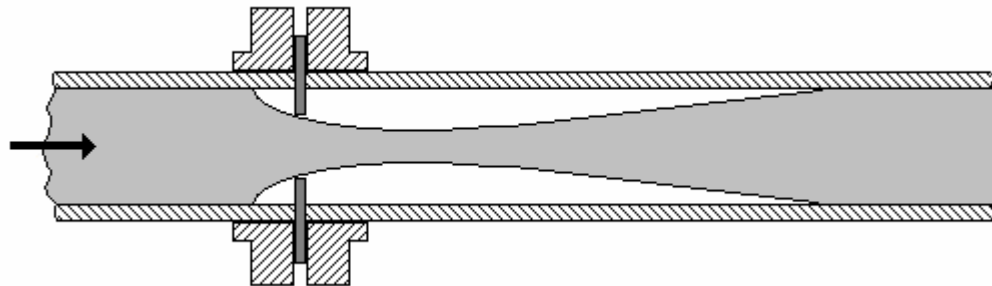


FIGURA 5. Efecto de la vena contracta

El orificio de la placa puede ser concéntrico, excéntrico o segmental, como se muestra en la figura 6. El concéntrico es el más comúnmente utilizado. El orificio de la placa es circular y concéntrico con el tubo en el que va instalado. Su exactitud es mucho mayor a la de los otros dos tipos de orificios. El excéntrico, el orificio en la placa es circular y tangente a la pared interna de la cañería en un punto. Se utiliza para fluidos con dos fases: vapor húmedo, líquidos que contienen sólidos, aceites que contienen agua, etc. El segmental, es un orificio en forma de segmento circular tangente en un punto a la circunferencia interna de la cañería. Se utiliza para fluidos barrocos con la ventaja que no acumula sólidos en el lado anterior a la placa.

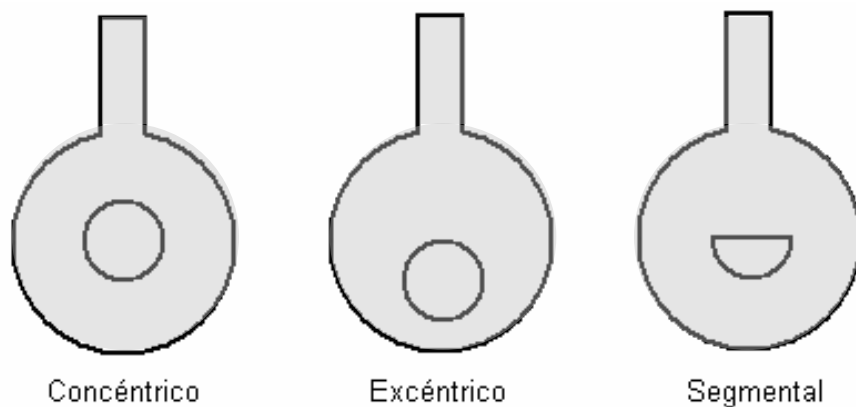


FIGURA 6. Distintos tipos de orificios

La ecuación del caudal para la placa orificio es la misma que para la tobera:

$$Q_{real} = KA_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

En este caso, A_2 es al área del orificio de la placa. Recuérdese que $K = CM$. Los valores de C se obtienen de curvas que son función del número de Reynolds y que tienen como parámetro $\beta = \frac{d}{D}$. A Por último, la precisión de la placa orificio está en el orden de $\pm 1\%$ y $\pm 2\%$.

Los medidores de placa delgada de orificio (figura 7) por lo regular se fabrican dentro del intervalo $0.2 \leq \beta \leq 0.8$. En la figura 7 se muestran dos formas de colocar las derivaciones de presión: (1) derivaciones de brida, colocadas 25 mm corriente arriba y corriente debajo de la placa orificio, y (2) derivaciones colocadas un diámetro corriente arriba y medio diámetro corriente debajo de la placa.

