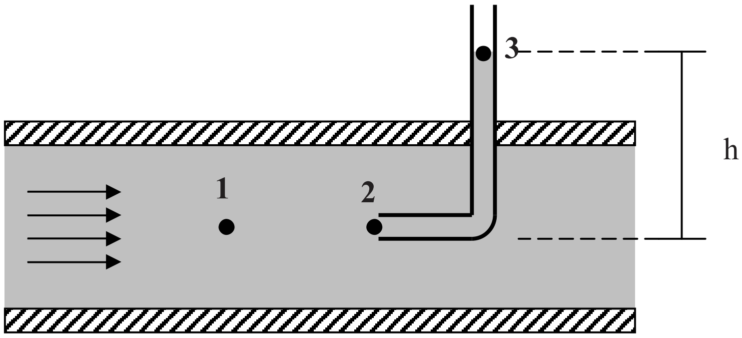
Medidores de Caudal

Tubo Pitot



El tubo Pitot es un tubo transparente en L que se instala en una tubería por la que se mueve un fluido, por lo general un líquido, el cual llena el tubo hasta una altura h por efecto de la presión y de la velocidad del fluido.

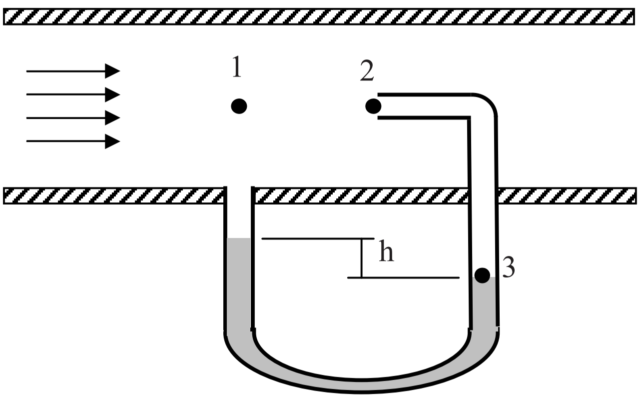
En el punto 1 el fluido lleva una velocidad V_1, y está sometido a una presión P_1. En el punto 2 se considera el fluido que se ha estancado justo a la entrada del tubo Pitot, de manera que $V_2=0$. Aplicando la ecuación de Bernoulli entre estos dos puntos se tiene:

$$\frac{P_1}{\rho}+\frac{V_1^2}{2}+gz_1=\frac{P_2}{\rho}+\frac{V_2^2}{2}+gz_2 \Rightarrow \frac{P_2}{\rho}=\frac{P_1}{\rho}+\frac{V_2^2}{2}$$

$$V_2=\sqrt{\frac{2(P_2-P_1)}{\rho}} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

La presión en 2 se puede calcular aplicando la ecuación de presión hidrostática entre 2 y 3:
$P_2=P_3+\rho gh$, si se conociera P_1, se podría calcular la velocidad, y por consiguiente medir el caudal.

Esto se puede lograr de manera indirecta mediante un montaje como el de la figura.



En la parte inferior del tubo hay un indicador, que puede ser mercurio, el cual permite calcular la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2, con lo cual es posible calcular la velocidad en el punto 1. Recuérdese que tanto la presión como la velocidad en 1 son los valores promedio, de manera que se puede calcular la presión en 3 por la izquierda y por la derecha:

Por la izquierda: $P_3 = P_1 + \rho_{fluido} gh' + \rho_{indic} gh$

Donde h' es la altura desde la pared de la tubería hasta el nivel del indicador.

