

TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA E INSTRUMENTAL NECESARIO DISPONIBLE EN EL MERCADO

Luis GARCÍA GUTIÉRREZ*

(*) Jefe Laboratorio de Agua. Centro Español de Metrología. C/del Alfar, 2
28760 TRES CANTOS (MADRID)

RESUMEN

La selección eficaz de un medidor de caudal exige un conocimiento práctico de la tecnología del medidor, además de un profundo conocimiento del proceso y del fluido que se quiere medir.

Cuando la medida del caudal se utiliza con el propósito de facturar un consumo, deberá ser lo más precisa posible, teniendo en cuenta el valor económico del fluido que pasa a través del medidor, y la legislación obligatoria aplicable en cada caso.

En este estudio se examinan los conceptos básicos de la medida de caudal y las características de los instrumentos de medida.

Entre los principales medidores que se estudian se citan, en primer lugar, los medidores de presión diferencial. Después se estudian los medidores con accionamiento mecánico, es decir, los medidores de desplazamiento positivo y los medidores de tipo turbina, para finalizar con los medidores de caudal de tipo electromagnético y los medidores de tipo ultrasónico.

Aunque los medidores de tipo másico no se abordan, ya que la ponencia trata de medidores de caudal de tipo volumétrico, en ocasiones es más importante conocer el caudal másico que el caudal volumétrico, principalmente en la industria química, donde es necesario conocer los caudales másicos con el fin de determinar balances energéticos en las plantas de proceso.

Se indican también las ventajas e inconvenientes de emplear uno u otro tipo de medidor de caudal, tanto técnica como económicamente.

Al final del estudio, se incluye una lista de referencias bibliográficas sobre los temas tratados.

Aunque se hace referencia a diferentes tipos de medidores de caudal, es obvio que no todos están contemplados en este estudio, dada la amplia variedad de los mismos.

MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Introducción

La medida de caudal en conducciones cerradas, consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por la conducción por unidad de tiempo.

Los instrumentos que llevan a cabo la medida de un caudal se denominan, habitualmente, caudalímetros o medidores de caudal, constituyendo una modalidad particular los contadores, los cuales integran dispositivos adecuados para medir y justificar el volumen que ha circulado por la conducción.

Los medidores de caudal volumétrico pueden determinar el caudal de volumen de fluido de dos formas:

- directamente, mediante dispositivos de desplazamiento positivo, o
- indirectamente, mediante dispositivos de: presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, etc.

Puesto que la medida de caudal volumétrico en la industria se realiza, generalmente, con instrumentos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido, abordaremos en primer lugar los medidores de presión diferencial.

Esta clase de medidores presenta una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, creando una diferencia de presión estática entre las secciones aguas arriba y aguas abajo del medidor.

Principales medidores de presión diferencial

Entre los principales tipos de medidores de presión diferencial se pueden destacar los siguientes:

placas de orificio,
toberas,
tubos Venturi,
tubos Pitot,
tubos Annubar,
codos,
medidores de área variable,
medidores de placa.

Se estima que, actualmente, al menos un 75% de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular la placa de orificio.

Las principales ventajas de dichos medidores son:

- su sencillez de construcción, no incluyendo partes móviles,
- su funcionamiento se comprende con facilidad,
- no son caros, particularmente si se instalan en grandes tuberías y se comparan con otros medidores,
- pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos, y
- hay abundantes publicaciones sobre sus diferentes usos.

Sus principales desventajas son:

- la amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores,
- pueden producir pérdidas de carga significativas,
- la señal de salida no es lineal con el caudal,
- deben respetarse unos tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor que, según el trazado de la tubería y los accesorios existentes, pueden ser grandes,
- pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas,
- la precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si, como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar.

Placas de orificio

La placa de orificio consiste en una placa perforada que se instala en la tubería.

El orificio de la placa, como se muestra en la *figura 1*, puede ser: concéntrico, excéntrico y segmental.

Con el fin de evitar arrastres de sólidos o gases que pueda llevar el fluido, la placa incorpora, normalmente, un pequeño orificio de purga.

Entre los diversos perfiles de orificio que se utilizan, según se muestra en la *figura 2*, se pueden destacar los siguientes: de cantos vivos, de cuarto de círculo y de entrada cónica.

Fig. 1. Tipos de orificio.

El más utilizado es el de cantos vivos, aunque también se usan las placas de cuarto de círculo y las de entrada cónica, especialmente cuando el fluido es viscoso.

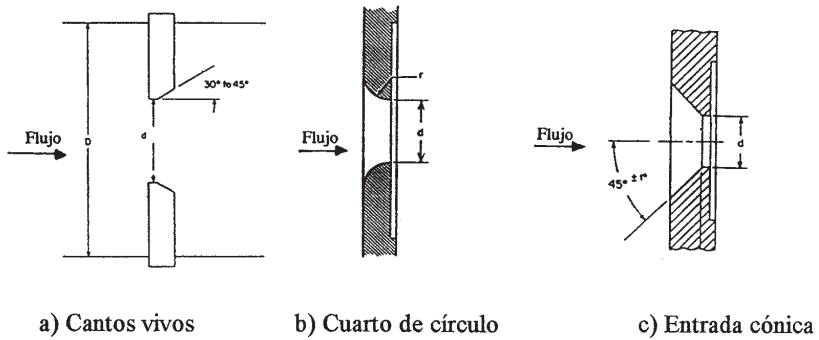


Fig. 2. Perfiles de orificios.

Para captar la presión diferencial que origina la placa de orificio, es necesario conectar dos tomas, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa. La disposición de las tomas, según se muestra en la figura 3, puede ser: en las bridas, en la vena contraída, y en la tubería.