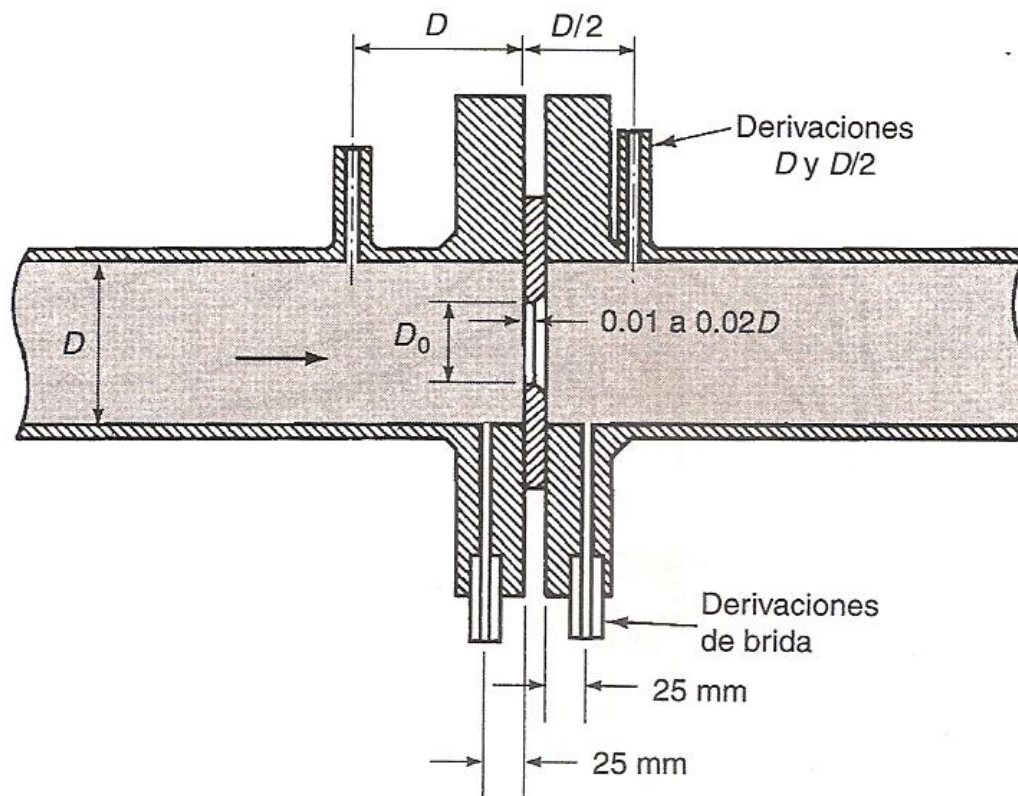
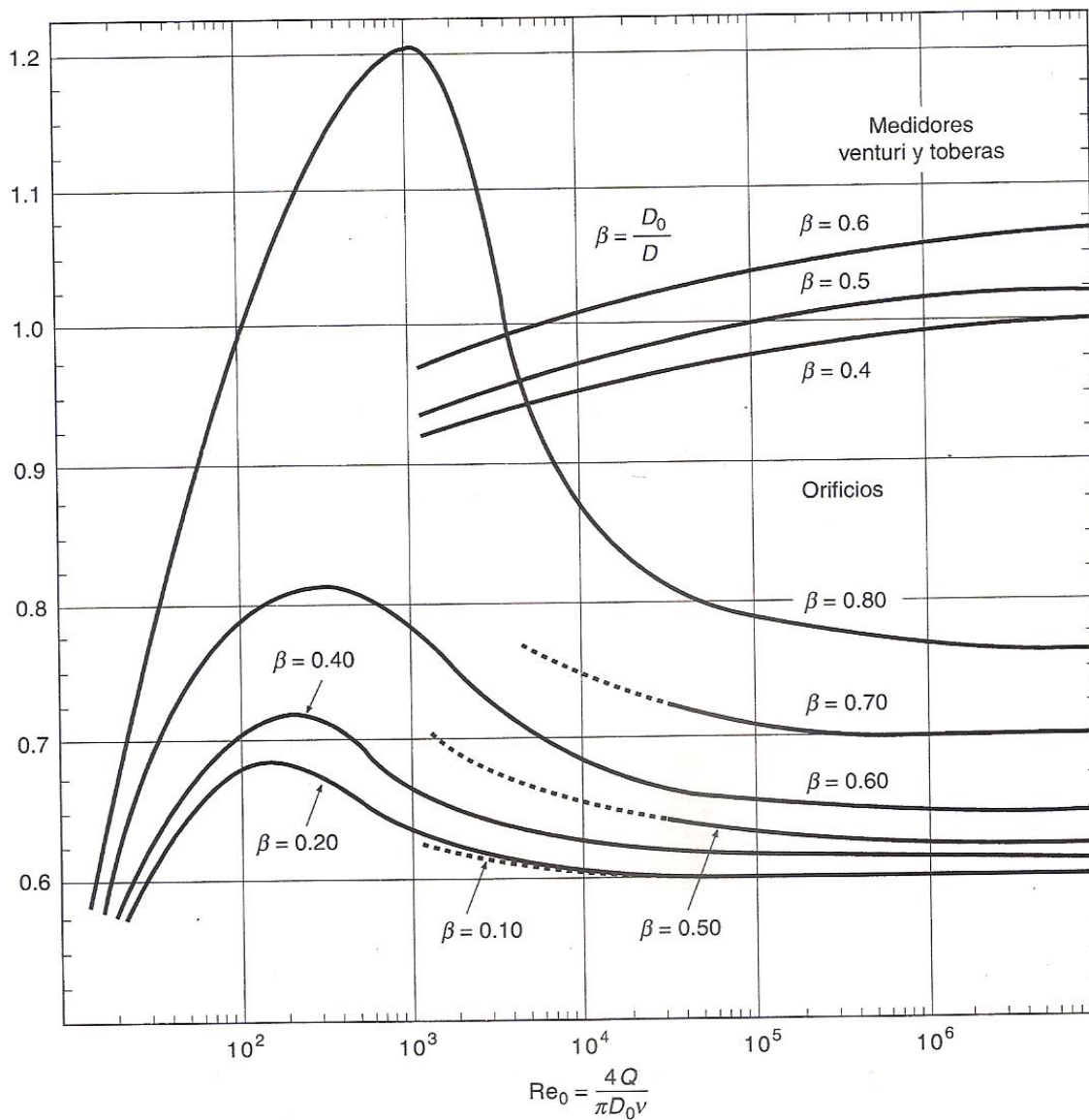