Por la derecha: $P_3 = P_2 + \rho_{fluido} g(R + h' + h)$

Igualando se tiene: $P_1 + \rho_{indic} gh = P_2 + \rho_{fluido} g(R + h)$

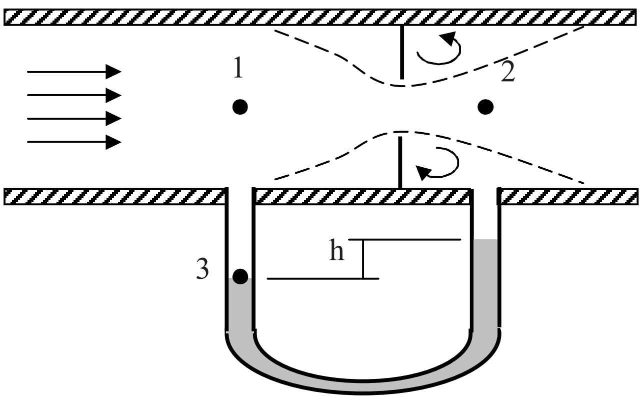
Igual a: $\dfrac{P_2 - P_1}{\rho_{fluido}} = \dfrac{\rho_{indic}}{\rho_{fluido}} gh - g(R + h)$

Resultado que se puede reemplazar en la Ec. 1:

$$V_2 = \sqrt{2\frac{P_2 - P_1}{\rho_{fluido}}} = \sqrt{2g\left(\left(\frac{\rho_{indic}}{\rho_{fluido}} - 1\right)h - R\right)}$$

Si el fluido es agua, la relación de densidades es la densidad relativa.

Medidor de Orificio



El principio del medidor de orificio es obligar al fluido a modificar el área transversal de flujo mediante una restricción brusca del mismo instalándole una placa circular perforada en el centro similar a una arandela. Así mismo se instalan tomas de presión a una distancia D "aguas arriba" y D/2 "aguas abajo". De este mismo modo se puede aplicar la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

De manera análoga, si se conoce la diferencia de presiones entre 1 y 2, puedo calcular la velocidad, ya que entre V_1 y V_2 se puede plantear la ecuación de continuidad ($V_1A_1=V_2A_2$).

La dificultad radica en establecer el valor de A_2. Para esto se puede hacer un cálculo idealizado del flujo, esto es, suponiendo que conociéramos el valor exacto de A_2. De la ecuación de continuidad:

$$V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2$$

Que al reemplazarlo en la ecuación de Bernoulli queda:

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

Se puede despejar V_2:

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

Expresión de la que se puede calcular el flujo másico teórico:

$$\dot{m}_{Teór} = \rho V_2 A_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}$$

El cociente es una cantidad que depende únicamente de las áreas de flujo, y se emplea para calcular el flujo real en un medidor de orificio, empleando el área del orificio (A_t) en lugar del área en el punto 2, para lo cual es necesario aplicar un factor C, llamado coeficiente de descarga, el cual sirve para dar los valores reales del flujo másico al establecerse una diferencia de presiones determinada.

$$\dot{m}_{Real} = \frac{C_{Orif} A_t}{\sqrt{1 - (A_t / A_1)^2}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}$$

Para calcular C_{Orif}, se emplea la siguiente expresión:

$$C_{Orif} = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{\mathrm{Re}_{D1}^{0.75}}$$

Donde $\beta = D_t / D_1$; $\beta^2 = A_t / A_1 = (D_t / D_1)^2$

Esta ecuación es válida para $0.2<\beta<0.5$ y $10^4<\mathrm{Re}_{D1}<10^7$. Nótese que Re debe calcularse para el diámetro de la tubería, y que casi siempre se quiere calcular el flujo, por lo que se desconoce la velocidad, por lo tanto no se puede calcular Re, que a su vez está en la fórmula para C. Afortunadamente ese término tiene poco peso en el valor final de C, por lo que se puede hacer un primer cálculo de C sin considerarlo, y una vez se tenga un estimado de la velocidad, hacer el cálculo definitivo.

