

Unidad 8 - INSTRUMENTACION DE PRESION Y CAUDAL:

Subunidad A: Medición y transmisión de variables en un lazo de control realimentado, incidencia en el comportamiento del mismo.

En cuanto a las variables industriales de presión y caudal, debe destacarse que:

Presión: es la única que puede ser a su vez clasificada en tres categorías (líquido, gas y vapores en equilibrio), cada una con características bien diferenciadas.

Caudal: la medición y transmisión de esta variable es necesaria para conocer el balance de materia, raramente se mantiene constante, generalmente fluctúa y es una variable ruidosa cuando se mide.

La adecuada selección de los instrumentos para medirlas requiere un conocimiento estricto de las condiciones del proceso donde estará inmerso, destacándose que el elemento primario de medición (transductor o sensor) y su transmisor asociado pueden influir en la caracterización total del lazo cerrado de control, sumando, en algunos casos, alinealidades, tiempos muertos, capacitancias simples, tendencias a la oscilación y ganancias estáticas que influyen en el desempeño final del lazo mencionado.

La minimización de estos aspectos no deseados de los instrumentos de medición dependen en gran parte en escoger la tecnología apropiada según sea el proceso y en virtud del costo, estas consideraciones son válidas para todos los instrumentos de medición de variables industriales aunque en ésta Unidad y la siguiente nos referiremos a la medición de presión, caudal, temperatura y nivel para al final hacer una mención de otras de interés industrial.

Subunidad B: Medición y transmisión de presión absoluta, relativa y diferencial.

Definición de presión: se define como una fuerza (F) que actúa en una superficie (S).

Unidades: SI es el nombre que se da a las unidades básicas en el sistema internacional de unidades. El nombre proviene del francés “Système International d’ Unités.” El SI se estableció por la Conferencia General de Pesos y Medidas (fundada por el Acuerdo Métrico del 20 de mayo de 1875).

Actualmente el sistema lo administra y revisa el Bureau International des Poids et Mesures en Sèvres (Francia). Tanto la International Standardization Organization (ISO) como la International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) recogen las recomendaciones internacionales para el uso de SI que después se fijan como obligatorias para los fabricantes de instrumentos de medición.

Por lo que las unidades de presión más comunes son:

El pascal: deriva del sistema de unidades SI, esto es el metro y el Newton.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2.$$

En presión meteorológica normalmente se indica en hPa. Esta unidad ha sustituido a la anteriormente habitual mbar. Se le dio el nombre de pascal por Blaise Pascal (1623 - 1662), matemático y científico Francés.

En aplicaciones industriales, se utiliza frecuentemente la unidad bar, Kpa o MPa. Como el pascal es una unidad de presión muy pequeña, se utiliza básicamente para medir presiones muy bajas

El hPa se utiliza principalmente en meteorología pero en algunos casos también en comercio e industria. Las unidades bar, KPa y MPa son unidades estándar en tecnología de medición industrial de presión.

También se puede expresar una presión en mmHg, es la más frecuente en medicina. La presión arterial.

En las industrias de origen anglosajón se emplean:

- psi (libra por pulgada al cuadrado)
- inch H₂O (pulgadas de agua)
- inch Hg (pulgadas de mercurio)

La Tabla siguiente establece una conversión entre los distintos sistemas de unidades.

III. Tabla de conversión

	Pa	hPa/mbar	kPa	MPa	bar	psi	mm c.d.a	inH ₂ O	mmHg	inHg
Pa	1	100	1,000	1,000,000	100,000	6,895	9,807	249.1	133.3	3,386
hPa/mbar	0.01	1	10	10,000	1,000	68.948	0.09807	2.491	1.333	33.864
kPa	0.001	0.1	1	1,000	100	6.895	0.009807	0.2491	0.1333	3.386
MPa	0.000001	0.0001	0.001	1	0.1	0.006895	0.000009807	0.0002491	0.0001333	0.003386
bar	0.00001	0.001	0.01	10	1	0.0689	0.00009807	0.002491	0.001333	0.0339
psi	0.0001451	0.0145	0.14505	145.05	14.505	1	0.001422	0.0361	0.0193	0.4912
mm c.d.a	0.102	10.2	102	102,000	10,200	704.3	1	25.4	13.62	345.9
inH ₂ O	0.004016	0.4016	4.016	4,016	401.6	27.73	0.0394	1	0.5362	13.62
mmHg	0.007501	0.7501	7.501	7,501	750.1	51.71	0.0734	1.855	1	25.4
inHg	0.0002953	0.0295	2953	295.3	29.35	2.036	0.002891	0.0734	0.0394	1

Tipos de presión:

Medir una presión es compararla con una presión de referencia. La tecnología de medición de presión distingue entre los siguientes tipos, permitiendo establecer la relación entre la presión medida y la presión de referencia.

La presión absoluta está relacionada con el espacio vacío del universo (presión cero) y respecto de la presión atmosférica se debe ampliar su concepto agregando que es la presión más importante para la vida en la tierra. La presión atmosférica surge del peso de la atmósfera que rodea la tierra. La atmósfera alcanza hasta una altitud de aprox. 500 km. La presión del aire disminuye progresivamente a esa altitud (donde la presión absoluta es cero). La presión atmosférica también se ve afectada por fluctuaciones relacionadas con el clima. En promedio, la presión atmosférica al nivel del mar es de 1013,25 hPa, pudiendo fluctuar hasta $\pm 5\%$ de acuerdo con el clima, por lo que:

Presión absoluta:

- presión medida por encima del cero absoluto
- referencia, vacío ideal
- la presión de medición siempre es mayor que la presión de referencia

Presión positiva:

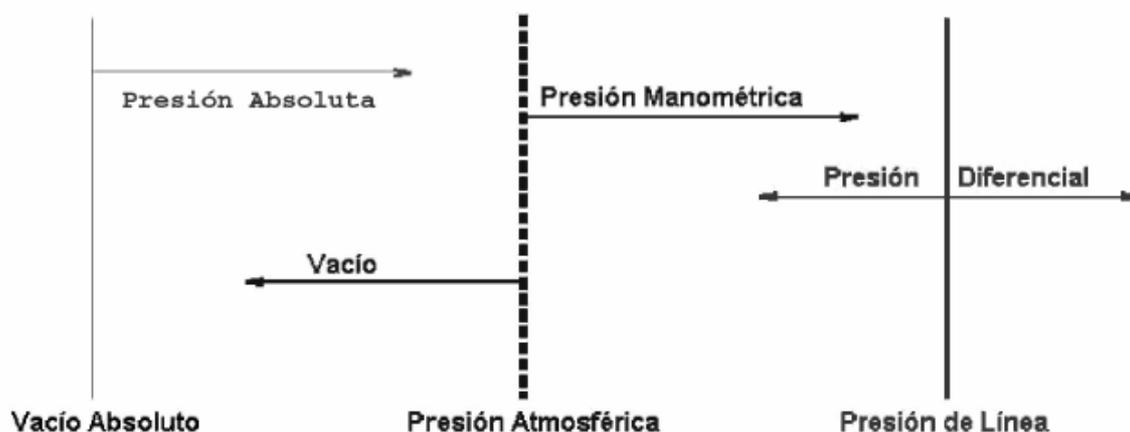
- presión medida por encima de la presión barométrica diaria
- presión ambiente de referencia
- la presión de medición siempre es mayor que la presión de referencia

Presión negativa:

- presión medida por debajo de la presión barométrica diaria
- presión ambiente de referencia
- la presión de medición siempre es menor que la presión de referencia

Presión diferencial:

- presión medida superior o inferior a cualquier presión de referencia deseada
- El siguiente gráfico pretende ilustrar lo arriba expuesto.



Tecnologías para la de medición de presión:

Probablemente la forma más básica de medir presión es utilizando un manómetro de columna. La presión a medir se compara con el peso de una columna de líquido. Según la presión a medir se utilizan distintos líquidos.