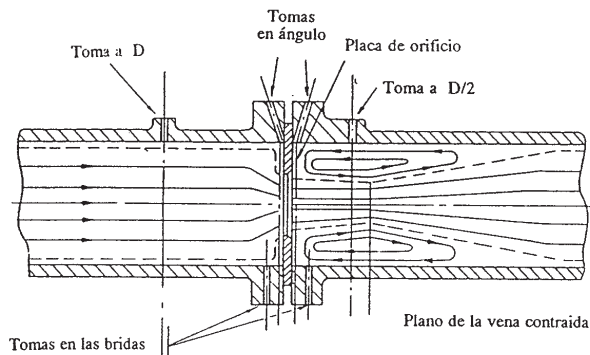


Fig. 3. Tomas de presión alternativas.

Las tomas en la brida se usan para tamaños de tubería de 2 in (50,8 mm) o superiores.

En el caso de las tomas en la vena contraída, la toma antes de la placa se sitúa a 1 in (25,4 mm) de distancia de la placa, mientras que la toma posterior se debe situar en el punto de mínima presión, donde la vena alcanza su diámetro más pequeño.

Las tomas en la tubería se sitúan a $2 \frac{1}{2}$ y 8 diámetros de tubería respectivamente, antes y después de la placa de orificio.

Toberas

La tobera presenta una entrada curvada que se prolonga en un cuello cilíndrico, siendo el coeficiente de descarga similar al del tubo Venturi. Sin embargo, la caída de presión es del mismo orden que en la placa de orificio, para el mismo caudal y con el mismo tamaño de tubería.

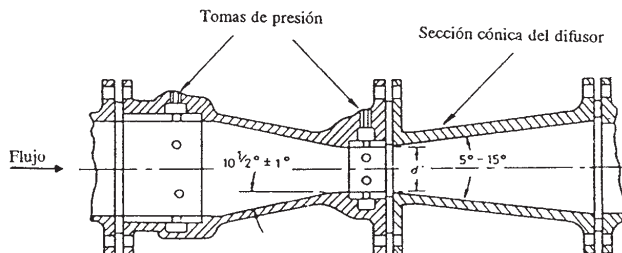
En la *figura 4* se muestran dos tipos de toberas normalizadas. Con este tipo de tobera se utilizan,

normalmente, tomas de presión en ángulo, tal como se indica en la figura.

Fig. 4. Tobera ISA 1932.

Tubos Venturi

En la *figura 5* se muestra el perfil de un tubo Venturi clásico, donde se puede apreciar la

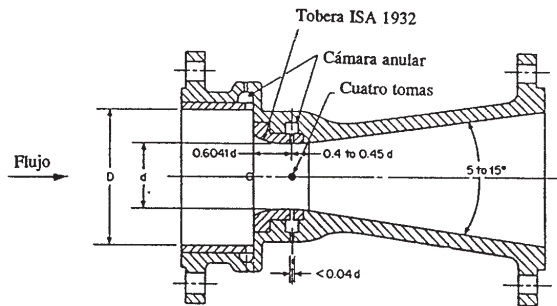


disposición de las tomas de presión para determinar la presión diferencial.

Fig. 5. Tubo Venturi.

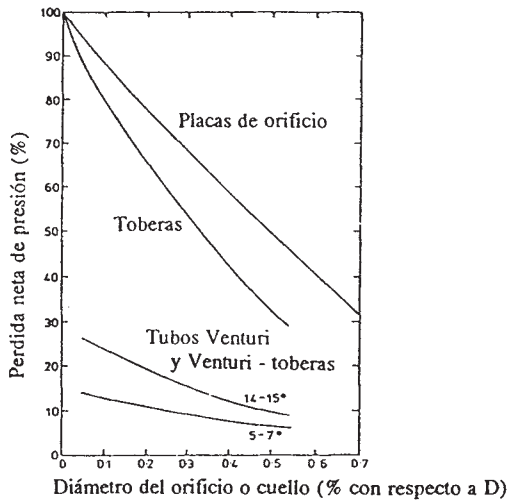
Como se aprecia en la figura se pueden destacar tres partes fundamentales: a) una sección de entrada cónica convergente en la que la sección transversal disminuye, lo que se traduce en un aumento de la velocidad del fluido y una disminución de la presión; b) una sección cilíndrica en la que se sitúa la toma de baja presión, y donde la velocidad del fluido se mantiene prácticamente constante, y c) una tercera sección de salida cónica divergente en la que la sección transversal aumenta, disminuyendo la velocidad y aumentando la presión. La incorporación de esta sección de salida permite una recuperación de la mayor parte de la presión diferencial producida y, por tanto, un ahorro de energía.

Con el fin de reducir las pérdidas de carga causadas por una tobera, puede acoplarse a continuación de la tobera una sección divergente similar a la utilizada para un tubo Venturi, resultando una combinación que se denomina *Venturi-tobera*, como se muestra en la figura 6,



donde pueden apreciarse las tomas de presión.

Fig. 6. Combinación Venturi-tobera.



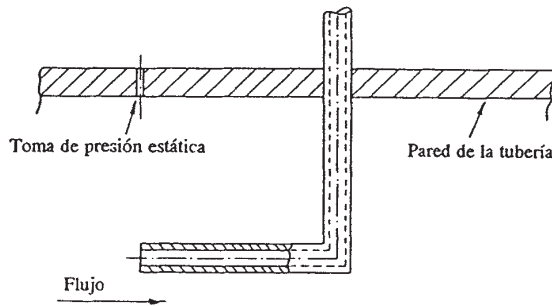
En la figura 7 se muestra una comparación entre varios elementos de presión diferencial con respecto a la recuperación de la presión.

Fig. 7. Comparación entre diferentes dispositivos de presión diferencial con respecto a la recuperación de la presión.

Las principales limitaciones de los tubos Venturi son su elevado coste y la longitud necesaria para su instalación, sobre todo para grandes tamaños de tubería. Sin embargo, debido a su baja pérdida de carga, son justificados en casos donde tienen que bombearse grandes cantidades de líquido de forma continua. Cuando la pérdida de carga no es importante, suele prescindirse del tubo Venturi y sustituirse por una placa de orificio debido a su menor coste y mayor facilidad de instalación y mantenimiento.

Tubo Pitot

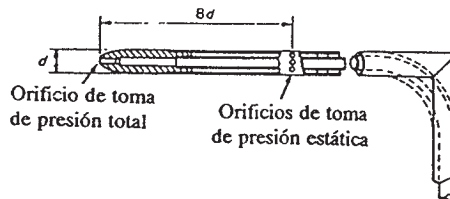
El tubo de Pitot es quizá la forma más antigua de medir la presión diferencial y también conocer la velocidad de circulación de un fluido en una tubería. En la *figura 8* se muestra, en su forma más sencilla, un pequeño tubo con la entrada orientada en contra del sentido de la corriente del fluido. La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto



de estancamiento, convirtiendo su energía cinética en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot.

Fig. 8. Tubo Pitot en su forma más sencilla.

En la práctica se emplea un diseño, como se muestra en la *figura 9*, con dos tubos concéntricos,



el interior que actúa de tubo de Pitot y el exterior como un medio de medir la presión estática.

Fig. 9. Tubo de Pitot clásico.

Los tubos de Pitot son instrumentos sencillos, económicos y disponibles en un amplio margen de tamaños. Si se utilizan adecuadamente pueden conseguirse precisiones moderadas y, aunque su uso habitual sea para la medida de la velocidad del aire, se usan también, con la ayuda de una técnica de integración, para indicar el caudal total en grandes conductos y, prácticamente, con cualquier fluido.

Probablemente la principal desventaja sea su dificultad para medir bajas velocidades del aire. Para líquidos quizás el principal problema sea la rotura de la sonda.

Tubo Annubar

El tubo Annubar es una innovación del tubo de Pitot. En la *figura 10* se muestra un tubo Annubar clásico, donde se aprecia un tubo exterior, situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería, y dos tubos interiores. El tubo exterior presenta cuatro orificios en la cara aguas arriba de la corriente, que se utilizan para interpolar los perfiles de velocidad y realizar un promedio, y otro orificio en el centro del tubo pero en la cara aguas abajo de la corriente.

Fig. 10. Tubo Annubar.

De los dos tubos que están en su interior, uno sirve para promediar las presiones obtenidas en los cuatro orificios, midiendo la presión total, mientras que el otro tubo, que se encuentra en la parte posterior, mide la presión estática en el orificio central aguas abajo de la corriente.

Existen diferentes tipos de tubos Annubar, cuya selección depende del tamaño de la línea y su aplicación.

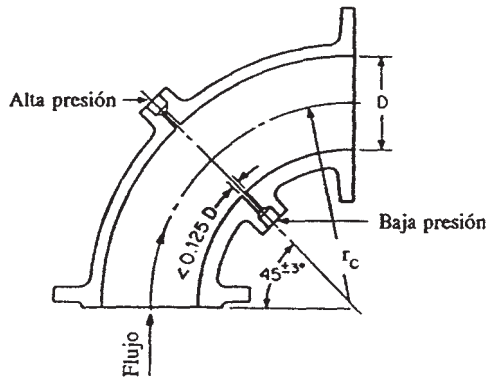
El tubo Annubar tiene mayor precisión que el tubo de Pitot, así como una baja pérdida de carga, utilizándose para la medida de pequeños y grandes caudales de fluidos.

Codos

Cuando un fluido circula por el codo de una tubería, está sujeto a una aceleración angular. La fuerza centrífuga resultante crea una presión diferencial entre el radio interior y el radio exterior. La raíz cuadrada de esta presión diferencial es proporcional al caudal, siendo la base fundamental de estos medidores de caudal.

En la *figura 11* se muestra un codo con las tomas de alta y baja presión.

Fig. 11. Tomas de presión en un codo.



Las tomas en el codo presentan la ventaja de que como la mayoría de las configuraciones de tuberías tienen codos, pueden situarse en ellos las tomas de presión. Esto permite una instalación económica, sin pérdidas de presión, y sin introducir obstrucciones en la línea. Debe ponerse especial cuidado para alinear los orificios de las tomas de presión en ambos planos.

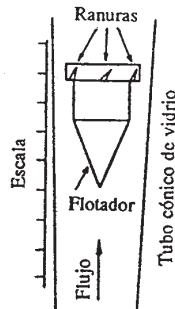
Si el codo está calibrado, su precisión puede ser comparable a la de una placa de orificio.

Medidores de área variable

Los medidores de área variable funcionan sobre la base de mantener una presión diferencial constante, permitiendo aumentar el área eficaz de flujo con el caudal.

Existen varios tipos de medidores de orificio variable, pero el más utilizado es el que está formado por un tubo cónico de eje vertical y un flotador. Como se muestra en la *figura 12*, el fluido circula en sentido ascendente por el tubo desplazando un flotador que, habitualmente, lleva unas ranuras que dan lugar a que el flotador gire, proporcionándole la estabilidad y efecto de centrado necesario. Esta rotación es la que ha dado origen al nombre de rotámetro.

Fig. 12. Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador.



Cuando no hay flujo el flotador descansa en la parte baja del tubo, pero al pasar el fluido hace ascender el flotador de su posición de reposo, a fin de mantener la caída de presión a través del

flotador en equilibrio con los efectos de empuje hidrostático y gravitatorio que actúan sobre el mismo. Puesto que el peso del flotador sumergido es una constante para un fluido dado, la caída de presión también tiene que permanecer constante. Por consiguiente, cuando el caudal aumenta el flotador ascenderá en el tubo con el fin de proporcionar una sección anular de paso mayor, para que el fluido pueda pasar a través de ella.

La altura que alcanza el flotador es así una indicación del caudal que está pasando y, en el caso de tratarse de un tubo transparente, puede graduarse directamente sobre el tubo en unidades de caudal. Cuando las condiciones de trabajo son más severas, el tubo se fabrica de metal.

La precisión que puede conseguirse con los medidores de área variable no suele ser mejor que $\pm 2\%$ de desviación a plena escala, por lo que no son aconsejables cuando se requiere una elevada precisión.

Medidores de placa

El principio de funcionamiento del medidor de placa de resistencia al avance de la corriente se muestra en la *figura 13*.

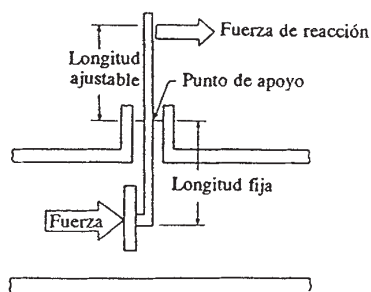


Fig. 13. Medidor de placa.

Una placa circular se mantiene en el centro de la tubería por medio de una barra normal al flujo. Teniendo en cuenta que la aceleración del fluido en el espacio anular entre la placa y la tubería crea una presión reducida sobre la cara aguas abajo de la placa, la fuerza ejercida por el fluido sobre la placa será la diferencia entre las presiones sobre las superficies aguas arriba y aguas abajo de la placa, la cual tiende a mover la placa en la dirección del flujo. A esta fuerza se opone un par antagonista producido por la articulación, y el movimiento es detectado por un elemento secundario, es decir, un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas o un transductor eléctrico de galgas extensométricas, situado al final de la barra soporte. La señal del dispositivo de equilibrio de fuerzas es proporcional a la fuerza sobre la placa, y por tanto proporcional al cuadrado del caudal.

Presenta la ventaja de no precisar conexiones para la medida de la presión diferencial, pero debido a la fuerza que tiene que soportar el sistema de equilibrio de fuerzas, está limitada a tamaños de tubería hasta 100 mm.

MEDIDORES CON ACCIONAMIENTO MECÁNICO

Introducción

En este capítulo se incluirán los medidores con accionamiento mecánico, habitualmente de tipo rotativo, que miden el volumen total o el caudal volumétrico de un fluido circulando por una tubería.

Medidores de desplazamiento positivo

Los medidores de desplazamiento positivo miden la cantidad de fluido que circula por un conducto, dividiendo el flujo en volúmenes separados y sumando los volúmenes que pasan a través del medidor.

En cada medidor, se pueden destacar tres componentes comunes:

- cámara, que se encuentra llena de fluido,
- desplazador, que, bajo la acción del fluido circulando, transfiere el fluido desde el final de una cámara a la siguiente, y
- mecanismo (indicador o registrador), conectado al desplazador, que cuenta el número de veces que el desplazador se mueve de una parte a otra en la cámara de trabajo.

Un problema importante que se debe tener en cuenta al fabricar un medidor de desplazamiento positivo es conseguir una buena estanqueidad de las partes móviles, evitando un par de rozamiento inaceptable y que la cantidad de líquido de escape a través del medidor sea moderada. Por esta razón, es necesario calibrar el medidor de desplazamiento a varios caudales, dentro del margen de utilización, con un fluido de viscosidad conocida.

Medidores de desplazamiento positivo para líquidos

En principio, los medidores de desplazamiento positivo para gases deberían ser similares a los utilizados para líquidos, sin embargo, en la práctica hay una diferencia importante. La energía de un fluido en movimiento es proporcional a su densidad, lo que significa que un gas no puede suministrar con facilidad la energía suficiente para hacer funcionar un medidor con una mecánica compleja. Por consiguiente, los medidores de desplazamiento positivo para gases tienen que tener una baja resistencia a la fricción.

No obstante, en este estudio solo trataremos de los medidores de desplazamiento positivo para líquidos.

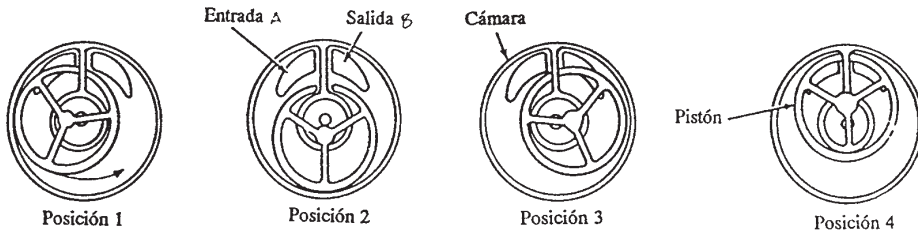
Dentro de los diferentes tipos de medidores para líquidos se considerarán los siguientes:

- medidores de tipo pistón,

- medidores de paletas deslizantes, y
- medidores de engranajes.

Los medidores de tipo pistón se utilizan, habitualmente, para medidas precisas de pequeños caudales, siendo una de sus aplicaciones en unidades de bombeo de distribución de petróleo. Los medidores de paletas deslizantes se usan para medir líquidos de elevado coste, siendo instalados, generalmente, en camiones cisternas para la distribución de combustible para la calefacción. Los medidores de engranajes encuentran aplicaciones para un amplio margen de líquidos y condiciones de funcionamiento, aunque la precisión de la medida no es tan elevada.

Medidor de pistón oscilante



En la *figura 14* se aprecia una sección transversal de un medidor de pistón oscilante mostrando las cuatro etapas de su ciclo de funcionamiento.

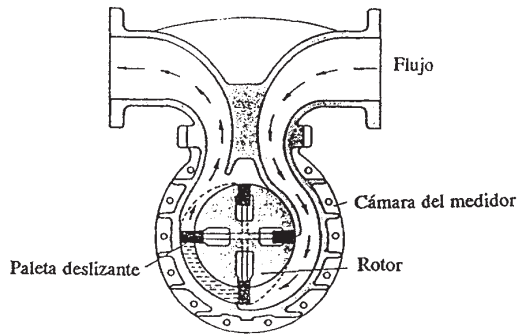
Fig. 14. Etapas de funcionamiento de un medidor de pistón oscilante.

Consiste de un pistón hueco montado excéntricamente dentro de un cilindro. El cilindro y el pistón tienen la misma longitud, pero el pistón, como se aprecia en la figura, tiene un diámetro más pequeño que el cilindro. El pistón, cuando está en funcionamiento, oscila alrededor de un puente divisor, que separa la entrada de la salida de líquido. Al comienzo de un ciclo el líquido entra al medidor a través de la puerta de entrada A, en la posición 1, forzando al pistón a moverse alrededor del cilindro en la dirección mostrada en la figura, hasta que el líquido delante del pistón es forzado a salir a través de la puerta de salida B, en la posición 4, quedando el dispositivo listo para comenzar otro ciclo.

Medidores de paletas deslizantes

En la *figura 15* se muestra un medidor de paletas deslizantes, que consta de un rotor con unas paletas, dispuestas en parejas opuestas, que se pueden deslizar libremente hacia adentro y hacia afuera de su alojamiento. Los miembros de las paletas opuestas se conectan rígidamente mediante varillas, y el fluido circulando actúa sobre las paletas sucesivamente, provocando el giro del rotor.

Mediante esta rotación el líquido se transfiere desde la entrada a la salida a través del espacio entre las paletas. Como éste es el único camino para el paso del líquido desde la entrada a la salida, contando el número de revoluciones del rotor, puede determinarse la cantidad de líquido que ha pasado. El cierre se lleva a cabo por la acción de las paletas sobre la pared de la cámara,



mediante una combinación de presión de líquido y fuerzas centrífugas, auxiliado por el apriete, mediante resortes, de las paletas contra la pared de la cámara. Esto ayuda a mantener en valores aceptables cualquier escape de líquido que pueda producirse a través de las paletas.

Fig. 15. Medidor de paletas deslizantes.

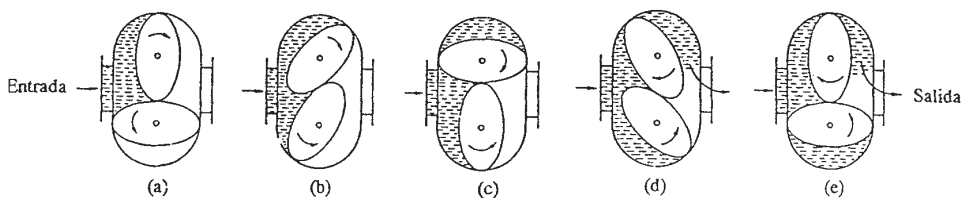
Medidores de engranajes

Entre los más importantes medidores de engranajes se pueden destacar los siguientes:

- medidores de rueda oval, y
- medidores helicoidales.

Medidores de rueda oval

El medidor de rueda oval, que se muestra en la *figura 16*, dispone de dos ruedas ovales que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el flujo de líquido. La acción del líquido actúa de forma alternativa sobre cada una de las ruedas, dando lugar a un giro suave de un par prácticamente constante. Tanto la cámara de medida como

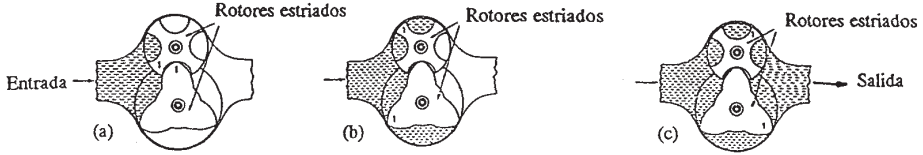


las ruedas están mecanizadas con gran precisión, con el fin de conseguir que el deslizamiento entre ellas se produzca con el mínimo rozamiento, sin que se formen bolsas o espacios muertos y desplazando la misma cantidad de líquido en cada rotación.

Fig. 16. Medidor de rueda oval.

La principal ventaja de estos medidores es que la medida realizada es prácticamente independiente de variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido.

Medidores helicoidales



En la *figura 17* se muestra un medidor de tipo helicoidal, cuyo funcionamiento es similar al de la rueda oval, por lo que no merece más detalles.

Fig. 17. Medidor de engranajes helicoidales.

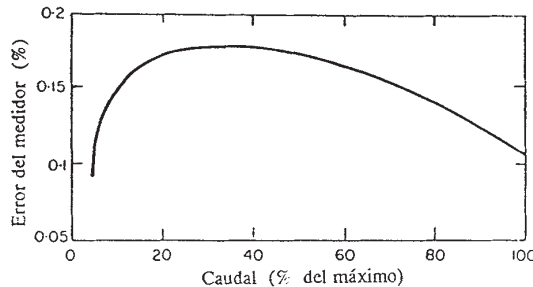
Características de comportamiento de los medidores de desplazamiento positivo

Como todos los dispositivos mecánicos complicados, los medidores de desplazamiento presentan resistencia a la fricción, la cual tiene que ser vencida por el fluido circulando. Para caudales muy bajos, el fluido no tiene energía cinética suficiente para hacer girar el rotor frente a esta fricción, que además incluye, en la mayoría de los medidores de desplazamiento, la resistencia ofrecida por el mecanismo articulado del contador, por lo que el fluido se desliza lentamente entre los componentes del medidor y la cámara, sin producir movimiento del rotor o pistón. El error del medidor, E, se define como,

$$E = \frac{Q_{Indicado} - Q_{real}}{Q_{real}} 100\%$$

de forma que, para estos caudales bajos, el error es grande y negativo.

Sin embargo, cuando el caudal aumenta este error negativo desaparece rápidamente, ya que la energía cinética del fluido aumenta con el cuadrado de su velocidad. Una condición cercana al equilibrio se alcanza cuando la fuerza directriz del fluido se equilibra por las diversas fuerzas de resistencia, y esto se mantiene para el margen de funcionamiento para un medidor bien



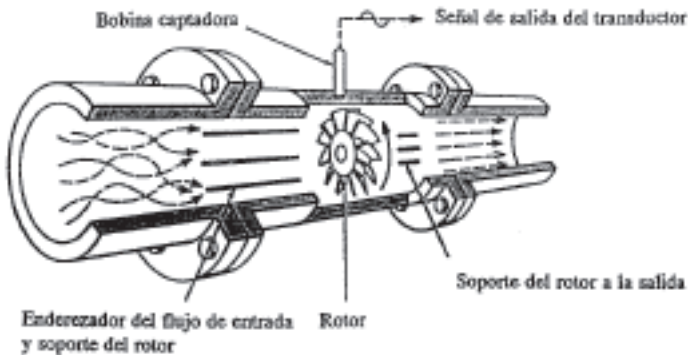
diseñado.

La *figura 18* presenta una curva de comportamiento para un medidor de paletas deslizantes.

Fig. 18. Curva de comportamiento de un medidor de paletas deslizantes.

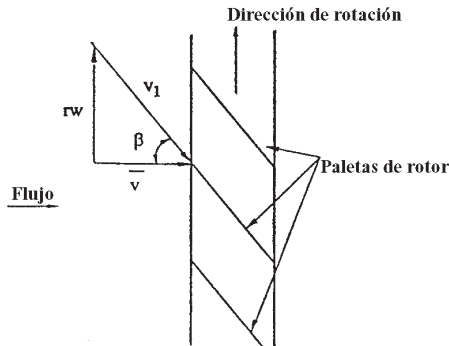
Medidores de turbina

Los medidores para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La *figura 19* muestra la sección transversal de un medidor de turbina típico para líquidos. Consta de una longitud de tubería en el centro de la cual hay un rotor de paletas múltiple, montado sobre cojinetes, para que pueda girar con facilidad, y soportado aguas arriba y aguas abajo por un dispositivo de centrado



tipo cruceta que, habitualmente, incorpora un enderezador de la vena fluida. La energía cinética del fluido circulando hace girar el rotor con una velocidad angular que, en el margen lineal del medidor, es proporcional a la velocidad media axial del fluido y, por tanto, al caudal volumétrico.

Fig. 19. Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.



Una teoría sencilla sobre el funcionamiento de los medidores de turbina puede comprenderse mediante la *figura 20*, que muestra un diagrama simplificado de la velocidad para una paleta de un medidor ideal.

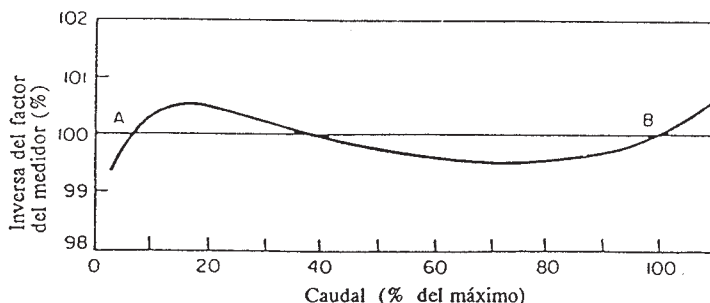
Fig. 20. Diagrama simplificado de la velocidad para un medidor de turbina ideal.

Los medidores de turbina para gas o líquido difieren fundamentalmente en el diseño del rotor.

Una salida mediante impulsos eléctricos se produce cuando se detecta el paso de cada paleta alrededor de uno o más sensores situados en el campo del medidor.

El punto más débil en un medidor de turbina para líquidos son los cojinetes, ya que tienen que soportar el peso del rotor.

Características de comportamiento



Para predecir la característica de comportamiento de un medidor de turbina es necesario que sea calibrado, de modo que la relación entre el número de impulsos emitidos y el volumen de fluido que ha pasado pueda determinarse experimentalmente. Esto da como resultado una curva de calibración de la forma mostrada en la *figura 21*.

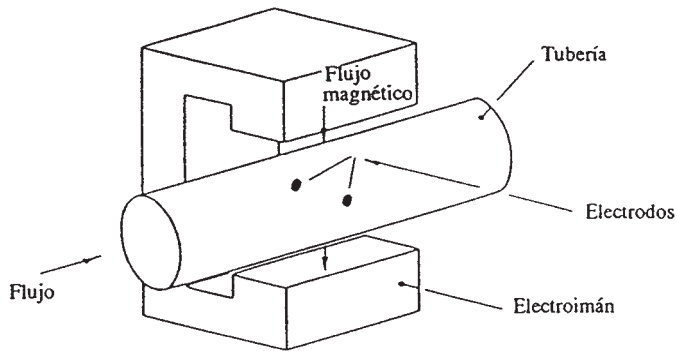
Fig. 21. Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos.

Se puede estimar que en el margen entre los puntos A y B el medidor de turbina tiene una salida lineal y el volumen de líquido que pasa a través del medidor es casi proporcional al número de impulsos recibidos, dejando de ser preciso para caudales inferiores al punto A y superiores al B.

OTROS MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

Medidores de caudal electromagnéticos

El medidor de caudal electromagnético utiliza el mismo principio básico que el electrogenerador, es decir, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento. Si el conductor es una sección de un líquido conductor circulando por un tubo aislado eléctricamente, a través de un campo magnético y se montan los electrodos diametralmente opuestos en la pared de la tubería, tal como se muestra en la *figura 22*, la fuerza electromotriz generada a través de los electrodos es directamente proporcional a la velocidad media del fluido.



Es importante señalar que la diferencia de potencial entre los electrodos es del orden de milivoltios, por lo que dicha señal tiene que ser amplificada mediante un dispositivo secundario denominado convertidor, que proporciona una señal de salida en miliamperios, en voltios o en impulsos.

Fig. 22 Elementos de un medidor electromagnético.

Puesto que los electrodos tienen que hacer un contacto con el fluido, su material tiene que ser compatible con las propiedades químicas del fluido que circula. Entre los materiales más utilizados se pueden citar los siguientes: acero inoxidable no magnético, platino/iridio, monel, hasteloy, titanio, y circonio para líquidos particularmente agresivos.

Entre las ventajas más fundamentales se pueden señalar las siguientes:

- No presentan obstrucciones al flujo, por lo que son adecuados para la medida de todo tipo de suspensiones, barros, melazas, etc.
- No dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en grandes tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña.
- Se fabrican en una gama de tamaños superior a la de cualquier otro tipo de medidor.
- No son prácticamente afectados por variaciones en la densidad, viscosidad, presión temperatura y, dentro de ciertos límites, conductividad eléctrica.
- No son seriamente afectados por perturbaciones del flujo aguas arriba del medidor.
- La señal de salida es, habitualmente, lineal.
- Pueden utilizarse para la medida del caudal en cualquiera de las dos direcciones.