FIGURA 7. Especificaciones de la placa orificio

La figura muestra valores determinados experimentalmente del coeficiente de flujo K para orificios, toberas y medidores venturi en función de β y del número de Reynolds calculado con el diámetro d o D_o .



El tubo Pitot

El tubo Pitot, el cuál se muestra en la figura 7, mide la diferencia de presión entre los puntos a y b la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad. El fluido se desplaza por las aberturas en a , estas aberturas son paralelas a la dirección del flujo y están situadas lo suficientemente lejos como para que la velocidad y la presión fuera de ellas tengan los valores del flujo libre. Por lo tanto, la presión en el brazo izquierdo del manómetro, que está conectado a las aberturas, es la presión estática P_a . La abertura del brazo derecho del manómetro perpendicular a la corriente. La velocidad se reduce a cero en el punto b y el líquido se detiene en ese sitio. La presión en b es la presión total de empuje P_b . De acuerdo con la ecuación de Bernoulli en los puntos a y b .

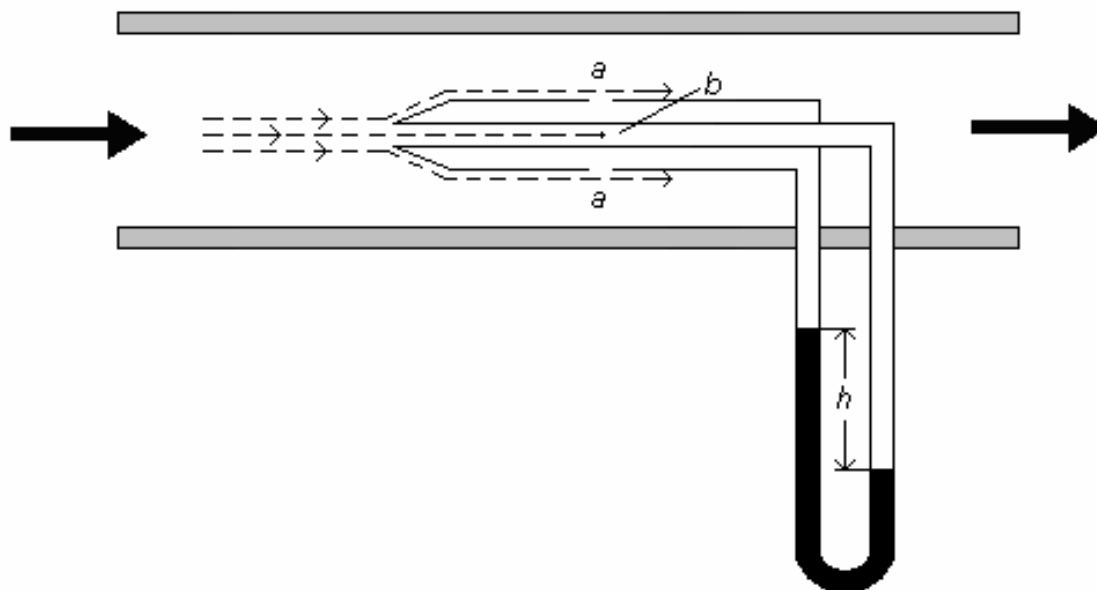


FIGURA 7. Tubo de pitot

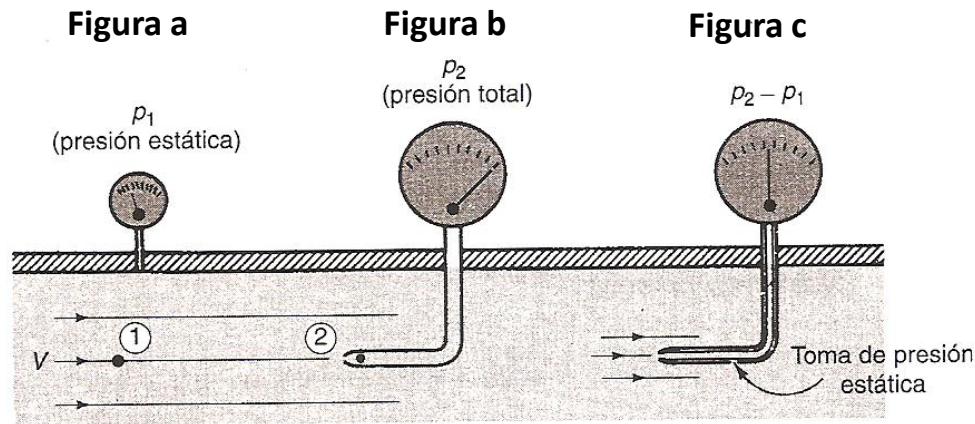
Como se puede ver en la figura, P_b es mayor que P_a . h es la diferencia de altura del líquido en los brazos del manómetro y ρ_M es la densidad del líquido manométrico.

$$P_a + \rho \frac{V^2}{2} = P_b \quad \text{y} \quad P_a + \rho_M g h = P_b, \text{ comparando estas ecuaciones } \rho \frac{V^2}{2} = \rho_M g h, \text{ entonces; } V = \sqrt{\frac{2\rho_M g h}{\rho}}$$

Si el área transversal de la tubería A es conocido, el caudal del líquido es AV , es decir: $Q = A \sqrt{\frac{2\rho_M g h}{\rho}}$

Su precisión es baja, del orden de 1,5% - 4%, y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

