

SENSORES DE CAUDAL Y FLUJO

(Abril de 2005)

Anderson Noriega Talero Cód. 2011655
Mario Alberto Pérez Benavides Cód. 2011659
Instrumentación industrial, USTA

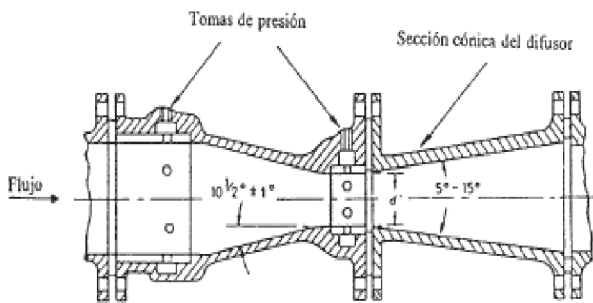
I.- Contenido-

Caudal: cantidad de materia, en peso o volumen, que fluye por unidad de tiempo.

- Las medidas de caudal están presentes en todos los procesos de transporte de materia y energía mediante fluidos, para controlar el proceso, como indicación o para determinar tarifas (agua, gas, gasolina.)

TUBO VENTURIMETRO

- Es un tipo de boquilla especial, seguido de un cono que se ensancha gradualmente, accesorio que evita en gran parte la pérdida de energía cinética debido al rozamiento. Es por principio un medidor de área constante y de caída de presión variable. En la figura se representa esquemáticamente un medidor tipo Venturi.

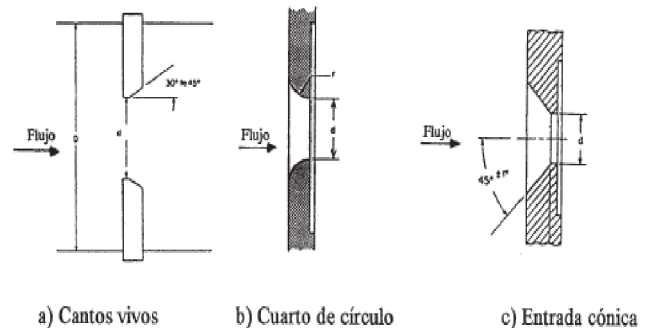


Como se aprecia en la figura se pueden destacar tres partes fundamentales: a) una sección de entrada cónica convergente en la que la sección transversal disminuye, lo que se traduce en un aumento de la velocidad del fluido y una disminución de la presión; b) una sección cilíndrica en la que se sitúa 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.

MEDIDOR DE ORIFICIO

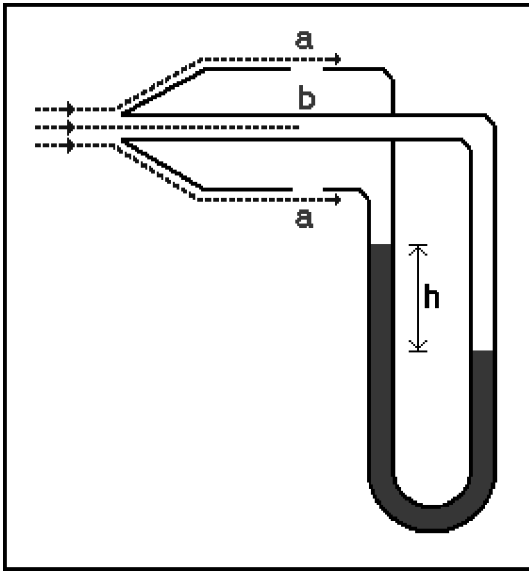
- El medidor de Orificio es un elemento más simple, consiste en un agujero cortado en el centro de una placa intercalada en la tubería. El paso del fluido a través del orificio, cuya área es constante y menor que la sección transversal del conducto cerrado, se realiza con un aumento apreciable de la velocidad (energía cinética) a expensa de una disminución de la presión estática (caída de presión). Por esta razón se le clasifica como un medidor de área constante y caída de presión variable.

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.



TUBO DE PITOT

- Es uno de los medidores más exactos para medir la velocidad de un fluido dentro de una tubería. El equipo consta de un tubo cuya abertura está dirigida hacia arriba, de modo que el fluido penetre dentro de ésta y suba hasta que la presión aumente lo suficiente dentro del mismo y equilibre el impacto producido por la velocidad. El Tubo de Pitot mide las presiones dinámicas y con ésta se puede encontrar la velocidad del fluido, hay que anotar que con este equipo se puede verificar la variación de la velocidad del fluido con respecto al radio de la tubería (perfil de velocidad del fluido dentro de la tubería).