Entre las desventajas se pueden destacar las siguientes:

- El líquido cuyo caudal se mide tiene que tener una razonable conductividad eléctrica. Para fines industriales el límite práctico es del orden de $10 \text{ } \mu\text{mho cm}^{-1}$. Esto significa que los líquidos acuosos pueden manejarse adecuadamente, lo que no ocurre con líquidos orgánicos.

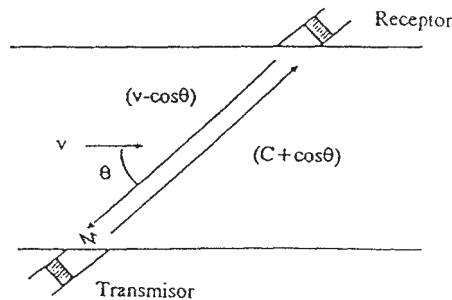
- La energía disipada por las bobinas da lugar al calentamiento local del tubo del medidor.

Medidores ultrasónicos

Dos tipos de medidores ultrasónicos son utilizados, fundamentalmente, para la medida de caudal en circuitos cerrados. El primero (tiempo de tránsito o de propagación) utiliza la transmisión por impulsos, mientras que el segundo (efecto Doppler) usa la transmisión continua de ondas.

Medidores ultrasónicos por impulsos

Los medidores ultrasónicos modulados por impulsos son los más precisos y se utilizan, preferentemente, con líquidos limpios, aunque algunos tipos permiten medidas de líquidos con cierto contenido de partículas y gas. El método diferencial de medida por tiempo de tránsito, se basa en un sencillo hecho físico. Si imaginamos dos canoas atravesando un río sobre una misma línea diagonal, una en el sentido del flujo y la otra en contra del flujo, la canoa que se desplaza en el sentido del flujo necesitará menos tiempo en alcanzar su objetivo.



Las ondas ultrasonoras se comportan exactamente de la misma forma

Las ecuaciones básicas son las mismas para ambos métodos de diferencia de frecuencia y tiempo de propagación. Como se muestra en la *figura 23*, un impulso ultrasónico se emite diagonalmente a través de la tubería.

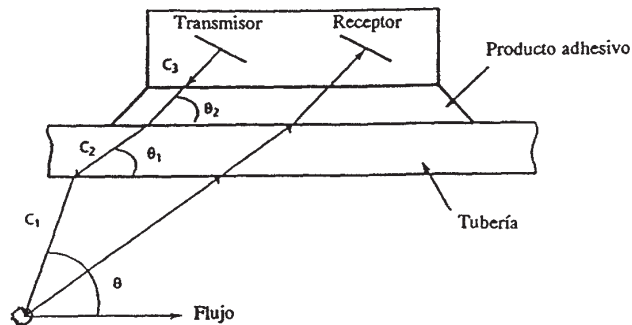
Fig. 23. Tiempo de desplazamiento del impulso.

Medidores ultrasónicos utilizando el efecto Doppler

El efecto Doppler puede entenderse fácilmente si se considera el cambio que se produce en la frecuencia cuando un tren se mueve hacia un observador con su bocina sonando. Cuando el tren se acerca, la bocina es percibida por el observador con una graduación de tono más alta, ya que la velocidad del tren da lugar a que las ondas sonoras sean más próximas que si el tren estuviera

parado. De igual manera, si el tren se aleja aumenta el espaciamento, dando como resultado una graduación de tono o frecuencia más baja. Este aparente cambio en la frecuencia se denomina efecto Doppler y es directamente proporcional a la velocidad relativa entre el objeto móvil, el tren, y el observador.

Los medidores ultrasónicos de tipo Doppler utilizan el concepto de que si se deja pasar el ultrasonido en un fluido en movimiento con partículas, el sonido será reflejado de nuevo desde las partículas. La variación de frecuencia del sonido reflejado será proporcional a la



velocidad de las partículas.

En la *figura 24* se muestra un cabezal individual transmitiendo con una frecuencia F_T y un ángulo θ . El sonido tiene que realizar un recorrido a través del encapsulado, el adhesivo, la pared de la tubería y el fluido. En cada límite de separación el sonido es refractado.

Fig. 24. Cabezal individual transmisor/receptor.

Al igual que en el caso de los medidores magnéticos, los medidores de caudal por ultrasonidos no presentan obstrucciones al flujo, no dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en grandes tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña. Los transductores son incorporados en el cuerpo del medidor, sin necesidad de juntas en contacto con el fluido. No se necesita tubería en derivación ni válvulas de aislamiento, ya que todos los elementos activos pueden reemplazarse sin contacto alguno con el líquido. Para tuberías de diámetros superiores a 400 mm ofrecen una solución competitiva.

Respecto a la precisión, los medidores de tipo magnético pueden llegar hasta un $\pm 0,25\%$ del caudal real, mientras que los de tipo de ultrasonidos hasta un $\pm 0,5\%$.

Su fácil instalación reduce los costes de mantenimiento, y además la medición, sin apenas pérdida de carga, reduce los costes energéticos.

Hidrantes

En su forma más sencilla, los hidrantes son una combinación de dos elementos en un mismo cuerpo, es decir, una válvula hidráulica y un contador de agua, como se muestra de forma

esquemática en la *figura 25*.



La válvula hidráulica tiene la actuación de apertura y cierre por membrana, lo que reduce el número de piezas que, habitualmente, se utilizan para esas funciones, simplificando con ello también el diseño global de la válvula. La actuación de apertura y cierre de la válvula se realiza mediante la propia presión del agua de la tubería.

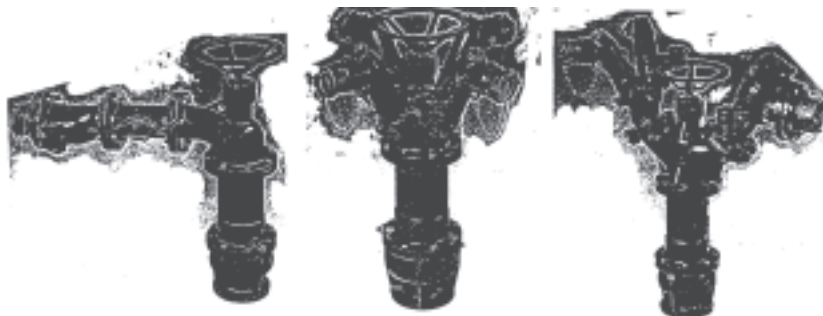
Fig. 25. Hidrante en su forma más sencilla.

El contador se basa en una hélice colocada en las líneas del flujo de agua, haciéndola girar al paso de la misma por la válvula, transmitiendo la rotación a los engranajes de un cabezal de registro mediante una transmisión magnética.

El cabezal dispone de dígitos para totalizar el volumen de agua que circula por la válvula. Gracias a la transmisión magnética, el cabezal y los engranajes funcionan sin mojarse, siendo la hélice y su eje las únicas partes móviles en contacto con el agua.

Al hidrante se le puede incorporar una válvula de solenoide para abrirlo y cerrarlo a distancia mediante una señal eléctrica.

Más completos que los anteriores, en cuanto a componentes se refiere, existen otro tipo de hidrantes, muy utilizados para el suministro de agua de riego simultáneamente a diversas parcelas de terreno, y que se muestran en la *figura 26*. Los elementos de que están integrados ejercen las siguientes funciones:



a) válvula de control, que se encuentra dentro de un alojamiento y donde sus partes internas

se mueven haciendo variar el caudal gradualmente al abrir o cerrar, y protegiendo la red de posibles golpes de ariete.

Fig. 26. Hidrantes con diferentes salidas.

b) contador, que se encuentra en derivación en conexión con una tobera, la cual se encuentra dentro de la tubería de salida. El totalizador ofrece una lectura directa, estando protegido contra la manipulación.

c) regulador/estabilizador de la presión, cuya misión es regular y estabilizar la presión aguas abajo, una vez que el flujo está abierto.

d) controlador del caudal, que está formado por un diafragma de goma calibrado. Cuando el caudal aumenta, el diafragma se deforma, alterando la apertura del caudal. Una serie de retenes permite usar el controlador hasta presiones de 12 bar.

REGLAMENTACIÓN EXISTENTE SOBRE CONTADORES DE AGUA FRÍA

Entre las normas comunitarias reguladoras de instrumentos de medida y métodos de control metrológico, se encuentra la Directiva 75/33/CEE, de 17 de diciembre de 1974, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre contadores de agua fría.

En el B.O.E. de 6 de marzo de 1989, se publicó la Orden de 28 de diciembre de 1988 por la que se regulan los contadores de agua fría, y que no tenía otro objeto que incorporar al derecho interno español la Directiva mencionada.

No obstante, esta disposición contempla solamente los contadores de agua fría que utilizan un procedimiento mecánico directo, en el que intervienen cámaras volumétricas de paredes móviles o la acción de la velocidad del agua sobre la rotación de un órgano móvil (turbina, hélice, etc.).

Por consiguiente, si se tiene en cuenta que la mayoría de los tipos de medidores destinados a la medida de consumos de agua, tanto de la extraída de un acuífero, como de la distribuida a los cultivos, etc., no están acogidos en la citada Orden, sería aconsejable la elaboración de la correspondiente legislación que recogiera a todos aquellos medidores que no están contemplados en la Orden de 28 de diciembre de 1988, ya que en el caso de que se destinen a facturar un consumo o a controlar las extracciones de los acuíferos, no estarían oficialmente respaldados a efectos de su legalización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ISO 4006 : 1991. *Measurement of fluid flow in closed conduits; vocabulary and symbols.*

UNE - EN 5167 - 1 : 1996. *Medición de caudal de fluidos mediante aparatos de presión diferencial. Parte 1: diafragmas, toberas y tubos de Venturi intercalados en conducciones en carga de sección circular (ISO 5167 - 1 : 1991).*

ISO 9951 : 1993. *Measurement of gas flow in closed conduits. Turbine Meters.*

UNE - EN 29104 : 1996. *Medida del caudal de los fluidos en conductos cerrados. Método para la evaluación del funcionamiento de caudalímetros electromagnéticos para líquidos (ISO 9104 : 1991).*

UNE - EN ISO 6817 : 1996. *Medida del caudal de líquidos en conductos cerrados. Método por caudalímetros electromagnéticos (ISO 6817 : 1992).*

ISO 2186 - 1973. *Fluid flow in closed conduits. Connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements.*

Spitzser, RW. (1990). *Industrial flow measurement.* Instrument Society of America.

Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología. Centro Español de Metrología (MOPTMA), 1ª ed., 1994.

Thompson, RJS. (1969). *Rotary positive displacement meters.* Institution of gas engineers seminar on gas measurement. University of Salford.

Shafer, MR. (1962). *Performance characteristics of turbine flowmeters.* Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, vol. 84, pp 471-485.

Bela, G, Liptak. (1969). *Instrument engineering handbook.* Vol. I, Process measurement.

Shercliff, JA. (1962). *The theory of electromagnetic flow measurement.* University Press, Cambridge.

Scott, RWW. (1967). *A practical assessment of the performance of electromagnetic flowmeters.* HMSO, Edimburgh.

Jespersen, KI. (1973). *A review of use of ultrasonics in flow measurement.* NEL Report N° 552, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow.

Heritage, JE. (1989). *The performance of transit time ultrasonic flowmeters under good and disturbed flow conditions.* Flow measurement and Instrumentation, vol. I, pp 24-30.

Hayward, ATJ. (1977). *Methods of calibrating flowmeters with liquids - a comparative survey.* Measurement and Control 10, 3, pp 106 - 116.