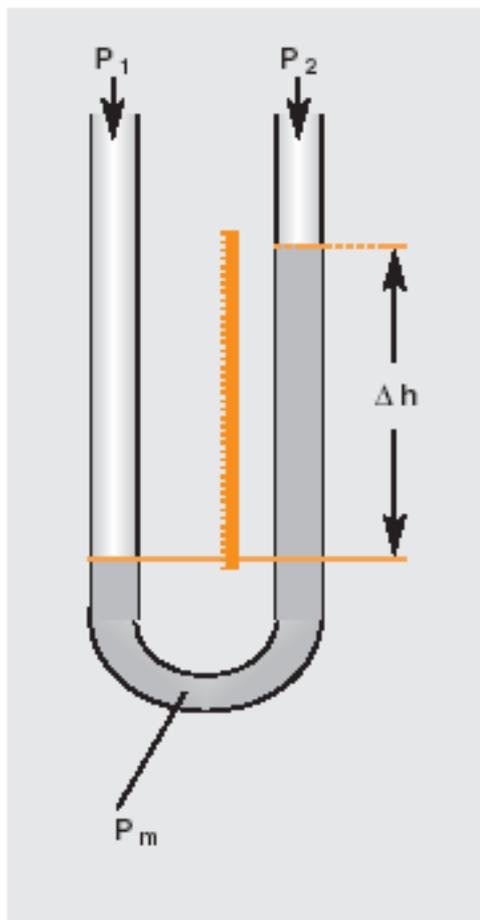
A una altitud de 1 m se obtienen los siguientes valores medidos:

- Alcohol 78.5 hPa
- Agua 98.1 hPa
- Mercurio 1334.2 hPa

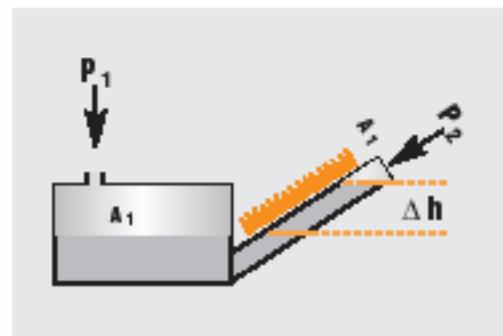
Puede verse que los manómetros de columna están indicados para presiones diferencial o positivas pequeñas.

Algunos ejemplos de manómetros de columna.

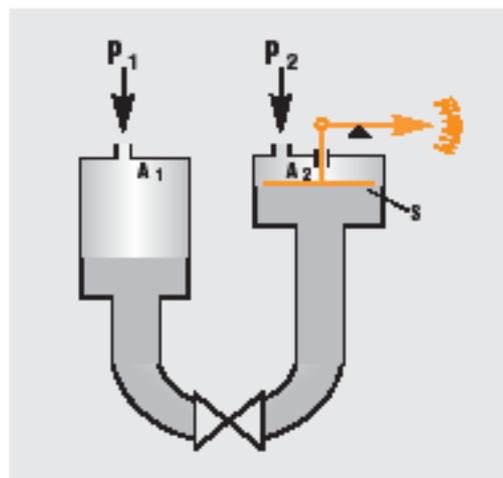
Manómetro de columna



Manómetro columna inclinada



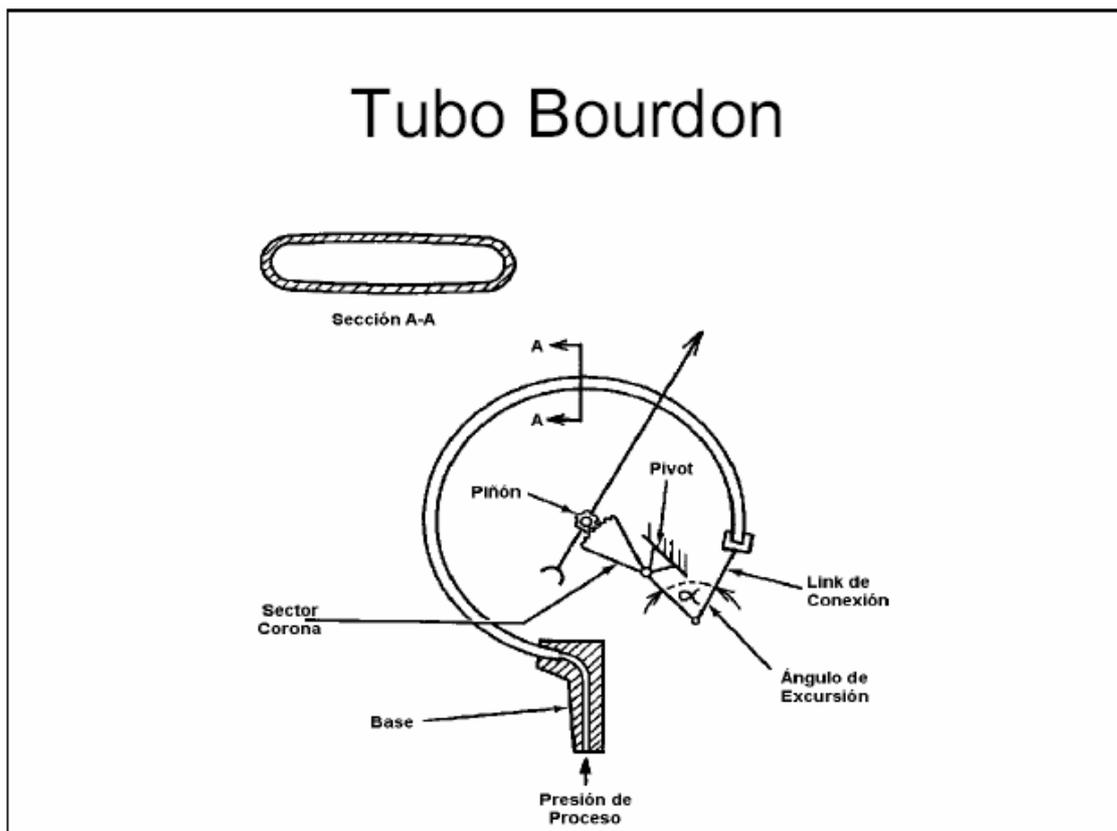
Manómetro flotador



Aunque las mediciones con estos manómetros son relativamente fiables, deben tenerse en cuenta algunos parámetros importantes.

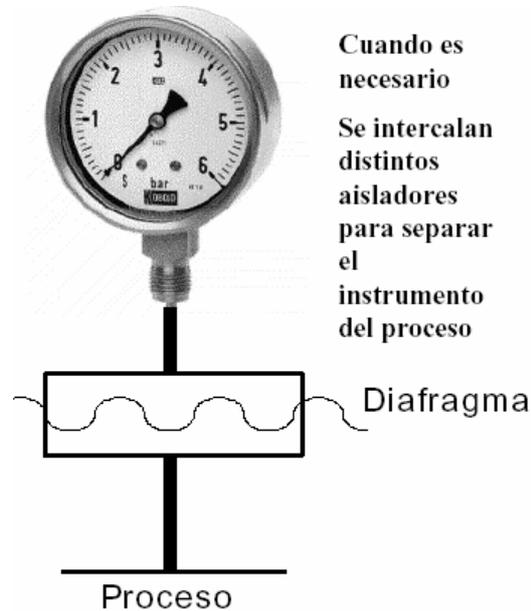
- Es esencial que la conexión sea absolutamente horizontal, incluso una ligera desviación puede provocar números engañosos.
- Las instrucciones de manejo para mediciones portátiles no son óptimas. Los líquidos deben rellenarse en cada situación y el manómetro debe recalibrarse. Dependiendo del líquido, esto debe realizarse con un cuidado extremo (ej. el mercurio es muy tóxico incluso en concentraciones bajas y por este motivo ya casi no se utiliza).
- Debido a las distintas densidades de los líquidos no deben mezclarse nunca.
- Para evitar errores de paralelismo, el valor medido debe leerse en posición absolutamente horizontal.

Manómetro mecánico: después de la revolución industrial (el inicio del siglo 19), se necesitó medir rangos de presión mayores (ej. debido a la introducción de máquinas de vapor) y los manómetros de columna ya no eran suficientes debido a su rango y estrés mecánico (vibraciones), se desarrolló un nuevo tipo de manómetro. Esto condujo al manómetro mecánico. En el manómetro, se deforma un tubo, denominado de Bourdon según la presión que se le aplica. Esta deformación puede utilizarse para mover un dial de forma que la presión correspondiente se lea en una escala, la figura siguiente muestra tal detalle.



Los manómetros mecánicos se caracterizan por su resistencia y por su sencillo manejo. También tienen un costo relativamente barato. Pero tienen algunas desventajas. Con la deformación mecánica existe un riesgo de fatiga de material que evita que el tubo

retorne a su posición original, fenómeno la que muchas veces se manifiesta como histéresis.



Los manómetros mecánicos sólo pueden utilizarse para medir presión relativa o presión absoluta, su clase (exactitud) está en el orden del 1 %.

Otros procesos de medición de presión incluyen, entre otros a (limitándonos a su simple mención):

- balanza de presión
- medidor de pistón de presión
- balanza de pistón de presión

Uno de los propósitos principales de la asignatura es describir sistemas de medición y transmisión a distancia de las variables de interés industrial, en este caso, la presión, en forma de una señal equivalente, por ejemplo 4 a 20 mA , usualmente a Sala de Control, ya sea para su control o simple indicación, es por eso que haremos hincapié en dispositivos transductores o sensores y trasmisores electrónicos asociados basados en microprocesador, que cumplan con tal objetivo.