El tubo Annubar es una innovación del tubo de Pitot, en un tubo Annubar clásico, 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.

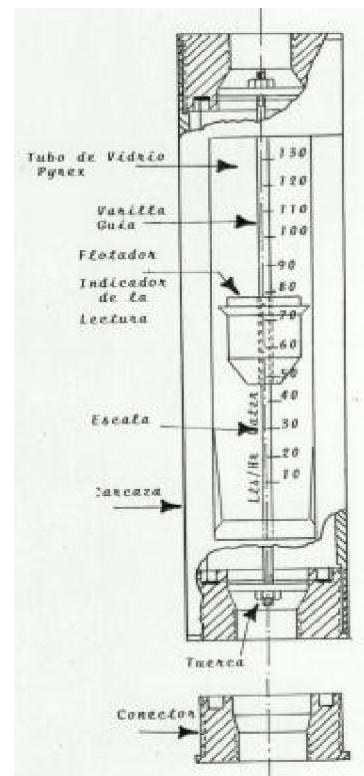
El tubo Annubar tiene mayor precisión que el tubo de Pitot, así como una baja pérdida de carga, utilizándose para la medida de pequeños y grandes caudales de fluidos.

ROTAMETROS

- Es un medidor de caudal en tuberías de área variable, de caída de presión constante. El Rotámetro consiste de un flotador (indicador) que se mueve libremente dentro de un tubo vertical ligeramente cónico, con el extremo angosto hacia abajo. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador suba hasta que el área anular entre él y la pared del tubo sea tal, que la caída de presión de este estrechamiento sea lo suficientemente para equilibrar el peso del flotador. El tubo es de vidrio y lleva grabado una escala lineal, sobre la cual la posición del flotador indica el gasto o caudal.

Los rotámetros, flowmeters, del tipo area variable, son instrumentos diseñados para la medición y control de caudales, gases y líquidos. Fabricamos caudalímetros desde 1 ml/h hasta 1000000 lts/min. La unidad de lectura vendrá especificada en la unidad de preferencia del usuario (lts/h, g/min, mtr³/h, scfh, lbm/min, scfm, etc, etc), es decir,

lectura directa de caudal. Rangos operacionales disponibles: desde 0,5 ltrs/h de agua (0,01 mtr³/h de aire), para tuberías de diámetro 1/4" NPT, hasta 100000 ltrs/h de agua (3000 mtrs³/h de aire) para tuberías de diámetro 4". Para diámetros de tubería mayores de 3", caudales hasta 10000000 ltrs/min, se usará el medidor de flujo de tipo area variable modelo "push button".



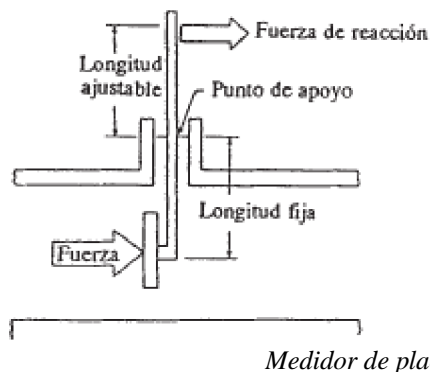
Aquí se presenta un modelo de las especificaciones técnicas de un Rotámetro:

El tubo medidor del tipo *pyrex*, está protegido por una carcasa protectora de acero inoxidable calidad 316. EL flotador medidor se desplaza verticalmente a lo largo de una varilla guía, razón por la cual pueden ser utilizados para medir fluidos de una alta viscosidad. Rotámetros de seguridad con fabricación especial y a requerimientos específicos están disponibles.

Los materiales usados son:
Tubo medidor en vidrio borosilicato tipo pyrex.
Conectores y partes internas en acero inoxidable 316.
O-rines y empaques en teflón
La longitud de la escala medidora se ofrece en variados tamaños: 230 mm, 330 mm, 100 mm, etc.
La precisión es del 2% en full escala.

MEDIDORES DE PLACA

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



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

No podemos dejar de reseñar 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.

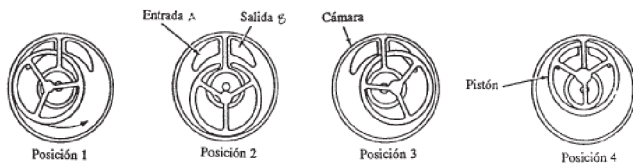
Dentro de los diferentes tipos de medidores para líquidos se considerarán los siguientes:

- 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* se aprecia una sección transversal de un medidor de pistón oscilante mostrando las cuatro etapas de su ciclo de funcionamiento.



Etapas de funcionamiento de un medidor de pistón oscilante.

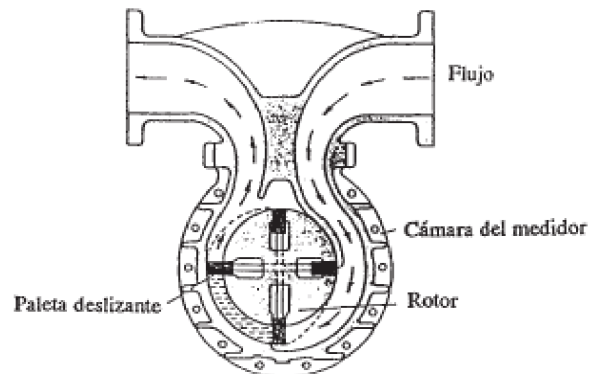
Consiste de un pistón hueco montado excéntricamente dentro de un cilindro. El cilindro y el pistón tienen la misma longitud, pero el pistón, como se aprecia en la figura, tiene un diámetro más pequeño que el cilindro. El pistón, cuando está en funcionamiento, oscila alrededor de un puente divisor, que 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* 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.



Medidor de paletas deslizantes.

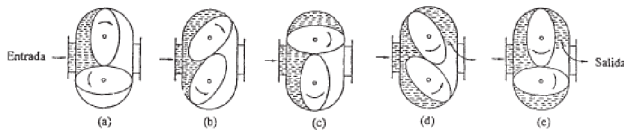
Medidores de engranajes

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*, 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.

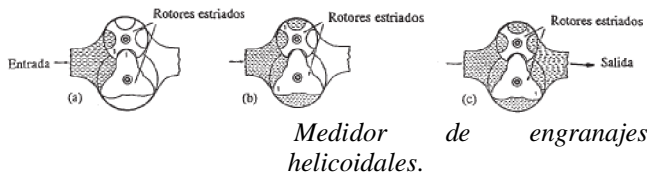


Medidor de rueda oval.

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



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,

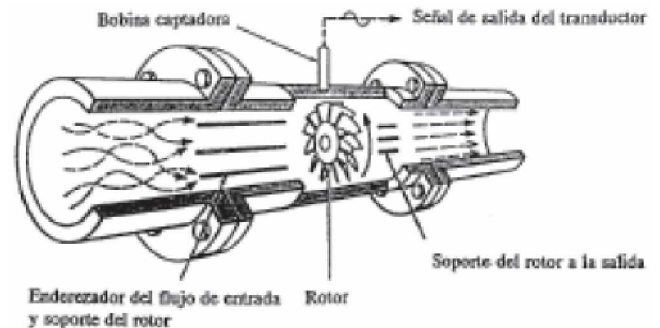
$$E = \frac{Q_{\text{Indicado}} - Q_{\text{real}}}{Q_{\text{real}}} 100\%$$

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.

Medidores de turbina

Los medidores para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La *figura* 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.



Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.

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.

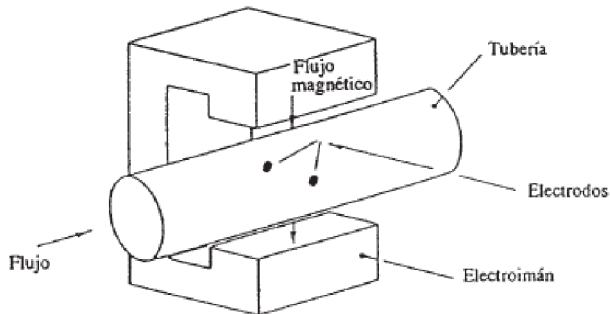
El punto más débil en un medidor de turbina para líquidos son los cojinetes, ya que tienen que soportar el peso del rotor.

OTROS TRANSDUCTORES

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*, 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.



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^{-6} 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.

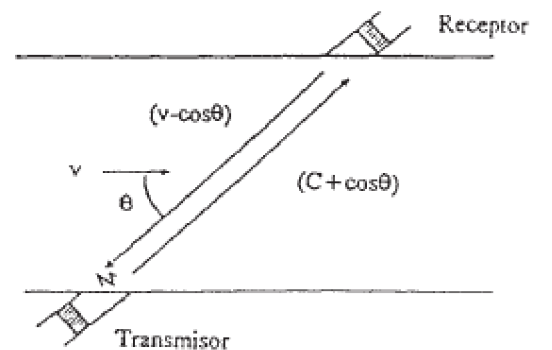
Medidores ultrasónicos

Dos tipos de medidores ultrasónicos son utilizados, fundamentalmente, para la medida de caudales 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.



Tiempo de desplazamiento del impulso

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.

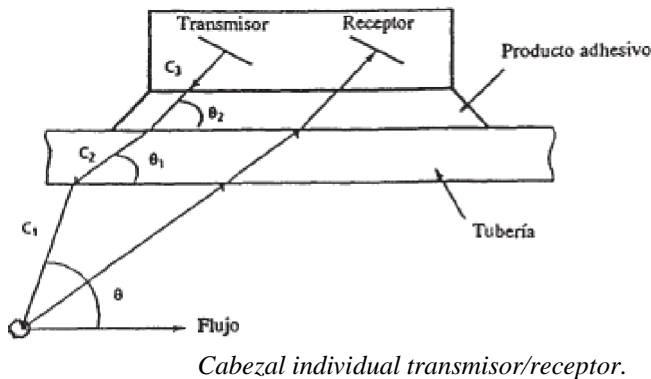
Medidores ultrasónicos utilizando el efecto Doppler

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 espaciamiento, 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* se muestra un cabezal individual transmitiendo con una frecuencia FT 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.



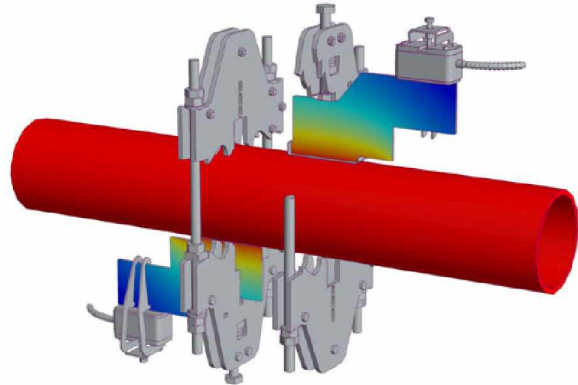
Al igual que en el caso de los medidores magnéticos, los medidores de caudal por ultrasonidos no presentan obstrucciones al flujo, no dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en grandes tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña. 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 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.

I. MEDICIÓN DE CAUDAL A TEMPERATURAS ELEVADAS

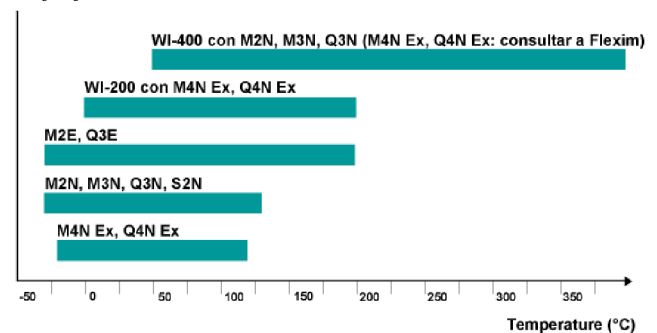
El nuevo **Wave Injector**[®] fue diseñado para aumentar el rango de temperatura de los sensores de caudal Q y M . Ahora es posible una medición **permanente** de caudal

mediante ultrasonido a temperaturas de hasta **400°C**, inclusive en atmósferas explosivas.



El Wave Injector se basa en las propiedades de la transmisión del ultrasonido en metales. Una placa metálica es insertada entre la pared de la tubería y el transductor de flujo. Se obtiene un acople ultrasónico casi sin pérdidas y los transductores se enfrían hasta su rango normal de temperatura.

Rango de temperatura de los transductores de flujo de Flexim



Una aplicación típica del Wave-Injector es en la medición de flujo en atmósferas explosivas para la industria química, a temperaturas de proceso superiores a los 220° C. Otra aplicación frecuente es la medición de flujo de aceite térmico

- WaveInjector WI-400: hasta 400°C
- WaveInjector WI-200: hasta 200°C

BIBLIOGRAFÍA

<http://tarwi.lamolina.edu.pe/~dsa/Medidores.htm>

<http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm#vertederos%20de%20aforo>

http://www.flexim.de/news/wave_es.htm

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).

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).*

Electrónica Industrial Moderna. Timothy J. Maloney
Prentice Hall, Tercera Edición

Tomado del formato IEEE para publicaciones
Traducido por:
Javier A. González C.
Presidente Rama IEEE
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
2002

"Este documento esta diseñado para presentar (en ingles) el desarrollo de proyectos al IEEE. Es solo una guía, el autor debe ajustarlo a su necesidad"