La diferencia de presiones se puede calcular considerando las presiones hidrostáticas en el manómetro diferencial, obteniéndose:

$P_1 - P_2 = (\rho_{Ind} - \rho_{fluido})gh$, que al reemplazarlo en la expresión para el flujo másico, se convierte en:

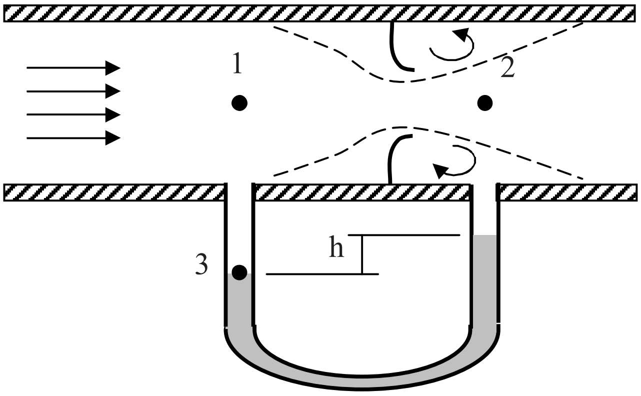
$$\dot{m}_{Real} = \frac{C_{Orif} A_t}{\sqrt{1 - (A_t / A_1)^2}} \sqrt{2\rho_{fluido}(\rho_{Ind} - \rho_{fluido})gh}$$

Si el fluido es agua, se puede decir:

$\dot{m}_{Real} = \frac{C_{Orif} A_t}{\sqrt{1 - (A_t / A_1)^2}} \rho_{agua} \sqrt{2(D_R - 1)gh}$, ó $Q = \frac{C_{Orif} A_t}{\sqrt{1 - (A_t / A_1)^2}} \sqrt{2(D_R - 1)gh}$ donde D_R es la densidad relativa del indicador.

Medidores de tobera:

El principio de los medidores de tobera es el mismo que el de los de orificio, con la diferencia en que la restricción no es tan brusca, para lo cual en lugar de una placa perforada, se instala una restricción con forma de tobera, como se indica en la figura

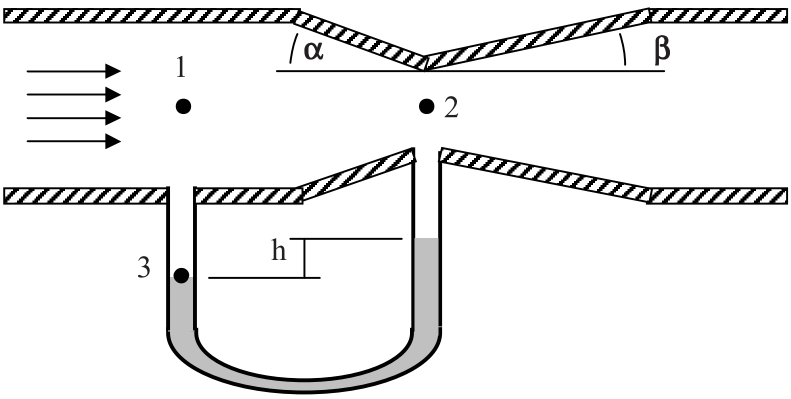


Se emplea la misma expresión para el flujo másico obtenida para el medidor de orificio, sólo que en este caso el coeficiente de descarga se calcula mediante la expresión:

$$C_{Tob} = 0.9975 - \frac{6.53\beta^{0.5}}{\mathrm{Re}_{D1}^{0.5}}$$

Esta ecuación es válida para $0.2<\beta<0.5$ y $10^4<\mathrm{Re}_{D1}<10^7$. Se hace la misma observación que para el medidor de orificio.

Medidor Vénturi



Es el más preciso (y más costoso) de los instrumentos basados en el cambio del área para medición de flujo. En el vénturi el cambio de área se produce de forma controlada mediante dos secciones cónicas en serie de reducción y expansión como se muestra en la figura. Esto hace que las perturbaciones en el flujo sean mucho menores, interfiriendo mucho menos en la medición.
En este caso el coeficiente de descarga se puede considerar como $C_V=0.985$ para vénturis nuevos ó 0.98 para vénturis usados (sucios).