Veremos asimismo que tales elementos son muy similares a los empleados para la medición de caudales volumétricos basados en presión diferencial, por ejemplo placa orificio, tobera, tubo Venturi, etc. Y que además se puede inferir nivel, como se describirá en el Tema 9 , con la única condición que el peso específico del líquido, cuyo nivel h se pretende medir, sea constante, de forma tal que se cumpla la siguiente expresión:

$$h = P / \delta$$

Donde h es la altura del líquido y δ es el peso específico del mismo.

En la medición de presión electrónica se utilizan predominantemente los siguientes principios y procesos:

- piezoresistivo
- galga extensiométrica (strain gage)
- capacitivo
- inductivo
- otros

Características que debe cumplir un sensor de Presión

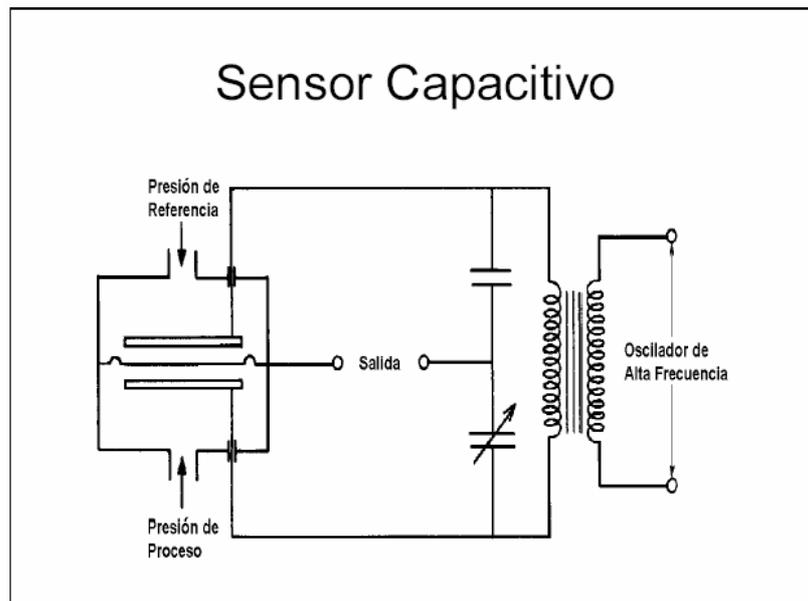
- Debe formar una interfase integral entre la Presión a medir y la Señal de Salida
- Debe tener un Coeficiente térmico mínimo
- Debe tener buena Linealidad, Histéresis y Repetibilidad

Las ventajas de los transmisores de presión:

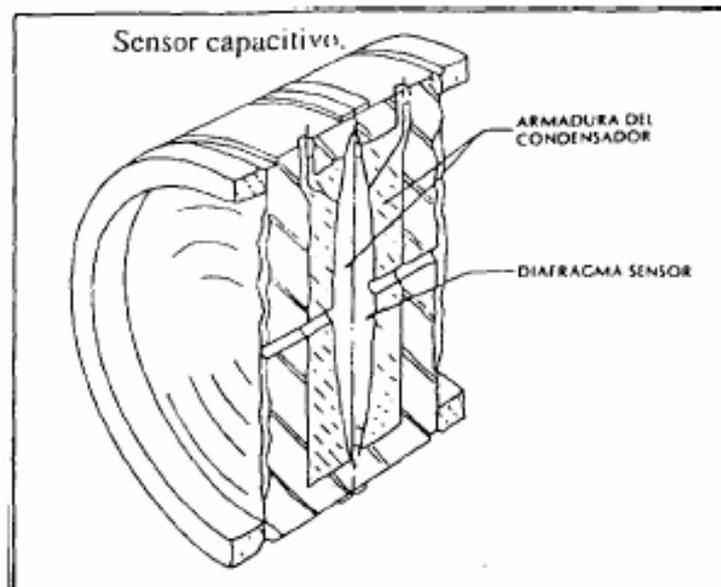
- elevada exactitud (hasta clase 0.05)
- escasa histéresis (menor deformación del sensor)
- buena reproducibilidad
- poca influencia de la temperatura (compensados internamente) y de la humedad
- sencillos de manejar

En nuestro caso nos limitaremos al tipo capacitivo, que básicamente es un puente de Wheastone de alterna, esto es su fuente de alimentación la constituye un oscilador y los componentes del puente son capacitores que pueden conducir corriente alterna con una determinada reactancia capacitiva.

Dos de esos capacitores son conformados por un arreglo en dos cámaras (presión de un proceso que se pretende medir por un lado y presión de referencia en la otra), la posible diferencia de presiones entre ellas, deforman un diafragma metálico que hace que disminuya la distancia hacia una placa en detrimento de un alejamiento de otra , esto es aumentar la capacidad en un capacitor y disminuirla en el otro, ya que el diafragma forma un capacitor con cada lámina. Al desbalancearse el puente, hay una tensión alterna en la salida que es procesada y convertida, usualmente en una salida de 4 a 20 mA, proporcional en el rango de presión escogido. La figura siguiente muestra el esquema básico.



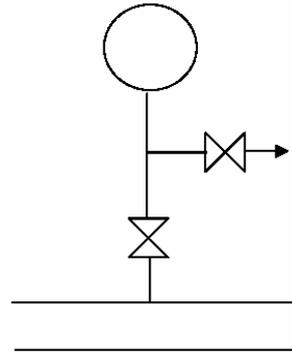
Desde el punto de vista constructivo, consta de dos membranas exteriores y el fluido cuya presión se pretende determinar está en contacto con un diafragma sensor, situado entre las dos armaduras de un condensador. El fluido transmite la presión soportada por las membranas al diafragma, el cual se desplaza hacia un lado o hacia otro proporcionalmente a la presión diferencial. Esto hace que varíe la constante dieléctrica entre las placas de los condensadores. El esquema siguiente da una idea al respecto.



La próxima figura muestra un transmisor de presión que incluye un manifold que permite en el caso de una desinstalación, cerrar la válvula entre la cañería y el instrumento y una superior a la primera que permite depresionar el mismo antes de retirarlo.



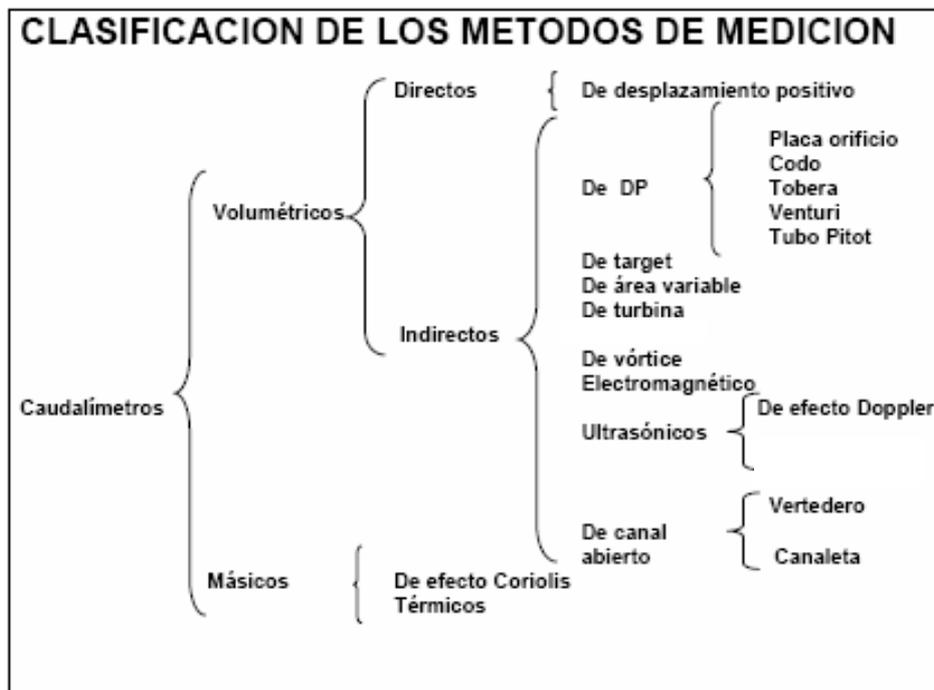
Manifold de dos válvulas



Subunidad C: Idem de caudal por medidores de área fija: placa orificio, Venturi, Tubo Pitot y Annubar.

Introducción: en la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales, en las efectuadas en laboratorio y en plantas, es muy importante la medición de los caudales de líquidos o de gases ya sea para su indicación, registro o control.

Existen dos tipos de medidores, los volumétricos que determinan el caudal en volumen de fluido y los másicos que determinan el caudal masa. Se reservan los medidores volumétricos para la medida general de caudal y se destinan los medidores de caudal másico a aquellas aplicaciones en que la exactitud de la medida es importante, por ejemplo en las determinaciones finales del caudal de un producto para su facturación. Hay varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico deseado. A continuación se da una clasificación de los mismos según el principio de funcionamiento:



Dada la extensa gama de posibilidades de medir caudal, nos limitaremos en esta Unidad a estudiar los medidores volumétrico basados en presión diferencial (DP), de turbina y magnéticos y dentro de los másicos, los basados en el efecto Coriolis.

Instrumentos de presión diferencial o de área constante: probablemente el tipo más utilizado, cualquiera que sea la construcción del medidor, el principio es el mismo. Se reduce la sección de una corriente de fluido, lo que causa un aumento en la velocidad y por lo tanto en la energía cinética; como consecuencia se produce una disminución de presión del fluido para conservar la energía total. Midiendo una fracción de esta disminución de presión, se deducen la velocidad y el caudal del fluido. Si consideramos un tramo de cañería como el de la Figura C.1, en la cual se produce una variación de la sección y aplicamos el teorema de Bernoulli para una unidad de masa del fluido que entra a una tubería horizontal con una restricción en su interior, se tiene que:

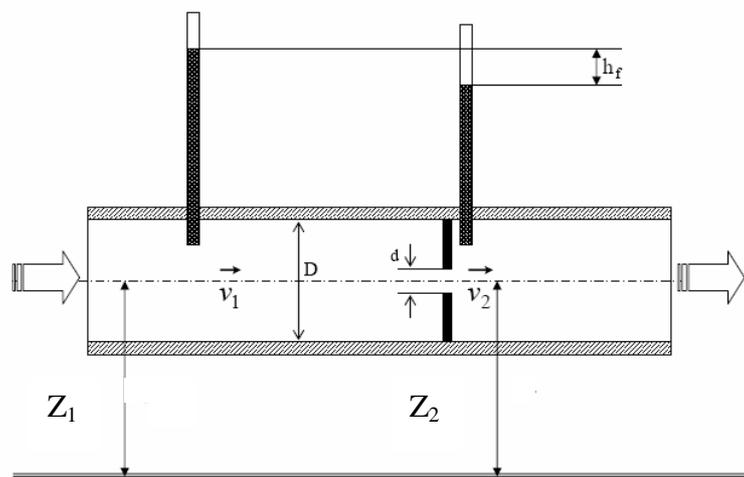


Figura C.1

$$m \cdot z_1 \cdot g + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 + m \cdot \frac{P_1}{\rho_1} + E_1 = m \cdot z_2 \cdot g + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 + m \cdot \frac{P_2}{\rho_2} + E_2$$

Ecuación C.1

Siendo:

- m : unidad de masa.
- z_1 : altura sobre el plano de referencia al centro del tramo de tubería.
- z_2 : ídem al centro de la restricción.
- g : aceleración de la gravedad.
- v_1 y v_2 : velocidades del fluido antes y en la restricción, respectivamente.
- P_1 y P_2 : presiones antes y en la restricción, respectivamente.
- ρ_1 y ρ_2 : densidades del fluido antes y en la restricción, respectivamente.
- E_1 y E_2 : energía interna del fluido antes y en la restricción, respectivamente.

Si no hay variación de temperatura antes y después del estrangulamiento, $E_1 = E_2$

Esta ecuación es aplicable a líquidos y gases, ahora bien, para líquidos considerados incompresibles, la densidad permanece constante, luego $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Además, dado que la tubería está horizontal, resulta que $Z_1 = Z_2$, por lo que podemos ordenar la ecuación C.1 de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 + m \cdot \frac{P_1}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 + m \cdot \frac{P_2}{\rho}$$

Ecuación C.2

Dividiendo por m y g , se tiene:

$$\frac{1}{2g} \cdot v_1^2 + \frac{P_1}{g \cdot \rho} = \frac{1}{2g} v_2^2 + \frac{P_2}{g \cdot \rho}$$

Ecuación C.3

Si practicamos dos tomas, una antes de la restricción y otra después de la misma y conectamos dos tubos verticales en los cuales se han hecho el vacío, el líquido ascenderá por los mismos hasta que las respectivas presiones hidrostáticas equilibren las presiones P_1 y P_2 , observándose una diferencia de altura h_f , que se puede expresar como:

$$h_f = \frac{P_1}{g \cdot \rho} - \frac{P_2}{g \cdot \rho} = \frac{1}{2g} v_2^2 - \frac{1}{2g} \cdot v_1^2$$

Ecuación C.4

La ecuación C.4 es un reordenamiento de la igualdad expresada en C.3, por lo que :

$$2 \cdot g \cdot h_f = v_2^2 - v_1^2$$

Ecuación C.5

Aplicando la ecuación de continuidad, esto es el caudal volumétrico Q será el mismo antes y después de la restricción:

$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Ecuación C.6

Siendo:

- S_1 = área de pasaje de la tubería de diámetro D .
- S_2 = área de la restricción de diámetro d .

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \qquad S_2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Pudiéndose expresar a v_1 en función de v_2 , esto es:

$$v_1 = \frac{S_2}{S_1} \cdot v_2$$

Reemplazando v_1 en C.5

$$2 \cdot g \cdot h_f = v_2^2 - \frac{S_2}{S_1} v_2^2 = v_2^2 \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right)$$

Ecuación C.7

Y dado que

$$S_1 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \qquad y \qquad S_2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Por lo que la ecuación C.7 se puede escribir como:

$$2 \cdot g \cdot h_f = v_2^2 - \frac{S_2}{S_1} v_2^2 = v_2^2 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)$$

Llamando:

$$\beta = \frac{d}{D} \rightarrow 2 \cdot g \cdot h_f = v_2^2 (1 - \beta^4)$$

Luego:

$$v_2^2 = \frac{2 \cdot g \cdot h_f}{(1 - \beta^4)} \rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_f}{(1 - \beta^4)}}$$

En términos de caudal volumétrico:

$$Q = S_2 \cdot v_2 = S_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_f}{(1 - \beta^4)}}$$

Ecuación C.8

La ecuación anterior ha sido deducida suponiendo que las restricciones S_1 y S_2 son perfectamente determinadas, esto no ocurre en la práctica debido a que la sección mínima de la vena líquida se produce un poco después de la restricción (vena contracta) y que depende de varios factores entre los que se encuentran la forma de los bordes del orificio, la viscosidad, etc., por tal motivo la ecuación se afecta de un coeficiente de descarga C que se define de la siguiente manera:

$$C = \frac{\text{flujo real}}{\text{flujo teórico}}$$

Si la temperatura y la densidad son las mismas en ambas secciones se puede asumir que C es constante y dado que β también lo es, se pueden agrupar en una sola constante K , de forma tal que:

$$K = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Por lo que la ecuación C.8 se puede reescribir como:

$$Q = K \cdot S_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f}$$

Ecuación C.9

El coeficiente K depende, entre otros factores, del Número de Reynolds de la instalación como veremos más adelante.

El motivo de esta subunidad es el estudio de la captación y procesamiento de la variable caudal para ser luego indicada, registrada y controlada. El proceso de captación y procesamiento y envío de señal para los propósitos indicados lo realizan los transmisores de caudal (FT) que miden la diferencia de presión ($P_1 - P_2$) en pulgadas (o milímetros) equivalentes de columna de agua, cualquiera sea el fluido, líquido o gaseoso, para ello, nos valemos de la siguiente igualdad:

$$h_f \cdot \delta_f = h_w \cdot \delta_w \rightarrow h_f = \frac{h_w \cdot \delta_w}{\delta_f}$$

Donde δ_f y δ_w son los pesos específicos del fluido y del agua respectivamente, por lo que la ecuación C.9 se puede expresar ahora como:

$$Q = K \cdot S_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{h_w \cdot \delta_w}{\delta_f}}$$

Ecuación C.10

Es necesario ahora agregar ahora un nuevo coeficiente, F_a , que es un factor de corrección por dilatación del dispositivo (placa orificio, tubo Venturi, etc.) a la temperatura de operación. Además si se asume que δ_f permanece constante y sabiendo que:

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

y agrupando todas constantes en una nueva constante K_1 , se puede dar una nueva expresión a la Ecuación C.10:

$$Q = K_1 \cdot d_2^2 \cdot F_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_w}$$

Ecuación C.11

Corrección para gases y vapores: Cuando se mide el caudal de un gas, es necesario aplicar un nuevo factor de corrección debido a la expansión adiabática sufrida al pasar de una zona de mayor presión a una de menor presión.

En general la corrección, denominada “Y” es determinada experimentalmente y aplicada empíricamente, dicho coeficiente depende:

- del tipo de elemento primario de medición usado (placa orificio, tobera o tubo Venturi).
- de la relación β
- de la relación de presiones P_1/P_2
- de la relación de calor específico a presión constante y de calor específico a volumen constante C_p/C_v

Por lo que la ecuación para gases y vapores será:

$$Q = K_1 \cdot d_2 \cdot Y \cdot F_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_w}$$

Ecuación C.12



Instrumentación y Control Automático

Unidad 8: Medición de Presión y Caudal

Universidad Nacional de Cuyo
Facultad de Ingeniería

Las ecuaciones C.11 y C.12 son las expresiones generales de los elementos de medición primaria basados en presión diferencial o de área constante, la primera para líquidos y la segunda para gases y vapores, dichas fórmulas pueden ser afinadas teniendo en

cuenta una serie de coeficientes, en su mayoría empíricos y obtenibles por tablas, que solo nos limitaremos a mencionarlos, entre otros, ellos son:

- F_{tf} = Factor de corrección por temperatura de flujo.
- F_G = Factor de corrección por densidad.
- F_{pb} = Factor de corrección por presión de base.
- F_{tb} = Factor de corrección por temperatura base.

Influencia del Número de Reynolds (Re): Se ha encontrado que existe un valor mínimo del número de Reynolds a partir del cual el coeficiente de descarga K de un medidor a presión diferencial permanece prácticamente constante sin ser afectado por la viscosidad, densidad o velocidad del fluido que se mide. Este valor es por ejemplo, entre 20.000 a 40.000 para la placa orificio y 40.000 o más para las boquillas y tubos Venturi.

Para la determinación del valor numérico del coeficiente de descarga K se hace uso de tablas o gráficos que dan este valor en función del Número de Reynolds (Re) y del β , recordando que el primero es un número adimensional:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\mu}$$

donde:

v : velocidad del fluido (m/seg)
 μ : viscosidad cinemática (m²/seg)
 D : diámetro interno de la tubería (m)

Elementos primarios de medición basados en presión diferencial:

Instrumentación y Control Automático

Unidad 8: Medición de Presión y Caudal

Placa orificio: es la forma más común y más antigua de producir una caída de presión en un caudal. En su forma más simple, consiste en una placa de metal con un orificio circular en su centro, aunque no es la única, como lo muestra la figura C.2.

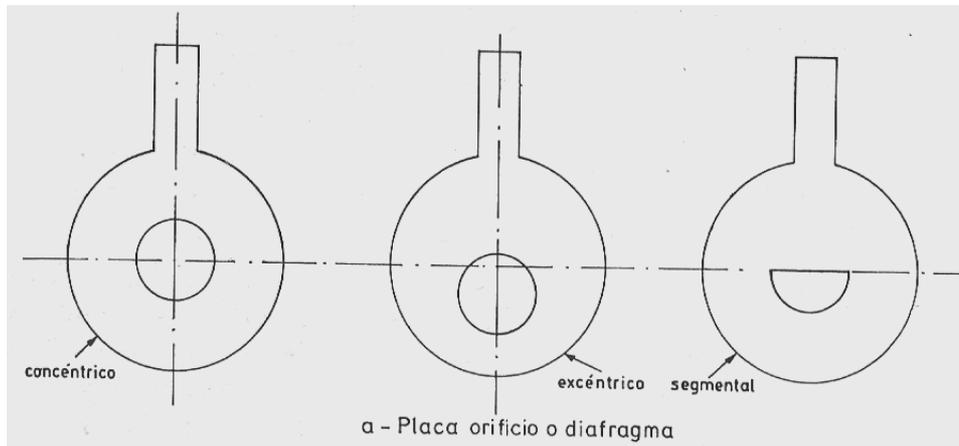


Figura C.2

El orificio de la placa, puede ser, de izquierda a derecha: *concéntrico*, *excéntrico* o *segmental*, con un pequeño orificio auxiliar, no significativo en el cálculo (no influye en el β) denominado de drenaje en la parte inferior, en los servicios de fluidos gaseosos, de forma tal que no influyan en la medición los condensados o de purga en la parte superior para los servicios de líquidos, de manera que no incidan en la respectiva medición, la posible fase gaseosa. El borde del orificio en la cara que da a la parte de alta presión debe ser perfectamente agudo (canto vivo) y el borde del lado de bajo presión se bisela para lograr una mayor definición en la contracción de la vena fluida.

La placa, generalmente se fabrica de acero inoxidable, siendo vital evitar que el material se desgaste o se corra, debido a que cualquier variación en el filo del orificio produce una modificación en el régimen de la contracción de la vena y modifica la calibración del equipo. La placa orificio es un elemento fácilmente reproducible al torno y de bajo costo, además es de práctica colocación. Todas estas ventajas han hecho que este dispositivo haya sido estudiado y experimentado intensamente. Debido a ello existen gran cantidad de datos empíricos para un gran número de aplicaciones y rangos de medida.

Ubicación de las tomas de presión en la placa orificio: como ya se dijo, la sección de la vena fluida continúa disminuyendo luego de haber pasado por el orificio de la placa, por lo tanto la presión será mínima está en la zona donde la vena fluida tiene su menor sección (vena contracta), la figura C.3 da una indicación didáctica de la distribuciones de la presiones, según la ubicación de la placa. La posición de la zona de menor presión de la sección fluida (vena contracta) depende de la velocidad del fluido a través del orificio y de la relación de los diámetros β , cuando disminuye la velocidad, la vena contracta se corre hacia la placa y viceversa, al igual que cuando la relación β aumenta, la contracción se hace menor y el plano de la vena contracta se mueve también hacia la placa y lo contrario cuando β disminuye, dicho plano se aleja de la placa.

Instrumentación y Control Automático

Unidad 8: Medición de Presión y Caudal

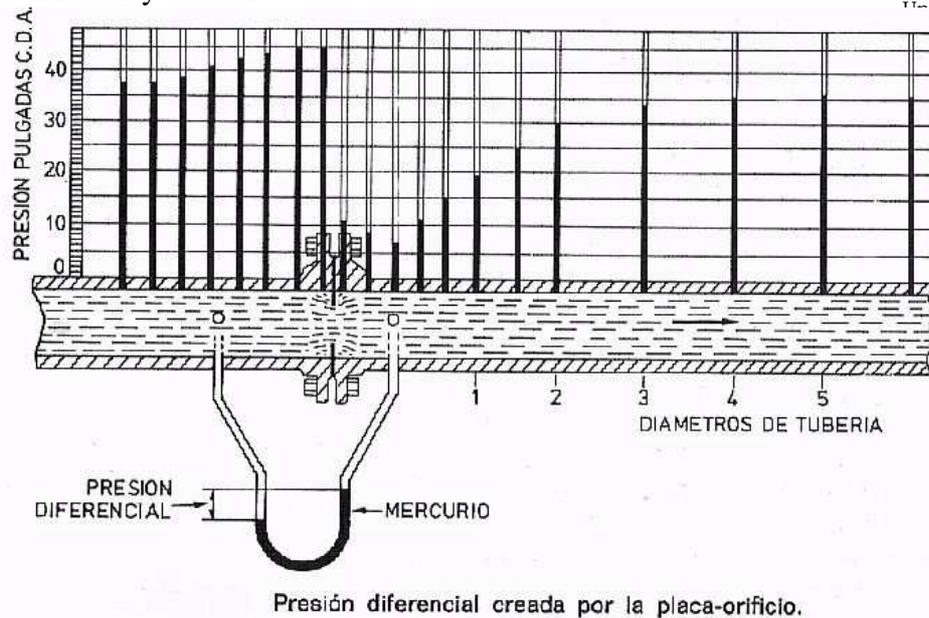


Figura C.3

Dada esta variabilidad de la posición de la vena contracta y por lo tanto de la máxima presión diferencial, lleva a normalizar las tomas de presión (orificios de conexión a la cañería que transmite la presión diferencial al transmisor de caudal (FT), como veremos más adelante, dicha disposición es un conjunto de cañerías y válvulas denominado “manifold o equipo de maniobra que vincula convenientemente las tomas de la tubería antes y después de la placa y las tomas de entrada al transmisor de caudal). Básicamente son cuatro, (Figura C.4) ellas son:

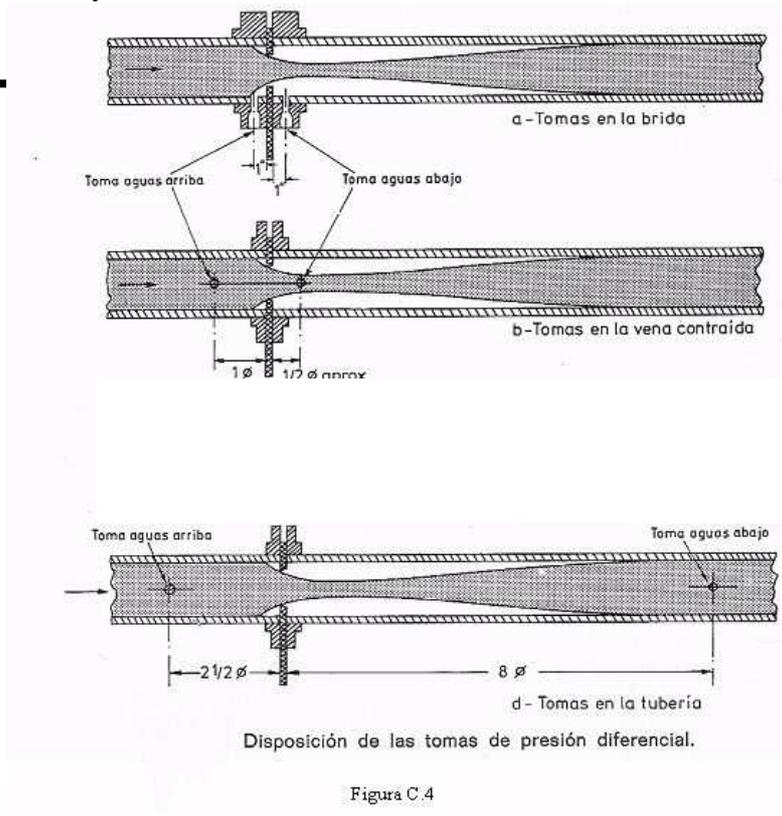
- Tomas en bridas (flange taps): es la más utilizada porque su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1” de distancia de la misma.
- Toma en la vena contraída o radial (vena contracta taps o radius taps): la toma posterior está situada en un punto donde se estima que la vena alcanza su diámetro mas pequeño (lo cual depende, como ya dijimos de la razón de diámetros y de la velocidad) y se presenta aproximadamente a $\frac{1}{2}$ diámetro de la tubería. La toma anterior se sitúa a 1 diámetro de la tubería.
- Tomas en la cámara anular (corner taps) : las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial. Rara vez de emplea.
- Tomas en la tubería (pipe taps): las tomas anterior y posterior están situadas a $2^{1/2}$ y 8 diámetros, respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado.

Instrumentación y Control Automático

Unidad 8: Medición de Presión y Caudal



Universidad Nacional de Cuyo
Facultad de Ingeniería



Tobera: la tobera está situada en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña, Figura 4. La tobera permite caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicios. Su pérdida de carga es de 30 a 80 % de la presión diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad, si bien, si estos sólidos son abrasivos, pueden afectar la precisión de elemento. El costo de la tobera es de 8 a 16 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de $\pm 0,95$ a $\pm 1,5\%$.

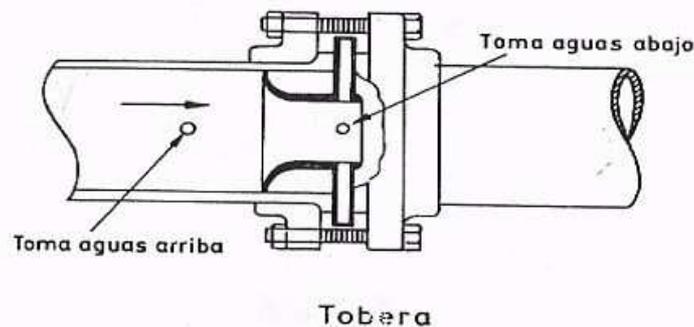


Figura C.5

Tubo Venturi: permite la medición de caudales 60 % superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20 % de la presión diferencial. Posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, si bien, los sólidos abrasivos influyen afectando la exactitud de la medida. El costo del tubo Venturi (Figura C.6) es elevado, del orden de 20 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de $\pm 0,75\%$.

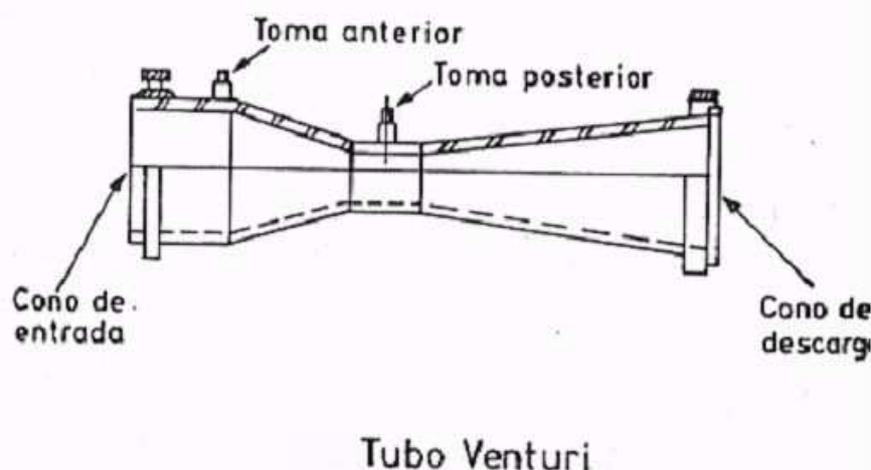


Figura C.6

Para el cálculo de las placa orificio, toberas y tubos Venturi se utilizan normas variadas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- ISO 5167-1980
- Norma ASME 19.5
- Norma A.P.I 2530
- Normas AGA-3 Y AGA-7

En estas normas se indican las pérdidas de carga de los elementos y las condiciones de instalación en tramos rectos de las tuberías con distancias mínimas a codos , válvulas, curvas etc.

Tubo Pitot: el tubo Pitot (Figura C.7) mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad.

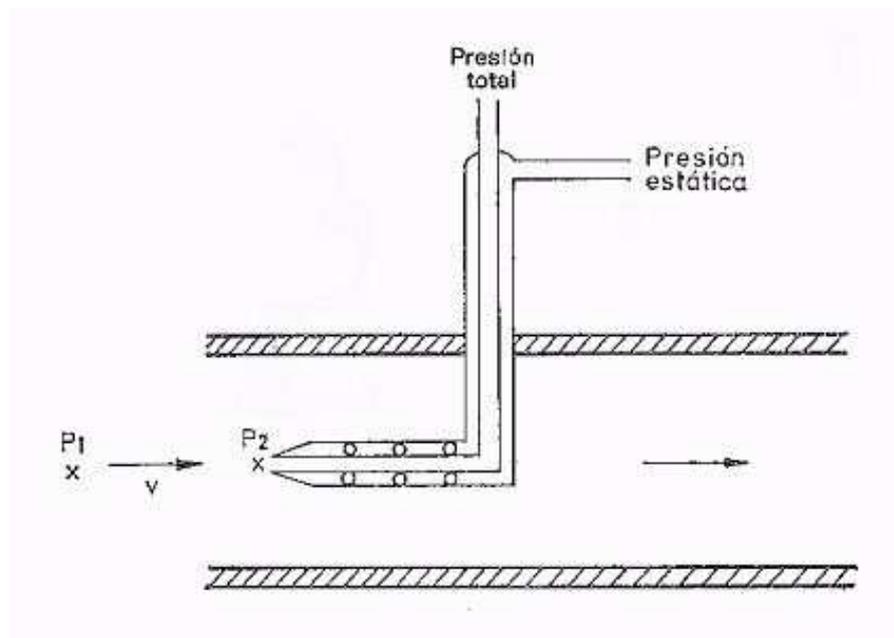


Figura C.6

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el punto P_1 y el P_2 obtenemos:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

Teniendo en cuenta que $v_2 = 0$; se tiene:

$$\frac{P_2}{\rho \cdot g} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g}$$

De la ecuación anterior se deduce que:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_2 - P_1)}{\rho}}$$

Donde:

P_2 = Presión de impacto o total absoluta en el punto donde el fluido anula su velocidad.

P_1 = Presión estática absoluta en el fluido.

ρ = Densidad

v_1 = Velocidad del fluido en el eje de impacto.

Se introduce un coeficiente de velocidad C para tener en cuenta la irregular distribución de velocidades, la rugosidad de la tubería, etc., por lo que resulta:

$$v_1 = C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_2 - P_1)}{\rho}}$$

Por lo que el caudal, en base a la ecuación de continuidad, será:

Siendo A , el área de pasaje de la tubería.

$$Q = A \cdot v_1 = A \cdot C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_2 - P_1)}{\rho}}$$

Ecuación C.13

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el *flujo sea laminar* disponiéndolo en un tramo reto de tubería.

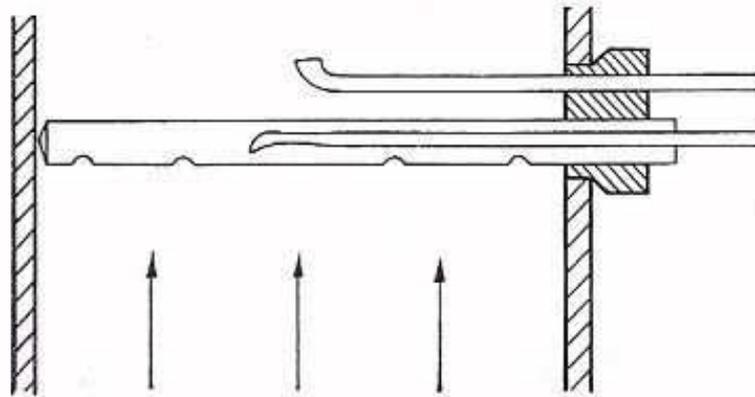
Su precisión es baja, del orden del 1.5 – 4% y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

Tubo Annubar : el tubo Annubar (Figura C.7) es una innovación del tubo Pitot y consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática.

El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería.. Estos anillos tienen áreas iguales.

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total con su orificio en el centro de la tubería y aguas debajo de la misma.

El tubo Annubar es de mayor precisión que el tubo Pitot, tiene una baja pérdida de carga y se emplea para la medida de pequeños o grandes caudales de líquidos o gases.



Tubo Annubar.

Figura C.7

Subunidad D: Medidores de caudal de turbina.

Los medidores de turbina consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal; Figura D.1:

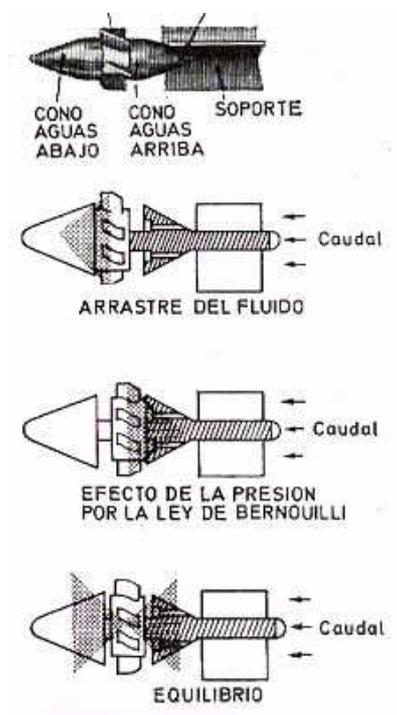


Figura D.1

La velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debida al cambio de área entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta. De este modo el rotor está en equilibrio hidrodinámico y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento que necesariamente se produciría.

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo induciendo en la bobina captora una corriente alterna que, por lo tanto es proporcional al giro de la turbina.

En el tipo inductivo el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captora exterior.

En ambos casos, la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal siendo del orden de 250 a 1200 ciclos / segundo.

Es adecuado para la medida de caudales de líquidos limpios o filtrados. La Figura D.2 muestra una turbina con su captor inserta en un carrete bridado.

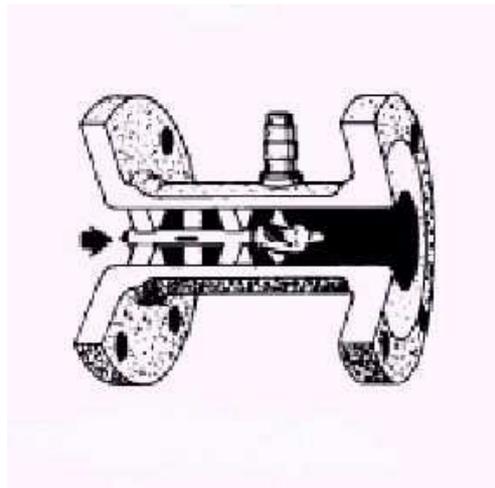


Figura D.2

La precisión es muy elevada, del orden de $\pm 0.3\%$. La máxima precisión se consigue con un régimen laminar.

Subunidad E: Medidores de caudal magnéticos.

En el medidor magnético, Figura E.1, el conductor es el líquido y E_s la señal generada en términos de tensión, esta señal es captada por los electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos. Realmente la única zona del líquido en movimiento que contribuye con la mencionada f.e.m es la que une en línea recta a los dos electrodos, B es la densidad del campo magnético creado por medio de la

bobina de campo y L , es el diámetro de la tubería y v es la velocidad del fluido a través del medidor, entonces, la fórmula de caudal que se obtiene a partir de la Ley de Faraday es la siguiente:

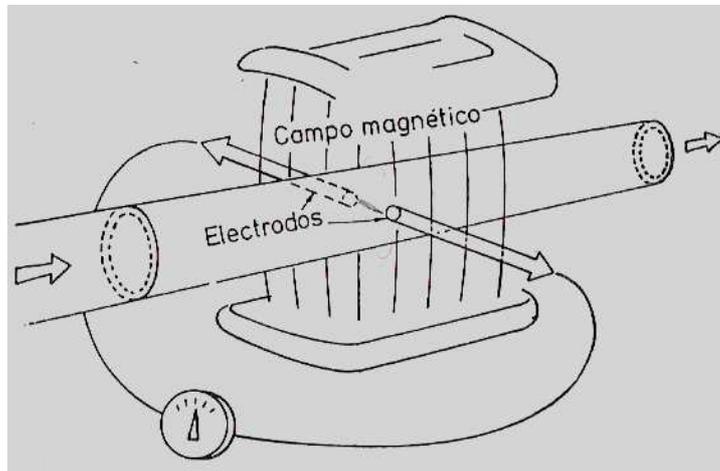


Figura E.1

$$E_s = K_m \cdot B \cdot L \cdot v \quad \rightarrow v = \frac{E_s}{K_m \cdot B \cdot L}$$

Siendo:

E_s = tensión generada en el conductor.

K_m = constante

B = densidad del campo magnético.

L = longitud del conductor.

v = velocidad del movimiento.

Pero dado que

$$Q = v \cdot A = v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \rightarrow Q = \frac{E_s}{K_m \cdot B \cdot L} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = K \cdot \frac{E_s}{B} \cdot D$$

Ecuación E.1

Donde:

$$K = \frac{\pi}{4 \cdot K_m}$$

A : área de la tubería

D : diámetro de la tubería y

Subunidad F: Medidores de caudal máxicos basado en el efecto o principio de Coriolis.

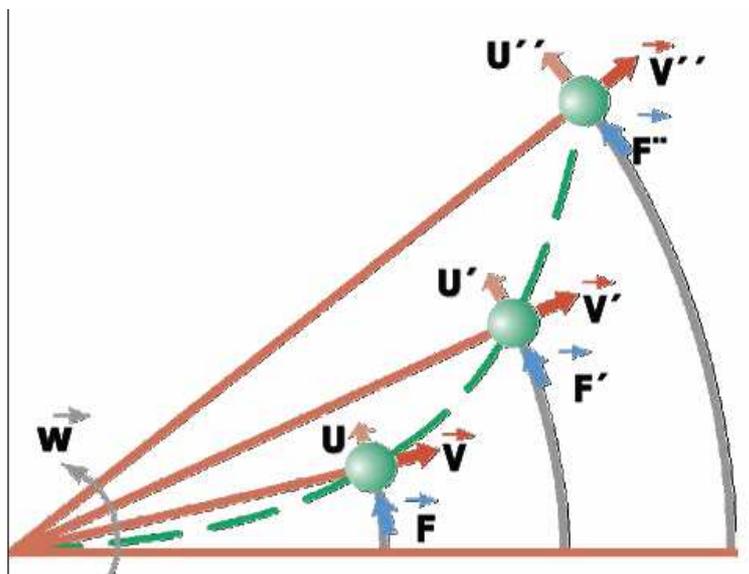
Introducción: Este medidor está adquiriendo cada vez más popularidad y su uso se está extendiendo en detrimento de la medición volumétrica de un caudal, esto es así ya que esta última varía en función de la temperatura para los líquidos y de la temperatura y presión para los gases. Si bien se puede “normalizar” a 0 °C y 1 atmósfera o su equivalente anglosajón de “estandarización” a 60 °F y 1 atmósfera, implica la medición simultánea de temperatura y presión en la línea para referirlos a algunos de los sistemas de referencia.

Esto es particularmente importante al medir fluidos costosos en transacciones de compra – venta, en muchos casos con un cuadro de medición en cada lado que deben guardar una mínima diferencia entre ellos previamente acordada entre las partes.

Todo esto hace interesante este medidor, que para entenderlo y siguiendo a Creus diremos que:

“El *medidor de Coriolis* se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795-1843) que observó que un objeto de masa (m), *una bola por ejemplo*, que se desplaza con una velocidad lineal (V) a través de una superficie giratoria que gira con velocidad constante angular constante W , experimenta una velocidad tangencial U (velocidad angular por radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración y por lo tanto, una fuerza sobre su masa. Como el radio de giro va aumentando gradualmente, la velocidad tangencial también varía, con lo que se concluye que una variación de velocidad comporta una aceleración, la que a su vez es debida a una fuerza que actúa sobre la bola. Estas son, respectivamente, la aceleración y la fuerza de Coriolis”

$$F_c = 2 \cdot m \cdot W \times V$$



la F_c está dada por la 2ª Ley de Newton, para esa masa unitaria m (la bola) y por la no menos importante aceleración de Coriolis, representada por el producto vectorial:

$$W \times V$$

Asimismo se debe hacer notar que existiría una desaceleración si invertimos el sentido del vector velocidad V , la velocidad tangencial U iría disminuyendo conforme nos acercáramos al centro. Ver y analizar el gráfico anterior.

Teniendo en cuenta lo antes dicho, la aplicación industrial se basa en obtener una inversión de las velocidades lineales de fluido con cierta velocidad lineal v , mediante la desviación provocada por un tubo en forma de omega, de longitud R y radio r , sometido a una vibración controlada ω perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, la que crea una fuerza de aceleración en el tramo recto de la tubería de entrada del fluido de longitud L y una fuerza de desaceleración en el tramo recto de la tubería de salida y con igual longitud L , con lo que se genera un par, cuyo sentido va variando de acuerdo a la vibración, produciendo una deformación angular o ángulo de torsión del tubo, dicho ángulo *es directamente proporcional a la masa instantánea del fluido circulante*.

CAUDALIMETRO MASICO (POR EL PRINCIPIO DE CORIOLIS)

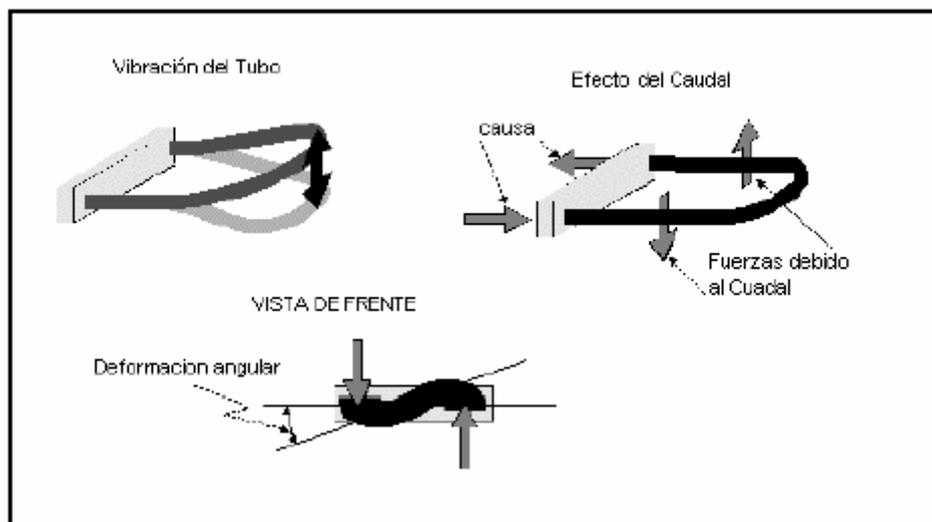


Figura F.1

La fuerza F_c de Coriolis, estaría expresada por:

$$F_c = 2 \cdot m \cdot \omega \times v$$

Siendo:

- m = masa del fluido contenida en el tubo recto de longitud L .
- ω = velocidad angular (vibración 80 a 100 Hz).
- v = velocidad lineal del fluido.

La Figura F.2 da un mayor detalle de la tecnología de este medidor, comenzando por el radio r del tramo circular y el ángulo θ de torsión del tubo por efecto del par M , que sería:

$$M = 2 \cdot F_c \cdot r = 4 \cdot m \cdot \omega \cdot v \cdot r = 4 \cdot \omega \cdot r \cdot W$$

Donde W es el caudal másico (unidad de masa / unidad de tiempo), recordar que m es la masa del fluido sobre una longitud L , que multiplicado por $v = L/t$ nos da masa / t o sea el caudal másico W .

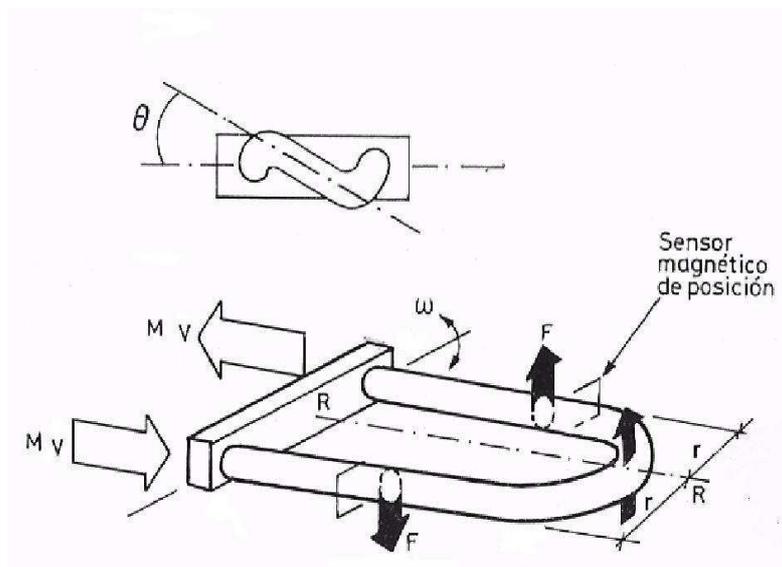


Figura F.2

A su vez si K_s es la constante de elasticidad del tubo y θ el ángulo de torsión, ya comentado, M estaría expresado también por:

$$M = K_s \cdot \theta$$

Igualando y despejando W , se tiene que:

$$W = \frac{K_s \cdot \theta}{4 \cdot \omega \cdot r}$$

En la Figura F.2 se observan dos sensores magnéticos de posición que miden el ángulo de torsión θ y combinan dos intervalos de tiempo, uno del movimiento hacia abajo del tubo y el otro del movimiento hacia arriba.

Para que se entienda mejor este fenómeno, hay que ver que cada sensor magnético capta una oscilación con una cierta amplitud y período, que para un determinado caudal, resultan iguales en ambos tramos rectos, pero desfasados en un cierto tiempo Δt .

Esto es, cada vez que el sensor de flujo entrante capta un máximo superior, pasa un cierto tiempo Δt para que suceda lo mismo con el sensor de flujo saliente.

En otras palabras son dos trenes de pulsos iguales pero desfasados en Δt .

La diferencia en tiempo Δt de las señales de los sensores magnéticos de posición está relacionada con θ y con la velocidad v_i del tubo en su punto medio, según:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v_i}{2 \cdot r} \cdot \Delta t$$

y como θ es pequeño, resulta que:

$$\theta = \frac{L \cdot \omega}{2 \cdot r} \cdot \Delta t$$

combinando ahora las expresiones de W y θ , resulta:

$$W = \frac{K_s \cdot L}{8 \cdot r^2} \cdot \Delta t$$

Lo que indica que el caudal másico es sólo proporcional al intervalo de tiempo y a las constantes del tubo e independiente de las vibraciones ω .

Se comprueba que:

- A caudal cero, es decir, cuando el fluido no circula, los dos tramos del tubo oscilan en fase.
- La diferencia de fase entre los tramos rectos del tubo aumenta con el caudal másico.

De este modo la diferencia de las ondas se traducen en impulsos que alimentan un integrador lineal que carga un circuito analógico o digital, siendo las opciones de salida: frecuencia, 4-20 mA o protocolos HART, Modbus, Fieldbus, Profibus, etc.



Figura F.3

La Figura F.3 muestra un caudalímetro másico basado en efecto Coriolis, observar el transmisor asociado con algunas de las opciones de señales de salidas ya mencionadas.

Ventajas:

- * Su salida es lineal con el caudal másico.
- * No requiere compensación por variaciones de temperatura o presión
- * Es adecuado para casos de viscosidad variable
- * Permite la medición de caudales másicos de líquidos difíciles de medir: adhesivos, nitrógeno líquido, etc.

Desventajas:

- * Es muy voluminoso.
- * No es apto para caudales elevados.

Profesor Titular: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi
Profesor Adjunto: Ing. María Susana Bernasconi
JTP: Ing. Esther Bibiana Castiglione
Ayudante Alumno: José Carlos Cotiñas