La presión estática en una tubería puede medirse con sólo instalar un piezómetro (figura a). El dispositivo llamado tubo de Pitot (figura b) sirve para medir presión total en un flujo de fluido, el punto 2 justo adentro del tubo de Pitot es un punto de estancamiento, la velocidad ahí es cero. Podemos usar la diferencia entre las lecturas del tubo de Pitot y el piezómetro para determinar la velocidad en el punto 1. También se puede emplear un tubo de Pitot-estático para medir la diferencia entre la presión total y la estática con una sola sonda. La figura 7, es un diseño específico, llamado tubo de Prandtl. Este tubo tiene los agujeros de presión estática a lo largo del tubo horizontal.



$$V = V_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_1)}$$

Donde las presiones en 1 y 2 son equivalentes a las presiones en a y b respectivamente según la figura 7.

Problemas:

- 1.- Se usará un tubo de Prandtl para mediciones repetidas de velocidad de una corriente de aire atmosférico. Se desea relacionar la velocidad V con la lectura del manómetro h en centímetros de mercurio (esto es, $V = C\sqrt{h}$). Calcule el valor de la constante C para un laboratorio a 20°C situado: a) Al nivel del mar. b) a una altitud de 2000m.
- 2.- Se propone una probeta de Pitot-estática conectada a un manómetro que tiene agua como fluido para efectuar mediciones en un flujo de aire cuya velocidad es de 8 m/s. ¿Qué lectura manométrica se espera obtener?
- 3.- Fluye agua a 20°C por un tubo de 2 mm de diámetro hacia un tanque calibrado. Si se recaban 2 litros en 10 minutos, calcule la razón de flujo en m^3/s , el flujo másico en kg/s y la velocidad promedio en m/s. ¿El flujo es laminar, turbulento o imposible de caracterizar?
- 4.- La razón de flujo de agua en una tubería de 12 cm de diámetro medida con un medidor venturi de 6 cm de diámetro es de $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$. Determina la deflexión que habría que esperar en un manómetro de agua-mercurio. Suponga que la temperatura del agua es de 20°C .
- 5.- Se desea medir la descarga de un flujo de agua a 20°C en un tubo de 54 cm de diámetro. Si un manómetro de agua-mercurio marca 12 cm, calcule la descarga si el manómetro está conectado a:
 - (a) una placa orificio de 15 cm de diámetro.
 - (b) una tobera de 15 cm de diámetro.
- 6.- Calcule la razón de flujo de agua a 40°C en las tuberías que se muestran en las figuras:

