



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

---

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
CALIBRACIÓN PARA MICROMOLINETE**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA ELECTRICA-ELECTRONICA**

PRESENTA:

**MARIO ALBERTO CAREDO MANJARREZ**

ASESOR: ING. RODOLFO PETERS LAMMEL

CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO DEL 2005





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios quien me dió la existencia y permitió concluir mi carrera.*

*A mi padre Mario y mi madre Refugio, que por su infatigable esfuerzo e impulso que desde la infancia me han proporcionado forjaron la persona y el profesionista que soy, muchas gracias por todo su amor y apoyo.*

*A mis tíos: Alfredo, Martín, Raymundo y Manolo por sus consejos, su valiosa y amena compañía, y por contribuir de numerosas formas a la realización de mi carrera.*

*A mis tías: Chagua, Conchis, Juany, Nami, Lucy y Pin que muchas veces intercedieron por mí en las premuras propias de una etapa estudiantil.*

*A mi tío Chebeto, mi Tía Crucita y mi Tío Narciso por su cariño, hospitalidad, confianza y por haberme tendido la mano en momentos difíciles.*

*Al Ing. Peters por su cooperación para culminar este trabajo.*

*A la UNAM, a la Facultad de Ingeniería y a todos mis maestros que asentaron en mí los conocimientos necesarios para ser un buen profesionista.*

*A todas las personas que han contribuido en mi formación.*

# CONTENIDO

	Pág.
<i>Listado de Figuras</i>	<i>í</i>
<i>Listado de Tablas</i>	<i>ii</i>
<b>INTRODUCCION</b>	
<b>1.- CLASIFICACION DE MEDIDORES DE FLUJO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONDUCTOS LIBRES</b>	<b>3</b>
1.1.1 VERTEDORES	4
1.1.1.1 Consideraciones convenientes en los vertedores.	5
1.1.1.2 Vertedor rectangular.	7
1.1.1.3 Vertedor triangular.	9
1.1.1.4 Vertedor trapecial (de Cipoletti).	11
1.1.1.5 Características del medidor	12
1.1.2 MEDIDOR PARSHALL	14
1.1.2.1 Características del medidor	18
<b>1.2 MEDIDORES EN CONDUCTO CERRADO ( TUBERIAS )</b>	<b>20</b>
1.2.1 MEDIDOR VENTURI	21
1.2.1.1 Características del medidor	25
1.2.2 TOBERA	29
1.2.2.1 Características del medidor	31
1.2.3 TUBO DE PITOT	34
1.2.3.1 Características del medidor	36
1.2.4 PLACA ORIFICIO	39
1.2.4.1 Características del medidor	45
1.2.5 MEDIDORES DE AREA VARIABLE	52
1.2.5.1 Rotámetro	53
1.2.5.2 Características del medidor.	58
1.2.6 MEDIDOR DE PLACA DE IMPACTO	62
1.2.6.1 Características del medidor.	66
1.2.7 MEDIDOR DE TURBINA	71
1.2.7.1 Características del medidor.	75
1.2.8 MEDIDOR ULTRASONICO	80
1.2.8.1 Medidores transmisivos.	80
1.2.8.2 Medidores reflectivos (efecto Doppler).	84
1.2.8.3 Características del medidor.	88
1.2.9 MEDIDOR ELECTROMAGNETICO	93
1.2.9.1 Características del medidor.	98

	<b>Pág.</b>
1.2.10 MEDIDOR DE VORTICE	105
1.2.10.1 Características del medidor.	110
1.2.11 MOLINETE	114
1.2.11.1 Procedimiento de medición	116
1.2.11.2 Tipos de medición	117
1.2.11.3 Consideraciones	118
<b>2.- SELECCION DEL MEDIDOR</b>	<b>121</b>
<b>3.- SISTEMA PROPUESTO PARA LA CALIBRACION DEL MICROMOLINETE</b>	<b>126</b>
Conclusiones	132
Anexo 1	133
Anexo 2	136
Anexo 3	142
Bibliografía	144

## LISTADO DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.1.1.a</b>	Partes principales de un vertedor.	4
<b>Figura 1.1.1.b</b>	Formas de la lámina vertiente.	6
<b>Figura 1.1.1.c</b>	Vista de un vertedor típico.	10
<b>Figura 1.1.2.a</b>	Medidor Parshall típico.	15
<b>Figura 1.2.1.a.</b>	Corte longitudinal de un medidor Venturi.	22
<b>Figura 1.2.1.b.</b>	Cd en función de Re (1) y de Cc (2) para un Venturi.	24
<b>Figura 1.2.2.a.</b>	Tobera intercalada entre bridas con manómetro diferencial de carátula y termómetro.	29
<b>Figura 1.2.2.b.</b>	Cd en función de Re para una tobera.	30
<b>Figura 1.2.3.a.</b>	Tubo de Pitot con indicación analógica (izquierda) y digital (derecha)	34
<b>Figura 1.2.4.a.</b>	Placa orificio instalada en un proceso industrial.	39
<b>Figura 1.2.4.b</b>	Placa orificio y líneas de corriente.	40
<b>Figura 1.2.4.c.</b>	Cd en función de Re para una placa orificio.	41
<b>Figura 1.2.4.d.</b>	Tomas en la tubería para una placa orificio.	44
<b>Figura 1.2.4.e.</b>	Tubería con placa orificio intercambiable.	46
<b>Figura 1.2.5.a.</b>	Medidores de área variable tipo orificio obstruido (1) y tipo pistón (2).	45
<b>Figura 1.2.5.b.</b>	Partes principales de un rotámetro.	53
<b>Figura 1.2.5.c</b>	Relación área -velocidad y diagrama de fuerzas de un rotámetro.	54
<b>Figura 1.2.5.d</b>	Formas más comunes de flotadores en un rotámetro.	56
<b>Figura 1.2.6.a</b>	Medidor de placa de impacto en línea con indicador mecánico.	62
<b>Figura 1.2.6.b</b>	Medidor de impacto de Inserción Fija (1) y de Inserción Retráctil (2).	64
<b>Figura 1.2.6.c</b>	Instalación de un medidor de impacto con válvula de derivación ("bypass").	68
<b>Figura 1.2.7.a.</b>	Elementos de un medidor de turbina.	71
<b>Figura 1.2.7.b.</b>	Elementos para mejorar la exactitud de un medidor de turbina.	73
<b>Figura 1.2.7.c.</b>	Instalación del medidor de turbina.	77
<b>Figura 1.2.8.a.</b>	Medidor ultrasónico en línea en posición diagonal.	80
<b>Figura 1.2.8.b.</b>	Medidor ultrasónico en línea en posición reflejo con transductor fijo (1) y retráctil (2).	82
<b>Figura 1.2.8.c.</b>	Operación del medidor Doppler con dos transductores (1) y un transductor (2).	85
<b>Figura 1.2.9.a.</b>	Esquema de un medidor de flujo electromagnético.	93
<b>Figura 1.2.9.b.</b>	Partes principales de un medidor electromagnético en línea.	95
<b>Figura 1.2.10.a.</b>	Principio de funcionamiento de un medidor de vórtice (1) e ilustración de un medidor de vórtice de inserción (2).	105
<b>Figura 1.2.10.b.</b>	Formas comunes para generar vórtices.	108
<b>Figura 1.2.10.c.</b>	Orientación de un medidor de vórtice.	111
<b>Figura 1.2.11.a.</b>	Partes principales de un molinete.	114
<b>Figura 1.2.11.b.</b>	Puntos de medición en un río con un molinete.	116
<b>Figura 1.2.11.c.</b>	Posición del cable de sondeo en agua a gran velocidad.	119
<b>Figura 1.2.11.d.</b>	Distribución de la velocidad en la vertical de una corriente.	120
<b>Figura 3.a.</b>	Sistema propuesto para la medición de gasto.	126

## LISTADO DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.1.1.a</b>	Gastos de un vertedor sin contracciones con la fórmula de Francis. 9
<b>Tabla 1.1.1.b.</b>	Gastos para un vertedor triangular según la fórmula de Thomson. 11
<b>Tabla 1.1.2a.</b>	Dimensiones típicas de medidores Parshall según su ancho de garganta. 16
<b>Tabla 1.1.2.b.</b>	Límites de medición para Parshall con descarga libre. 18
<b>Tabla 1.2.1.a.</b>	Gastos de un Venturi. 26
<b>Tabla 1.2.2.a.</b>	Valores de gasto para una tobera. 31
<b>Tabla 1.2.3.a.</b>	Límites de aplicación del tubo Pitot. 37
<b>Tabla 1.2.4.a.</b>	Gastos para una placa orificio. 45
<b>Tabla 1.2.4.b.</b>	Tramos rectos de tubería para la instalación de un medidor de placa orificio, tobera y Venturi. 47
<b>Tabla 1.2.5.a.</b>	Materiales más comunes de flotadores normales. 57
<b>Tabla 1.2.5.b.</b>	Valores típicos de gasto de rotámetros. 59
<b>Tabla 1.2.6.a.</b>	Valores típicos de gasto para medidores de placa de impacto. 67
<b>Tabla 1.2.6.b.</b>	Aplicaciones del medidor de placa de impacto. 69
<b>Tabla 1.2.7.a.</b>	Gastos típicos de medidores de turbina en línea. 76
<b>Tabla 1.2.7.b.</b>	Aplicaciones del medidor de turbina. 78
<b>Tabla 1.2.8.a.</b>	Capacidades típicas de gastos en medidores ultrasónicos. 89
<b>Tabla 1.2.8.b.</b>	Aplicaciones de los medidores ultrasónicos. 91
<b>Tabla 1.2.9.a.</b>	Resistencia a la abrasión y corrosión de varios revestimientos. 98
<b>Tabla 1.2.9.b.</b>	Capacidades típicas de medidores electromagnéticos en línea. 99
<b>Tabla 1.2.9.c.</b>	Capacidades típicas para medidores electromagnéticos en línea. 103
<b>Tabla 1.2.10.a.</b>	Capacidades de gasto de algunos medidores de vórtice en línea. 110
<b>Tabla 1.2.10.b.</b>	Distancias recomendadas para la instalación de un medidor de Vórtice. 111
<b>Tabla 2.a.</b>	Parámetros cuantitativos para el micromolinetete y los medidores anteriormente estudiados. 121
<b>Tabla 2.b.</b>	Parámetros cualitativos para el micromolinetete y los medidores anteriormente analizados. 122
<b>Tabla 2.c.</b>	Comparativo entre el micromolinetete y los medidores descritos anteriormente . 123
<b>Tabla 3.a.</b>	Rugosidad absoluta para diversos materiales. 129
<b>Tabla 3.b.</b>	Factor de fricción para conductos de acero comercial nuevo y limpio. 130
<b>Tabla 3.c.</b>	Gastos y velocidades para diferentes coeficientes de contracción. 131

## INTRODUCCION

Un instrumento no calibrado constituye un peligro potencial y no puede ser un dispositivo de medición y control confiable.

La calibración es parte esencial de la medición y el control industrial, no es una operación muy interesante sin embargo se debe efectuar en forma correcta para que el producto pueda tener una calidad controlada.

La calibración es la única garantía de que los instrumentos industriales tienen la exactitud y el rango requerido para mantener en operación y en condiciones económicamente controladas los sistemas. Los instrumentos calibrados permiten que un fabricante o procesador produzca sus artículos con las especificaciones de calidad deseables.

La calibración se debe de efectuar de un modo periódico y requiere de un estándar par comparar valores. Por tanto, la calibración se puede definir como la comparación de valores específicos de entradas y salidas de un instrumento, con un estándar de referencia.

Aunque la calibración no garantiza el buen funcionamiento de un instrumento, por lo general indica si su funcionamiento puede satisfacer o no las especificaciones de precisión y rango en las que se va a utilizar.

Cuando dicho instrumento se ha diseñado para llenar ciertas especificaciones de precisión y rango pero no lo hace durante la calibración se debe reparar y ajustar de tal manera que cumpla esta función. La recalibración siempre se lleva a cabo después de que un instrumento se ha ajustado, reparado, modificado o utilizado en forma incorrecta.

El procedimiento de la calibración involucra una comparación del instrumento en particular con: (1) un estándar primario; (2) un estándar secundario con una exactitud más alta que la del instrumento que va a calibrarse, o (3) una excitación conocida.



Por ejemplo, un medidor de gasto (que es nuestro caso de estudio) puede calibrarse de las siguientes maneras: (1) comparándolo con un estándar de medición de gasto proporcionado por una institución oficial reconocida para tales fines, (2) comparándolo con otro medidor de gasto de exactitud conocida (la exactitud de este medidor debe ser especificada por una fuente respetable), o (3) por medio de una calibración directa con un medidor primario, como puede ser el pesar la cantidad de agua que pasa a través del medidor durante un lapso conocido.

Este trabajo surge por la necesidad de calibrar un micromolinetete el cual es usado por la Comisión Federal de Electricidad para uso interno de su planta.

El micromolinetete es un medidor de flujo cuya principal característica es medir la velocidad de fluidos por medio de impulsos eléctricos provocados por el movimientos de unas aspas. El objetivo principal es diseñar un sistema de calibración con un patrón primario el cual sea factible en cuanto a costo, tamaño y facilidad de operación.

Para lograr esto se estudiarán y se expondrán de manera comprensible algunos tipos de medidores de flujo que se apegaron lo más cerca posible a las características del instrumento de estudio con el objetivo de escoger el más factible para calibrarlo.

# 1 CLASIFICACION DE MEDIDORES DE FLUJO

Existen muchos tipos de industrias en las que la medición de flujo es fundamental para diversos procesos en los cuales se manejan y controlan fluidos líquidos y gaseosos. Estos fluidos pueden abarcar desde fluidos esenciales como son agua, vapor hasta una gran cantidad de fluidos específicos para cada tipo de industria de acuerdo a la naturaleza de los productos que se procesen.

Los primeros medidores de flujo se remontan a la época del Imperio Romano, un ejemplo clásico de estos medidores es el reloj de arena. Pero el desarrollo en el que se basa la teoría y diseño de los medidores es de origen reciente.

En 1738 Juan Bernoulli desarrolló el teorema sobre el que se basan las ecuaciones hidráulicas para medidores de flujo.

En 1797 Giovanni B. Venturi publicó los resultados de su trabajo acerca del tubo que lleva su nombre

En 1872 Enrique Pitot presentó su trabajo “Descripción de un aparato para medir la velocidad de una corriente de agua “.

Las medidas de flujo gaseoso con el tubo de Venturi siguen las leyes de la expansión adiabática y la ecuación que se encontró era complicada e impracticable para mediciones comerciales. Esta objeción y la necesidad de otros medios prácticos para medir grandes cantidades de gas natural condujeron a los investigadores a diseñar a principios de este siglo el medidor de orificio de bordes cuadrados, el que posteriormente ha sufrido modificaciones de acuerdo con las necesidades y los problemas que se han encontrado en diferentes circunstancias.

De la misma manera, la medición del gasto de algunos flujos no puede ser realizada con un determinado sistema por las características extremas del líquido como lo pueden ser la presión, temperatura, velocidad, viscosidad, etc. Esto propicia nuevas técnicas y nuevos instrumentos de medición.

Existen varios tipos de medidores para calcular el gasto volumétrico, a continuación se hace una clasificación breve de ellos.

	<b>SISTEMA</b>	<b>ELEMENTO</b>
<b>CONDUCTOS LIBRES</b>	<b>Carga Hidráulica</b>	Vertedor Aforador Parshall
<b>CONDUCTOS CERRADOS</b>	<b>Presión Diferencial</b>	Tubo Venturi Tobera Tubo Pitot Placa Orificio
	<b>Area variable</b>	Rotámetro
	<b>Fuerza</b>	Placa de Impacto
	<b>Velocidad</b>	Turbina Sondas ultrasónicas
	<b>Tensión inducida</b>	Medidor Magnético
	<b>Vórtice</b>	Medidor de frecuencia

## 1.1

## CONDUCTOS LIBRES

Los conductos libres son aquellos que presentan en cualquier punto de la superficie libre una presión igual a la atmosférica y siempre funcionan por gravedad.

La medición de caudales en conductos libres y particularmente en los canales abiertos constituye sin duda una importante ayuda en la medición. Estos medidores pueden consistir en un simple estrangulamiento adecuado a una sección, en el descenso o en la sobre-elevación del fondo, o en una combinación conveniente de estas singularidades.

Además de la facilidad con que pueden ser construidos estos medidores presentan ventajas que tienen sus propias características hidráulicas: una sola determinación de carga es suficiente, la pérdida de carga es reducida, no hay obstáculos capaces de provocar la formación de depósitos, etc.

### 1.1.1

## VERTEDORES

El término vertedor se emplea para designar una abertura o escotadura hecha en la orilla superior de una pared vertical a través de la cual se deja que pase el flujo con la finalidad de hacer mediciones de gasto.

El principio en el que se basa este dispositivo es provocar en el canal una diferencia de alturas del líquido entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo para lograr el propósito mencionado anteriormente.

El vertedor como usualmente se construye tiene una forma geométrica simple y la abertura tiene aristas agudas de manera que la carga de fluido toque únicamente una línea, la abertura generalmente es rectangular, triangular o trapezoidal.

Los vertedores son utilizados, intensiva y satisfactoriamente en la medición del caudal de pequeños cursos de agua así como en el control del flujo en galerías y canales.

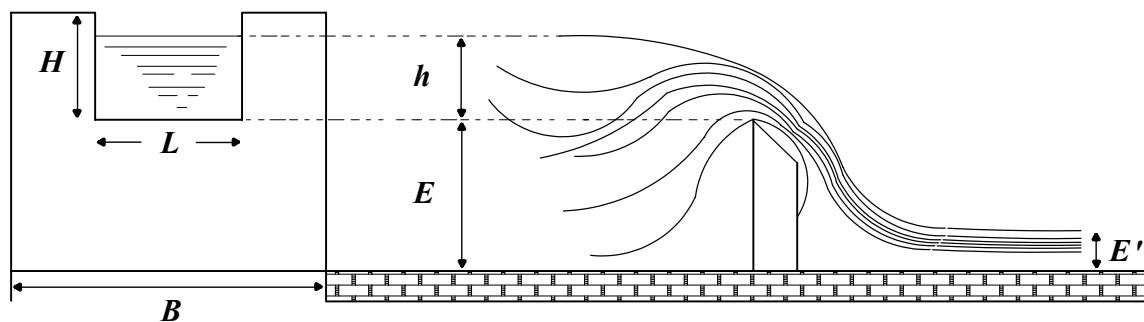


Figura 1.1.1.a Partes principales de un vertedor.

La parte inferior de la abertura se le denomina cresta ( $L$ ), está fabricada de placa de metal y está pegada al muro de contención. A  $H$  se le conoce como la altura del vertedor.

La altura alcanzada por el líquido que pasa sobre ella en un punto donde no es afectada por la curvatura de la superficie es la carga  $h$  que se mide aguas arriba del vertedor.

La lámina de líquido que corre a través de la abertura sobre la cresta se le llama vena y al salir de ésta forma lo que se conoce como superficie de contracción (**figura 1.1.1.a**).

El gasto se determina indicando la carga de agua  $h$  y debido a la depresión de la lámina vertiente junto al vertedor debe ser medida aguas arriba a una distancia aproximadamente igual o superior a  $4h$ . El canal aguas arriba de ser recto como mínimo  $10h$ .

Aceptando las más variadas formas y disposiciones, los vertedores presentan diversos comportamientos. Una clasificación breve es la siguiente:

- 1.- *Forma:*
  - a) Simples: rectangulares, trapezoidales, triangulares, etc.;
  - b) Compuestos: secciones combinadas.
- 2.- *Altura relativa del umbral:*
  - a) Vertedores: completos o libres: ( $E > E'$ );
  - b) Vertedores incompletos o ahogados: ( $E < E'$ ).
- 3.- *Espesor de la pared:*
  - a) Vertedores de pared delgada: placas o madera biselada;
  - b) Vertedores de pared gruesa.

### **1.1.1.1 CONSIDERACIONES CONVENIENTES EN LOS VERTEDORES**

Algunas consideraciones relativas al escurrimiento en los vertedores y su efecto en el gasto de descarga son las siguientes:

#### **A) INFLUENCIA DE LA FORMA DE LA VENA**

En un vertedor que funciona normalmente la prolongación de las caras encierra totalmente la vena vertiente aislando el espacio  $w$  (**figura 1.1.1.b -1**).

En los vertedores donde el aire no penetra en el espacio  $w$  debajo de la lámina vertiente puede ocurrir una depresión, modificándose la posición de la vena y alterándose el caudal.

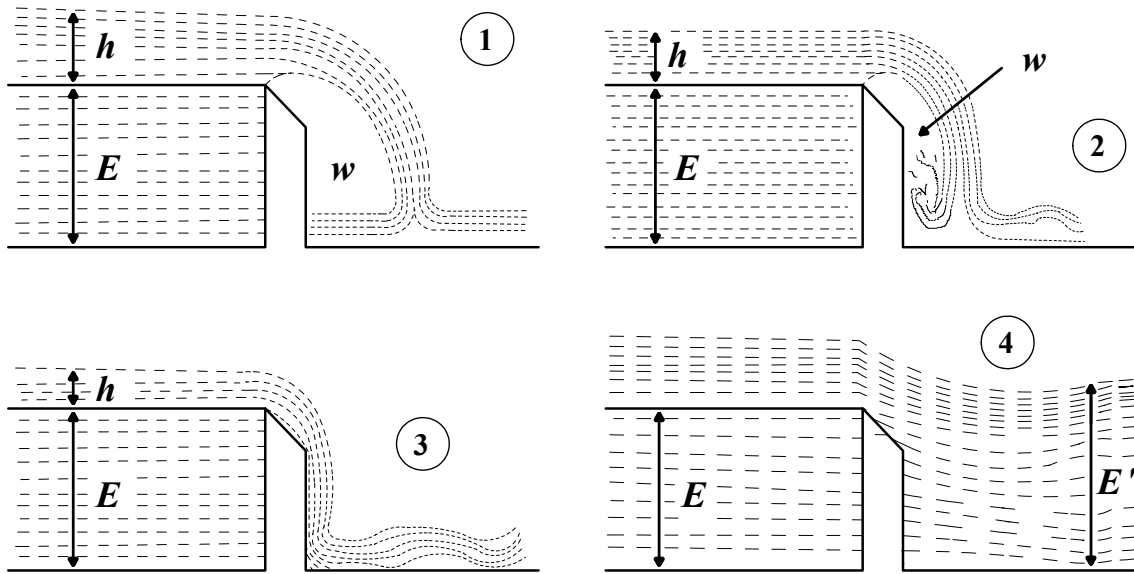


Figura 1.1.1.b Formas de la lámina vertiente.

En estas condiciones, la lámina líquida puede tomar una de las siguientes formas:

- a) Lámina deprimida.- El aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial en  $w$ , que modifica la posición de la vena (figura 1.1.1.b-2).
  - b) Lámina adherente.- Ocurre cuando el aire sale totalmente. (figura 1.1.1.b-3).
- En cualquiera de estos dos casos el caudal es superior al previsto o dado por las fórmulas indicadas anteriormente.
- c) Lámina ahogada.- El nivel aguas abajo es lo suficientemente elevado para retardar el flujo a través del vertedor, (figura 1.1.1.b-4):

$$E' > E.$$

En vertedores ahogados, el caudal disminuye a medida que aumenta la sumersión.

## B) INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE LLEGADA

Esta cantidad hace sentir su efecto, como mínimo, en dos formas diferentes:

*Primera.-* La descarga con una carga dada  $h$  aumenta con la velocidad de llegada. En las ecuaciones anteriores se consideró que la velocidad es uniforme sobre todas las partes del canal, sin embargo se sabe que esto no es así y que el efecto de las paredes del canal es el de retardar la velocidad del agua cerca de los lados y del fondo, por lo tanto el agua cerca de la superficie tendría una velocidad mayor.

*Segunda.-* La existencia de velocidad en el canal indica que la superficie del agua tiene una pendiente en la dirección del escurrimiento.

Como la carga  $h$  se mide desde un plano horizontal a través de la cresta y hasta la superficie del agua, se deriva que se pueden obtener valores ligeramente diferentes para una descarga dada si se varía la distancia aguas arriba de la cresta hasta el punto de la medición.

Esto se comprueba a altas velocidades de llegada pues a velocidades bajas prácticamente la superficie está a nivel, esta situación puede afectar los resultados del cálculo de gasto con una variación del  $\pm 1\%$ .

### **1.1.1.2 VERTEDOR RECTANGULAR**

El vertedor rectangular es el más antiguo y más común debido a su simplicidad, facilidad de construcción y precisión.

Los modelos más usados son los vertedores sin contracciones laterales ( $L=B$ ) y con contracciones ( $L<B$ ).

#### **A) VERTEDOR RECTANGULAR SIN CONTRACCIONES**

Existe un gran número de fórmulas para estos vertedores. Serán indicadas las más usuales según los experimentos realizados por los autores:



Fórmula de Francis ( 1848 - 1852 )

$$Q = 1.838Lh^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.1\text{a})$$

$$Q = 3.330Lh^{3/2} \quad (\text{ft}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.1\text{b})$$

Fórmula de Bazin ( 1866 )

$$Q = \left[ 1.793 + \frac{0.013}{h} \right] \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{h}{h+p} \right)^2 \right] Lh^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.2\text{a})$$

$$Q = \left[ 3.25 + \frac{0.0789}{h} \right] \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{h}{h+p} \right)^2 \right] Lh^{3/2} \quad (\text{ft}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.2\text{b})$$

Fórmula de la sociedad suiza de Ingenieros y Arquitectos ( 1924 )

$$Q = \left[ 1.816 + \frac{1.816}{305h + 1.6} \right] \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{h}{h+p} \right)^2 \right] Lh^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.3\text{a})$$

$$Q = \left[ 3.290 + \frac{3.29}{305h + 1.6} \right] \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{h}{h+p} \right)^2 \right] Lh^{3/2} \quad (\text{ft}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.3\text{b})$$

Fórmula de Rehbock ( 1929 )

$$Q = \left[ 1.78 + 0.239 \left( \frac{h + 0.0036}{p} \right) \right] L(h + 0.0036)^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.4\text{a})$$

$$Q = \left[ 1.78 + 0.239 \left( \frac{h + 0.0036}{p} \right) \right] L(h + 0.0036)^{3/2} \quad (\text{ft}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.4\text{b})$$

La **tabla 1.1.1.a** incluye valores calculados por la fórmula de Francis para un metro de ancho del vertedor.

Para propósitos de elección de alguna de las fórmulas anteriores es igualmente aceptable cualquiera de ellas aunque en forma general se utiliza la fórmula de Francis para cargas mayores a 0.50 pies.

Conforme aumenta la velocidad de llegada, la concordancia es menos aproximada.

Altura		$Q$ (l/s)	Altura		$Q$ (l/s)
cm	pies		cm	pies	
3	0.098	9.57	25	0.82	230.0
4	0.131	14.72	30	0.98	305.3
5	0.164	20.61	35	1.14	381.1
6	0.196	27.05	40	1.31	465.5
7	0.229	34.04	45	1.47	555.5
8	0.262	41.58	50	1.64	650.6
9	0.295	49.68	55	1.80	750.5
10	0.328	58.14	60	1.96	855.2
11	0.360	67.12	65	2.13	964.2
12	0.393	76.53	70	2.29	1,077.7
13	0.426	86.24	75	2.46	1,195.1
14	0.459	96.34	80	2.62	1,316.5
15	0.492	106.90	85	2.78	1,442.0
20	0.656	164.50	90	2.95	1,571.0

Tabla 1.1.1.a Gastos de un vertedor sin contracciones con la fórmula de Francis.

## B) VERTEDOR RECTANGULAR CON CONTRACCIONES

Las contracciones ocurren en los vertedores cuyo ancho es inferior al del canal donde se encuentran instalados ( $L < B$ ), ver **figura 1.1.1.c**.

Según Francis, se debe considerar en la aplicación de la fórmula un valor corregido para  $L$ .

$$Q = 1.84(L - 0.1nh)h^{3/2} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1.1.1.5a)$$

$$Q = 3.33(L - 0.1nh)h^{3/2} \quad \text{ft}^3/\text{s} \quad (1.1.1.5b)$$

Donde  $n = 1, 2$  para un vertedor con 1 y 2 contracciones respectivamente.

Estos medidores pueden alcanzar rangos de 0-19.5 ft<sup>3</sup>/s (0-0.55 m<sup>3</sup>/s).

### 1.1.1.3 VERTEDOR TRIANGULAR

Los vertedores triangulares hacen posible una mayor precisión en la medida de cargas correspondientes a caudales reducidos. El arreglo acostumbrado para un vertedor triangular se muestra en la **figura 1.1.1.c**.

Estos vertedores son construidos en placas metálicas lisas, pues este vertedor es muy sensible a cualquier cambio en la rugosidad de dichas placas.

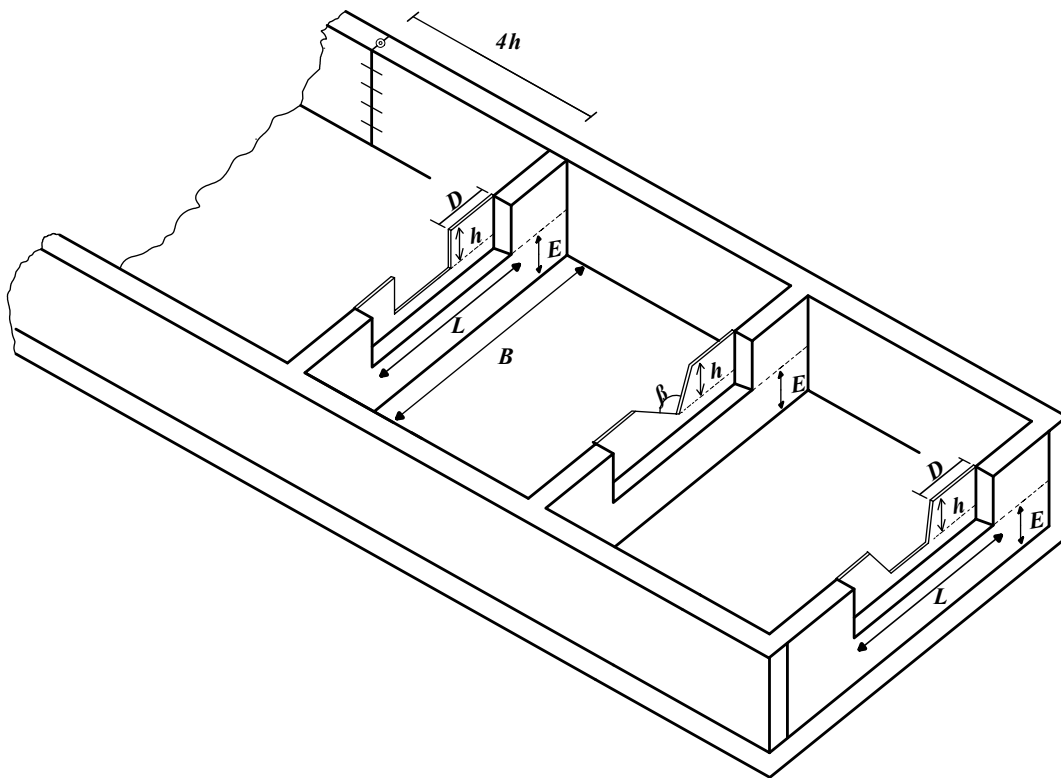


Figura 1.1.1.c Vista de un vertedor típico.

El vertedor triangular ofrece el rango más amplio para un solo tamaño ya que la pequeña abertura en "V" puede alojar flujos pequeños y la porción más amplia de la parte superior permite el paso de flujos mayores, pero ofrece la mayor caída de carga debido a su forma.

En la práctica, solamente son empleados los que tienen forma isósceles, siendo más usuales los de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , y  $90^\circ$ . Para estos vertedores, se adapta la fórmula de Thomson:

	(m <sup>3</sup> /s)	(ft <sup>3</sup> /s)
$\beta=30^\circ$	$Q = 0.377h^{5/2}$ ----- (1.1.1.6a)	$Q = 0.685h^{5/2}$ ----- (1.1.1.6b)
$\beta=60^\circ$	$Q = 0.809h^{5/2}$ ----- (1.1.1.7a)	$Q = 1.45h^{5/2}$ ----- (1.1.1.7b)
$\beta=90^\circ$	$Q = 1.4h^{5/2}$ ----- (1.1.1.8a)	$Q = 2.54h^{5/2}$ ----- (1.1.1.8b)

Este vertedor es capaz de medir caudales dentro del intervalo de 0- 10ft<sup>3</sup>/s (0-0.28 m<sup>3</sup>/s).

La **tabla 1.1.1.b** muestra los caudales para las cargas más comunes.

<i>h</i>		<i>Q (l/s)</i>			<i>h</i>		<i>Q (l/s)</i>		
cm	pies	30°	60°	90°	cm	pies	30°	60°	90°
3	0.098	0.058	0.12	0.21	17	0.557	4.49	9.63	16.70
4	0.131	0.120	0.25	0.44	18	0.59	5.18	11.10	19.20
5	0.164	0.210	0.45	0.78	19	0.623	5.93	12.70	22.00
6	0.196	0.330	0.71	1.24	20	0.656	6.74	14.40	25.00
7	0.229	0.480	1.04	1.81	21	0.689	7.61	16.30	28.30
8	0.262	0.680	1.46	2.52	22	0.721	8.55	18.30	31.80
9	0.295	0.910	1.96	3.39	23	0.754	9.56	20.50	35.50
10	0.328	1.190	2.55	4.44	24	0.787	10.63	22.80	39.50
11	0.360	1.510	3.24	5.62	25	0.82	11.78	25.20	43.70
12	0.393	1.880	4.03	6.98	30	0.984	18.58	39.80	69.00
13	0.426	2.290	4.92	8.54	35	1.148	27.32	58.60	101.50
14	0.459	2.760	5.93	10.25	40	1.312	38.14	81.81	141.70
15	0.492	3.280	7.04	12.19	45	1.476	51.21	109.80	190.10
16	0.524	3.860	8.28	14.33	50	1.64	66.64	143.00	247.50

Tabla 1.1.1.b Gastos para un vertedor triangular según la fórmula de Thomson.

#### 1.1.1.4 VERTEDEDOR TRAPEZIAL ( CIPOLETTI )

Este vertedor, inventado por un ingeniero italiano que lleva su nombre, es mencionado porque es usado en algunas ocasiones en el trabajo de irrigación de Estados Unidos.

Como su nombre lo indica, la escotadura tiene la forma trapezoidal como se muestra en la **figura 1.1.1.c**. Los taludes son iguales y tienen una inclinación de 1:4 (horizontal : vertical).

La descarga puede considerarse dividida en dos partes: una a través del área rectangular y la otra a través de un área triangular.

La pendiente de los lados del trapecio corrige las contracciones laterales del manto de agua y el caudal es por lo tanto proporcional a la altura de la cresta. Su campo de medida equivale al del vertedero rectangular sin contracciones.

La fórmula empírica para calcular el gasto es la siguiente:

$$Q = 1.86Lh^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.9a)$$

$$Q = 3.367Lh^{3/2} \quad (\text{ft}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.9b)$$

Este tipo de vertedor no es muy seguro y se obtienen con ellos resultados menos precisos que con los vertedores anteriores.

La medición en los vertedores se realiza a una distancia específica aguas arriba en un depósito que está conectado al canal mediante un tubo.

La carga se puede leer directamente en una regla graduada situada en la pared del recipiente. En otros casos existen mecanismos en los que un flotador sube y baja siguiendo las variaciones de caudal, estos desplazamientos permiten la lectura directa del caudal a través de un graficador. También se puede utilizar un transmisor de nivel para lecturas remotas

Como aditamentos adicionales se cuenta con una minicompuerta para desalojar residuos sólidos bajo el vertedor.

#### 1.1.1.5 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

##### ❖ *Exactitud y precisión*

Exactitud:  $\pm 2\%$ ;      Precisión  $\pm 5\%$ ;      Campo de medida 20:1 a 60:1.

##### ❖ *Diseño*

- Las cargas deben acotarse a los siguientes rangos:  $1'' < h < 0.5H$   
( $6 \text{ cm} < h_{\text{mín.}} < 75 \text{ cm}$ ).
- La cresta por lo menos debe ser tres veces la carga máxima del vertedor:  $L > 3h_{\text{máx.}}$ .
- Las contracciones deben tener un ancho de 2.5 veces la carga del medidor:  $D = 2.5h_{\text{máx.}}$  (sólo para vertedor rectangular)
- La distancia bajo la escotadura se recomienda sea tres veces la carga máxima:  $E = 3h_{\text{máx.}}$ .
- El área transversal del canal debe ser al menos 6 veces el área que cubre la escotadura.

### ❖ *Operación*

- La velocidad del flujo no debe exceder de 0.3 ft/s (0.09 m/s).
- El flujo debe tener menos de 50 mg/l de sólidos suspendidos.
- El flujo debe alejarse al menos 0.1' (3 cm) de la escotadura para permitir la ventilación de la vena.
- La lámina vertiente debe tener una caída de al menos 6" (15 cm) aguas abajo del medidor.
- El canal debe ser recto y tener al menos una longitud  $15h_{máx.}$  aguas abajo del vertedor.

### ❖ *Aplicaciones*

Estos medidores se utilizan preferentemente en la medición de grandes volúmenes de agua, drenaje o desperdicios industriales (ver tabla siguiente). Su construcción se realiza por lo general en el lugar de su aplicación.

<i>Recomendable</i>	<i>No Recomendable</i>
Agua cruda Aguas tratadas Afluentes secundarios Afluentes primarios	Aguas fecales Licor mezclado Lodos

### ❖ *Mantenimiento y calibración*

- Hacer semanalmente lecturas de nivel por simple inspección visual y calcular el gasto mediante tablas para compararlo con las lecturas del graficador o lecturas remotas, esto indicará si se tiene que revisar el mecanismo del flotador o calibrar el transmisor de nivel.
- Limpiar los residuos bajo el vertedor semanalmente.
- Inspeccionar fugas y orillas afiladas del vertedor anualmente

## 1.1.2

### MEDIDOR PARSHALL

Es un medidor que se incluye entre los de régimen crítico, siendo idealizado por R. L. Parshall (1920), ingeniero del Servicio de Irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Estos medidores operan en el principio de que si existe una restricción de algún perfil o forma especificada y se coloca a través de un canal, dicha restricción elevará aguas arriba el nivel del líquido el cual es una función de la velocidad de descarga y de la sección estrangulada.

El medidor Parshall se forma por tres secciones: la primera es un tramo de paredes que convergen uniformemente con piso horizontal; la intermedia llamada garganta es un tramo corto de paredes paralelas y piso descendente; la última se forma por paredes que divergen uniformemente con piso ascendente en la dirección del escurrimiento como se indica en la **figura 1.1.2.a**.

El medidor es usualmente construido de concreto reforzado pero puede ser de madera, hay algunos con revestimiento de acero inoxidable para la medición de soluciones ácidas.

Si el medidor es muy grande se le construye en el lugar de su aplicación, si es pequeño se puede adquirir el tipo pre-fabricado que viene integrado en el concreto, en ambos casos la superficie del medidor debe estar plana y lisa.

#### A) DIMENSIONES

Los medidores Parshall son indicados normalmente por el ancho de la garganta  $W$  que representa la menor sección transversal, frecuentemente está comprendido entre un tercio y la mitad del ancho de los canales existentes porque este tamaño es el más económico.

Específicamente en el caso de los medidores de 1' a 8' el fondo a nivel es inclinado en la garganta con un declive de 1 vertical: 2.6 horizontal y las dimensiones pueden ser determinadas de la siguiente manera:

$B$	$= 0.49W + 1.194$	(m)	$B$	$= 0.49W + 3.91$	(ft)
$C$	$= W + 0.305$	(m)	$C$	$= W + 1$	(ft)
$D$	$= 1.196W + 0.479$	(m)	$D$	$= 1.196W + 1.571$	(ft)
$E = G$	$= 0.915$	(m)	$E = G$	$= 3$	(ft)
$F$	$= 0.610$	(m)	$F$	$= 2$	(ft)
$n$	$= 0.229$	(m)	$n$	$= 0.751$	(ft)
$k$	$= 0.076$	(m)	$k$	$= 0.249$	(ft)

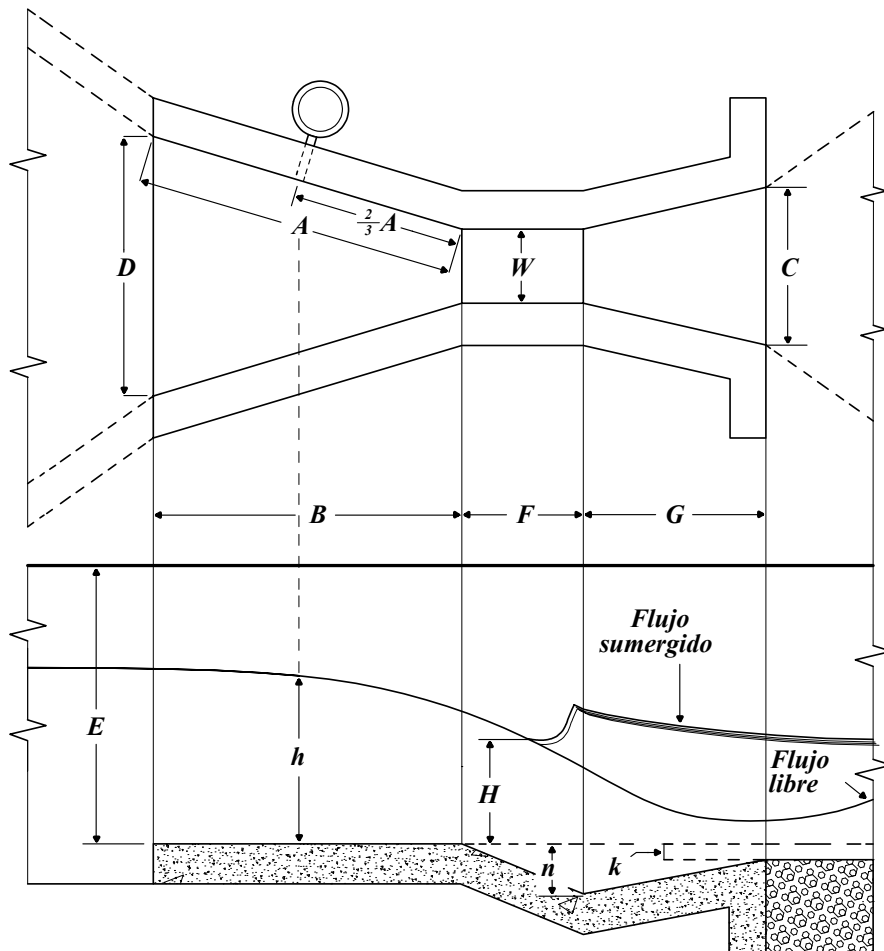


Figura 1.1.2.a Medidor Parshall típico.

En forma general existen 22 diseños estándar perfectamente calibrados para cubrir un intervalo de gastos desde  $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $93,000 \text{ l/s}$ . Los medidores empleados más pequeños son los de 1 pulgada y el mayor construido hasta hoy mide 50 pies.



Aunque la forma básica de los medidores es la misma para todos los diseños estándar no existe semejanza geométrica entre uno y otro (**tabla 1.1.2.a**), por lo que la relación entre gasto y carga tuvo que ser obtenido por un programa exhaustivo de calibración estableciéndose fórmulas empíricas para cada tamaño.

<i>W</i>		<i>Dimensiones en metros</i>								
pulg.	m	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
1	0.025	0.363	0.356	0.093	0.168	0.229	0.076	0.203	0.019	0.029
2	0.050	0.414	0.406	0.135	0.214	0.254	0.114	0.254	0.022	0.043
3	0.075	0.466	0.457	0.178	0.259	0.381	0.152	0.305	0.025	0.057
6	0.150	0.621	0.610	0.394	0.402	0.457	0.305	0.610	0.076	0.114
9	0.225	0.880	0.864	0.380	0.575	0.610	0.305	0.457	0.076	0.114
pies										
1	0.300	1.372	1.344	0.610	0.845	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
1 1/2	0.450	1.449	1.420	0.762	1.026	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
2	0.600	1.525	1.496	0.915	1.204	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
3	0.900	1.677	1.645	1.220	1.572	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
4	1.200	1.830	1.795	1.525	1.938	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
5	1.500	1.983	1.941	1.930	2.303	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
6	1.800	2.135	2.090	2.135	2.667	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
7	2.100	2.288	2.240	2.440	3.030	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
8	2.400	2.440	2.392	2.745	3.400	0.915	0.610	0.915	0.076	0.229
pies										
10	3.000	-	4.267	3.658	4.756	1.219	0.914	1.829	0.152	0.343
12	3.600	-	4.877	4.470	5.607	1.524	0.914	2.438	0.152	0.343
15	4.500	-	7.620	5.588	7.620	1.829	1.219	3.048	0.229	0.457
20	6.000	-	7.620	7.315	9.144	2.134	1.829	3.658	0.305	0.685
25	7.500	-	7.620	8.941	10.560	2.134	1.829	3.962	0.305	0.685
25	7.500	-	7.620	8.941	10.560	2.134	1.829	3.962	0.305	0.685
30	9.000	-	7.925	1.056	12.310	2.134	1.829	4.267	0.305	0.685
40	12.000	-	8.230	1.384	15.480	2.134	1.829	4.877	0.305	0.685
50	15.000	-	8.230	1.727	18.520	2.134	1.829	6.096	0.305	0.685

Tabla 1.1.2.a Dimensiones típicas de Medidores Parshall según su ancho de garganta.

El mayor uso del medidor Parshall se debe a su baja pérdida de carga. Para iguales longitudes de cresta, operando en idénticas condiciones de flujo libre y con la misma velocidad de descarga, la pérdida de carga del medidor Parshall es la cuarta parte de cualquier vertedor.

Semejante a los vertedores, este medidor trabaja en dos regímenes distintos, descarga libre y ahogamiento (sumergencia).

Los límites de descarga libre se muestran en la siguiente tabla:

Límites de descarga libre				$H/h \leq$ (Límite)
Tamaño del medidor				
m		pulg.	pies	
0.025 - 0.075	1 - 3	0.083 - 0.25	0.5	
0.150 - 0.230	6 - 9	0.500 - 0.750	0.6	
0.300 - 2.400	12 - 96	1 - 8	0.7	
3.000 - 15.000	120 - 600	10 - 50	0.8	

Con la descarga libre, la única medida de carga necesaria y suficiente para conocer el caudal es  $h$  que se localiza en la sección convergente en un punto localizado a  $2/3$  de  $A$ . Esta medición es idéntica a la que se realiza en los vertedores.

Si se tiene ahogamiento se tienen que usar factores de corrección para el cálculo del gasto.

## B) FORMULAS

Los numerosos experimentos y observaciones hechos con medidores Parshall llevaron resultados que corresponden a expresiones del tipo:

$$Q = \tau h^\beta \quad (1.1.2.1)$$

La **tabla 1.1.2.b** muestra los valores del coeficiente  $\tau$ , del exponente  $\beta$  y el gasto considerando el funcionamiento en régimen de descarga libre. Los gastos que arroja la fórmula estarán en  $\text{ft}^3/\text{s}$  para medidas inglesas y  $\text{m}^3/\text{s}$  para unidades métricas.

Así por ejemplo, para el Parshall de 1 pie, la ecuación de caudal en el sistema métrico e inglés es respectivamente:

$$Q = 0.690h^{1.522} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q = 3.995h^{1.522} \quad (\text{ft}^3/\text{s})$$

Los autores, con base en los propios datos de Parshall, obtuvieron la siguiente fórmula aproximada para estos medidores:

$$Q = 2.20Wh^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.1.2.2a)$$

$$Q = 3.98Wh^{3/2} \quad (\text{ft}^3/\text{s}) \quad (1.1.1.2b)$$

$W$		$\beta$	$\tau$	$\tau$	Capacidad (l/s) $Q = \tau h^\beta$		Rango de cargas $h$ (m)	
pies	(m)		Unidades inglesas	Unidades métricas	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
0.08 (1")	0.025	1.549	0.337	0.0604	0.09	5.40	0.01	0.21
0.17 (2")	0.050	1.549	0.674	0.1207	0.18	13.20	0.01	0.24
0.25 (3")	0.075	1.550	0.988	0.1771	0.77	32.10	0.03	0.33
0.50 (6")	0.150	1.579	2.060	0.3812	1.50	111.00	0.03	0.45
0.75 (9")	0.225	1.530	3.064	0.5354	2.50	251.00	0.03	0.61
1	0.300	1.522	3.995	0.6909	3.32	457.00	0.03	0.76
1-1/2	0.450	1.538	5.994	1.0565	4.80	695.00	0.03	0.76
2	0.600	1.549	7.995	1.4280	12.10	937.00	0.04	0.76
3	0.900	1.565	11.986	2.1840	17.60	1,427.00	0.04	0.76
4	1.200	1.568	16.165	2.9530	35.80	1,923.00	0.06	0.76
5	1.500	1.577	20.206	3.7320	44.10	2,424.00	0.06	0.76
6	1.800	1.595	23.978	4.5190	74.10	2,929.00	0.07	0.76
7	2.100	1.600	27.958	5.3120	85.80	3,438.00	0.07	0.76
8	2.400	1.606	31.938	6.1120	97.20	3,949.00	0.07	0.76
<b>m<sup>3</sup>/s</b>								
10	3.000	1.595	39.537	7.4830	0.16	8.28	0.09	1.07
12	3.600	1.595	46.951	8.8590	0.19	14.68	0.09	1.37
15	4.500	1.604	57.463	10.9500	0.23	25.04	0.09	1.67
20	6.000	1.595	76.604	14.4500	0.31	37.97	0.09	1.83
25	7.500	1.600	94.476	17.9400	0.38	47.14	0.09	1.83
30	9.000	1.595	118.613	21.4400	0.48	56.33	0.09	1.83
40	12.000	1.602	149.538	28.4300	0.60	74.70	0.09	1.83
50	15.000	1.600	186.467	35.4100	0.75	93.04	0.09	1.83

Tabla 1.1.2.b.- Límites de medición para Parshall con descarga libre.

### 1.1.2.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

#### ❖ *Exactitud y precisión*

Exactitud:  $\pm 3\%$       Precisión:  $\pm 5\%$

#### ❖ *Instalación*

Los medidores Parshall no deben ser instalados inmediatamente después de una compuerta o una curva, pues las ondas o sobre-elevaciones en el agua podrían alterar los resultados.

Lo ideal es proyectar estos medidores en un tramo recto aguas arriba de longitud  $10 D$ .

### ❖ *Aplicaciones*

El medidor Parshall fue ideado teniendo como objetivo principal la irrigación; los más pequeños para regular la descarga distribuida a las propiedades agrícolas, y los más grandes para ser aplicados a los grandes canales de riego.

También se utilizan en la medición de agua cruda, aguas residuales y aguas tratadas pero no se recomiendan en la medición de caudales que contengan lodos o químicos.

### ❖ *Mantenimiento y calibración*

- Hacer semanalmente lecturas de nivel por simple inspección visual y calcular el gasto mediante tablas para compararlo con las lecturas del graficador o lecturas remotas, esto indicará si se tiene que revisar el mecanismo del flotador o calibrar el transmisor de nivel.
- Limpiar los residuos bajo el medidor cada tres meses o como sea necesario así como la regla de medición.

### *Ventajas:*

- *Gran facilidad de construcción y bajo costo de ejecución.* \*
- *Solo una medición es suficiente (h).* \*
- *En su construcción pueden ser empleados diversos materiales como: concreto, mampostería, madera, metal, asbesto, cemento, etc.* \*
- *No hay peligro de formación de depósitos debido a materias en suspensión.*
- *Gran habilidad en soportar sumergencias elevadas, sin alteración del caudal.*
- *La mayoría de ellos ya fueron ensayados hidráulicamente, lo que permite su empleo en condiciones semejantes.*
- *Pérdida de carga muy pequeña.*

### *Desventajas:*

- *La exactitud se deteriora con el uso.* \*
- *No recomendable para flujos fluctuantes.* \*

\* *Aplica a vertedores también.*

## 1.2 MEDIDORES EN CONDUCTO CERRADO (TUBERIAS)

El empleo del término tubería está limitado generalmente en su aplicación a los conductos cerrados que llevan agua bajo presión. Usualmente las tuberías son de sección circular porque esta forma combina la ventaja de resistencia estructural con la simplicidad de diseño.

De todas las tuberías que tienen igual área en su sección pero diferente forma la tubería circular tiene el perímetro más pequeño de la sección y por consiguiente posee el área de paredes interiores más pequeña por metro de longitud. De esto se deriva que la resistencia que la tubería circular ofrece al escurrimiento del agua es menor que una tubería de cualquier otra sección geométrica.

A continuación se hace una descripción de los dispositivos que con mayor frecuencia han sido empleados para la medición del caudal en tuberías a presión y en algunos casos se proporciona información sobre sus orígenes. Se menciona además su principio de funcionamiento y la relación que guarda con las características del flujo.

Por último, se enumeran las ventajas y desventajas técnicas que posee cada uno de los medidores.

Estas características permiten seleccionar aquellos que se adaptan más fácilmente a las condiciones cambiantes de los diferentes lugares en que se pretenda efectuar el aforo en una tubería.

### 1.2.1

## MEDIDOR VENTURI

En 1797 el físico italiano Giovanni Battista Venturi presentó su trabajo sobre el tubo que lleva su nombre, sin embargo fue hasta 1887 que el ingeniero norteamericano Clemens Herschel utilizó estas investigaciones para fabricar el primer tubo Venturi comercial. Este dispositivo es muy simple en su forma y detalles, consta de dos secciones cónicas convergentes de tubo unidas por una sección corta cilíndrica. El medidor debe insertarse en la tubería donde se quiere medir el gasto.

Su funcionamiento consiste en producir un estrangulamiento de la sección transversal de la tubería con lo que se logra un cambio en las presiones de una sección a otra. Con la medición de este cambio es posible conocer el gasto que circula por la sección. En la **figura 1.2.1.a** se muestra el corte longitudinal de un Venturi.

Comenzando en la brida aguas arriba hay primero una corta sección cilíndrica de diámetro  $D$  que es continuación de la tubería, labrada a máquina interiormente o de vaciado muy liso de manera que su diámetro pueda determinarse con exactitud. En esta parte hay uno o varios agujeros laterales que atraviesan la pared en un anillo piezométrico para hacer la toma de la presión estática.

La transición del cono de entrada a la garganta recta está redondeada con una suave curva tangencial para evitar la resistencia producida por la arista viva e impedir a alta velocidad la posible separación del líquido de la pared.

El diámetro de la garganta ( $d$ ) mide generalmente  $1/2 D$  a  $1/4 D$ , por lo general hay en ella una junta o un agujero para la mano para facilitar la inspección del estado de la misma y permitir la medición exacta del diámetro de la garganta.

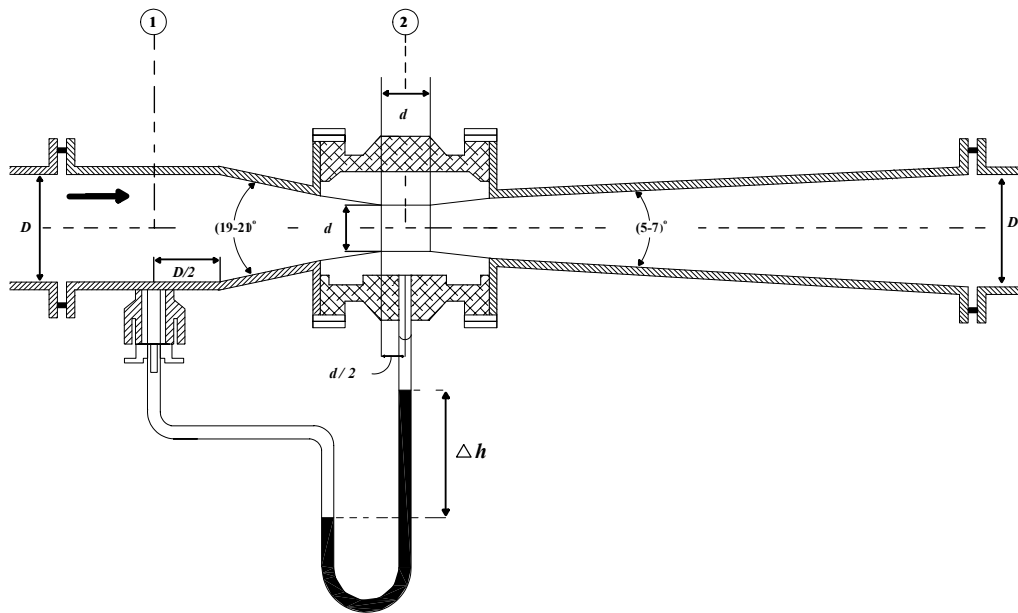


Figura 1.2.1.a Corte longitudinal de un medidor Venturi.

El extremo de la garganta conduce por otra curva suave al cono de salida (difusor) con un ángulo de 5° a 7°. Este termina en la brida aguas abajo que conecta el medidor a la tubería que sigue.

La función del cono divergente largo es retardar o acelerar el fluido suavemente y restaurar la presión tan cerca como sea posible de su valor de entrada.

En general la longitud de un Venturi es aproximadamente  $8D$ .

#### DEDUCCION DE LA FORMULA.

Para efectos prácticos en la deducción de la fórmula se despreciarán las pérdidas de energía.

Aplicando la ecuación de Bernoulli a  $z_1$  y  $z_2$  como cargas de posición respecto de un plano de referencia cualquiera en las secciones 1 y 2, y por otra parte auxiliándose de la ecuación de continuidad tenemos las siguientes expresiones:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \text{ ----- (1)} \quad v_1 = \frac{v_2 A_2}{A_1} \text{ ----- (2)}$$

Con  $h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right)$  de la ecuación 1 y sustituyendo la ecuación 2, se obtiene:

$$h = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \rightarrow 2gh = v_2^2 - \frac{v_2^2 A_2^2}{A_1^2} \rightarrow v_2 = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} = \frac{\sqrt{2g}\sqrt{h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

Dejando la última expresión en términos de los diámetros de la tubería y aplicando la ecuación para gasto  $Q = A_2 v_2$  se tiene que:

$$v_2 = \frac{\sqrt{2g}\sqrt{h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \Rightarrow Q = \frac{3.48d^2\sqrt{h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

Finalmente se obtiene el gasto en términos del coeficiente de descarga  $C_d$ :

$$Q = \frac{3.48 \cdot C_d \cdot d^2 \sqrt{h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \text{ (m}^3\text{/s); } Q = \frac{21.8 \cdot C_d \cdot d^2 \sqrt{h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \text{ (pulg}^3\text{/s) ----- (1.2.1.1)}$$

\*  $h = [\Delta h \cdot (\gamma_m / \gamma) - 1]$  en términos del líquido manométrico.

El coeficiente de descarga se define como  $C_d = C_c C_v = \beta \cdot C_v$

Donde  $C_c = d/D$  es el coeficiente de contracción y  $C_v$  es el coeficiente de velocidad que se introduce para corregir los errores debidos a la omisión de la pérdida de carga producida por la fricción de las paredes del tubo.

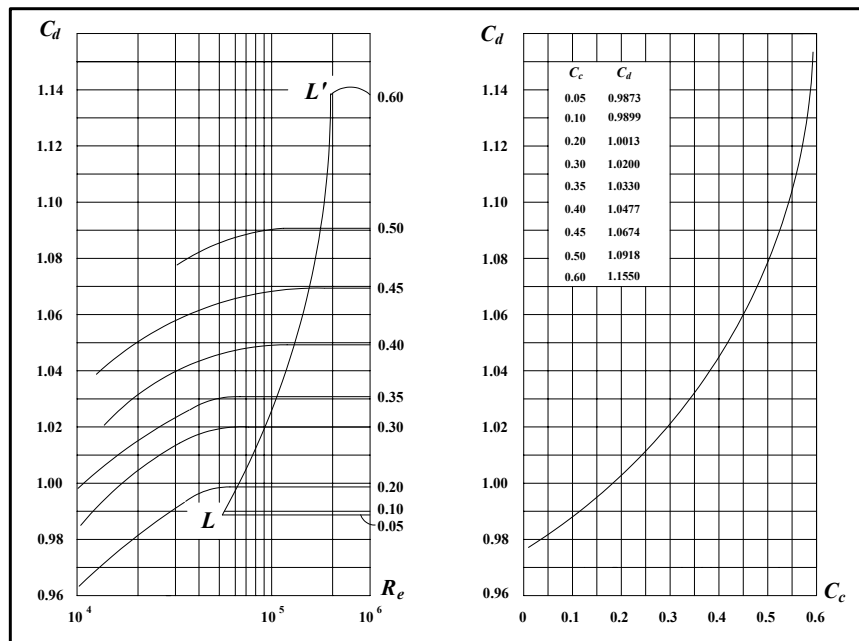
Los valores de  $C_v$  y  $C_d$  dependen del número de Reynolds:  $R_e = \frac{v_2 D_2}{\nu}$



Donde  $D_2$  es el diámetro de la sección estrangulada,  $v_2$  es la velocidad media en la misma, y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del líquido.

Con base en investigaciones sistemáticas se establecieron normas para definir el valor medio de  $C_{dr}$  en la **figura 1.2.1.b** se muestran las gráficas donde se obtienen sus valores.

Para los medidores Venturi, el valor medio de  $C_d$  está alrededor de 0.975.



(1)

(2)

Figura 1.2.1.b.  $C_d$  en función de  $R_e$  (1) y de  $C_c$  (2) para un Venturi.

Una ventaja significativa del Venturi es su baja pérdida de presión comparada con otros dispositivos. Esta pérdida oscila entre un 10 y un 20% de la presión diferencial lo que indica que entre un 80 y 90% de la caída de presión se recupera en el cono divergente.

Por ejemplo, un Venturi de  $C_c = 0.6$  tiene una pérdida de presión de sólo el 15% de la actual presión diferencial comparado con un 50% de la tobera y un 63% de la placa orificio.

Aunado a la ventaja anterior, en iguales condiciones de servicio el Venturi permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa orificio, pero su costo es del orden de 20 veces mayor.

La pérdida de presión disminuye a medida que aumenta la corriente o aumenta el tamaño del medidor.

### 1.2.1.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

#### ❖ *Exactitud y precisión*

La exactitud y precisión de un Venturi se mantiene durante un periodo muy largo y solo varía en conjunto con el elemento secundario de medición (transmisor). Los valores más comunes son los siguientes:

Exactitud:  $\pm 1\%$ ;                      Precisión:  $\pm 1$

#### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Se pueden medir flujos desde 0.8 l/min hasta 3,800 m<sup>3</sup>/min y su campo de medida es de 4:1. Los tamaños del medidor varían de 1/2" hasta 120". Límites usuales de aplicación se muestran en la **tabla 1.2.1.a.**

#### ❖ *Construcción*

Los medidores Venturi se fabrican con diversos materiales como metales (acero al carbón, acero inoxidable, latón, bronce, níquel, tantalio, zirconio etc.), aleaciones (inconel, monel, cromo-molibdeno, etc.), plásticos (resinas, PVC, fibra de carbono, acrílico, teflón, etc.), o incluso vidrio (sólo para diámetros pequeños). Las conexiones en los extremos pueden ser bridadas o soldables.

Comúnmente los Venturi pequeños ( $D < 8''$ ) se maquinan en una sola pieza a partir de una barra de metal u otro material. Después se les da un acabado liso y pulimentado en todo su interior para reducir la resistencia.

					<b>Gasto (GPM)</b>			
<i>D</i>		<i>C<sub>c</sub></i>	<i>d</i>		<i>h (pulgadas de agua)</i>			
pulg.	m		pulg.	m	20	50	100	200
1/2	0.013	0.3	0.15	0.004	0.56	0.88	1.25	1.77
		0.5	0.25	0.006	1.60	2.52	3.57	5.05
		0.7	0.35	0.009	3.48	5.50	7.77	10.99
1	0.025	0.3	0.30	0.008	2.24	3.53	5.00	7.07
		0.5	0.50	0.013	6.39	10.10	14.28	20.20
		0.7	0.70	0.018	13.90	21.98	31.09	43.97
2	0.050	0.3	0.60	0.015	8.94	14.14	19.99	28.28
		0.5	1.00	0.025	25.55	40.39	57.13	80.79
		0.7	1.40	0.035	55.62	87.94	124.36	175.88
3	0.075	0.3	0.90	0.023	20.12	31.81	44.99	63.62
		0.5	1.50	0.038	57.48	90.89	128.53	181.77
		0.7	2.10	0.053	125.14	197.86	279.82	395.73
4	0.100	0.3	1.20	0.030	35.77	56.55	79.97	113.10
		0.5	2.00	0.050	102.19	161.58	228.50	323.15
		0.7	2.80	0.070	222.47	351.76	497.46	703.51
6	0.150	0.3	1.80	0.045	80.47	127.24	179.94	254.48
		0.5	3.00	0.075	229.93	363.55	514.13	727.09
		0.7	4.20	0.105	500.56	791.45	1,119.28	1,582.90
8	0.200	0.3	2.40	0.060	143.06	226.20	319.90	452.40
		0.5	4.00	0.100	408.76	646.31	914.02	1,292.61
		0.7	5.60	0.140	889.88	1,407.03	1,989.83	2,814.05
10	0.250	0.3	3.00	0.075	223.53	353.44	499.84	706.88
		0.5	5.00	0.125	638.69	1,009.85	1,428.15	2,019.71
		0.7	7.00	0.175	1,390.44	2,198.48	3,109.12	4,396.96
20	0.500	0.3	6.00	0.150	894.13	1,413.75	1,999.35	2,827.50
		0.5	10.00	0.250	2,554.75	4,039.42	5,712.60	8,078.83
		0.7	14.00	0.350	5,561.76	8,793.91	12,436.47	17,587.82
30	0.750	0.3	9.00	0.225	2,011.80	3,180.94	4,498.53	6,361.88
		0.5	15.00	0.375	5,748.19	9,088.69	12,853.34	18,177.37
		0.7	21.00	0.525	12,513.95	19,786.30	27,982.05	39,572.60

**Tabla 1.2.1.a Gastos de un Venturi.**

Los Venturi de tamaño mediano ( $8'' \leq D \leq 32''$ ) se fabrican de metal en talleres de fundición o de plástico por medio de moldes.

Los Venturi grandes ( $32'' \leq D < 120''$ ) se construyen de hormigón, duelas de madera o planchas de acero, los materiales de la garganta son metálicos. Estos medidores son construidos y armados en secciones, en ellos es más fácil introducir accesorios para medir la presión.

### ❖ *Instalación*

Los Venturi puede ser instalados en cualquier posición siempre y cuando funcionen llenos de líquido y las tomas de presión deben estar colocadas en la mitad superior del plano meridiano.

No debe instalarse inmediatamente después de una conexión, válvula, irregularidad de la tubería, turbulencias, etc., sino que debe estar precedida por una longitud de tubería recta en la que pueda regularizarse la corriente después de cualquier perturbación. Una medida prudente es de aproximadamente  $20D$ .

Se recomienda no instalar un Venturi cuando en la línea se ha montado una bomba de desplazamiento positivo pues las pulsaciones de flujo producen excesivas perturbaciones al manómetro o al transmisor.

En la **Tabla 1.2.4.b** se muestran las distancias aguas arriba del medidor para diversos accesorios.

### ❖ *Operación*

Este medidor permite una pérdida de carga del 10-20% y para operarlo eficientemente se sugiere  $1 \times 10^4 < R_e < 6 \times 10^6$ . Se permiten presiones hasta de 6000 PSI (420 Bar) y temperaturas máximas de  $-200^\circ$  a  $760^\circ\text{C}$  ( $-328$  a  $1400^\circ\text{F}$ ). Los límites de velocidad abarcan de 0.1 a 15 m/s

### ❖ *Aplicaciones*

El medidor Venturi permite la medición de fluidos viscosos conteniendo sólidos en suspensión incluyendo mezclas. También es recomendable para medir flujos de agua y aguas de desperdicio previamente tratadas.

Se utiliza también para propulsores de cohetes, fluidos radiactivos, líquidos criogénicos, etc. pero no se debe utilizar en la medición de químicos corrosivos.

### ❖ *Mantenimiento y calibración*

El venturi es un dispositivo de “autolimpieza”. Su diseño elimina la erosión y el atascamiento de materia extraña y también le permite una recuperación de presión suave y eficiente.

La limpieza debe efectuarse manualmente cada dos semanas o cuando el monitoreo indique una disminución de la presión diferencial.

El medidor debe re-calibrarse cuando el monitoreo de la señal indique un cambio en la exactitud mientras que al transmisor se le debe hacer cada mes.

#### ***Ventajas:***

- *Su vida útil promedio es de 30 años aunque puede superar los 50 dependiendo de los materiales empleados en su construcción.*
- *Simple en su construcción, sin incluir partes móviles.*
- *No presenta cambios repentinos de presión al paso del flujo.*
- *El ensanchamiento gradual después de la sección contracta ocasiona que no se tengan grandes pérdidas de presión.*
- *Debido a su constante aplicación, este medidor ha sido ampliamente estudiado, teniéndose a la fecha bastante información para su construcción.*
- *Su funcionamiento es mecánico.*

#### ***Desventajas:***

- *Al ser un medidor de grandes dimensiones generalmente es muy pesado, esto ocasiona que sea difícil su colocación en lugares donde se disponga de una longitud pequeña de tubería.*
- *Para conocer el gasto en la tubería se requiere una expresión matemática que está en función de la diferencial de presión.*
- *En dicha expresión la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango del flujo sino que se requiere extraer la raíz cuadrada.*

## 1.2.2

## TOBERA

Las primeras noticias sobre el uso comercial de las toberas datan de documentos de mediados del siglo XIX y fue en 1934 que la ASME inició un extenso programa de investigación sobre los coeficientes para este dispositivo que es una modificación simplificada del Venturi.

Las toberas en general son conductos convergentes en la dirección del flujo (**figura 1.2.2.a**) que producen un aumento de velocidad y una disminución de la presión.

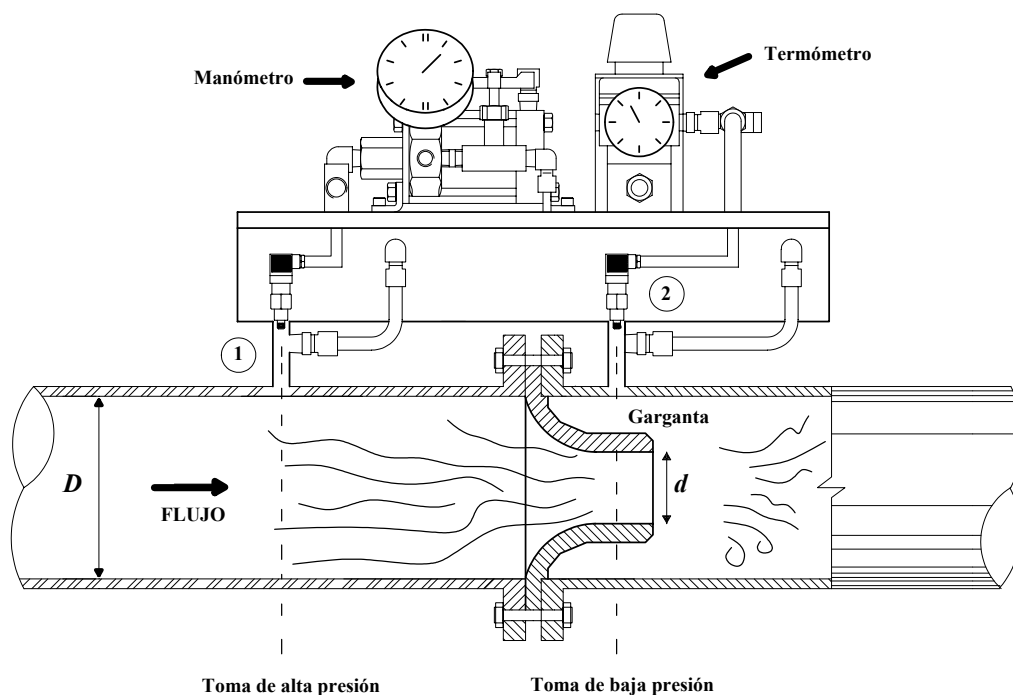


Figura 1.2.2.a Tobera intercalada entre bridas con manómetro diferencial de carátula y termómetro.

La fórmula para calcular el gasto es la misma que para el Venturi (**ecuación 1.2.1.1**), el coeficiente de descarga también es muy cercano.

En las toberas estándar o normalizadas se pueden emplear los valores de la **figura 1.2.2.b**.

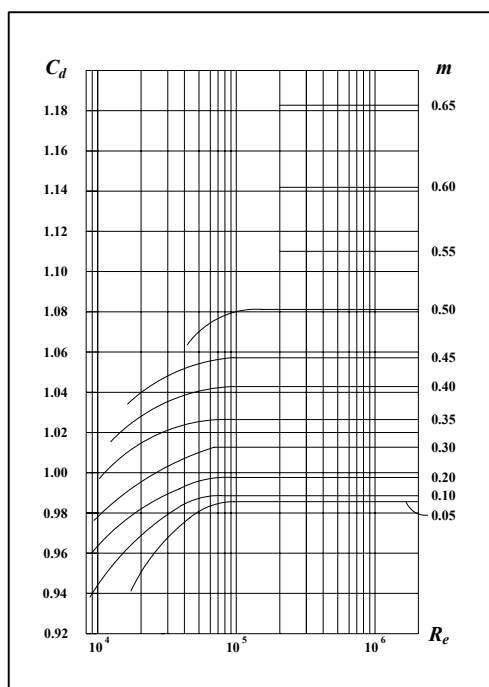


Figura 1.2.2.b  $C_d$  en función de  $R_e$  para una tobera.

La tobera se sujeta a la tubería intercalándola entre bridas o por medio de tornillos, esto se realiza cuando se requiere mayor precisión exactitud.

Cuando se trabaja a altas presiones y temperaturas elevadas la tobera se utiliza soldada a la tubería, en tal caso se dispone de secciones completas para facilitar su instalación.

Las toberas pequeñas ( $D < 4''$ ) se construyen de la misma forma que los Venturi pequeños, las toberas grandes de manera similar a los Venturi de tamaño mediano, en ambos casos se utilizan los mismos materiales de construcción.

La tobera es un medidor que no ha sido estudiado de manera extensiva como el resto de los medidores de presión diferencial por lo que se carece en muchas ocasiones de respaldo técnico e ingenieril para su diseño y construcción.

Sin embargo, se puede mencionar que su pérdida de carga es del 30 al 50% de la presión diferencial; respecto a la placa orificio su costo es 8 a 16 veces mayor y permite caudales 60% más grandes.

### 1.2.2.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

#### ❖ *Exactitud y precisión*

Exactitud  $\pm 1\%$ , precisión  $\pm 1\%$ .

#### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Sus valores típicos de medición abarcan desde 20 lt/min a 1,400 m<sup>3</sup>/min (5-360,000 gal/min) y su campo de medida típico es de 4:1. Los tamaños de tubería varían de 0.5 a 60 cm (2"-48").

Valores de gastos se muestran en la **tabla 1.2.2.a**.

D		C <sub>c</sub> =0.3				C <sub>c</sub> =0.7			C <sub>c</sub> =0.3			C <sub>c</sub> =0.7			
pulg.	m	h	Gasto		v	Gasto			h	Gasto		v	Gasto		
		H <sub>2</sub> O	GPM	l/s	m/s	GPM	l/s	m/s		GPM	l/s	m/s	GPM	l/s	m/s
2	0.05	5,700	150.90	9.51	4.84	938.90	59.15	30.13	2,300	95.9	6.04	3.08	596.40	37.58	19.14
3	0.08	5,300	327.50	20.63	4.67	2,037.10	128.34	29.05	2,000	201.2	12.67	2.87	1,251.40	78.84	17.85
4	0.10	5,000	565.50	35.63	4.54	3,517.60	221.61	28.22	1,700	329.7	20.77	2.64	2,051.10	129.22	16.45
6	0.15	4,700	1,233.60	77.72	4.40	7,673.40	483.42	27.36	1,500	696.9	43.91	2.48	4,335.00	273.10	15.45
8	0.20	4,400	2,121.90	133.68	4.26	13,199.10	831.54	26.47	1,200	1,108.1	69.81	2.22	6,893.00	434.26	13.82
10	0.25	4,100	3,200.50	201.63	4.11	19,908.10	1,254.21	25.55	1,000	1,580.6	99.58	2.03	9,831.90	619.41	12.62
12	0.30	3,900	4,494.90	283.18	4.01	27,959.70	1,761.46	24.92	700	1,904.3	119.97	1.70	11,845.40	746.26	10.56
16	0.41	3,700	7,783.40	490.35	3.90	48,414.80	3,050.13	24.27	500	2,861.2	180.26	1.43	17,797.60	1,121.25	8.92
20	0.51	3,500	11,828.30	745.18	3.80	73,575.10	4,635.23	23.61	300	3,463.0	218.17	1.11	21,540.60	1,357.06	6.91
24	0.61	3,300	16,538.90	1,041.95	3.69	102,876.60	6,481.22	22.92	100	2,879.1	181.38	0.64	17,908.50	1,128.24	3.99
30	0.76	3,100	25,046.70	1,577.94	3.57	155,797.50	9,815.24	22.22	75	3,895.8	245.44	0.56	24,233.20	1,526.69	3.46
36	0.91	2,900	34,884.40	2,197.72	3.45	216,990.70	13,670.41	21.49	50	4,580.6	288.57	0.45	28,492.30	1,795.01	2.82
42	1.07	2,700	41,555.60	2,618.00	3.33	258,487.10	16,284.69	20.73	30	4,380.3	275.96	0.35	27,246.90	1,716.56	2.19
48	1.22	2,500	57,581.10	3,627.61	3.21	358,170.30	22,564.73	19.95	20	5,150.2	324.46	0.29	32,035.70	2,018.25	1.78

*Nota: Gastos aplicables en tubería de acero cédula 40S/STD.*

Tabla 1.2.2.a Valores de gasto para una tobera.

#### ❖ *Instalación*

Ver tabla 1.2.4.b



### ❖ *Operación*

Las presiones de operación no deben exceder las 6000 PSI (420 Bar) y soportan temperaturas de -200° a 760 °C (-328 a 1400 °F).

Estos medidores son recomendables para flujos de alta velocidad, desde 0.15 hasta 30 m/s y su funcionamiento es más eficiente si los valores de  $R_e$  oscilan entre  $1 \times 10^4$  y  $6 \times 10^6$

Las toberas pueden emplearse para fluidos que arrastren sólidos pero si estos sólidos son abrasivos pueden afectar la precisión del medidor.

### ❖ *Aplicaciones*

Las aplicaciones de las toberas se enfocan principalmente para altas presiones y temperaturas al igual que para líquidos con viscosidad media conteniendo suspensiones.

Se utilizan para medir y controlar la descarga de agua en embarcaciones, sistemas de limpieza e irrigación. También se emplean en instalaciones de plantas de potencia.

### ❖ *Mantenimiento y calibración*

Debido a que el fluido sale expulsado del medidor a una velocidad relativamente alta el atascamiento de materia extraña es poco frecuente, por eso la limpieza se sugiere efectuarla manualmente cada mes. El medidor debe re-calibrarse cuando la señal de salida indique variaciones notables en la exactitud, el transmisor lo debe recibir cada mes y medio.

### *Ventajas:*

- *No tiene partes móviles.*
- *Dependiendo costo del material con que se construya, puede presentar una gran vida útil.*
- *Posee una simplicidad en su diseño e instalación.*
- *Su funcionamiento es mecánico.*
- *Requiere una instalación mínima de tubería aguas abajo.*

### ***Desventajas:***

- *Gran sensibilidad a las distorsiones ocasionadas por las variaciones en el perfil de velocidades.*
- *Es afectado su funcionamiento por la vibración en la tubería y por la presencia de burbujas de aire en el agua.*
- *Se instala en un rango limitado de diámetros en una tubería.*
- *Para conocer el gasto en la tubería se requiere una expresión matemática que está en función de la diferencial de presión.*
- *En dicha expresión la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que se requiere extraer la raíz cuadrada.*

### 1.2.3

### TUBO DE PITOT

El tubo de Pitot fue diseñado y utilizado por el ingeniero francés Henry Pitot en 1730 para realizar experimentos en el río Sena. Consiste en dos tubos, uno inserto en el centro de otro y ambos doblados en la dirección donde viene el fluido.

El tubo interior mide la presión total o de estancamiento ( $\mu$ ), el tubo exterior tiene puertos de sensado perpendiculares a su circunferencia y mide la presión estática ( $\beta$ ), de tal forma que el dispositivo permite medir la presión dinámica ( $\mu - \beta$ ).

Los puertos se encuentran separados entre la punta y el doblado a una distancia de tres y ocho diámetros respectivamente.

En la **figura 1.2.3.a-A** se muestra un tubo de Pitot introducido en una corriente de fluido con un peso específico  $\gamma$ , el dispositivo está conectado a un manómetro diferencial cuyo líquido manométrico tiene un peso específico  $\gamma_m$ .

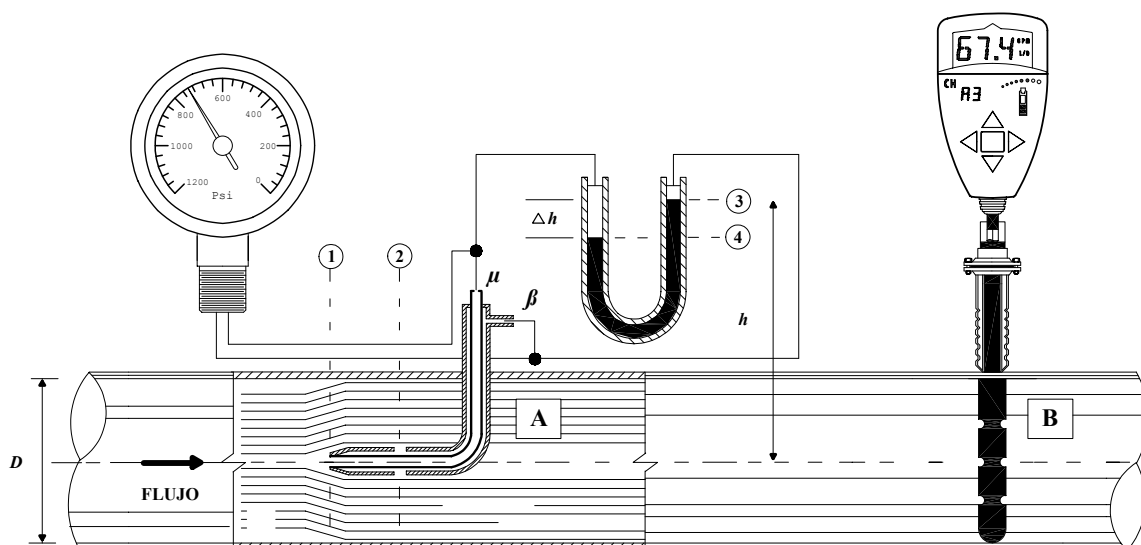


Figura 1.2.3.a Tubo de Pitot con indicación analógica (izquierda) y digital (derecha).

El tubo de Pitot al ser introducido en el fluido produce una perturbación que se traduce en la formación de un punto de estancamiento (sección 1) de manera que  $v_1 = 0$ .

Para satisfacer el equilibrio estático, entre las columnas del líquido y del manómetro, se debe cumplir con lo siguiente:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + h \text{ ----- (1)} \quad \frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_4}{\gamma} + (h + \Delta h) \text{ ----- (2)}$$

Además  $p_3 = p_4 + \gamma_m \Delta h$ , sustituyendo esta expresión en (1):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_4}{\gamma} + \frac{\gamma_m}{\gamma} \Delta h + h \text{ ----- (3)} ; \text{ y de (2): } \frac{p_4}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} - h - \Delta h \text{ ----- (4)}$$

Sustituyendo (4) en (3) y teniendo en cuenta que  $p_1 = p_2$

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} - h - \Delta h + \frac{\gamma_m}{\gamma} \Delta h + h \rightarrow \frac{v_1^2}{2g} = \Delta h \left( \frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right) \rightarrow v_1 = \sqrt{2g\Delta h \left( \frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)}$$

Dejando la última expresión en términos del diámetro de la tubería e introduciendo un coeficiente de descarga como en los casos anteriores la expresión para el gasto es:

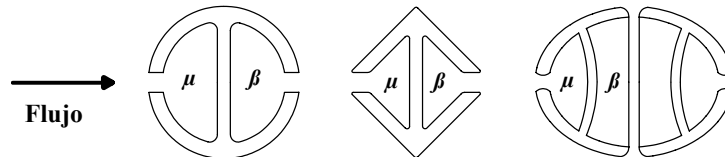
$$Q = 3.48 \cdot C_f \cdot D^2 \sqrt{h} \text{ --- (m}^3\text{/s)}; \quad Q = 21.8 \cdot C_f \cdot D^2 \sqrt{h} \text{ --- (pulg}^3\text{/s)} \text{ --- ( 6.1)}$$

$$* \sqrt{h} = \sqrt{\Delta h \left( \frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \text{ en términos del manómetro de mercurio;} \\ C_f = 0.91 \text{ (Coeficiente de impacto)}$$

En este modelo de inserción algunos fabricantes disponen de mecanismos que permiten mover verticalmente y girar el tubo Pitot orientándolo en dirección contraria, esto permite abarcar un área más representativa en la medición y por otro lado obtener una medición bidireccional.

En el otro modelo de inserción (**figura 1.2.3.a-B**) los puertos de sensado están distribuidos en la vertical del tubo y orientados lateralmente aguas arriba y aguas abajo, e inclusive frontalmente por lo que el medidor también permite una medición bi-direccional.

La siguiente ilustración muestra la geometría de los sensores y su posición respecto al flujo,  $\mu$  es la presión total y  $\beta$  es la presión estática.



Los tubos Pitot se fabrican de metal (acero inoxidable, aluminio, cobre, bronce, diversas aleaciones, etc.) o plástico (PVC, resina, teflón, etc.)

Los tubos de Pitot de diámetros pequeños se fabrican a partir de una barra sólida o mediante moldeo, las tomas de presión están separadas y los extremos pueden ser bridados o roscados. Los tubos de Pitot más grandes son de inserción con montaje fijo o retráctil.

Los diámetros de prueba para tubos Pitot pequeños y de inserción son ( $3/16 - 1/4''$ ) y ( $3/8 - 3 1/2''$ ) respectivamente, los diámetros del sensor son ( $1/64 - 3/32''$ ) y ( $1/8 - 1 3/8''$ ) también respectivamente.

### 1.2.3.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

#### ❖ *Exactitud y precisión*

Exactitud:  $\pm 2\%$ ;                      Precisión: 0.1%

#### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Pueden abarcar caudales de 10 lt/min a 1,600 m<sup>3</sup>/min pero su campo de medida es bajo 3.5:1 (ver **tabla 1.2.3.a**). Los diámetros disponibles son: 12 mm-75 mm ( $1/2'' - 3''$ ) para medidores pequeños; 50 mm - 3 m ( $1/2'' - 120''$ ) para medidores de inserción fija; 150 mm - 1 m (6 - 42'') para medidores de inserción retráctil.

### ❖ *Instalación*

El tubo Pitot puede montarse vertical u horizontalmente cuidando que los puertos múltiples se sitúen de frente al flujo aguas arriba. También se requiere que funcione en una tubería recta y suave aguas arriba y aguas abajo (**Tabla 1.2.4.b**), cuando esto no es posible se debe usar un enderezador de flujo.

El transmisor se debe montar de manera que las conexiones de alta y baja presión estén exactamente a igual elevación, además se debe proveer una válvula de tres salidas para conectar un manómetro portátil durante la calibración.

<i>D</i>		<i>h</i>		GASTO <sub>máx.</sub>		Veloc.		<i>D</i>		<i>h</i>		GASTO <sub>máx.</sub>		Veloc.	
pulg.	m	pulg.	GPM	l/s	m/s	pulg.	m	pulg.	GPM	l/s	m/s	pulg.	GPM	l/s	m/s
1/2	0.01	1,100	38.95	2.45	20.00	20	0.51	750	51,462.16	3,242.12	16.51				
3/4	0.02	1,075	86.64	5.46	19.77	24	0.61	700	71,592.72	4,510.34	15.95				
1	0.03	1,050	152.23	9.59	19.54	30	0.76	500	94,542.02	5,956.15	13.48				
2	0.05	1,025	601.62	37.90	19.30	36	0.91	350	113,903.32	7,175.91	11.28				
3	0.08	1,000	1,337.03	84.23	19.07	42	1.07	250	131,028.55	8,254.80	9.53				
4	0.10	950	2,316.75	145.96	18.58	48	1.22	200	153,071.67	9,643.52	8.53				
6	0.15	925	5,143.64	324.05	18.34	60	1.52	160	213,924.17	13,477.22	7.63				
8	0.20	900	9,019.83	568.25	18.09	72	1.83	125	272,281.01	17,153.70	6.74				
10	0.25	875	13,896.37	875.47	17.83	84	2.13	80	296,483.77	18,678.48	5.39				
16	0.41	800	34,015.93	2,143.00	17.05	96	2.44	65	349,057.12	21,990.60	4.86				
18	0.46	775	42,373.39	2,669.52	16.78	120	3.05	35	400,215.47	25,213.57	3.57				

\* Gastos aplicables en un tubo de acero al carbón cédula 40S/STD.

Tabla 1.2.3.a Límites de aplicación del tubo Pitot.

### ❖ *Operación*

El tubo Pitot se utiliza cuando se acepta una pérdida de presión mínima o cuando el proceso es limpio o libre de sólidos, de lo contrario las partículas grandes pueden tapan los puertos de sensado o incluso la entrada del medidor. Adicionalmente se tienen las siguientes condiciones:

- Presión máxima: 6000 PSI (420 Bar)
- Rango de temperaturas (-200 a 480°C).
- Rango de velocidades de 1 a 20m/seg.
- $R_e$  : sin límite.

### ❖ *Aplicaciones*

El tubo Pitot se utiliza principalmente en la industria química, petroquímica, alimenticia y cervecera entre otras, así como en la medición de caudales de agua y aguas tratadas.

### ❖ *Mantenimiento y calibración*

El tubo Pitot se debe remover para inspeccionar los orificios y verificar que no haya depósitos sólidos a causa del fluido, este procedimiento se debe realizar cada semana.

El medidor debe re-calibrarse cuando la señal visualizada indique periodos extensos de exactitud pobre, el transmisor por su parte debe re-calibrarse cada mes.

### *Ventajas :*

- *Su permanencia se limita al periodo de medición del gasto.*
- *Por su diseño, produce pocas pérdidas de presión en la tubería.*
- *Es fácil de instalar, requiriendo solamente la colocación de una terminal de inserción en la tubería.*
- *Su funcionamiento es mecánico.*
- *Su costo es relativamente bajo.*
- *Se puede remover sin interrumpir el proceso.*

### *Desventajas:*

- *Cualquier fuga en el medidor o en la conexión de inserción a la tubería repercute en la exactitud del aparato.*
- *La variación en el perfil de velocidades afecta su funcionamiento.*
- *Para conocer el gasto en la tubería se requiere una expresión matemática que está en función de la diferencial de presión.*
- *En dicha expresión la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que se requiere extraer la raíz cuadrada.*
- *Su reparación suele ser costosa.*

## 1.2.4

## PLACA ORIFICIO

Una placa orificio es una placa hecha de diversos materiales (metales, aleaciones o plásticos) que lleva un orificio circular de diámetro  $d$  usualmente concéntrico con el eje de la tubería. Este orificio varía del 30 al 80% del diámetro  $D$  de la tubería.

Cuando el fluido pasa por la placa ocurre una modificación en las velocidades ocasionando un cambio de presiones antes y después del orificio cuyo valor permite determinar el gasto.

Este medidor tiene un diseño relativamente simple siendo sencilla su construcción. La placa está montada entre dos bridas, generalmente es baja en costo, fácil de instalar y maneja un rango de fluidos muy grande.

Más del 80% de todos los medidores usados en industrias químicas y de procesos son del tipo placa orificio (**figura 1.2.4.a**).

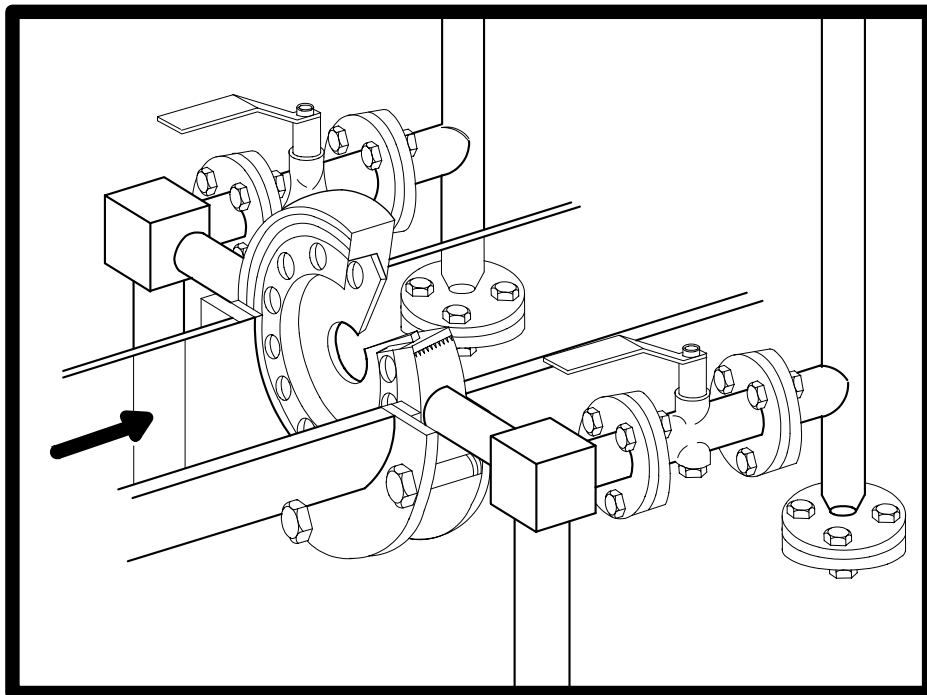
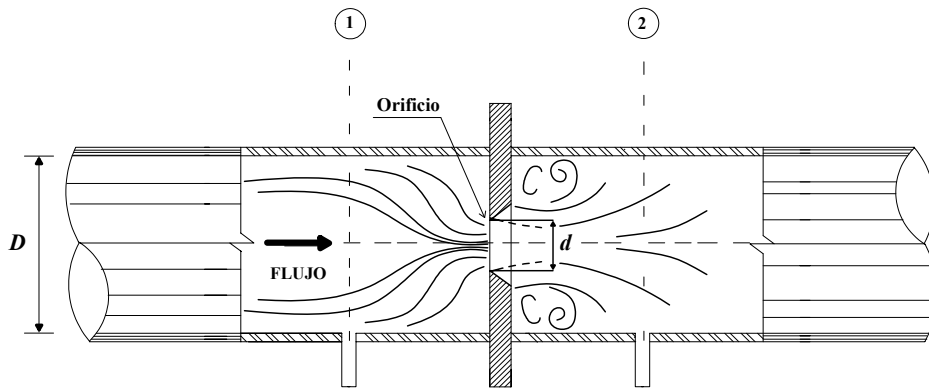


Figura. 1.2.4.a Placa orificio instalada en un proceso industrial.



En la **figura 1.2.4.b.** se presenta un corte transversal de una placa orificio mostrando las secciones 1 y 2 donde se observan las tomas piezométricas que se conectan a un manómetro diferencial. En el esquema se han dibujado también las líneas de corriente.



**Figura. 1.2.4.b** Placa orificio y líneas de corriente.

Una vez que la caída de presión ha sido establecida, el gasto se puede calcular fácilmente.

La fórmula para calcular el caudal es la misma que para el Venturi:

$$Q = \frac{3.48 C_d d^2 \sqrt{\Delta h \left( \frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)}}{\sqrt{1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4}} \quad (7.1)$$

De manera similar que con un Venturi, la placa orificio puede construirse bajo normas establecidas. Para este caso los valores del coeficiente  $C_d$  pueden tomarse de la gráfica mostrada en la **figura 1.2.4.c.** El valor de  $C_c$  se recomienda que sea mayor a 0.25 pero menor a 0.75.

De la fórmula 3.4, se tiene para este medidor en específico que el valor medio del coeficiente  $C_v$  es 0.985 y el valor medio de  $C_c$  es 0.62, por lo que para orificios en general se tiene que el valor de  $C_d$  es 0.61 y es el que se utiliza en problemas prácticos, independientemente del número de Reynolds.

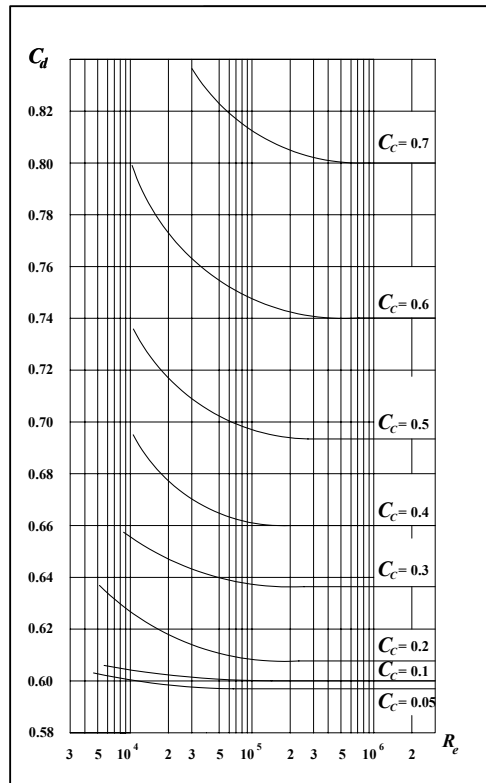


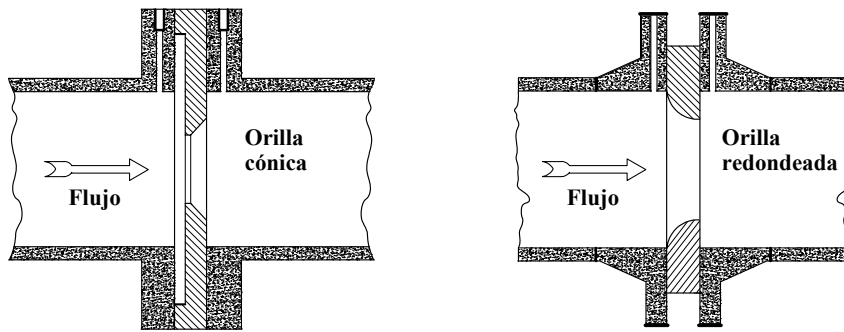
Figura 1.2.4.c  $C_d$  en función de  $R_e$  para una placa orificio.

Los datos de diseño requeridos para un cálculo riguroso del medidor tales como la viscosidad, densidad y temperatura no siempre se conocen exactamente dando como resultado errores de hasta un 10%,

Aunado a esto, hay un gran número de factores tales como la fricción, perfil de velocidades, el grado de contracción, etc. que afectan el cálculo de la caída de presión aunque en forma apenas detectable (ver **Anexo 1**). Sin embargo rara vez se requiere tanta exactitud.

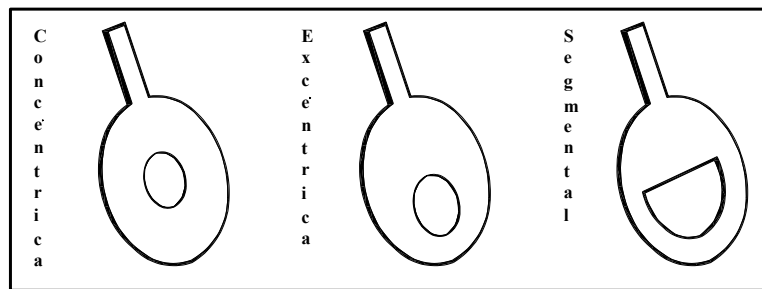
Varios tipos de placa orificio son usados en diferentes aplicaciones como las de orilla cónica (USA) y orilla redondeada (Europa), ambas son usadas para líquidos viscosos porque el chaflán -normalmente a  $45^\circ$ - contrarresta las fuerzas viscosas; se recomiendan para  $R_e \leq 10,000$ .

La placa orificio excéntrica es usada principalmente cuando se miden líquidos que contienen gas o algunos sólidos.



La placa orificio segmental tiene el mismo uso pero principalmente para prevenir la acumulación de material por abajo de la placa cuando se mide en un plano horizontal.

Sin embargo, la placa orificio más usada es concéntrica, plana, delgada y de orilla afilada. Esta placa es usada para líquidos limpios, sin embargo para  $Re$  bajos el  $C_d$  puede variar hasta un 30%.



El grosor de una placa orificio se recomienda como sigue:

Espesor		$D$ (cm)		$D$ (pulg.)	
mm	pulg.	mín.	máx.	mín.	máx.
3	1/8	1.9	15	3/4	6
6	1/4	20.0	35	8	14
9	3/8	40.0	55	16	20
12	1/2	60.0	91	24	36
18	3/4	106.0	240	42	96

Cuando la placa orificio es usada en tubos pequeños,  $1/4'' < D < 1- 1/2''$  los efectos nocivos de la rugosidad del tubo, la excentricidad de la placa y los bordes de la misma llegan a dificultar los cálculos del coeficiente de descarga, por lo tanto se debe establecer por calibración.

Para resolver este problema se encuentran disponibles placas orificio manufacturadas a partir de una barra de acero, bronce u otro material las cuales están pulidas y maquinadas con precisión en una sección de tubería, en ellas las tomas de presión están barrenadas en el tubo.

En muchos casos tales placas son parte integral de un transmisor funcionando satisfactoriamente para cualquier gasto.

Debido al cambio abrupto en el área del fluido con las placas orificio, el tubo no está completamente lleno inmediatamente aguas arriba ni aguas abajo, esto es debido al efecto llamado vena contracta. Este efecto se considera cuando se colocan las tomas de presión.

Las tomas de presión más comunes son las siguientes:

- *Tomas en las esquinas (figura 1.2.4.d-1).*- Las tomas están situadas inmediatamente antes y después de la placa, su empleo requiere un aditamento especial en la placa. Se usa mucho en Europa.
- *Tomas en las bridas (figura 1.2.4.d-2).*- Es bastante 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.
- *Tomas en la vena contracta (figura 1.2.4.d-3).*- La toma posterior está situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta a  $\frac{1}{2}D$  de la tubería después de la placa orificio.
- *Tomas en la tubería (figura 1.2.4.d-4).*- Las tomas anterior y posterior están situadas a  $2\frac{1}{2}D$  y  $8D$ , respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida.

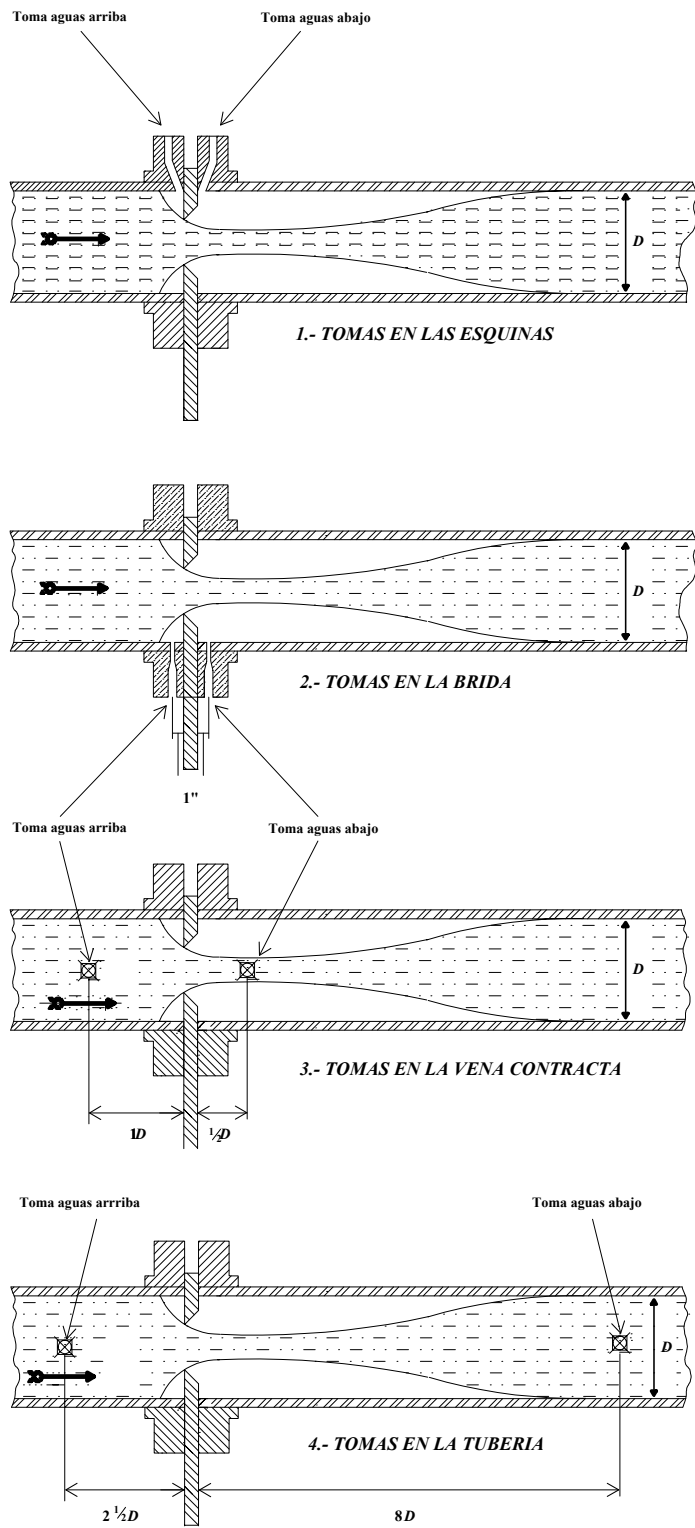


Figura 1.2.4.d Tomas en la tubería para una placa orificio.

### 1.2.4.1

## CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

### ❖ Exactitud y precisión

La exactitud que se puede obtener con una placa orificio es del orden de  $\pm 1$  si el dispositivo no está calibrado, y puede alcanzar el  $\pm 0.25\%$  si se calibra. La precisión es del orden del 0.6%.

Algunos factores que afectan la exactitud son: el tamaño impropio del orificio respecto al coeficiente de contracción; flujos más grandes o pequeños de los esperados; y tubería deficientemente instalada pues altera el perfil de velocidad del fluido.

				Gasto (GPM)						
$D$		$C_c$	$d$		$h$ (PSI)					
pulg.	m		pulg.	m	7	18	25	36	43	58
0.25	0.006	Mín.	0.08	0.002	0.28	0.44	0.52	0.62	0.68	0.78
		Máx.	0.18	0.004	1.72	2.72	3.22	3.84	4.21	4.86
0.50	0.013	Mín.	0.15	0.004	1.11	1.75	2.07	2.47	2.71	3.13
		Máx.	0.35	0.009	6.88	10.87	12.87	15.38	16.85	19.45
0.75	0.019	Mín.	0.23	0.006	2.48	3.92	4.64	5.54	6.07	7.01
		Máx.	0.53	0.013	15.47	24.47	28.95	34.60	37.90	43.77
1.00	0.025	Mín.	0.30	0.008	4.42	6.99	8.27	9.89	10.83	12.51
		Máx.	0.70	0.018	27.51	43.50	51.46	61.51	67.38	77.81
2.00	0.050	Mín.	0.60	0.015	17.69	27.97	33.09	39.56	43.33	50.03
		Máx.	1.40	0.035	110.04	173.98	205.86	246.05	269.53	311.23
3.00	0.075	Mín.	0.90	0.023	39.80	62.93	74.46	89.00	97.50	112.58
		Máx.	2.10	0.053	247.58	391.46	463.18	553.61	606.45	700.27
4.00	0.100	Mín.	1.20	0.030	70.76	111.88	132.38	158.22	173.33	200.14
		Máx.	2.80	0.070	440.15	695.93	823.44	984.20	1,078.13	1,244.92
6.00	0.150	Mín.	1.80	0.045	159.21	251.73	297.85	356.00	389.98	450.31
		Máx.	4.20	0.105	990.33	1,565.85	1,852.74	2,214.44	2,425.80	2,801.08
8.00	0.200	Mín.	2.40	0.060	283.04	447.53	529.52	632.90	693.30	800.56
		Máx.	5.60	0.140	1,760.59	2,783.73	3,293.75	3,936.79	4,312.54	4,979.69
10.00	0.250	Mín.	3.00	0.075	442.25	699.26	827.37	988.90	1,083.29	1,250.87
		Máx.	7.00	0.175	2,750.92	4,349.58	5,146.49	6,151.23	6,738.34	7,780.76
16.00	0.400	Mín.	4.80	0.120	1,132.16	1,790.10	2,118.08	2,531.59	2,773.22	3,202.23
		Máx.	11.20	0.280	7,042.34	11,134.92	13,175.02	15,747.16	17,250.15	19,918.76
20.00	0.500	Mín.	6.00	0.150	1,769.00	2,797.04	3,309.50	3,955.61	4,333.15	5,003.49
		Máx.	14.00	0.350	11,003.66	17,398.32	20,585.97	24,604.94	26,953.36	31,123.06
24.00	0.600	Mín.	7.20	0.180	2,547.36	4,027.73	4,765.68	5,696.07	6,239.73	7,205.02
		Máx.	16.80	0.420	15,845.27	25,053.58	29,643.79	35,431.11	38,812.84	44,817.20
Nota: Gastos calculados en placas de acero al carbón..					200	500	700	1000	1200	1600
					$h$ (pulgadas de agua)					

Tabla 1.2.4.a Gastos para una placa orificio.

### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Estos medidores pueden alcanzar un rango de 0.015 l/min a 2,000 m<sup>3</sup>/min (ver **tabla 1.2.4.a**)

Como la velocidad del fluido es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial, el campo de medición es bajo, del orden de 3:1 a 5:1. Los tamaños de tubería que abarca es de 3 mm - 2.4 m (1/8 -96").

Sin embargo, estos medidores pueden ser operados sobre rangos más amplios si los flujos son limitados por una mínima caída de presión en un extremo del rango y por una máxima caída de presión en el otro extremo, esto se logra con los siguientes procedimientos:

- A.- Cambiando la placa orificio.- Varios diseños utilizan placas intercambiables con orificios de distintos diámetros (**figura 1.2.4.e**), estas se insertan en la tubería sobre un montaje especial de modo que no se interrumpe el flujo.
- B.- Utilizando dos o incluso tres medidores de presión diferencial en paralelo, cada uno cubriendo una sección diferente del flujo.

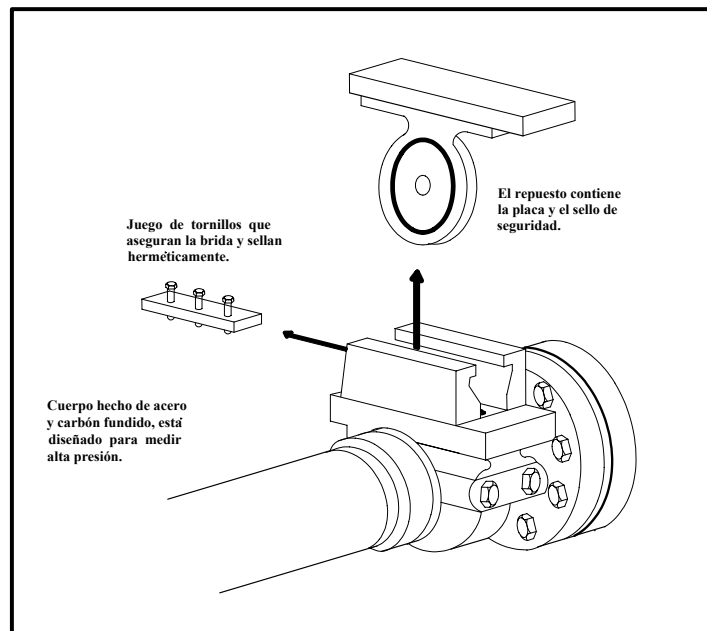

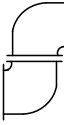

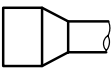
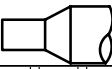
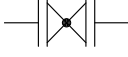



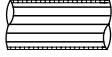


Figura 1.2.4.e Tubería con placa orificio intercambiable.

❖ **Instalación**

Primer accesorio aguas arriba	Distancia entre el medidor y el primer accesorio									
	Símbolo	Coeficiente de contracción ( $C_c$ )							Pitot	
		0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	$U_s$	$D_s$
Codo a 90° o T		9 -	10 0.5	14 0.5	14 1.5	18 3.0	28 4.0	36 4.5	5	3
Dos o más curvas de 90° (radio $D$ ) en el mismo plano		14 0.5	16 1.5	18 1.5	20 2.5	26 3.0	36 4.5	42 4.5	8	3
Dos o más curvas de 90° (radio $D$ ) en diferentes planos		31 -	34 0.5	36 0.5	40 8.5	48 17.5	62 27.5	70 29.5	12	4
Reductor 2D a D		5 -	5 -	5 2.5	6 5.5	9 8.5	14 10.5	22 11.5	6	3
Expansión 0.5D a D		15 1	16 1.5	16 1.5	18 2.5	22 3.5	30 5.5	38 6.5	8	4
Válvula de globo		18 -	18 -	20 -	22 -	26 -	32 -	36 -	6	3
Válvula de compuerta		10 1	12 1.5	12 2.5	12 3.5	14 4.5	20 5.5	24 5.5	15	4
Bomba		18 9	20 10	24 12	26 16	34 20	40 22	42 22	25	9
Tanque		30 25	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	18	6
Enderezador		4 -	4 2	4 2	4 2	4 2	4 2	4 2	3	1
Agua abajo (para todos los accesorios mostrados).		5 $4d$	5 $4d$	6 $4d$	6 $4d$	7 $4d$	7 $4d$	8 $4d$		

Notas 1.- La primera fila corresponde a la placa orificio y tobera, la segunda al Venturi.  
2.- Para el Pitot,  $U_s$  y  $D_s$  significa aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

**Tabla 1.2.4.b Tramos rectos de tubería para la instalación de un medidor Venturi, tobera, Pitot y placa orificio.**



La tubería debe mantenerse recta una distancia de  $15d$  a  $60d$  aguas arriba del medidor dependiendo de la naturaleza de los accesorios (ver tabla 1.2.4.b).

Es posible usar un enderezador de flujo cuando no es posible instalar la longitud de tubería recta recomendada.

#### ❖ *Operación*

- Los medidores de placa orificio pueden operar en tuberías que funcionan inclinadas a cualquier ángulo.
- Se deben usar empaques de grafito de 12.5 mm ( $1/8$  ") de espesor junto a la placa para evitar escurrimientos y lecturas erróneas.
- $1 \times 10^4 < R_e < 6 \times 10^8$ ; ( $R_e > 1,000$  para  $0.5" < D < 1.5"$ ).
- Presión máxima: 6000 PSI (420 Bar).
- Rangos de temperatura: -200 a 750° C.
- Velocidades de 0.03 a 10 m/s.

#### ❖ *Aplicaciones*

Prácticamente se utiliza en cualquier tipo de industria como la azucarera, cervecera, cementera, alimenticia, química, etc. Sólo es práctica en donde se admite una gran pérdida de presión.

#### ❖ *Mantenimiento y calibración*

Es posible que las placas orificio de gran tamaño puedan doblarse o distorsionarse alterando el coeficiente de descarga del medidor. También es posible que en las orillas del orificio de la placa se tenga suciedad, y esto alterará la exactitud hasta en un 20%.

Por lo tanto, las placas orificio deben ser revisadas periódicamente para verificar su planitud, la orilla del orificio debe mostrarse afilada y no tener depósitos de material o corrosión. La supervisión debe realizarse cada mes o cuando haya variaciones muy grandes de presión

Por seguridad el medidor debe re-calibrarse mensualmente auxiliándose de curvas de calibración dadas por el fabricante mientras que el transmisor lo debe recibir cada mes.

***Ventajas:***

- *De los equipos descritos, es el que presenta el menor costo de adquisición y construcción.*
- *Su fabricación es muy económica, aún para grandes diámetros.*
- *Es fácil de instalar y de reemplazar.*
- *No posee partes móviles.*
- *Su funcionamiento es mecánico.*

***Desventajas:***

- *Debido a la gran pérdida de presión pueden presentarse problemas en el suministro aguas abajo.*
- *Para conocer el gasto en la tubería se requiere una expresión matemática que está en función de la diferencial de presión.*
- *En dicha expresión la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que se requiere extraer la raíz cuadrada.*

**\* CONSIDERACIONES COMUNES A LOS MEDIDORES DE PRESION DIFERENCIAL**

- A. Estos dispositivos son elementos primarios de medición en los cuales la diferencia de presión se mide con un manómetro o con un sensor de presión diferencial (SPD) que la convierte en una señal de voltaje o corriente. Pero se requiere un elemento secundario para linealizar esta señal, esto se logra usando un transmisor manométrico (TM) o un transmisor de presión diferencial (TPD), ambos se conectan a las tomas del medidor.

En el caso de usar un manómetro este muestra directamente la lectura de gasto del líquido tomando en cuenta que estos dispositivos se diseñaron básicamente con las fórmulas descritas anteriormente, si se usa un TPD se puede visualizar el gasto “*in situ*” o en un lugar remoto.

- B) En caso de usar un TPD las líneas de las tomas de presión pueden circular llenas de líquido pero con concentraciones de sólidos no mayores de 30 mg/l.

Para superar esta restricción se puede proveer un sistema de ráfaga de agua, en dicho sistema se emplean dos métodos para inyectar el agua.

Uno consiste en enviar ráfagas de agua intermitentemente para purgar los sólidos de las líneas de las tomas y para este efecto la medición se interrumpe durante el ciclo de purgado.

En el otro método se envía un flujo continuo de agua de purga a ambas líneas, este flujo actúa como una barrera para impedir que se acumulen los sólidos y debe ser del mismo líquido de proceso. En este caso el pulso de agua debe ser 10 PSI (70 kPa) mayor que la presión de proceso. Además se debe controlar la ráfaga de agua en cada toma con un rotámetro para visualizar y ajustar el flujo de purga.

Si la salida está indicada por un TPD la calibración se realiza con un calibrador digital portátil suministrado por el fabricante; en el caso de un manómetro de carátula esta se realiza en un laboratorio; cuando se trata del elemento primario se utiliza un manómetro portátil.

C) Las medidas de las tomas de presión son las siguientes:

$\varnothing_{\text{toma}}$		$\varnothing_{\text{tubería}}$					
Pulg.	mm.	pulg.			mm.		
1/8	<b>3.20</b>	1/4	-	1-7/8	6.40	-	27.30
1/4	<b>6.30</b>		2			51	
3/8	<b>9.60</b>	2 1/2	-	3.0	63.50		76.20
1/2	<b>12.70</b>		>	4.0		>	101.60

D) En ocasiones se requiere retirar el instrumento de medición por varias causas: reparación del medidor, calibración en fábrica, cambio de tubería dañada, reemplazo de bridas, etc. En otras ocasiones se requiere espacio para revisión de sensores, calibración del transmisor, ajustes de parámetros del medidor, mantenimiento de la línea, etc.

Para tal propósito se recomienda instalar el elemento primario y el elemento secundario en un lugar de fácil acceso. Además se puede utilizar una válvula de derivación ("bypass") lográndose remover el medidor sin interrumpir el flujo.

E) Como prevención los cables de alimentación y de la señal de salida deben estar aislados entre sí, además la distancia entre el medidor y el panel de control no debe exceder los 100 m (300pies).

## 1.2.5

## MEDIDORES DE AREA VARIABLE

Los medidores de área variable están basados en el principio de que el fluido acelerado a través de una restricción incrementa su energía cinética a costa de su energía de presión (energía potencial).

En el lado aguas abajo de la restricción la energía cinética es parcialmente recuperada en forma de energía potencial mientras el resto de la energía original es perdida en forma de fricción debido a la turbulencia.

Estos dispositivos son conocidos también como medidores de caída de presión- carga constante o medidores de estrangulamiento (**figura 1.2.5.a**).

Varios son los diseños usados para proveer un área que varíe con la velocidad del flujo como los de orificio obstruido o los de pistón.

Sin embargo el tipo más conocido y más usado es el rotámetro por su simplicidad de diseño, costo y versatilidad.

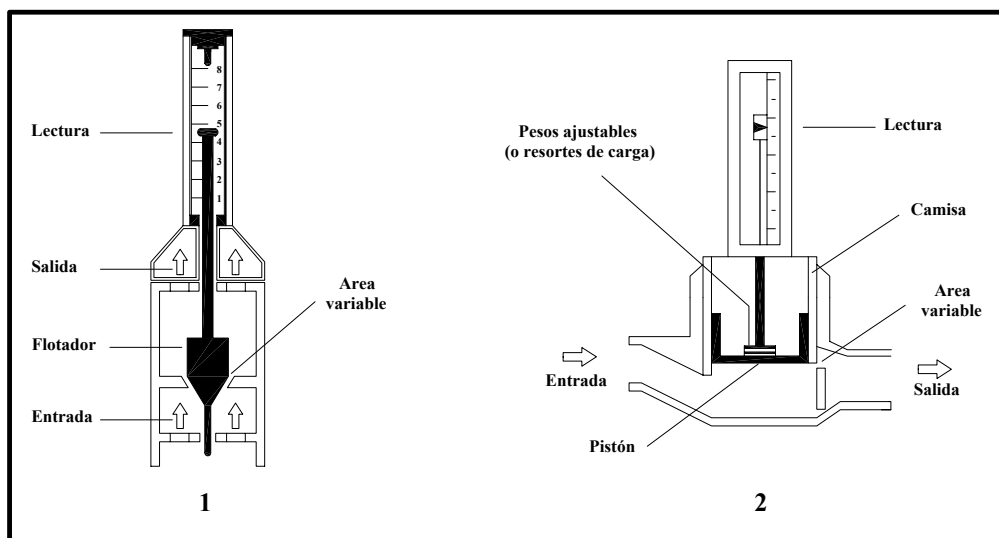


Figura 1.2.5.a Medidores de área variable tipo orificio obstruido (1) y tipo pistón (2).

### 1.2.5.1

## ROTAMETRO

Los rotámetros consisten de un tubo de medición cerrado con una cierta conicidad y montado verticalmente. Dentro del tubo se encuentra un carrete conocido como flotador que puede moverse hacia arriba y hacia abajo cambiando su posición proporcionalmente al flujo del fluido (**figura 1.2.5.b**).

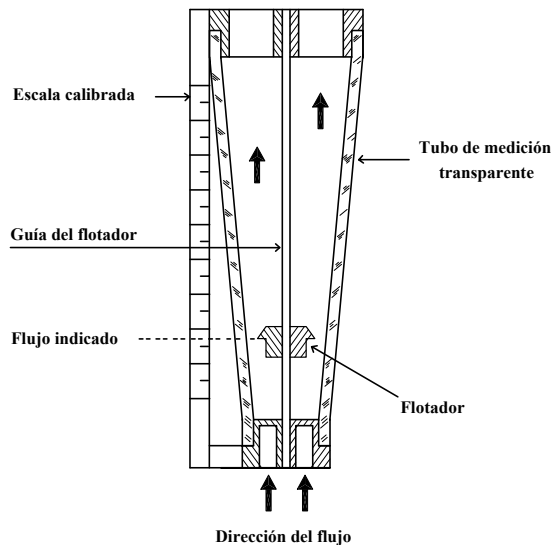


Figura 1.2.5.b Partes principales de un rotámetro.

El líquido entra por la parte mas baja y fluye hacia arriba a través del estrechamiento del tubo. Posteriormente acelera su velocidad a través del área anular entre el flotador y las paredes del tubo para después llegar a la salida.

En condiciones de diseño la presión diferencial provocada por el estrangulamiento permanece constante a través del flotador debido a que las fuerzas de peso y de flotación son constantes y a que la altura del flotador cambia para exponer el área que satisface la ecuación de Bernoulli.

La fuerza resultante de la diferencia de presión actúa sobre el flotador y lo eleva hasta que este encuentra una posición de balance a una altura particular dentro del tubo. El rotámetro se puede considerar como una placa orificio de área variable.

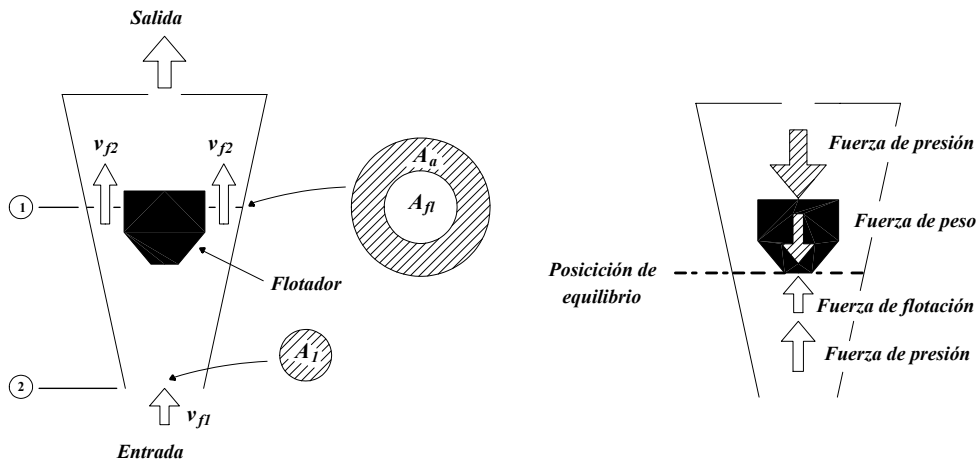


Figura 1.2.5.c Relación área -velocidad y diagrama de fuerzas de un rotámetro.

El área que ocupa el flujo entre el tubo y el flotador se da en la siguiente relación:

$$\frac{P_{f1}}{\rho_f} + \frac{v_{f1}^2}{2g_c} + h_1 = \frac{P_{f2}}{\rho_f} + \frac{v_{f2}^2}{2g_c} + h_2$$

Despreciando la diferencia de alturas:

$$P_{f1} - P_{f2} = \frac{\rho_f}{2g_c} (v_{f2}^2 - v_{f1}^2) \quad \text{----- (1)}$$

Por simplicidad se asumirá que la presión hacia abajo actuando sobre el flotador es la presión estática en la sección 2 y que la presión actuando hacia arriba es la presión total, por lo tanto para que se cumpla el equilibrio estático en cualquier posición del flotador la suma de las fuerzas representada en la **figura 1.2.5.c** es:

$$A_{fl} \left( P_{f1} + \frac{\rho_f v_{f1}^2}{2g_c} \right) + \frac{g_l}{g_c} \rho_f V_{fl} = \frac{g_l}{g_c} \rho_f V_{fl} + A_{fl} P_{f2} \quad \text{----- (2)}$$

*Fza. de presión + Fza. de flotación = Fza. de peso + Fza. de presión*

donde:

$A_{fl}$ = Area del flotador	$V_{fl}$ = Volumen del flotador
$\rho_{fl}$ = Densidad del flotador	$\rho_f$ = Densidad del fluido
$P_{f1}$ = Presión aguas arriba secc. 1	$P_{f2}$ = Presión aguas abajo secc. 2
$v_{f1}$ = Velocidad “ “ “ “	$v_{f2}$ = Velocidad “ “ “ “

Por otra parte, de la ecuación de continuidad de masa entre las secciones 1 y 2 y teniendo en cuenta una densidad constante:

$$A_1 v_{f1} = A_a v_{f2} \quad (3)$$

Donde  $A_1$  es el área de entrada y  $A_a$  es el área anular entre el flotador y la pared del tubo.

Introduciendo el coeficiente de descarga  $C_d$  y combinando las ecuaciones 1,2 y 3 tenemos la expresión siguiente:

$$Q_f = \left[ C_d \sqrt{\frac{2g_l \cdot v_{f1}}{A_{fl}}} \right] \sqrt{\frac{\rho_{fl}}{\rho_f} - 1} A_a \quad (1.2.5.1)$$

Esta fórmula permite determinar el caudal del fluido que pasa a través de un rotámetro conocido. La cantidad entre corchetes es constante, y el área anular  $A_a$  es directamente proporcional a la altura del flotador. Este caudal depende evidentemente del peso específico del líquido y de los valores de la sección interior del tubo  $A_a$ , ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador. Por estos motivos la selección del tamaño de un rotámetro es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores.

Con el fin de normalizar los cálculos por lo general se acostumbra referir los caudales del líquido a sus equivalentes en agua. Por ejemplo, si se considera un flotador de acero inoxidable 316 de densidad 8.04, se tiene que:

$$Q_{agua} = \left[ C_d \sqrt{\frac{2g_l \cdot v_{f1}}{A_{fl}}} \right] \sqrt{\frac{8.04}{1} - 1} A_a \quad (5)$$



Dividiendo la ecuación 5 entre la ecuación 8.1 resulta:

$$Q_{agua} = Q_f \sqrt{\frac{\rho_f \cdot 7.04}{\rho_{fl} - \rho_f}} \text{-----} \quad (1.2.5.2)$$

Las fórmulas anteriores permiten determinar rápidamente los caudales equivalentes en agua del fluido y de las tablas del fabricante se escoge el tamaño, la forma y el peso del tubo y del flotador.

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción notando que aquellos de orillas afiladas son más inmunes a cambios en la viscosidad y minimizan las pérdidas de carga (**figura 1.2.5.d**).

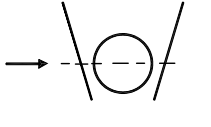
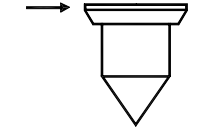
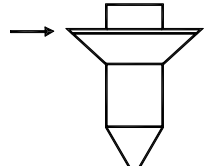
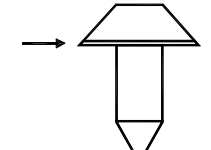
	<p>Esféricos para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido, <math>C_d \approx 1</math></p>
	<p>Cilíndrico con borde plano para caudales medios y elevados con una influencia media de la viscosidad del fluido, <math>C_d \approx 0.9</math></p>
	<p>Cilíndrico con borde saliente, de cara inclinada contra el flujo con menor influencia de la viscosidad, que por sus características de caudal, puede compararse a una tobera, <math>C_d \approx 0.8</math></p>
	<p>Cilíndrico, con bordes salientes contra el flujo y con la mínima influencia de la viscosidad del fluido, que por su funcionamiento, puede compararse a una placa-orificio, <math>C_d \approx 0.7</math></p>

Figura 1.2.5.d Formas más comunes de flotadores en un rotámetro.

El material más empleado en los flotadores es el acero inoxidable 316 por su resistencia a la corrosión pero también se utilizan también otros metales y otros materiales como el plástico.

En la **tabla 1.2.5.a** se indican las densidades de los materiales más comunes en los flotadores normales.

<i>Material</i>	<b>Densidad</b>
Aluminio	2.72
Bronce	8.78
Níquel	8.91
Plomo	11.38
Titanio	4.50
Inox. 304/Inox 316	7.92
Tantalio	16.60

<b>Material</b>	<b>Densidad</b>
Vidrio de borosilicato	2.20
Goma	1.20
Teflón	2.20
Durimet	8.02
Monel	8.84
Zafiro	4.03
Carboloy	14.95

Tabla 1.2.5.a Materiales más comunes de flotadores normales.

Los flotadores tienen la cabeza de forma cónica lo que les permite un movimiento rotatorio, esto les ayuda a centrarse en el tubo y conservarlo limpio de sedimentos o impurezas que se les adherirían si estuvieran estacionarios.

Los tubos empleados en los rotámetros pueden ser de vidrio y metálicos. Los fabricantes los mecanizan de tal modo que queda asegurada la intercambiabilidad de los diversos tubos y flotadores a fin de obtener caudales correspondientes sin necesidad de calibrar individualmente cada medidor.

#### **A) ROTAMETROS DE TUBO DE VIDRIO**

Los rotámetros de tubo de vidrio son ideales para fluidos limpios y son los más utilizados por su fácil manejo.

Se utilizan principalmente en bajas presiones y bajas temperaturas debiendo hacer hincapié en que los fluidos deben ser relativamente transparentes e inofensivos pues estos medidores son muy frágiles.

Los tubos pueden ser lisos o con una varilla interior la cual sirve para guiar el flotador, generalmente sus conexiones a proceso son roscadas.

En este medidor las escalas están grabadas en una placa de latón o aluminio montada a lo largo del tubo y situada en coincidencia con la línea de cero del tubo, o también directamente sobre el tubo.

La escala puede estar graduada en unidades directas del caudal (referido siempre a unas condiciones de servicio dadas) o bien en porcentaje de 10 a 100% de la escala total, en este último caso se añade un factor de multiplicación para convertir las lecturas a unidades de volumen.

Las escalas son generalmente lineales pero hay algunos medidores con escalas logarítmicas.

#### **A) ROTAMETROS DE TUBO METALICO**

Los rotámetros de tubo metálico se utilizan para presiones y temperaturas más altas o líquidos peligrosos u opacos; los tubos metálicos son siempre cónicos y lisos conectándose a proceso mediante bridas la mayoría de las veces. Estos medidores precisan de una extensión para lectura directa, esta extensión generalmente es un acoplamiento magnético en relación con la posición del flotador.

Si se usa una varilla interior es posible evitar que el flotador se adhiera a la misma. Esto se consigue horadando la varilla e introduciendo un tubo con el objeto de poder enfriar o calentar el líquido.

Este procedimiento también tiene otro propósito que es el mantener el líquido a una temperatura deseada para evitar solidificaciones o evaporaciones.

#### **1.2.5.2 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR**

##### **❖ *Exactitud y precisión***

La exactitud que puede obtenerse con estos medidores es del orden del  $\pm 0.5\%$  para tubos de vidrio y de  $\pm 2\%$  para tubos de metal, la primera se encuentra limitada por la habilidad del usuario para apreciar la posición del flotador en la graduación de la escala.

La exactitud puede disminuir por las siguientes causas: fluctuaciones e irregularidades del flujo, diferencias de temperatura entre el medidor y el fluido, cambios de temperatura durante la medición y cambios en los parámetros del fluido.

El rotámetro con tubo de vidrio tiene una precisión promedio del  $\pm 0.25\%$ , para un tubo metálico el valor estándar es  $\pm 0.5\%$ . La precisión puede mejorar sólo si el flotador está guiado en la parte central.

❖ *Rango de medición y campo de medida*

Estos medidores pueden cubrir rangos de (0.0001 - 4000 lt/min) para rotámetros con tubos de vidrio y de (0.001 - 15,000 lt/min) para tubos metálicos (**tabla 1.2.5.b**). El campo de medida puede llegar a ser de 6:1 para rotámetros con tubo de vidrio y de 10:1 para tubo metálico.

Los tubos de vidrio abarcan medidas de 1.6 a 75 mm ( $1/16 - 3''$ ) y los tubos metálicos de 3 a 100 mm ( $1/8 - 4''$ ).

DIÁMETRO		PRESIÓN DE TRABAJO SEGURA		CAPACIDAD				PÉRDIDA TOTAL DE PRESIÓN			
mm.	pulg.	PSI		l/seg				PSI			
		A	B	A		B		A		B	
				Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
6	1/4	450	750	0.002	0.03	0.006	0.061	0.04	0.37	0.359	0.775
12	1/2	300	525	0.020	0.30	0.027	0.377	0.04	1.20	0.508	2.015
25	1	180	310	0.250	1.90	0.366	2.660	0.30	0.40	0.653	1.813
37	1- 1/2	130	205	0.800	3.40	1.245	4.500	0.30	3.60	0.712	4.945
50	2	100	135	1.300	5.70	2.695	8.950	0.40	4.00	0.798	6.285
75	3	60	100	3.800	7.60	4.783	11.116	0.70	5.40	0.870	7.030
100	4	40	65	4.800	9.60	13.883	22.330	0.80	6.80	1.393	8.190
A.- Tubo de vidrio						B.- Tubo de metal con indicación magnética					

Tabla 1.2.5.b Valores típicos de gasto de rotámetros.

❖ *Instalación*

El rotámetro siempre se debe instalar verticalmente; el patrón de velocidad a la entrada normalmente es destruido antes de que alcance el flotador.

El medidor es insensible a los accesorios de la tubería (codos, T, etc.) ya sea aguas arriba o aguas abajo por lo que su presencia no afecta la exactitud del medidor.

### ❖ *Operación*

Los rotámetros no son sensibles al perfil del flujo o remolinos. Sin embargo las fluctuaciones e irregularidades del flujo harán difícil visualizar la posición real del flotador.

Los rotámetros con tubo de vidrio soportan temperaturas de -30 a 204°C (-22 a 400°F ) y presiones hasta de 550 PSI (40 Bar); los de tubo metálico admiten temperaturas de -200 a 540°C (-330 a 1000°F) y presiones de hasta 1500 PSI (105 Bar).

Estos medidores operan en líquidos con una viscosidad máxima de 100 cS y con valores de  $R_e > 10,000$ , cuando este último valor es inferior el rotámetro se comporta como una placa orificio.

Las velocidades de entrada de estos medidores abarcan desde 0.05 hasta 2.5 m/s para tubos de vidrio, y de 0.2 hasta 5 m/s para tubos metálicos.

El fluido no debe estar contaminado por partículas grandes pues obstruiría el movimiento del flotador.

### ❖ *Aplicaciones*

Se utilizan a menudo para efectos de purga en caudales muy pequeños.

Algunas de sus aplicaciones típicas son la purga hidráulica de los sellos mecánicos en las bombas generales de la planta, la medición del nivel por burbujeo, la purga de elementos de presión diferencial evitando la obturación de las tuberías, la purga de instrumentos que trabajan en atmósferas corrosivas o polvorientas, dosificación volumétrica continua, etc.

Los rotámetros manejan casi todo tipo de líquidos: altamente viscosos, corrosivos, abrasivos, tóxicos, peligrosos, criogénicos, etc., sin embargo su uso se limita a procesos donde se manejan caudales pequeños.

Es un medidor de flujo de los más populares en el mercado y uno de los más baratos, además produce una caída de presión muy baja.

Aunque la mayoría de los rotámetros son de indicación directa, estos se pueden equipar con sensores y transmisores de tal manera que se pueden convertir a un sistema digital.

#### ❖ *Mantenimiento y calibración*

En los tubos de vidrio se deben eliminar cualquier tipo de residuo incrustado en ellos como vapores, grasas, sedimentos, etc.

Los tubos metálicos requieren inspección para verificar que no haya obstrucción de material extraño, esto se recomienda hacer cada 2 meses.

La calibración de los rotámetros se consigue básicamente manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido en un tiempo dado medido con precisión. Los aparatos de medida de volumen suelen ser buretas graduadas o básculas y para medir el tiempo se emplean cronómetros con precisión de 0.01 segundos como mínimo.

#### *Ventajas:*

- *Indicación directa de gasto.*
- *Su costo es relativamente bajo.*
- *Maneja una amplia variedad de líquidos corrosivos.*
- *Ideal para flujos pequeños.*
- *Su instalación no necesita conexiones ni enderezadores de flujo.*

#### *Desventajas:*

- *Debe ser montado verticalmente.*
- *Limitado a tuberías pequeñas en tamaño y capacidad.*
- *No maneja altas temperaturas ni altas presiones.*

## 1.2.6

## MEDIDOR DE PLACA DE IMPACTO

El medidor de placa de impacto esta formado por un tubo cilíndrico con una obstrucción en forma de un pequeño disco montado en el interior del tubo. El disco está sujeto al final de una viga voladiza, la cual está montada en un saliente del cuerpo del medidor.

El medidor de placa de impacto opera bajo el principio de que las fuerzas dinámicas del flujo actuando sobre un cuerpo fijo se relacionan con la velocidad (**figura 1.2.6.a**).

La fuerza que ejerce el fluido sobre la placa de impacto causa una deformación o doblamiento en la viga. Esta alteración permite cuantificar el gasto mediante un sistema mecánico vía un transmisor neumático de fuerzas; en un sistema electrónico se mide la rotación del pivote de la viga utilizando un sensor de desplazamiento que se basa en un puente de Wheatstone.

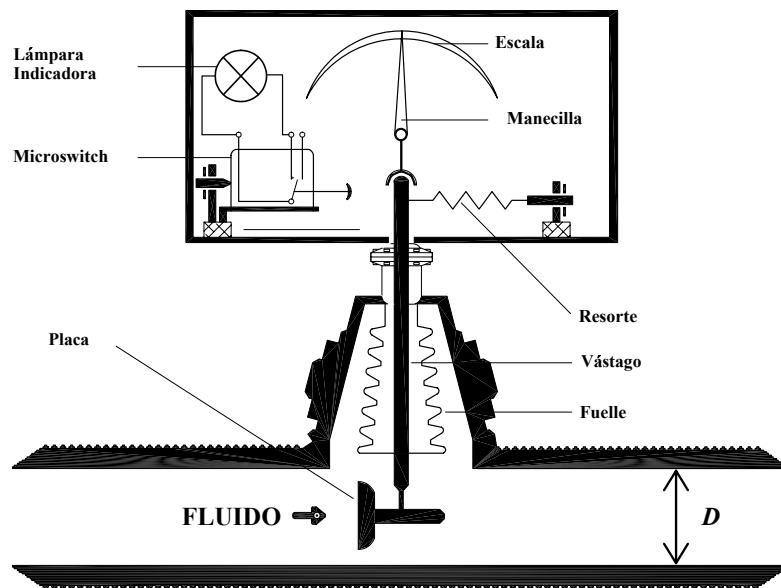


Figura 1.2.6.a Medidor de placa de impacto en línea con indicador mecánico.

La fórmula para calcular la fuerza es:

$$F = C_i \cdot A_i \cdot \rho \frac{v^2}{2g} \quad \text{-----} \quad (1)$$

donde:

- $C_i$  = Coeficiente de impacto
- $A_i$  = Area de impacto
- $\rho$  = Densidad del fluido
- $v$  = velocidad del fluido

Sabiendo que el caudal volumétrico está dado por:  $Q = A_p \cdot v = \frac{\Pi \cdot D^2}{4} \cdot v$

donde  $A_p$  es el área de la tubería, la ecuación 1 queda en términos del diámetro de la siguiente manera:

$$Q = 1.1D^2 \sqrt{\frac{F \cdot g}{C_i \cdot A_i \cdot \rho}} \text{ ----- (1.2.6.1)}$$

El valor de  $C_i$  es un número adimensional que depende de  $R_e$  y de la forma del cuerpo razón por la que este coeficiente se establece por numerosas pruebas.

Para valores de  $R_e \geq 3,000$  el medidor es prácticamente inmune a la viscosidad del fluido, en particular para este intervalo el disco circular mantiene un  $C_i \approx 1.05$  en un amplio rango de velocidades lo cual no sucede con la esfera.

#### A) TIPOS DE MEDIDORES

Dentro de los medidores de flujo existen dos tipos que son muy usados: en línea y de inserción (**figura 1.2.6.b**).

Los medidores en línea se fabrican en diámetros pequeños y sus conexiones a proceso son diversas: bridadas, roscadas, soldables, lisas, abocinadas, de tope, para cementar, de abrazadera, tipo oblea, etc. Estos medidores soportan presiones de trabajo mayores que los medidores de inserción.

Los medidores de inserción se utilizan ventajosamente en tuberías de diámetros medianos y grandes por su precio y su tamaño, además su mantenimiento es más sencillo y producen una pérdida de carga despreciable.



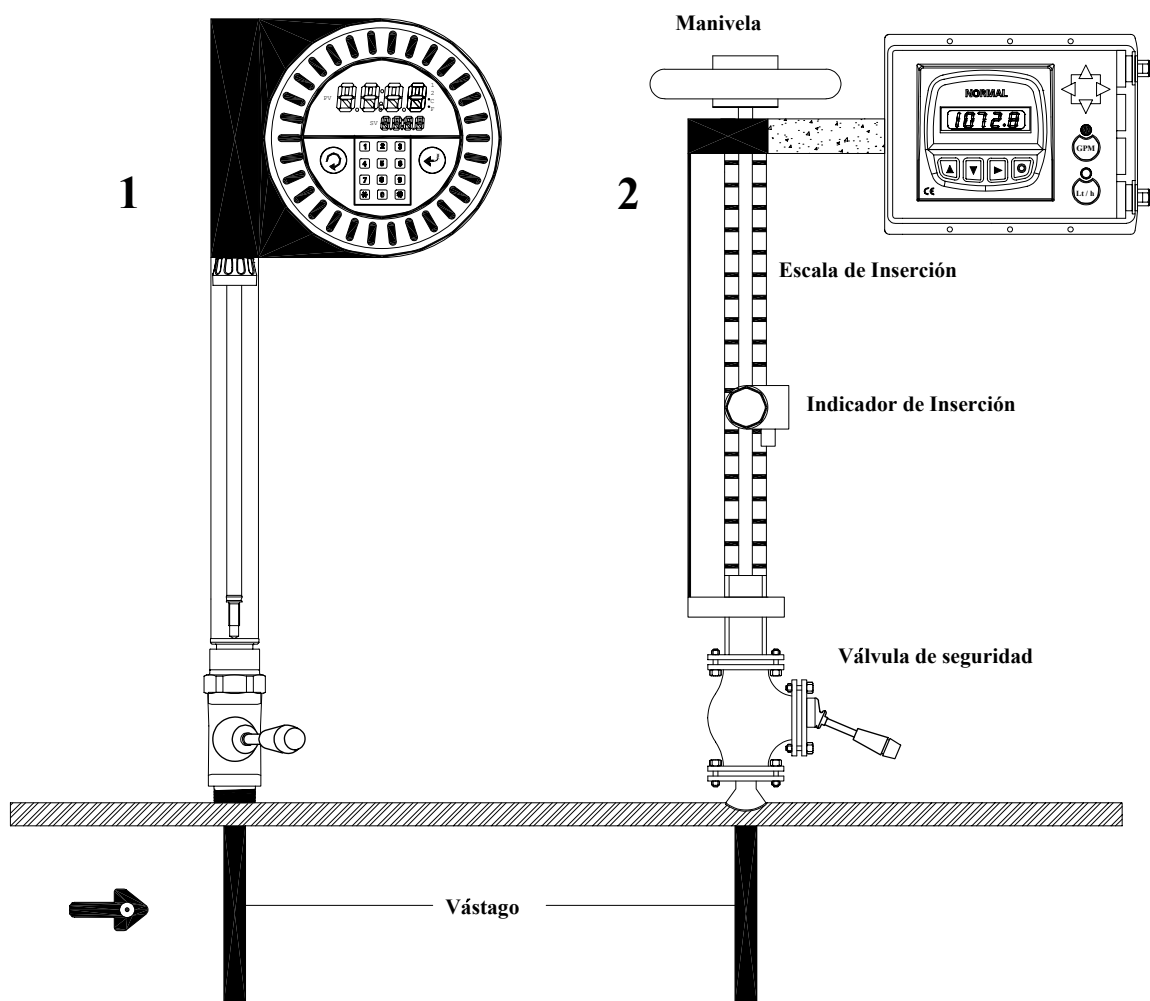


Figura 1.2.6.b Medidor de impacto de Inserción Fija (1) y de Inserción Retráctil (2).

Los medidores de inserción fija solo funcionan para un tamaño específico de tubería y para removerlo se tiene que interrumpir el flujo, estas limitaciones también las tienen los medidores en línea. Otra desventaja radica en que sólo mide el gasto local y no en toda el área de medición por lo que se requiere el conocimiento del perfil de velocidades en la sección. Sus conexiones a proceso pueden ser bridas, roscadas o soldables.

Los medidores de inserción retráctil tienen la ventaja de abarcar una sección más representativa del área de medición.

Esto lo logran utilizando dispositivos mecánicos que permiten ajustar la altura del elemento de medición manualmente por medio de gatos o manivelas. Estos medidores también contiene mecanismos que permiten removerlo de la tubería y adicionalmente se pueden complementar con una válvula de corte que sella la conexión a proceso con el fin de no suspenderlo.

Al igual que los medidores de inserción fija, sus conexiones a proceso pueden ser bridadas, roscadas o soldables

## B) OPCIONES DE FABRICA

La electrónica asociada de un medidor que utiliza un sensor y un transmisor puede tener diversas funciones: medición manual o automática, autodiagnóstico del aparato, memorias de gastos, conversión a diferentes unidades de medición, activación de alarmas visuales o audibles, transmisores de datos, programación de lecturas, totalizadores, linealizadores, indicación local o remota, detección automática de estado sin líquido de la tubería, etc.

Así mismo los parámetros eléctricos más comunes son los siguientes:

Alimentación de entrada: 115/230 VCA, 60 Hz / 0-42 VCD.

Salida	{	<i>Analógica</i>	: 0-20 mA DC ; 0 10mV DC
		<i>Digital</i>	: Tren de pulsos: 0-30 VDC
		<i>Frecuencia</i>	: 0-3 MHz
		<i>Otras</i>	: Comunicación RS232 / RS485 / RS422/etc.

Los medidores de impacto constan de un sensor y un transmisor y también están disponibles en los dos tipos: en línea y de inserción.

Los medidores de impacto en línea tienen una pérdida de presión máxima de 15 PSI y permiten mediciones bi-direccionales, además el disco es reemplazable.

El diámetro del disco y del vástago toma valores proporcionales al diámetro de la tubería siendo de  $1/8$  a  $1/2$ " para el primero y de  $1/16$  a  $1/8$ " para el segundo. La posición del disco es concéntrica a la tubería en su sección transversal.

Los medidores de impacto de inserción tienen una pérdida de presión máxima de 0.15 PSI y también permiten mediciones bi-direccionales. El diámetro del disco está en el rango de  $1/4$  a 4" mientras que para el vástago el rango es de  $1/8$  a 2".

En particular los medidores de impacto con inserción fija permiten reemplazar el disco mientras que los de inserción retráctil tienen la ventaja adicional de aceptar discos de diferentes medidas. En los primeros la longitud de inserción se fija entre un 40 y un 50% del diámetro de la tubería, los segundos pueden tomar diferentes posiciones desde un 10 hasta un 50%.

La tubería de proceso al igual que el vástago y el disco se fabrican según el fluido de proceso pudiéndose disponer de acero inoxidable, aluminio, níquel, cobalto o aleaciones.

Este medidor puede soportar 50% adicional al flujo esperado sin sufrir daño.

## 1.2.6 .1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

### ❖ *Exactitud y precisión*

La exactitud de estos medidores es de  $\pm 1\%$  y la precisión puede alcanzar el  $\pm 0.15\%$ .

### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

El medidor de placa de impacto puede medir caudales que van de 0.5 – 5,300 l/min para medidores en línea y de 5 - 850,000 l/min para medidores de inserción (**ver tabla 1.2.6.a**). El campo de medición es de 15:1.

Los medidores en línea abarcan tuberías de 12 -150 mm ( $1/2$  - 6"); los medidores de inserción fija de 100 mm - 1.5 m (4-60") y los de inserción retráctil de 100 mm-0.9m (4-36").

		CAPACIDAD								PERDIDA DE PRESIÓN
DIAMETRO		RANGO INFERIOR				RANGO SUPERIOR				(PSI)
		GPM		l/seg		GPM		l/seg		
pulg.	mm.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
1/2	12	0.03	3.01	0.002	0.194	2.0	30	0.13	1.89	14.000
3/4	19	0.66	10.01	0.044	0.638	4.0	60	0.25	3.78	8.000
1	25	1.50	15.02	0.093	0.954	5.5	80	0.35	5.04	5.000
1 - 1/4	30	1.66	25.03	0.104	1.587	6.5	100	0.41	6.30	3.500
1 - 1/2	38	2.00	30.04	0.138	1.891	8.0	120	0.50	7.56	2.500
2	50	2.66	40.06	0.171	2.520	13.5	200	0.85	12.60	1.000
2-1/2	62	3.34	50.07	0.214	3.159	16.5	250	1.04	15.75	0.800
3	75	4.67	70.10	0.295	4.423	23.5	350	1.48	22.05	0.600
4	100	6.67	100.14	0.424	6.316	40.0	600	2.52	37.80	0.400
5	125	10.01	150.21	0.638	9.464	65.0	1000	4.10	63.00	0.300
6	150	13.35	200.28	0.849	12.622	95.0	1400	5.99	88.20	0.200
10	250	59.07	900.00	3.725	56.708	188.6	2829	11.88	178.23	0.023
20	500	217.87	3,300.00	13.734	207.900	696.1	10441	43.85	657.78	0.006
30	750	503.07	7,500.00	31.699	472.508	1,607.0	24105	101.24	1,518.62	0.004
40	1,000	905.87	13,500.00	57.073	850.503	2,893.7	43405	182.30	2,734.52	0.003
50	1,250	1426.20	21,500.00	89.852	1,354.504	4,556.0	68340	287.03	4,305.42	0.002
60	1,500	2064.20	31,000.00	130.04	1,953.000	6,594.0	98910	415.42	6,231.33	0.001

Tabla 1.2.6.a Valores típicos de gasto para medidores de placa de impacto.

### ❖ *Instalación*

En los medidores en línea se recomienda instalar una tubería recta aguas arriba de  $10D$  y un tramo recto de  $5D$  aguas abajo, para medidores de inserción se sugiere duplicar las distancias anteriores.

En ambos casos la tubería siempre debe estar llena de líquido durante la medición.

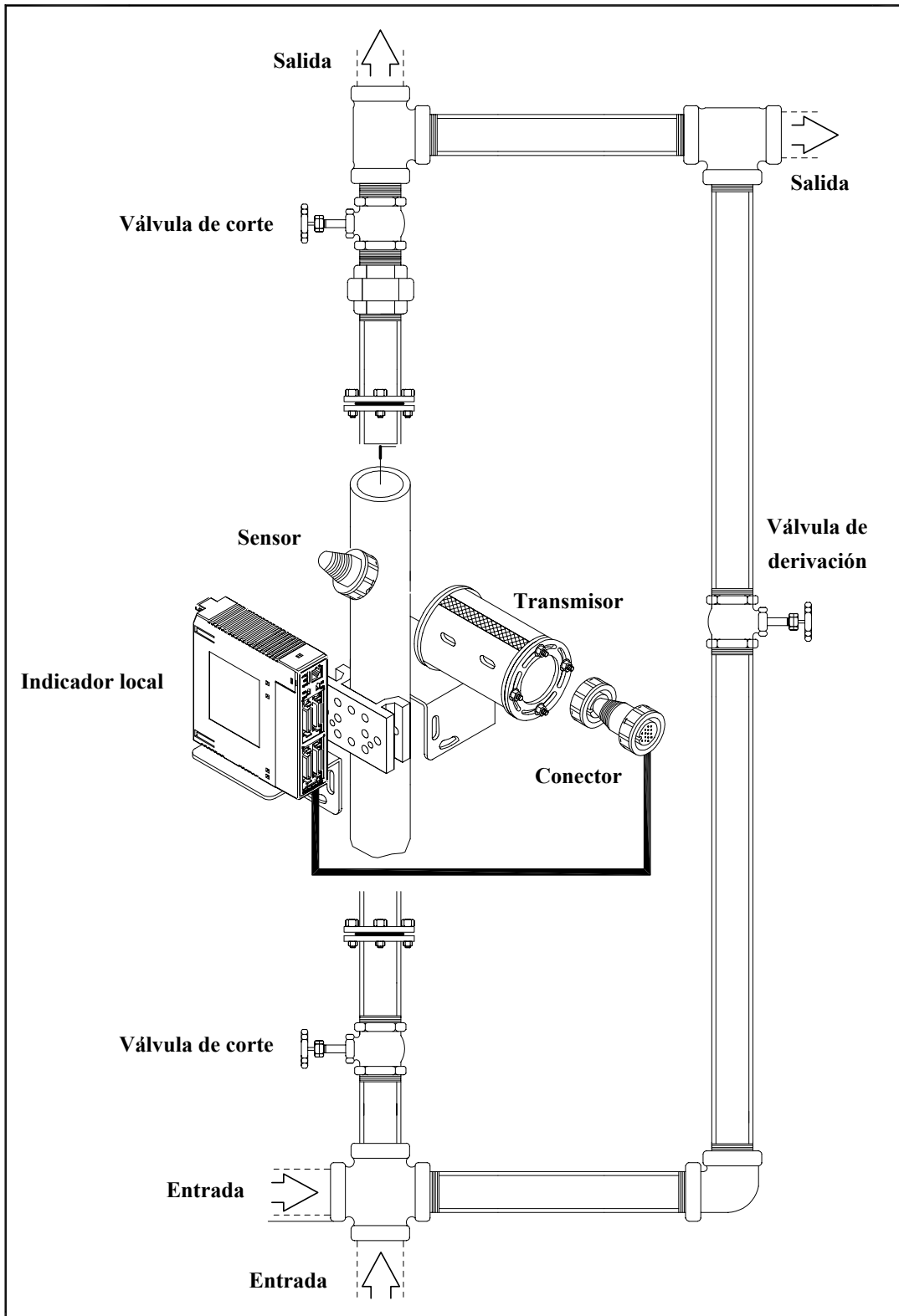


Figura 1.2.6.c Instalación de un medidor de impacto con válvula de derivación ("bypass").

Para medidores bi-direccionales se recomienda a ambos lados del medidor un tramo recto de  $20D$  (figura 1.2.6.c).

### ❖ Operación

La presión máxima que maneja el medidor de impacto es de 10,000 PSI (700 Bar) mientras que las temperaturas de operación varían de  $-195$  a  $398^{\circ}\text{C}$  ( $-320$  a  $750^{\circ}\text{F}$ ).

Las velocidades de flujo oscilan de  $0.07 - 15.5$  m/s para medidores en línea y de  $0.01$  a  $20$  m/s para medidores de inserción.

Se recomienda para estos medidores un  $R_e > 1,000$  y una viscosidad menor a  $500$  cSt.

### ❖ Aplicaciones

El medidor de impacto es frecuentemente usado para medir flujos transitorios o pulsantes.

Industria	Funciones	Industria	Funciones
Plantas de energía atómica	Controlar circuitos de lubricación y enfriamiento	Condensadores	Control de circuitos de enfriamiento
Calentadores	Prevención de niveles bajos de agua	Sistemas de calentamiento y almacenamiento	Prevención de niveles bajos de agua
Soldadoras de oxígeno	Control de quemadores	Maquinaria de industria papelera	Control de circuitos de enfriamiento y lubricación
Química	Control de flujo	Bombas	Prevención de funcionamiento en vacío
Máquinas diesel	Control de fugas, petróleo y enfriamiento de agua	Generadores	Control de circuitos de enfriamiento y lubricación
Generadores	Control de circuitos de enfriamiento	Plantas de rayos X	Control de válvulas de enfriamiento
Plantas de calefacción	Prevención de niveles bajos de agua	Plantas de calefacción	Control de enfriamiento de bobinas
Purificadores de alta presión	Prevención de niveles bajos de agua	Máquinas soldadoras	Control de enfriamiento de cables
Máquinas y plantas hidráulicas	Control de flujo	Control de maquinaria pesada	Circuitos de lubricación
Hornos de inducción	Control de circuitos de combustible y enfriamiento	Válvulas de alivio	Control de respuesta
Compresores	Control de circuitos de combustible y enfriamiento	Hornos al vacío	Circuitos de control de enfriamiento
Hornos de arco	Control de circuitos de enfriamiento	Herramienta de maquinaria	Control de circuitos de emulsión y lubricación

Tabla 1.2.6.b Aplicaciones del medidor de placa de impacto.

Este medidor puede ser usado en la industria pesada, química y farmacéutica; molinos de rodillos, industria de la alimentación y bebidas, y maquinaria industrial en general (ver **tabla 1.2.6.b**).

El instrumento permite el paso de fluidos diversos como líquidos criogénicos, líquidos corrosivos, combustibles diversos, aceites, etc. También permite el paso de líquidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión.

#### ❖ *Mantenimiento y calibración*

El disco debe ser revisado para verificar alguna deformación en el cuerpo o en las orillas las cuales deben mostrarse afiladas, esto se lleva a cabo regularmente cada 3 meses.

#### *Ventajas:*

- *No tiene partes móviles.*
- *Medición bi-direccional.*
- *Vida útil longeva.*
- *Montaje en cualquier posición.*
- *Menos tendencia a la sedimentación.*
- *Los medidores de disco intercambiables permiten varios rangos de medición.*

#### *Desventajas:*

- *Pérdida de presión considerable.*
- *La expresión matemática para conocer el gasto en la tubería no es lineal, se requiere extraer la raíz cuadrada.*
- *Presenta relativamente poca capacidad de medición.*

## 1.2.7

## MEDIDOR DE TURBINA

Este medidor consta de un impulsor (hélice o rotor) colocado en la ruta del fluido y situado coaxialmente en una sección transversal conocida del tubo, la rotación del impulsor es perpendicular a la dirección del flujo (**figura 1.2.7.a**).

La velocidad angular de la turbina es proporcional a la velocidad axial del fluido y al ángulo helicoidal entre los álabes, por lo tanto es una medida del gasto del fluido.

Esta velocidad puede ser traducida directamente a una cantidad volumétrica contando el número de revoluciones de la turbina por unidad de tiempo. La conversión se realiza mediante convertidores mecánicos (engranajes, etc.) o magnéticos (reluctivos, inductivos, etc.) montados fuera del cuerpo del medidor.

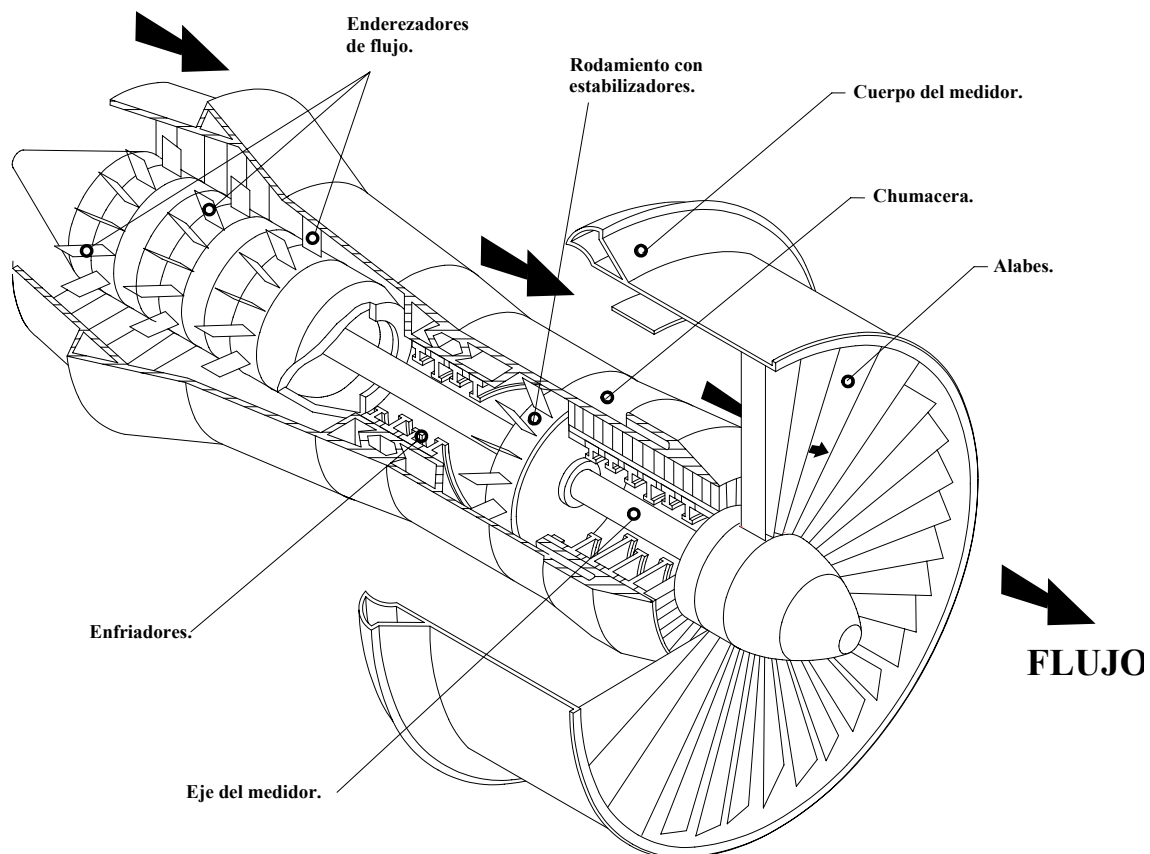


Figura 1.2.7.a. Elementos de un medidor de turbina.



Existen dos tipos de convertidores magnéticos para captar la velocidad de la turbina.

- a) Tipo reluctivo.- Este dispositivo consta de un imán permanente montado en una bobina captadora exterior, este imán crea un campo magnético de tal suerte que cuando los alabes pasan por el campo se genera un pulso de voltaje en la bobina pues las paletas están hechas de un material que es atraído por dicho imán.
- b) Tipo inductivo.- El imán permanente está integrado en el rotor o las aspas están hechas de un material permanentemente imantado. Nuevamente, cada paso de los álabes por la bobina genera un pulso de voltaje en ella. En algunos diseños se imanta una sola aspa por lo que cada pulso representa una revolución completa del rotor

La salida de ambos convertidores son ondas senoidales continuas y básicamente un tren de pulsos continuos de voltaje a una frecuencia proporcional a la velocidad de la turbina, cada pulso representa un volumen discreto de líquido (factor  $k$ ).

El factor  $k$  es determinado por el fabricante desplazando un volumen conocido del fluido a través del medidor y sumando el número de pulsos generado por el mismo.

Las siguientes ecuaciones arrojan el gasto del medidor; la primera lo relaciona con la velocidad del fluido y la segunda lo muestra como un tren de pulsos digitales.

$Q = v \cdot A \cdot C$	$Q = \frac{f}{k}$
$Q$ = gasto volumétrico	$Q$ = gasto volumétrico
$v$ = velocidad del fluido	$f$ = frecuencia
$A$ = área transversal	$k$ = pulsos /unidad de volumen
$C$ = constante	(factor $k$ )

La señal producida por el medidor es de 10 - 1000 mV la cual es normalmente convertida a una onda cuadrada y después amplificada. Las frecuencias de salida están en el rango de 3 a 2,000 Hz.

El número de pulsos por revolución puede ser incrementado montando un aro sobre la turbina con un número de ferritas incrustadas en el anillo (**figura 1.2.7.b-1**); colocando un aro ranurado alrededor de la turbina anillo (**figura 1.2.7.b-2**) o instalando un gran número de convertidores (**figura 1.2.7.b-3**).

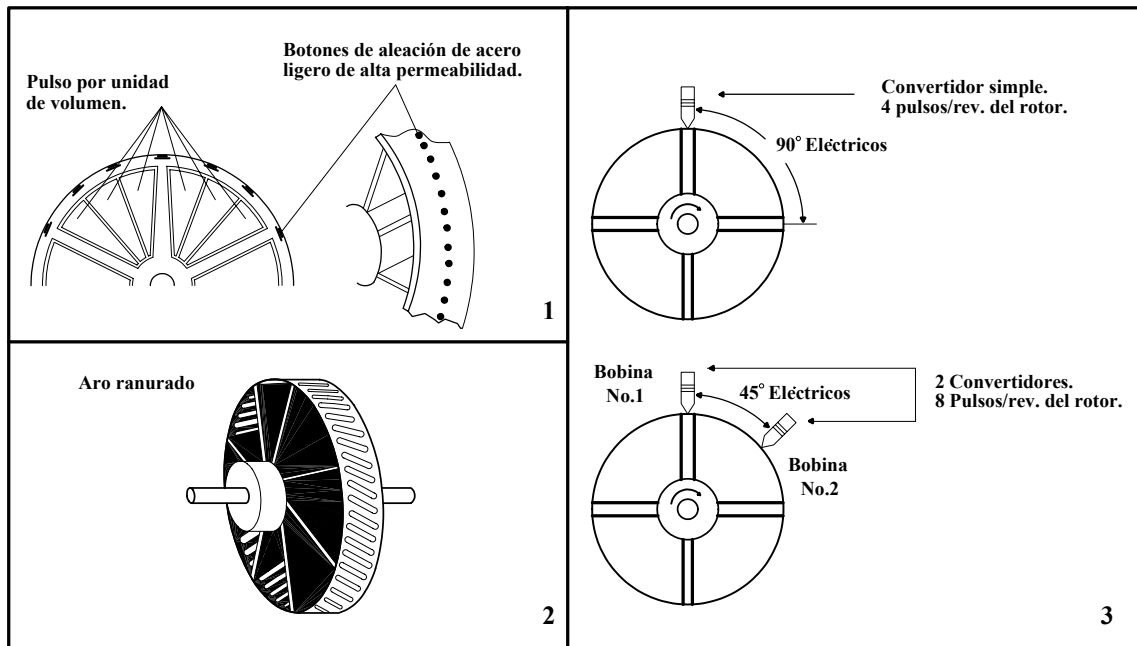


Figura.1.2.7.b Elementos para mejorar la exactitud de un medidor de turbina.

Existen factores que pueden provocar pérdidas en el medidor de turbina debiéndose decir que la solución es relativamente sencilla como se menciona en los siguientes puntos:

- Fricción del rodamiento.- Esto puede ser minimizado instalando rodamientos hidrodinámicos lubricados por el mismo fluido a medir o por otro de mejor diseño.
- Resistencia magnética de la bobina captadora.- Este problema puede ser superado al instalar una bobina capacitiva u óptica -en este caso se envía una luz vía fibra óptica hacia la turbina y a cada paso del álabe la luz es reflejada generando una señal (pulso).
- Perfil de velocidad.- Para esto se utiliza un enderezador de flujo.

La mayor fuente de error proviene del incremento de la viscosidad del fluido, esta se manifiesta entre el eje de la turbina y el rodamiento como una resistencia al giro de dicho eje.

La viscosidad también se hace presente entre las extremidades de los álabes y la cubierta del medidor dificultando la rotación de los mismos pues en las paredes el fluido se mueve más lentamente que en el centro. Estas fuerzas resistivas en la turbina son particularmente notorias en medidores más pequeños de 50 mm (2") pues generalmente representan una resistencia considerable al par de torsión.

Para superar estos problemas existen varias posibilidades: alterar la relación eje-rotor, corregir el diseño de las aspas, variar el claro del impulsor, modificar el espacio entre las puntas de las paletas, instalar un rotor doble, etc.

En los medidores de turbina es permisible exceder el flujo máximo de un 50-100% por periodos cortos a pesar de que esto reduce la vida útil del rodamiento. Este sobreflujo está limitado principalmente por la caída de presión y la cavitación.

Los materiales del cuerpo y el rotor pueden ser de acero inoxidable, acero fundido, bronce, aluminio y diversas aleaciones; también se dispone de componentes plásticos como PVC, poliamida y otros derivados. Los materiales de los rodamientos abarcan desde acero inoxidable, zafiro, carburo de tungsteno, aleaciones metálicas, grafito, cerámica, PVC, etc.

Los medidores de turbina en línea son los más comunes, están montados mediante rodamientos cuyo centro está inserto en el eje del medidor.

El eje puede estar diseñado de tal forma que puede funcionar como enderezador de flujo y además permite la instalación de un rotor doble como opción adicional.

En los medidores en línea menores a 3" el cuerpo y el rotor pueden ser fabricados de una barra sólida o mediante moldeo. Algunos diseños dirigen el flujo hacia el rotor mediante dos orificios colocados a la entrada y a la salida del medidor, esto permite la medición de flujos muy pequeños.

Los medidores en línea presentan una pérdida de presión de 3 a 10 PSI para flujo mínimo y máximo respectivamente. Estos medidores permiten la instalación de un rotor doble y además se puede obtener una medición bi-direccional.

Los medidores de turbina de inserción también permiten una medición bi-direccional y la instalación de un rotor doble. El diámetro del vástago mide generalmente 1" mientras que el diámetro de los rotores varía de 1 a 2", como dato adicional la pérdida de presión para flujo mínimo y máximo es de 0.05 a 1 PSI respectivamente.

En los medidores de inserción fija la longitud de inserción permanece inmóvil entre un 2.5 y un 25% del diámetro de la tubería, en los medidores de inserción retráctil la posición puede variar de un 5 a un 50% del mismo.

#### **1.2.7.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR**

##### **❖ *Exactitud y precisión***

Un medidor de turbina da una salida muy confiable, la exactitud de un medidor de turbina en línea es del orden de  $\pm 0.25\%$  y su precisión de  $\pm 0.05\%$ . En los medidores de inserción la exactitud toma valores de  $\pm 1\%$  y la precisión de  $\pm 0.25\%$ .

En general los medidores de turbina de gran tamaño son más exactos.

### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Los medidores de turbina son capaces de medir gastos de 0.004 l/min a 215 m<sup>3</sup>/min para medidores en línea, los de inserción de 7.5 l/min hasta 2,700 m<sup>3</sup>/min (**tabla 1.2.7.a**). El campo de medida para los medidores en línea y de inserción es de 10:1 pero puede ser extendido hasta 100:1.

Los medidores en línea cubren tamaños de 1/4 - 30" (6 mm - 75 cm); los de inserción fija de 2-80" (50 mm-2 m) y los de inserción retráctil de 12-60" (30 cm - 1.5 m).

Diámetro		Rango de flujo				Pres.	Factor <i>k</i>		Frecuencia	
mm	pulg	GPM		l/seg		PSI	Pulsos/l		Hz.	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
6	1/4	0.13	1.50	0.008	0.095	6000	18,000.0000	20,000.0000	171.0	1,900.0
12	1/2	1.00	10.00	0.063	0.630	5000	2,475.0000	2,750.0000	157.5	1,750.0
19	3/4	2.50	25.00	0.158	1.575	4500	810.0000	900.0000	126.0	1,400.0
25	1	5.00	50.00	0.315	3.150	3,850	342.0000	380.0000	108.0	1,200.0
32	1 1/4	7.50	75.00	0.473	4.725	3,500	171.0000	190.0000	81.0	900.0
38	1 1/2	10.00	100.00	0.630	6.300	3,000	108.0000	120.0000	68.4	760.0
50	2	20.00	200.00	1.260	12.600	2,500	45.9000	51.0000	57.9	643.0
75	3	60.00	600.00	3.780	37.800	2,250	13.5000	15.0000	51.0	567.0
100	4	105.00	1,050.00	6.615	66.150	1,850	6.8400	7.6000	45.3	503.0
150	6	250.00	2,500.00	15.750	157.500	1,650	2.3400	2.6000	36.6	407.0
200	8	450.00	4,500.00	28.350	283.500	1,300	0.9900	1.1000	28.1	312.0
250	10	700.00	7,000.00	44.100	441.000	1,000	0.9000	1.0000	19.7	441.0
300	12	1,000.00	10,000.00	63.000	630.000	700	0.0810	0.0900	5.1	57.0
500	20	3,000.00	30,000.00	189.000	1,890.000	200	0.0090	0.0100	1.7	19.0
600	24	4,000.00	40,000.00	252.000	2,520.000	100	0.0014	0.0015	0.3	3.8

Tabla 1.2.7.a Gastos típicos de medidores de turbina en línea.

### ❖ *Instalación*

El medidor de turbina debe instalarse de tal modo que no se vacíe cuando cesa el caudal pues los golpes de ariete lo pueden dañar seriamente. Por otra parte si el medidor se instala en algún ángulo la carga en los rodamientos se altera y la exactitud puede afectarse.

Por lo anterior se recomienda que estos medidores se instalen en un plano horizontal y que el tubo de proceso funcione lleno en todo momento de la medición.

Generalmente los desalineamientos, vórtices y remolinos provocados por válvulas, bombas, accesorios (compuertas, "T", codos, reductores, expansores, etc.) e instalación defectuosa de los tubos pueden introducir un perfil de velocidades distorsionado. Por tal motivo es aconsejable utilizar un enderezador de flujo pues se han observado desviaciones del 2% de la medición causada por remolinos.

La instalación óptima se logra usando una tubería recta ( $10D$  aguas arriba,  $5D$  aguas abajo) así como un enderezador de flujo (**figura 1.2.7.c**). Si se van a instalar accesorios y no se cuenta con dicho enderezador se sugiere aguas arriba una tubería recta de 25 a  $30D$ .

Se sugiere montar aguas arriba un filtro para prevenir la entrada de sólidos al rotor. Además se aconseja que el flujo que pasa por el medidor siempre se controle por medio de una válvula montada aguas abajo.

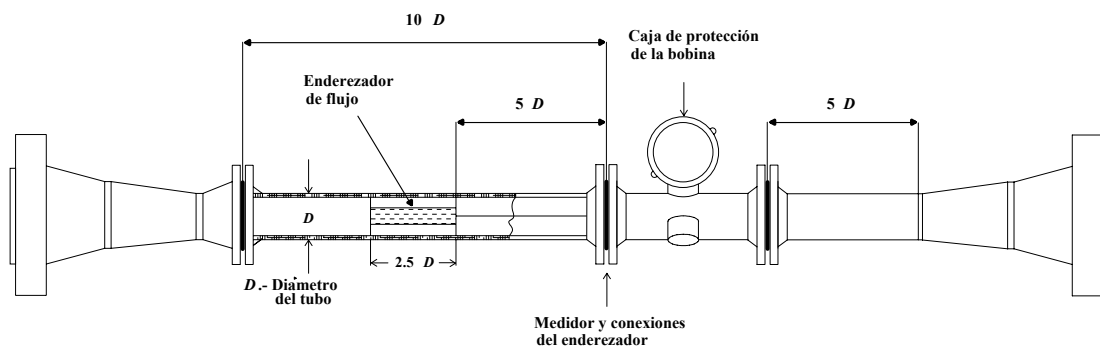


Figura 1.2.7.c Instalación del medidor de turbina.

### ❖ Operación

Las presiones de trabajo máximas para los medidores de turbina están determinadas por las conexiones de la entrada y la salida del medidor. Los medidores en línea son capaces de soportar hasta 10,000 PSI (700 Bar), los de inserción hasta 2,500 PSI (175 Bar).

Los límites de temperatura son de  $-268$  a  $1380^{\circ}\text{C}$  ( $-450$  a  $2500^{\circ}\text{F}$ ). Las velocidades de operación van de  $0.15$ - $10.5$  m/s para medidores en línea y de  $0.03$  -  $30$  m/s para medidores de inserción.

El medidor de turbina en línea es ideal para líquidos con viscosidades menores a 200 cSt en diámetros inferiores a 2" y 500 cSt para diámetros mayores. Por su parte los medidores de inserción admiten una viscosidad máxima de 50 cSt. Ambos medidores operan con mayor linealidad en el rango de  $4,000 < R_e < 20,000$ .

Por su parte los rodamientos demandan que el fluido tenga propiedades lubricantes y sea relativamente limpio con una concentración de sólidos menor de 0.1% del peso total.

Además los fluidos no deben contener fragmentos, materiales fibrosos ni partículas mayores a 70 micras - para rodamiento planos- o 10 micras - para rodamientos de bolas-.

### ❖ *Aplicaciones*

A pesar de que estos medidores fueron diseñados originalmente para mediciones de líquidos en aviones, cohetes y misiles, ahora son muy usados en el área de la ciencia y la industria (ver **tabla 1.2.7.b**).

Los medidores de turbina no son adecuados para líquidos que tienden a formar espuma ni que contengan gas porque en este último caso se medirá el volumen total de líquido mas el de gas.

Para medir flujo pulsante se debe usar una lectura digital y el periodo de conteo debe ser largo en relación con la frecuencia de las pulsaciones del fluido.

<b>Aplicaciones en general</b>	
<b>Industrias:</b>	Aeroespacial, Petroquímica y del Petróleo.
<b>Dosificado:</b>	Combustibles en hornos e ingredientes para mezcladoras.
<b>Higiénicas:</b>	Cervecerías, Destilerías y Lecherías.
<b>Criogénicas:</b>	Llenado de tanques para entrega de gas líquido.
<b>Suministro:</b>	Sistemas de lubricación y enfriamiento.
<b>Control de flujo:</b>	Transferencia de custodia de líquidos costosos.
<b>Corrosivos:</b>	Acidos, Petroquímicos, Líquidos Químicos, etc.
<b>Otros:</b>	Pesaje, Mezclado y Llenado.

**Tabla 1.2.7.b Aplicaciones del medidor de turbina.**

## ❖ *Mantenimiento y calibración*

Las aspas necesitan inspección visual para verificar su estado y los rodamientos necesitan mantenimiento regular o en caso extremo el reemplazo del mismo.

Los medidores de turbina normalmente no requieren calibración periódica, inclusive existen cápsulas que contienen el ensamblaje del rotor y el rodamiento pre-calibrados.

Si se requiere una alta precisión los medidores deben ser calibrados usando justamente los mismos fluidos a ser medidos (de preferencia en la misma tubería de instalación). De no ser así debe ser evaluado algún factor de corrección de acuerdo al manual del medidor.

### *Ventajas:*

- *La pérdida de presión es moderada y decrece conforme se incrementa el diámetro de la tubería.*
- *En diámetros muy grandes de tubería, el medidor presenta una buena precisión que se ve favorecida con la calibración periódica del aparato.*
- *La señal de salida del flujo es directamente proporcional a un tren de pulsos con alta linealidad.*
- *El medidor se puede alimentar al mismo tiempo con dos fuentes, una de corriente alterna y otra de corriente directa de tal manera que si una de ellas falla el medidor acepta la otra sin pérdida de pulsos.*
- *Estos medidores pueden ser ajustados con algunos accesorios para medir flujo bi-direccional.*

### *Desventajas:*

- *El medidor requiere de mantenimiento y lubricación constantes, mayormente si se trata de líquidos corrosivos.*
- *Estos dispositivos tienen costos elevados, especialmente para grandes diámetros de tubería.*
- *Los fluidos agresivos obligan un programa de calibración periódica.*
- *Su funcionamiento es sensible a la formación de flujos turbulentos.*
- *Requiere tubería recta aguas arriba y además enderezadores de flujo.*



## 1.2.8

## MEDIDOR ULTRASONICO

Introducidos en los años de 1970, los medidores ultrasónicos han pasado exitosamente su periodo introductorio aportando un instrumento de medición de flujo con inalcanzable rango de medición, linealidad y sensibilidad.

Existen dos tipos de medidores ultrasónicos, los de tipo transmisivo y los de tipo reflectivo, a continuación se explica el funcionamiento básico de ellos.

### 1.2.8.1

### MEDIDORES TRANSMISIVOS

Su funcionamiento consiste básicamente en enviar dos pulsos ultrasónicos en ángulo fijo a través del fluido mediante dos transductores (**figura 1.2.8.a**). Un pulso se envía en la dirección del flujo y el otro en dirección opuesta, este arreglo provoca variaciones en las señales que se utilizan para calcular la velocidad del fluido y por consiguiente el gasto.

Los transductores sónicos son cristales piezo-cerámicos que se energizan alternativamente por pulsos eléctricos y pueden actuar como transmisor o receptor.

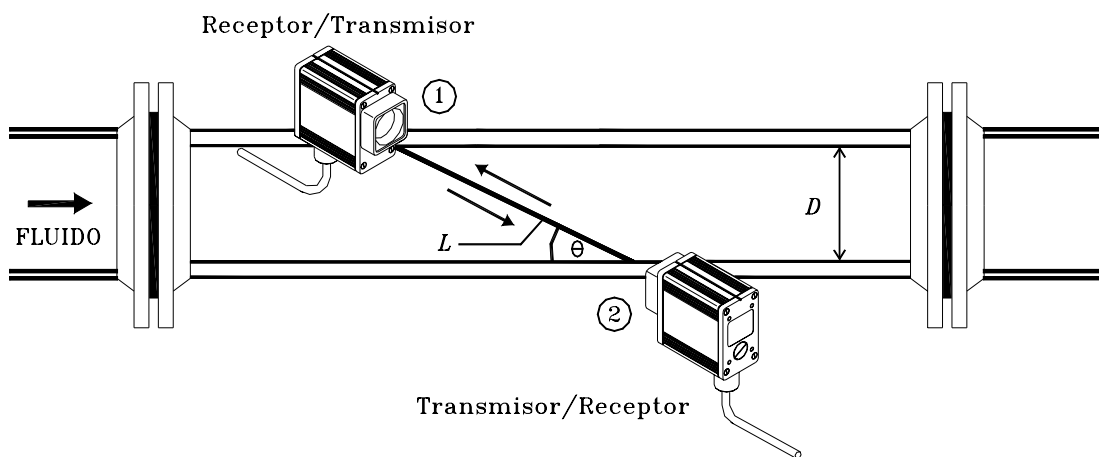


Figura 1.2.8.a Medidor ultrasónico en línea en posición diagonal.

Existen tres métodos para evaluar estos cambios: diferencia directa en tiempo ( $dt$ ), desplazamiento de fase ( $d\phi$ ) y diferencia de frecuencias ( $df$ ).

**A) DIFERENCIA DIRECTA EN TIEMPO ( $dt$ )**

En este método indicado por su nombre la diferencia en tiempo se produce debido a que el pulso acústico transmitido aguas abajo viaja en un periodo más corto que el pulso aguas arriba.

De la ilustración anterior se tienen las siguientes relaciones:

$$t_1 = \frac{L}{C + v \cos \theta} \text{ ----- (a)} \quad t_2 = \frac{L}{C - v \cos \theta} \text{ ----- (b)}$$

- $L$  = Distancia entre los transductores.
- $t_1$  = Tiempo que viaja el pulso aguas abajo.
- $t_2$  = Tiempo que viaja el pulso aguas arriba.
- $\theta$  = Angulo entre el haz sónico y la dirección del fluido.
- $v$  = Velocidad del fluido.
- $C$  = Velocidad del sonido en el fluido.
- $D$  = Diámetro de la tubería.

De las ecuaciones (a) y (b) y despejando  $v$  se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{t_2 - t_1}{t_1 \cdot t_2} = \frac{2v \cdot \cos \theta}{L} \text{ ----- (c)} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{L dt}{2 \cos \theta (t_1 \cdot t_2)} \text{ ----- (d)}$$

donde  $dt = t_2 - t_1$  y  $L = \frac{D}{\sin \theta}$

Por lo tanto:  $Q = \left[ \frac{\pi \cdot D^3}{4 \sin 2\theta} \right] \left[ \frac{dt}{t_1 t_2} \right] \text{ ----- (1.2.8.1)}$

De la expresión (c) se observa que la salida de estos medidores no se afecta por los cambios en la velocidad del sonido a través del medio que podrían darse por variaciones de temperatura o presión.

**B) DESPLAZAMIENTO DE FASE ( $d\phi$ )**

En este método cada transductor envía una ráfaga de señales ultrasónicas e inmediatamente después es usado como receptor.

La fase de las dos señales es modificada por el flujo y la diferencia de fase es una función de la velocidad del fluido (**figura 1.2.8.b**).

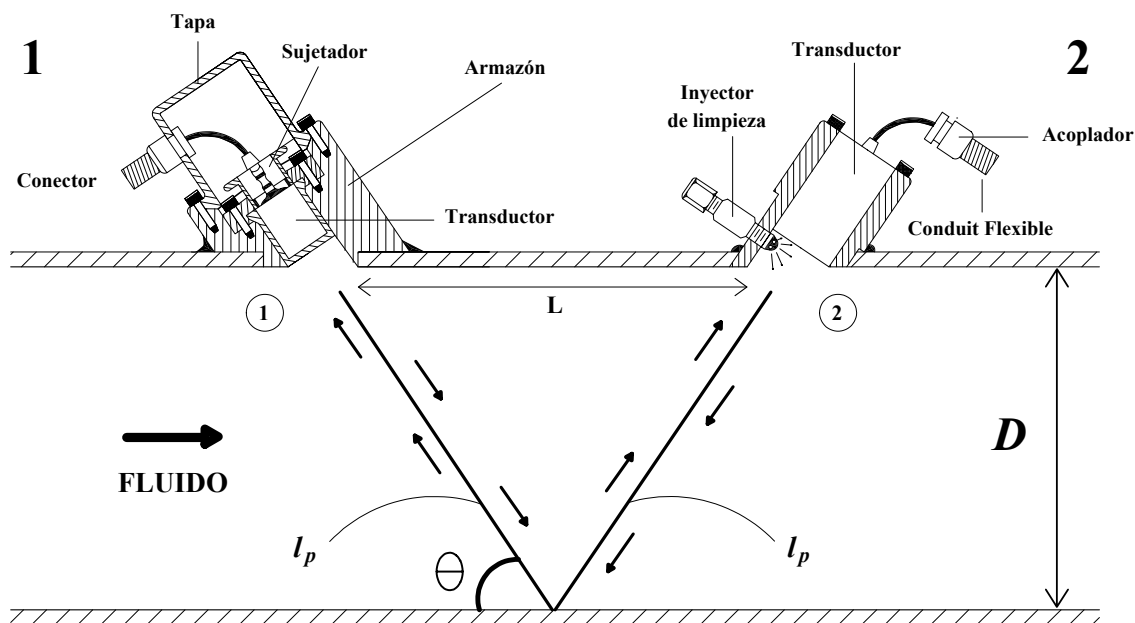


Figura 1.2.8.b Medidor ultrasónico en línea en posición reflejo con transductor fijo (1) y retráctil (2).

Del dibujo superior se observa que la trayectoria del haz sónico transductor-pared-transductor se repite en sentido inverso, así que restando la igualdad (b) menos la igualdad (a) y considerando que  $C$  es mucho más grande que  $v \cdot \cos \theta$  resulta que:

$$dt = \left( \frac{2l_p v \cdot \cos \theta}{C^2} \right) \times 2 \text{ trayectorias} \Rightarrow dt = \left( \frac{4l_p v \cdot \cos \theta}{C^2} \right) \text{ ----- (e)}$$

$l_p$  = Distancia que recorre el haz sónico del transductor a la pared o viceversa.  
 $dt = t_2 - t_1$

Partiendo de la fórmula  $d\phi = 2\pi \cdot f \cdot dt$  y del dibujo anterior  $l_p = \frac{L}{2 \cos \theta}$ , la ecuación (e) en términos de  $v$  queda de la siguiente forma:

$v = \frac{d\phi C^2}{4\pi \cdot f \cdot L}$	$d\phi$	=	La diferencia de fases entre los ciclos ( $\phi_2 - \phi_1$ )
	$f$	=	Frecuencia de las señales
	$C$	=	Velocidad del sonido en el fluido
	$L$	=	Distancia entre los transductores.

Finalmente: 
$$Q = \frac{D^2 C^2 d\phi}{16f \cdot L} \text{ ----- (1.2.8.2)}$$

En este método la velocidad del sonido a través del medio interviene en la expresión matemática para calcular la velocidad del flujo.

Los medidores ultrasónicos que utilizan este método con la posición "reflejo" son recomendables para pequeños diámetros pues se incrementa la longitud de la ruta de las señales.

**C) DIFERENCIA DE FRECUENCIAS ( $df$ )**

En este método el emisor lanza una señal acústica hacia al receptor y este último dispara una señal de retorno (**figura 1.2.8.a**). La diferencia de frecuencia producida en las señales es una medida de la velocidad del fluido.

Para lograr una mayor exactitud este procedimiento se hace en repetidas ocasiones y se promedia la diferencia de frecuencias. Para conseguir este propósito el papel de los transductores se tiene que alternar en cada pulso.

Se sabe que  $\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2v \cdot \cos \theta}{L}$  y  $L = \frac{D}{\text{sen} \theta}$  de las expresiones (c) y (d) respectivamente, adicionalmente se tiene que la relación entre  $f$  y  $t$  se define por  $f_1 = \frac{1}{t_1}$  y  $f_2 = \frac{1}{t_2}$  quedando la siguiente relación:

$$df = \frac{v \cdot \text{sen } 2\theta}{D} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{D \cdot df}{\text{sen } 2\theta}$$

$df$  = La diferencia en frecuencia de la repetición de pulsos ( $f_1 - f_2$ )

$\theta$  = ángulo entre el haz sónico y la dirección del flujo

$D$  = Diámetro de la tubería.

Por lo tanto:  $Q = \left[ \frac{\pi \cdot D^3}{4 \text{sen} 2\theta} \right] d_f \quad \text{-----} \quad (1.2.8.3)$

Nuevamente, en este método la velocidad del sonido a través del medio no interviene en la expresión matemática para calcular la velocidad del flujo.

### 1.2.8.2 MEDIDORES REFLECTIVOS (EFECTO DOPPLER)

El efecto Doppler ocurre cuando una onda que viaja en algún medio es reflejada por un cuerpo en movimiento y consecuentemente experimenta un cambio en su frecuencia referido a las velocidades relativas de la onda y del cuerpo.

Aplicando este principio al medidor un transductor simple envía una señal de frecuencia conocida dentro del fluido donde es reflejada hacia él mismo -u otro transductor- por burbujas o partículas suspendidas (**figura 1.8.2.c**).

Debido a que el patrón reflectivo se está moviendo junto con el flujo de proceso la frecuencia de las ondas sónicas es desplazada tal como son reflejadas. La magnitud de este corrimiento en frecuencia (Efecto Doppler) es proporcional a la velocidad del flujo y es convertida por medio electrónicos a una señal lineal para ser desplegada digitalmente en el medidor.

La amplitud de las señales reflejadas es dependiente del número de partículas y de las discontinuidades presentes en el tubo.

La frecuencia recibida no es una frecuencia simple sino un espectro de frecuencias las cuales se traducen a un número de velocidades que son promediadas para obtener la velocidad del fluido.

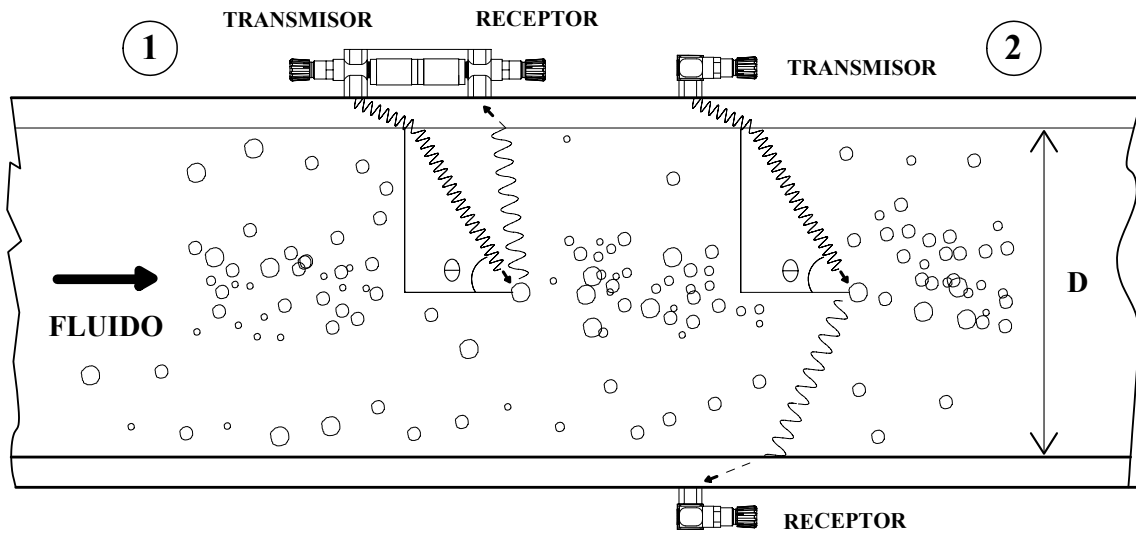


Figura 1.2.8.c Operación del medidor Doppler con dos transductores (1) y un transductor (2).

De las expresiones (a) y (b) y sabiendo que  $f_1 = \frac{1}{t_1}$  y  $f_2 = \frac{1}{t_2}$ : se deduce que:

$\frac{f_1}{f_2} = \frac{C + v \cos \theta}{C - v \cos \theta} \rightarrow f_1 = f_2 \left[ \frac{C + v \cos \theta}{C - v \cos \theta} \right];$	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>f_1</math></td> <td style="padding: 2px 5px;">=</td> <td style="padding: 2px 5px;">Frecuencia transmitida</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>f_2</math></td> <td style="padding: 2px 5px;">=</td> <td style="padding: 2px 5px;">Frecuencia recibida</td> </tr> </table>	$f_1$	=	Frecuencia transmitida	$f_2$	=	Frecuencia recibida
$f_1$	=	Frecuencia transmitida					
$f_2$	=	Frecuencia recibida					

Efectuando la división polinomial en el lado derecho de la segunda expresión y considerando que  $C$  es mucho más grande que  $v \cdot \cos \theta$  se tiene la siguiente igualdad:

$$f_1 = f_2 \left[ 1 + \frac{2v \cos \theta}{C} \right] \rightarrow \Delta_f = \frac{2v \cdot f_2 \cdot \cos \theta}{C} \rightarrow v = \frac{C \cdot \Delta_f}{2f_2 \cos \theta}$$

Donde el desplazamiento en frecuencia (efecto Doppler) está dado por  $\Delta_f = f_1 - f_2$ .

Por tanto 
$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot C \cdot \Delta_f}{8 f_2 \cos \theta} \text{ ----- (1.2.8.4)}$$

En el caso de un sistema con un transductor (**Figura 1.2.8.c-1**) solo se puede monitorear una sección del flujo y si el líquido no está pesadamente cargado con contaminantes reflectivos o el perfil de velocidades no es favorable la señal Doppler puede ser muy débil dificultándose su detección.

Adicionalmente hay que tener en cuenta la gran cantidad de etapas de acoplamiento recepción-transmisión del medidor lo que da lugar a grandes errores, especialmente en medidores de grandes diámetros.

Para minimizar estos errores se adopta el método de dos transductores usando el elemento de transmisión y recepción separados, esto alivia el problema pues activa mucha de la energía recibida originándola en la zona de reflexión (**figura 1.2.8.c-2**). Además con este método los dos transductores son capaces de operar en concentraciones de partículas con propiedades reflectivas más bajas.

En lo que respecta a los modelos existen dos tipos: medidores en línea y de abrazadera.

Los medidores ultrasónicos en línea requieren instalación como cualquier otro medidor y se utilizan cuando el proceso requiere una medición del gasto en algún lugar específico (**figura 1.2.8.b**), son más sencillos de configurar y menos complejos.

En ellos los transductores son directamente expuestos al fluido - transductores húmedos- y están colocados de frente en un ángulo fijo por lo que no es necesario calcular el ángulo de refracción para mantener el sistema calibrado.

Existen dos formas de montar los transductores:

- Transductor fijo: Se utiliza cuando el fluido a medir siempre es el mismo y se requiere retirar el armazón para reemplazar el transductor (**figura 1.2.8.b-1**).
- Transductor retráctil: Permite cambiar los transductores de acuerdo al fluido con el que se va a trabajar sin necesidad de manipular el armazón, por lo tanto no se interrumpe el proceso (**figura 1.2.8.b-2**).

En los medidores ultrasónicos de abrazadera los transductores están montados en la pared exterior del tubo. Un pulso de energía ultrasónica sale del transductor atravesando el líquido a través de una o ambas paredes del tubo hasta llegar al otro transductor.

Estos medidores son portátiles y no requieren instalación especial, sólo hay que tener cuidado en colocar los transductores exactamente como lo indica el manual del fabricante.

Una ventaja de este modelo es que permite medir el flujo en diferentes puntos de la tubería y así verificar variaciones del mismo.

En lo que respecta a los medidores tipo transmisivo se recomienda usarlos para líquidos limpios pues de lo contrario la presencia excesiva de sólidos o burbujas en el trayecto provocan una señal débil para ser procesada.

Estos medidores tienen la ventaja de ser más exactos y precisos que los de tipo reflectivo y por consiguiente más costosos. Se encuentran disponibles en ambos modelos ya sea en línea o de abrazadera.

En los modelos tipo transmisivo en línea se puede aumentar la exactitud utilizando desde 2 hasta 6 rutas con 4 y 12 transductores respectivamente, con estos arreglos se puede manejar cualquier líquido con total independencia de su viscosidad y de  $R_e$ .



Por su parte los medidores reflectivos sólo pueden ser usados para medir fluidos con contaminantes que pueden ser sólidos suspendidos, burbujas o turbulencias creadas por el flujo. Su funcionamiento depende de la cantidad, tamaño y distribución de las partículas (burbujas) en el fluido, aunado a la conductividad sónica del fluido.

Los medidores reflectivos se consiguen en ambos modelos, en línea o de abrazadera. En los medidores reflectivos en línea se puede elevar la exactitud transmitiendo dos señales ultrasónicas de frecuencia fija y comparando el corrimiento Doppler que sufren las señales reflejadas.

### 1.8.2.3 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

#### ❖ *Exactitud y precisión*

Medidores transmisivos: Exactitud:  $\pm 0.1\%$ ; Precisión:  $\pm 0.2\%$

Medidores reflectivos: Exactitud:  $\pm 1.0\%$ ; Precisión:  $\pm 0.5\%$

En general la exactitud del medidor se verá afectada severamente si la orientación de la tubería no permite que funcione llena de líquido o si se acumulan residuos en el transductor o cerca de él.

#### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

La siguiente ilustración muestra de una manera general los rangos de medición de los diferentes medidores ultrasónicos, para más detalles ver **tabla 1.8.2.a**.

Medidor	Modelo	Gasto		<i>D</i>			
		ml/min	m <sup>3</sup> /min	mm	m.	Pulg.	Pulg.
Transmisivo	<i>En línea</i>	1	- 7,560	0.8	- 3.0	1/32	- 120
	<i>Abrazadera</i>	0	- 53,000	6.0	- 10.0	1/4	- 400
Reflectivo	<i>En línea</i>	50	- 6,000	3.0	- 2.5	1/8	- 100
	<i>Abrazadera</i>	75	- 40,000	10.0	- 7.5	1/4	- 300

El campo de medida para los medidores transmisivos alcanza valores de 400:1 mientras que en los medidores reflectivos es de 10:1.

DIAMETRO		GASTO (GPM)							
pulg.	mm.	Velocidad en pies/s							
		0.5	1	2	4	10	15	20	30
1/4	6	0.07	0.10	0.30	0.50	1.35	2.00	2.70	4.00
1/2	12	0.30	0.50	1.00	2.00	5.40	8.00	11.00	16.00
1	24	1.00	2.00	4.00	9.00	20.00	30.00	45.00	65.00
2	36	2.50	5.00	10.00	20.00	50.00	70.00	100.00	150.00
3	75	10.00	21.00	45.00	90.00	230.00	350.00	450.00	650.00
4	100	20.00	38.00	80.00	160.00	400.00	600.00	800.00	1,100.00
6	150	45.00	90.00	180.00	350.00	900.00	1,400.00	1,800.00	2,500.00
8	200	80.00	150.00	300.00	600.00	1,500.00	2,400.00	3,000.00	4,500.00
10	250	130.00	250.00	500.00	1,000.00	2,500.00	3,700.00	5,000.00	70,000.00
20	500	450.00	900.00	1,800.00	3,500.00	9,400.00	13,000.00	18,000.00	28,000.00
30	600	700.00	1,400.00	2,700.00	5,400.00	14,000.00	20,000.00	27,000.00	40,000.00
42	800	1,200.00	2,400.00	4,800.00	9,500.00	24,000.00	36,000.00	50,000.00	70,000.00
54	1,350	3,500.00	6,900.00	13,800.00	27,500.00	69,000.00	105,000.00	140,000.00	200,000.00
60	1,500	4,000.00	8,400.00	17,000.00	33,500.00	84,000.00	125,000.00	170,000.00	250,000.00

Tabla 1.8.2.a Capacidades típicas de gastos en medidores ultrasónicos.

### ❖ *Instalación*

El medidor puede ser montado en un plano horizontal o vertical. No deben instalarse conexiones, válvulas, bombas, reductores o expansores a una distancia menor de  $10D$  aguas arriba del medidor, ni  $5D$  aguas abajo. Se sugiere lo anterior para no distorsionar  $R_e$  y consiguientemente el perfil de velocidades además de evitar una operación intermitente del medidor.

En los modelos de abrazadera el espesor de la pared del tubo debe conocerse exactamente y como máximo se aceptan 76 mm (3 pulg.), además la tubería no debe ser aislada con ningún material.

### ❖ *Operación*

En los medidores de tipo transmisivo el fluido de proceso debe ser limpio de modo que la cantidad de sólidos suspendidos mas la entrada de burbujas no debe ser mayor al 0.3% del peso total. Una ventaja adicional de estos dispositivos es que son totalmente bi-direccionales.

En los medidores tipo reflectivo el flujo debe ser lo suficientemente rápido para poner los sólidos y las burbujas en suspensión y distribuirlos uniformemente para la medición .

Para tal efecto se recomienda una velocidad mínima de 0.03 m/s para burbujas pequeñas y de 1.8 m/s para sólidos, estos últimos deben ser mayores a 30  $\mu\text{m}$  ó 25 ppm.

Además la cantidad de sólidos suspendidos junto con la entrada de burbujas de aire en el fluido debe ser mayor a 25 mg/l pero menor del 4% del peso total

En ambos tipo de medidores se requiere que el tubo de proceso funcione lleno durante la medición

Se muestran algunos parámetros de operación en la siguiente tabla:

Medidor	Modelo	Presión	Temperatura				Velocidad			
			°C		°F		m/s		ft/s	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Transmisivo	<i>En línea</i>	3,000 PSI	-185	500	-300	900	0.010	18.000	0.030	59.00
	<i>Abrazadera</i>	No aplica	-40	300	-40	570	0.000	32.000	0.000	105.00
Reflectivo	<i>En línea</i>	3,000 PSI	-185	400	-300	750	0.025	12.000	0.080	40.00
	<i>Abrazadera</i>	No aplica	-40	200	-40	400	0.030	15.000	0.100	50.00

La frecuencia de transmisión de los transductores se recomienda como sigue:

- a) < 0.1 Mhz para  $\varnothing = 5,000 - 10,000$  mm
- b) < 0.5 Mhz para  $\varnothing = 500 - 5,000$  mm
- c) < 1.0 Mhz para  $\varnothing = 50 - 2,000$  mm
- d) < 3.0 Mhz para  $\varnothing = 1 - 100$  mm

Por lo general la linealidad de los medidores ultrasónicos no se ve afectados por el número de Reynolds excepto en una región específica donde  $4,000 < R_e < 10,000$  o cuando la viscosidad del fluido es mayor a 2,500 cSt.

## ❖ *Aplicaciones*

Los medidores ultrasónicos no producen ninguna pérdida de carga y los electrodos permiten su limpieza con vapor.

Estos medidores permiten monitorear flujos a través de tuberías de diversos de metales y aleaciones, PTFE, PVC, acrílico, vidrio, asbesto, concreto, etc. Algunas aplicaciones se muestran en la **tabla 1.2.8.b**.

Medidor Transmisivo	Medidor Reflectivo
<b>Instalaciones urbanas:</b> Agua limpia para hospitales, casas-habitación, centros comerciales, universidades, oficinas, aeropuertos, etc.	<b>Industria alimenticia:</b> Vino, cerveza, jugos, pulpas, yogurt, jarabe, miel, aceites, lácteos, mayonesa, etc.
<b>Industria del petróleo y refinación:</b> Aceites crudos ligeros o medios	<b>Plantas de tratamiento:</b> Aguas de drenaje municipales, residuos contaminantes.
<b>Plantas de energía:</b> Agua caliente o fría para proceso.	<b>Transferencia de custodia:</b> Líquidos para plantas térmicas.
<b>Fluidos puros:</b> Industria farmacéutica, alimenticia y de bebidas.	<b>Productos químicos:</b> líquidos abrasivos, corrosivos, tóxicos, hidrocarburos, solventes, etc.
<b>Otros:</b> Líquidos criogénicos.	<b>Otros:</b> Concreto, cementos, pulpa de papel, melaza, asfaltos, cáusticos, etc.

Tabla 1.2.8.b Aplicaciones de los medidores ultrasónicos.

## ❖ *Mantenimiento y calibración*

Los transductores son susceptibles a ensuciarse y tienen que ser limpiados regularmente cada mes y medio a no ser que incluyan inyectores de limpieza. Se recomienda calibrar el transmisor cada mes y el medidor en conjunto cada 3 meses.

### **Ventajas:**

- *No obstruye el paso del fluido, por lo que no ocasiona ningún tipo de pérdidas de carga.*
- *Puede ser empleado en la medición del gasto de un gran número de fluidos.*
- *Se instalan sobre o en las paredes de la tubería y no requieren arreglos previos mayores.*
- *No se interrumpe el flujo durante el mantenimiento o reemplazo del medidor.*
- *Se adapta a los diferentes tamaños de diámetros de la tubería.*
- *Costos bajos en instalación y operación.*

### ***Desventajas:***

- *El medidor reflectivo es sensible al cambio en la composición fisicoquímica del fluido.*
- *El medidor reflectivo es vulnerable al perfil de velocidades del flujo, su precisión puede alterarse debido a los cambios en la rugosidad de la tubería y por cambios en el flujo de laminar a turbulento.*
- *El medidor transmisivo se puede afectar por la presencia de sólidos suspendidos de gran tamaño así como de grandes burbujas de aire que pueden distorsionar y bloquear la propagación de las ondas sónicas.*
- *Si se usa el medidor de abrazadera es importante cuidar el tipo de sellador para colocarlos ya que se pueden producir pérdidas de señal por absorción.*

## 1.2.9

## MEDIDOR ELECTROMAGNETICO

Los medidores de flujo electromagnéticos fueron introducidos comercialmente en el año 1950 y su principio está basado en la Ley de Faraday.

Esta ley enuncia que si un conductor es movido dentro de un campo magnético se induce un voltaje en dicho conductor en ángulo recto a la dirección del movimiento en ese conductor y en ángulo recto al campo magnético. Este voltaje es proporcional a la velocidad promedio a la cual se mueve dicho conductor. (Figura 1.2.9.a).

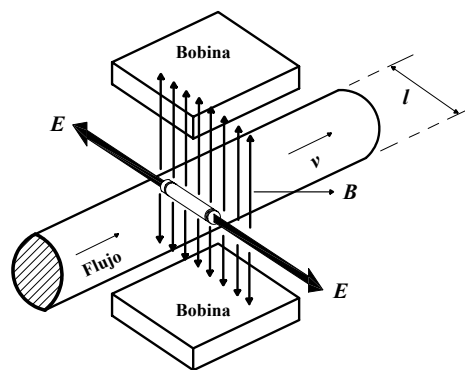


Figura 1.2.9.a Esquema de un medidor de flujo electromagnético.

La fórmula que define la Ley de Faraday es:

$$E = B \cdot l \cdot v$$

Donde  $E$  es el voltaje generado,  $B$  es la densidad de flujo magnética,  $l$  es la longitud del conductor y  $v$  es la velocidad del conductor.

Para una tubería circular el flujo volumétrico está dado por:

$$Q = \frac{\pi}{4} k \cdot D \cdot \frac{E}{B} \quad \text{-----} \quad (1.2.10.1)$$

Donde  $k$  es una constante determinada por calibración,  $D$  corresponde al diámetro de la tubería y  $B$  es un factor del medidor.

En los medidores electromagnéticos en línea se aplica el voltaje de alimentación a un circuito que incluye un transformador de corriente, este transformador energiza las bobinas de campo creando un campo magnético (**figura 1.2.9.b**).

Si el líquido que se va a medir tiene suficiente conductividad actuará como un conductor eléctrico e inducirá un voltaje ( $E$ ).

Este voltaje es la suma de todos los voltajes producidos por cada partícula del líquido dentro del campo magnético y es proporcional a la fuerza de dicho campo, al diámetro del tubo y a la velocidad del fluido dentro del medidor.

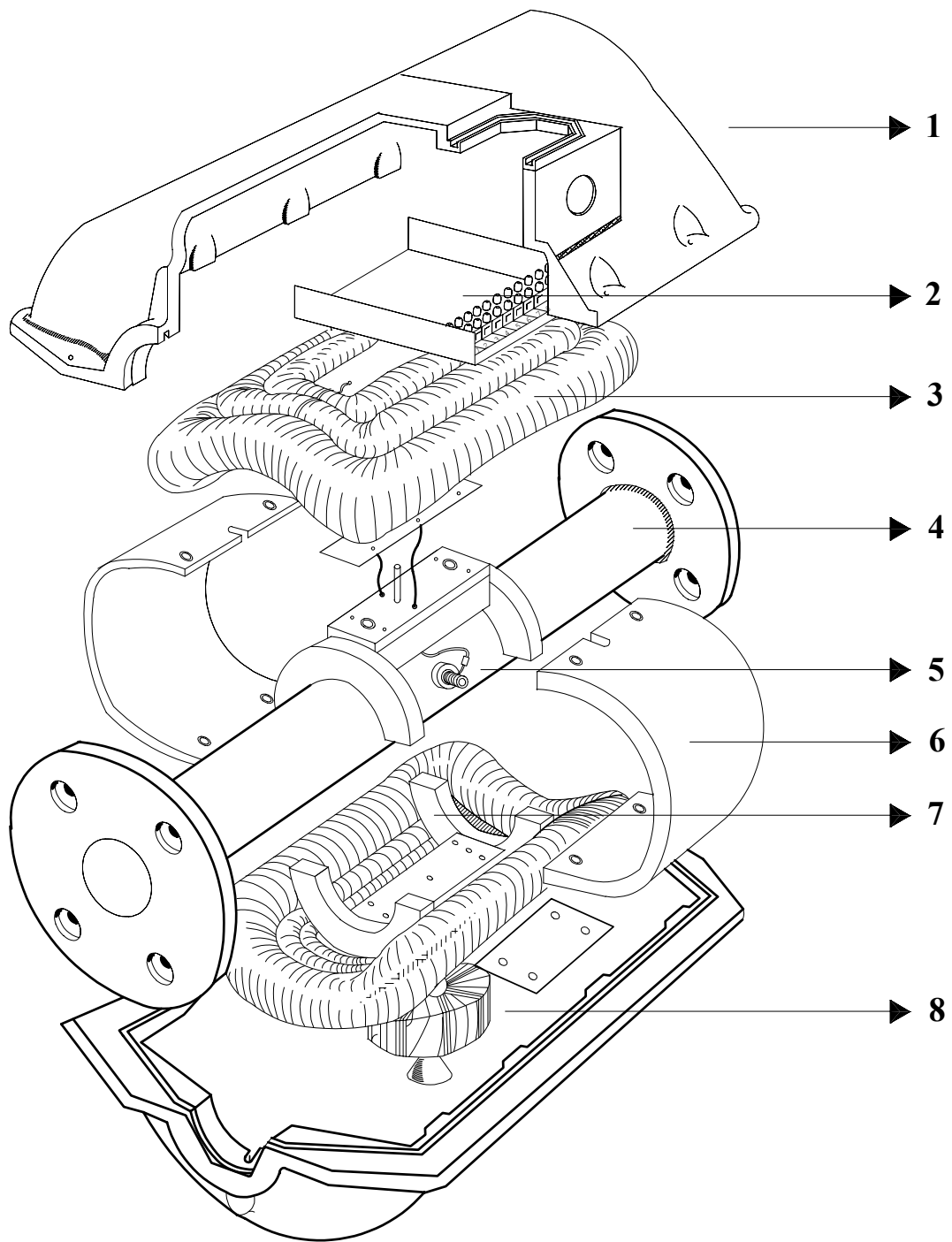
Realmente la única zona del líquido en movimiento que contribuye a generar un voltaje en el conductor es la que une en línea recta a los dos electrodos. Entre más rápido sea la velocidad del líquido más grande será el valor instantáneo de la señal ( $E$ ).

Esta señal es captada por dos electrodos diametralmente opuestos que son rasantes con la superficie interior del tubo y están en contacto con el líquido; dicha señal es enviada a un convertidor/transmisor donde es sumada, referenciada y convertida a una salida apropiada para enviarse a un indicador analógico o digital.

La salida del medidor electromagnético es lineal y proporcional al gasto del fluido.

En los medidores electromagnéticos en línea existen dos métodos para producir la densidad de flujo magnético: mediante corriente alterna ( $dc$ ) y corriente directa ( $ac$ ).

En los medidores de  $dc$  las bobinas son periódicamente energizadas, por lo tanto se inducen dos voltajes en los electrodos. El voltaje de energización es una combinación de la señal verdadera y del ruido mientras que el voltaje de desenergización representa solamente el ruido. Cuando se mide la diferencia entre los dos voltajes resulta una señal "limpia".



- |                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1.- Cuerpo del medidor            | 5.- Electrodos                   |
| 2.- Bloque de terminales          | 6.- Placa protectora del medidor |
| 3.- Bobina de campo               | 7.- Imanes                       |
| 4.- Tubería con material aislante | 8.- Transformador de corriente   |

**Figura 1.2.9.b Partes principales de un Medidor Electromagnético en línea.**



En los medidores de *ac* el voltaje de línea es aplicado a las bobinas y se crea en el electrodo un voltaje continuo de alterna de valor pequeño, su valor es aproximadamente de 0.05 V/pie/s.

Los medidores de *dc* tienen algunas ventajas debido a su modo de operación pues retornan a cero cada ciclo mientras que para un medidor de *ac* se requiere detener el flujo periódicamente para ajustar a cero el medidor.

Otra ventaja es que son generalmente menos voluminosos y cuestan aproximadamente 35% menos, además consumen menos energía y son algo más fáciles de instalar.

Sin embargo, cuando se espera que el flujo de proceso varíe rápidamente el medidor de *ac* seguirá estos cambios mucho mejor pues opera a 60 Hz mientras que el medidor de *dc* opera en el rango de 3-30 Hz.

Adicionalmente los medidores de *ac* manejan mejor las suspensiones porque las partículas duras pueden crear ruido de baja frecuencia que afecta más a los medidores de *dc*.

Por otra parte pueden existir muchas fuentes de señales de ruido que generan campos magnéticos como lo son las líneas eléctricas y motores de gran potencia cercanos al medidor, o las corrientes parásitas en el líquido provocadas por el campo magnético de corriente alterna del propio medidor. Este problema se supera introduciendo en el medidor un tercer electrodo y conectándolo a tierra

En cuanto a su construcción el cuerpo de los medidores electromagnéticos en línea consiste de un tubo hecho de un material no-magnético, en caso contrario este deberá tener un recubrimiento aislante. Este cuerpo contiene las bobinas de campo y los electrodos del tubo que deben ser compatibles con el fluido a medir, el tamaño de los electrodos varían de  $1/64$  -  $1/2$  pulg.

Todos estos elementos mencionados conforman el sensor, por lo que el diámetro de la tubería determina el diámetro del mismo.

Otro tipo de medidor electromagnético es el de inserción que puede cubrir una variedad muy amplia de tuberías y tiene un campo de medida de 100:1, este tipo de medidor solo puede ser operado mediante *dc*.

Estos medidores constan de un vástago que penetra en la tubería a  $\frac{1}{8} D$ , en una punta del vástago está montado el sensor que contiene las bobinas de campo y los electrodos; el otro extremo contiene el transmisor y/o indicador.

El tamaño de los electrodos se muestra en la siguiente tabla:

$\varnothing_{Tubería}$ (pulg.)	1/2 - 5	4 - 60	42 - 120	100 - 200	180 - 320
$\varnothing_{Vástago}$ (pulg.)	1/16	2	3	4	5
$\varnothing_{Electrodo}$ (mm)	0.25	0.35	0.50	0.70	1.00

La salida de los medidores electromagnéticos de inserción también es lineal y proporcional al gasto del fluido, además debido a su configuración estos medidores facilitan la limpieza de los electrodos.

En general la característica de los sistemas de medición magnética es que consumen poca potencia y son menos sensibles al perfil de flujo que muchos otros medidores (especialmente si se usan electrodos de área más grande). Además la medición es independiente de la viscosidad del fluido y de  $R_e$ .

Ambos tipos de medidores -en línea y de inserción- pueden medir caudales en ambos sentidos: mediante un interruptor que invierte las conexiones de la señal o recorriendo el cero del instrumento al 50% de la escala. También se han introducido diseños con 4 electrodos para mejorar la exactitud del medidor.

Resistencia	ELECTRODO							
	Standard		Opcional				Especial	
	Inox. 316	Hastelloy B & C	Haynes Alloy 25	Platino	Tantalio	Titanio	Monel	Carpenter 20
Corrosión	B	B	X	A	B	B	B	C
Abrasión	X	X	A	C	X	B	X	A
A.- Excelente		B.- Bueno		C.- Regular		X.- No Recomendable.		

En la ilustración anterior se indican los materiales más empleados en los electrodos mientras que en la **tabla 1.2.9.a** figuran las características de varios tipos de revestimientos (para mayor detalles ver **Anexo 2**).

REVESTIMIENTO	RESISTENCIA			PRESION		TEMP.MAX.	
	Abrasión Media	Abrasión Severa	Corrosión	Bar	PSI	°C	°F
<b>Teflón</b> <i>Usos:</i> Acidos, bases, jarabes, licores y cerveza. <i>Características:</i> Muy caro.	B	C	A	210	2,045	300	572
<b>Poliuretano</b> <i>Usos:</i> Fangos y aguas negras. <i>Características:</i> Muy barato pero quebradizo.	A	A	X	210	2,045	150	302
<b>Goma</b> <i>Usos:</i> Fangos medios y agua. <i>Características:</i> Barata y accesible para instalación.	A	B	X	210	2,045	180	356
<b>Neopreno</b> <i>Usos:</i> Agua natural, tratada, caliente y fría. <i>Características:</i> Barato.	A	B	X	210	2,045	170	338
<b>Vidrio</b> <i>Usos:</i> Acidos - excepto ácido fluorhídrico y fosfórico -, bases y productos alimenticios. <i>Características:</i> Vulnerable a vibraciones mecánicas y choques térmicos.	C	C	A	60	900	250	482
<b>Fibra de vidrio</b> <i>Usos:</i> Pasta de papel y aguas negras. <i>Características:</i> Barata y ligera pero quebradiza si es mal instalada.	X	C	A	150	2,175	460	860
<p style="text-align: center;"> <b>A.- Excelente</b>                      <b>B.- Bueno</b>                      <b>C.- Regular</b>                      <b>X.- No Recomendable</b> </p>							

Tabla 1.2.9.a Resistencia a la abrasión y corrosión de varios revestimientos.

### 1.2.9.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

#### ❖ *Exactitud y precisión*

En los medidores electromagnéticos en línea es posible obtener una exactitud del  $\pm 0.25$  y una precisión del  $\pm 0.1$  %. En los medidores de inserción la exactitud es del orden de  $\pm 1$  % y la precisión de  $\pm 0.2$  %.

### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Los medidores electromagnéticos en línea son recomendables para rangos de 25 ml/min a 5, 100 m<sup>3</sup>/min y los diámetros abarcan desde 1/12 - 120" (2 mm - 3 m).

Los medidores electromagnéticos de inserción cubren gastos de 3.78 a 23, 000 m<sup>3</sup>/min, las tuberías que cubren van desde 2 a 320" (50 mm - 8 m) para medidores de inserción fija y de 4 a 280" (100 mm - 7 m) para medidores de inserción retráctil.

El campo de medición para ambos es del orden de 10:1 aunque puede ser extendido a 30:1.

En la **tabla 1.2.9.b** se observa la capacidad de estos medidores.

Diámetro		Rango de flujo		Diámetro		Rango de flujo	
		GPM				GPM	
mm.	pulg.	Mín.	Máx.	mm.	pulg.	Mín.	Máx.
2	1/12	0.006	0.50	450	18	757.36	25,242.50
4	5/32	0.060	1.99	500	20	935.01	31,164.02
8	5/16	0.240	7.98	600	24	1,346.38	44,880.95
15	1/2	0.840	28.05	700	28	1,832.58	61,084.66
25	1	2.340	77.91	750	30	2,103.75	70,123.46
32	1 1/4	3.830	127.66	800	32	2,393.61	79,788.36
40	1 1/2	5.980	199.47	900	36	3,029.41	100,978.84
50	2	9.350	311.67	1000	40	3,739.99	124,664.90
65	2 1/2	15.800	526.72	1050	42	4,123.32	137,442.68
80	3	23.940	797.88	1200	48	5,385.80	179,519.40
100	4	37.400	1,246.65	1350	54	6,816.14	227,204.59
125	5	58.440	1,947.93	1400	56	7,330.25	244,347.44
150	6	84.150	2,804.98	1500	60	8,414.90	280,498.24
200	8	149.600	4,986.77	1600	64	9,574.51	319,144.62
250	10	233.750	7,791.01	1700	66	10,808.64	360,286.60
300	12	336.600	11,220.02	1800	72	12,117.72	403,919.75
350	14	458.160	15,271.60	2000	78	14,959.88	498,664.02
400	16	598.410	19,946.65				

Tabla 1.2.9.b Capacidades típicas de medidores electromagnéticos en línea.

### ❖ *Instalación*

La orientación del medidor debe ser tal que los electrodos estén situados en un plano paralelo al piso.

Accesorios aguas arriba (codos, válvulas, compuertas, uniones "T", reducciones, expansiones) provocan la formación de filetes de caudal asimétrico y pueden disminuir la exactitud del medidor, por eso es recomendable asegurarse que la tubería sea recta al menos una distancia  $10D$  aguas arriba y  $3D$  aguas abajo.

Asimismo cuando el instrumento está colocado en la impulsión de una bomba se recomienda una separación de unos 8 diámetros de tubería.

Por otra parte las cargas inductivas fuertes (como un motor de 100 Hp) deben estar alejadas al menos 6 m del medidor.

Dependiendo de la naturaleza del fluido se deben evitar velocidades fuertes para prevenir la erosión de los electrodos o velocidades bajas para evitar la sedimentación en la parte inferior del tubo siendo necesario a veces instalar expansores o reductores según se requiera, por lo común se recomiendan las velocidades siguientes:

- a.- Líquidos que no contienen sólidos: 0.06-18 m/s (0.2-60 pies/s).
- b.- Líquidos conteniendo sólidos: 1.5 - 7.5 m/s (5-25 pies/s).
- c.- Líquidos conteniendo sólidos abrasivos: 1-2 m/s (3-6 pies/s).

Cuando el flujo es intermitente y la aplicación es para lodos, se debe escoger un medidor con un aditamento el cual inyecte chorros de agua del mismo proceso o agua limpia para limpiar el electrodo.

### ❖ *Operación*

Normalmente los medidores electromagnéticos no requieren ajustes ni calibraciones antes de la puesta en marcha pues esto se ha llevado a cabo en fábrica.

Una vez que el instrumento está instalado basta llenar completamente la tubería con líquido y conectar el instrumento a la corriente permitiendo unos 45 minutos para que el sistema se caliente y se estabilice.

Con el medidor lleno de líquido en reposo el índice del convertidor debe señalar cero, si no es así el medidor o el convertidor pueden requerir pequeños ajustes.

La medición no es afectada por cambios en la presión, la temperatura, la viscosidad o la densidad del fluido ni tampoco por variaciones en la conductividad del líquido si esta es uniforme en todo el fluido.

Sin embargo son sensibles a la entrada de gases en el fluido, si una gran cantidad de gas está presente en la medición el medidor dará una lectura por encima del nivel real, además el gas puede producir fallas en el medidor si se acumula en los electrodos.

El medidor puede funcionar inclinado u horizontal pero es preferible que opere en una tubería vertical pues con esto se logra que las partículas magnéticas estén en suspensión homogénea y la conductividad sea uniforme en la sección transversal de la tubería. De cualquier forma la tubería debe mantenerse llena de líquido durante la medición, de otra manera el medidor puede sufrir sobrecalentamiento.

Los medidores electromagnéticos en línea pueden cubrir temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $204^{\circ}\text{C}$  ( $-40$  a  $400^{\circ}\text{F}$ ) y presiones hasta de 3, 600 PSI (250 Bar); las velocidades alcanzadas varían de 0.012 - 18 m/s.

Para estos dispositivos se recomienda que el líquido tenga una conductividad mayor a  $5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque algunos medidores tienen sensores que admiten valores de  $0.008\ \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Los medidores electromagnéticos de inserción operan en temperaturas de  $-25$  a  $80^{\circ}\text{C}$  ( $-13$  a  $175^{\circ}\text{F}$ ) y presiones hasta de 600 PSI (42 Bar); las velocidades se encuentran en el rango de 0.002 - 12 m/s.

En estos medidores la conductividad del fluido debe superar  $1\ \mu\text{S}/\text{cm}$  aunque este valor puede extenderse a  $0.001\ \mu\text{S}/\text{cm}$ .

### ❖ *Mantenimiento y calibración*

Los medidores electromagnéticos se calibran en fábrica utilizando un sistema dinámico de pesada, la calibración en seco se realiza en medidores para tubos de gran tamaño.

La calibración del transmisor se debe hacer mensualmente mientras que la del convertidor se recomienda hacerla cada tres meses.

El fluido puede llevar sustancias (aditivos o sustancias grasas) que por su naturaleza química pueden recubrir el tubo, los electrodos o ambos; también esto pasa cuando el flujo es intermitente y están circulando revolturas.

En casos favorables la mayor parte de las sustancias depositadas tienen la misma conductividad que el fluido ya que permanecen en forma de pasta húmeda o estas se depositan concéntricamente y no aíslan eléctricamente el electrodo del fluido, por lo tanto no se producen errores importantes.

Sin embargo, en casos desfavorables donde dichas sustancias son aislantes bastará una película delgada para que se rompa el contacto entre el electrodo y el fluido ocasionando que el instrumento marque cero. En estas dos situaciones el medidor puede mostrar una lectura cualquiera.

Algunos de estos problemas se solucionan utilizando dispositivos limpiadores como son los siguientes:

- a) El dispositivo ultrasónico se basa en un generador ultrasónico que consiste de un cristal piezoeléctrico montado sobre el reverso de los electrodos. Este dispositivo hace vibrar los electrodos con ondas de alta frecuencia y baja amplitud que contrarrestan la tendencia de los electrodos a recubrirse.

- b) El sistema mecánico consiste en raspadores mecánicos accionados por un motor y que rozan continuamente con las superficies de los electrodos.
- c) En el arreglo térmico la calefacción exterior de los tubos puede efectuarse mediante resistencias alimentadas eléctricamente por una fuente externa o por las corrientes parásitas del mismo medidor y controladas por medio de un termostato. La calefacción que se consigue en el tubo impide el depósito de grasa o de sólidos en las paredes del tubo

En otros medidores los electrodos son intercambiables, lo que permite limpiar o sustituir los electrodos sin necesidad de desmontar el medidor de la tubería. Estos medidores son útiles cuando el depósito de grasa es muy pesado y no se pueden usar ninguno de los limpiadores anteriores.

#### ❖ *Aplicaciones*

Los medidores electromagnéticos han sido aplicados a una amplia variedad de procesos industriales como la industria química, farmacéutica, alimenticia, generación y distribución de energía, etc. y en ciclos de control donde la precisión y la estabilidad del flujo son importantes.

Son recomendables para líquidos sucios, grasosos, flujos con químicos polvorientos o granulares. Sin embargo no incluye líquidos con conductividad muy baja como el petróleo.

Como el tamaño de los imanes no se incrementa en proporción al diámetro del tubo, los medidores más grandes son más económicos.

Los medidores electromagnéticos son apropiados para flujos pulsantes y como el fluido no es obstruido por los elementos de medición su pérdida de carga es muy baja correspondiendo a la de una tubería del mismo diámetro y la misma longitud.



Aplicaciones más específicas se muestran a continuación en la **tabla 1.2.9.c**.

<i>Aguas</i>	: Crudas, en suspensiones, residuales.
<i>Productos lácteos</i>	: Leche, helados, yogurt, crema.
<i>Metales líquidos</i>	: Mercurio, sodio (instrumentación nuclear)
<i>Sustancias viscosas</i>	: Salsa de tomate, miel, aceite comestible, pinturas, brea.
<i>Sustancias agresivas</i>	: Ácidos fuertes, bases, corrosivos, abrasivos, electrolitos, jugo de limón, detergentes.
<i>Revolturas</i>	: Lodos, pulpas, fluidos conteniendo sólidos (incluso terrones)
<i>Líquidos diversos</i>	: Cerveza, bebidas ligeras, licores, café, jarabe de maíz,
<i>Líquidos costosos</i>	: Transferencia de custodia

**Tabla 1.2.9.c Capacidades típicas para medidores electromagnéticos en línea.**

### ***Ventajas:***

- *No obstruye el paso del flujo*
- *Ocasiona pérdidas de presión insignificantes.*
- *Se encuentra disponible para un rango de diámetros muy grande.*
- *Las variaciones en la densidad del fluido, viscosidad, presión y temperatura tienen un efecto mínimo sobre el desempeño del medidor.*
- *La presencia de flujo turbulento aguas arriba del medidor no afecta de manera significativa su funcionamiento.*
- *La salida del medidor es lineal.*
- *Puede realizar mediciones en forma bi-direccional.*

### ***Desventajas:***

- *Los líquidos a medir deben ser eléctricamente conductivos.*
- *Para tuberías muy pequeñas estos medidores se vuelven relativamente caros.*
- *Este tipo de medidor es sensible a la geometría y propiedades eléctricas de la tubería, también a las variaciones de corriente de alimentación.*
- *Generalmente estos medidores son pesados y voluminosos.*

## 1.2.10

## MEDIDOR DE VORTICE

Los medidores de vórtice han estado en uso durante 15 años, pero duró un largo tiempo antes de que fueran aceptados totalmente.

El escurrimiento con vórtice se le da al fenómeno natural que ocurre cuando un líquido fluye alrededor de un peñasco o un objeto no aerodinámico, la capa del fluido aproximándose al cuerpo solo puede seguir el contorno del obstáculo a velocidades muy bajas.

Para un número de Reynolds de aproximadamente 2000, la capa del fluido se separa del contorno del cuerpo y la fricción del flujo obliga a la capa del fluido a formar un vórtice. Este vórtice se engrandece, rompe y mueve aguas abajo (Figura 1.2.10.a).

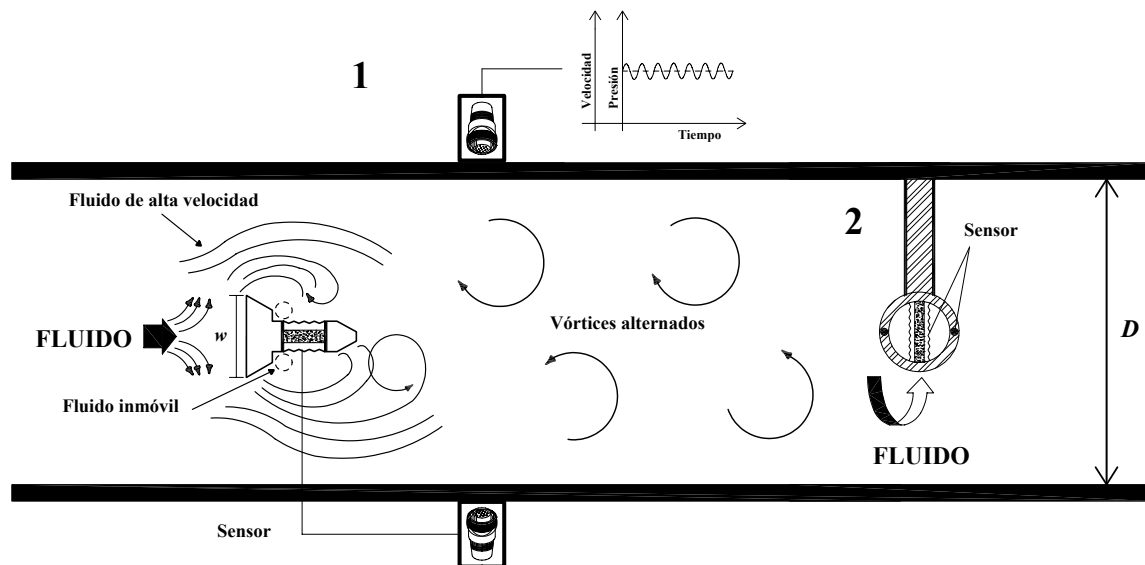


Figura 1.2.10.a Principio de funcionamiento de un medidor de vórtice (1) e ilustración de un medidor de vórtice de inserción (2).

Cuando un vórtice se desplaza a un lado del cuerpo generador la velocidad del fluido en ese lado se incrementa y la presión disminuye. En el lado opuesto la velocidad del flujo decrece y la presión se incrementa; este fenómeno se invierte en el siguiente vórtice.

La variación de la velocidad y la presión cambian a la misma frecuencia que lo hace el vórtice, esta frecuencia es proporcional a la velocidad de fluido.

Con un obstáculo simétrico, los vórtices se forman en cualquier lado formando una estela con un patrón alternado de forma estable. Un ejemplo típico de este fenómeno es el aleteo de una bandera cuando corre un viento fuerte.

Los primeros experimentos acerca del fenómeno de escurrimiento con vórtice fueron llevados a cabo por *Strouhal* quien formuló el número de Strouhal " $S_t$ ", el cual es la base para el diseño de medidores de flujo de vórtice.

$$S_t = \frac{f \cdot w}{v} \quad \text{donde: } \begin{array}{l} S_t = \text{número de Strouhal} \\ f = \text{frecuencia del vórtice} \\ w = \text{anchura del cuerpo} \\ v = \text{velocidad del fluido} \end{array}$$

El medidor de flujo de vórtice se basa en el hecho de que el número de Strouhal es relativamente constante para  $R_e$  muy grandes.

Por ejemplo, para un cuerpo esférico el número de Strouhal toma valores de  $0.20 \leq S_t \leq 0.21$  para  $300 < R_e < 150,000$  quedando la ecuación anterior como  $f = v/5w$ , por lo tanto la frecuencia del vórtice ( $f$ ) es una función de la velocidad del fluido ( $v$ ).

Las siguientes ecuaciones arrojan el gasto del medidor; la primera lo relaciona con  $v$  y la segunda con un tren de pulsos digitales.

$$Q = \frac{0.78D^2 \cdot w \cdot f}{S_t} \qquad Q = \frac{f}{k}$$

$Q$ = gasto volumétrico $D$ = diámetro de la tubería $f$ = frecuencia del vórtice $w$ = anchura del cuerpo	$Q$ = gasto volumétrico $f$ = frecuencia $k$ = pulsos /unidad de volumen (factor $k$ )
---	---

Los métodos más comunes para detectar la secuencia de los vórtices son los siguientes:

- a) **Sensor Integrado:** El cuerpo generador contiene un sensor de doble cara en el centro, este detector es un cristal piezoeléctrico que se encuentran en el centro de una cápsula la cual está aislada del fluido y llena de líquido.  
En el primer vórtice se produce un cambio de presión que es transmitido por el líquido hacia el cristal produciendo este último una salida de voltaje. Posteriormente el vórtice del lado contrario ocasiona a través del mismo cristal un voltaje de polaridad opuesta  
De este modo se genera una salida de voltaje alterno con una frecuencia idéntica a la de los vórtices.
- b) **Cuerpo Dual:** En este método se dispone de un cuerpo generador para formar los vórtices y otro aguas abajo que contiene dos sensores en posición diametralmente opuesta.  
El sensor consiste de un diafragma el cual al recibir el impacto del vórtice se flexiona cambiando la capacitancia. Estos cambios son detectados y procesados como una señal de frecuencia o voltaje.
- c) **Sensor ultrasónico:** En este caso se envía desde un transmisor una ráfaga de ondas ultrasónicas pasando por los vórtices y llegando hasta un receptor, ambos están montados en el exterior de la tubería y diametralmente opuestos.  
El método consiste en medir la diferencia de fase de las señales producida por los vórtices, esta señal es proporcional a la velocidad del fluido.

Se tienen diversas figuras geométricas para producir los vórtices como lo muestra la ilustración siguiente:

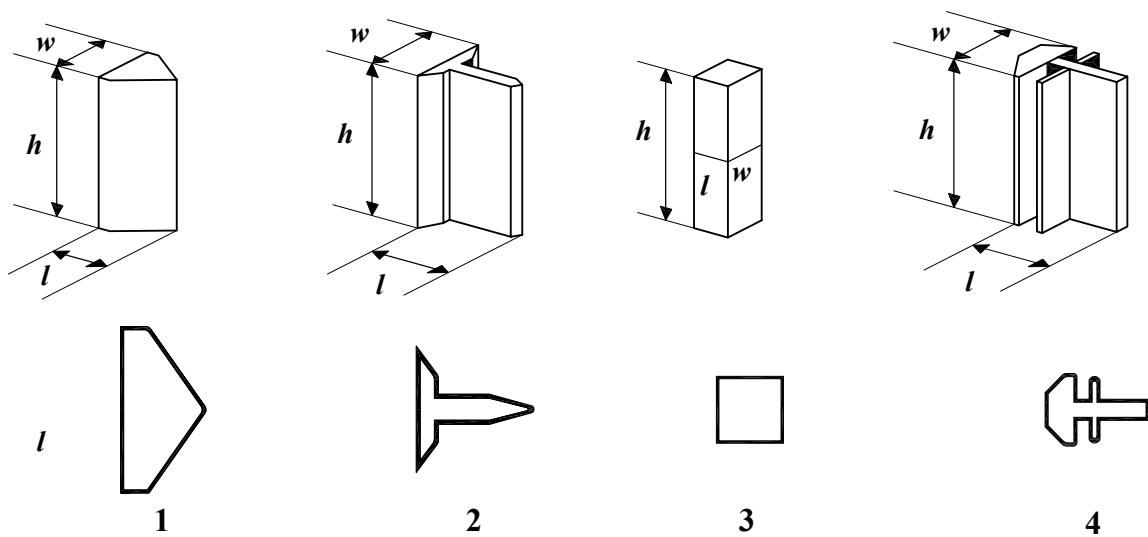


Figura 1.2.10.b Formas comunes para generar vórtices.

Las orillas afiladas de estos cuerpos dan un número de Strouhal consistente de  $0.88 \pm 0.01$  en un extenso rango de  $10,000 < Re < 1,000,000$ .

Los medidores de vórtice en línea se fabrican a partir de una sola pieza o por moldeo cuando la línea es menor a 1", esto incluye el tubo de medición, el vástago y el cuerpo generador. Para diámetros de 1 - 3" el tubo se fabrica por separado y se utiliza una conexión para incorporarlo al resto del medidor. En líneas más grandes el tubo permanece como en caso anterior, la única diferencia es que el cuerpo generador se suelda al vástago.

La posición del cuerpo generador para estos tipos de medidores es concéntrica en la mitad de la tubería. Por otra parte existen procesos especiales en los que se utilizan medidores en línea duales; en este caso dos medidores están soldados en una misma sección pero ambos son independientes de manera que cuando uno de ellos falla el otro entra en operación automáticamente.

La pérdida de presión máxima de los medidores de vórtice en línea es del orden de 20 PSI.

En los medidores de vórtice de inserción el tubo de medición y el cuerpo generador en conjunto se encuentran unidos a un vástago y son muy pequeños en comparación con la tubería de proceso.

La pérdida de presión de estos medidores tiene un valor máximo de 5 PSI.

La longitud de penetración de los medidores de inserción fija abarca de 0.4 hasta 0.5*D*, para los medidores de inserción retráctil el rango se amplía desde 0.15 hasta 0.5 *D*.

De la **figura 1.2.10.b** las dimensiones del elemento generador se recomiendan como sigue:

	En línea				Inserción		
	1	2	3	4	mín.	máx.	
<b>w*</b>	1/3	2/5	1/4	2/5	0.5	-	20 mm
<b>h*</b>	1	1	1	1	1.5	-	100 mm
<b>l*</b>	1/3	1/2	1/4	1/2	2.5	-	150 mm

\* Unidades expresadas en términos del diámetro *D*.

En general los medidores de vórtice permiten el intercambio del cuerpo generador y del sensor, también se diseñan de manera que el sensor sea inmune a la vibración. Los materiales del cuerpo pueden ser de vidrio, plásticos diversos, metales o aleaciones.

Estos medidores se caracterizan por una gran exactitud y un amplio campo de medida, además tienen la misma simplicidad en diseño e instalación que una placa orificio pues no tienen partes móviles por lo que pueden ser una alternativa a esta última. Adicionalmente, por sus rangos de medición y de presión también pueden sustituir a un medidor de turbina en línea del mismo tipo (*D* ≤ 12 pulg).

En los medidores de vórtice no se requieren cálculos de dispositivos primarios ni calibraciones mecánicas. Simplemente se instala el medidor según especificaciones del fabricante; se conecta a la unidad de lectura y control; posteriormente se energiza con la fuente de poder y la unidad está lista para la medición.

## 1.2.10.1 CARACTERISTICAS DEL MEDIDOR

### ❖ *Exactitud y precisión*

Los medidores de vórtice en línea alcanzan una exactitud de  $\pm 0.5\%$  y la precisión máxima es del orden de  $\pm 0.15\%$ . Para los medidores de vórtice de inserción la exactitud no sobrepasa el  $\pm 1\%$  y la precisión en su límite superior es del  $\pm 0.25\%$ .

### ❖ *Rango de medición y campo de medida*

Los medidores de vórtice en línea están disponibles para flujos desde 400 ml/min - 40, 000 lt/min, los de inserción de 750 ml/min - 7,000 m<sup>3</sup>/min. algunos valores se muestran en la **tabla 1.2.10.a**

El campo de medición típico para ambos tipos es de 20:1 aunque puede extenderse hasta 80:1

El rango de tubería que abarcan los medidores en línea va de  $1/8''$  -  $12''$  (3 mm - 30 cm). Los de inserción fija de  $1/2''$  -  $80''$  (12mm - 2 m) y los de inserción retráctil de 3 -  $80''$  (75 mm - 2 m)

Diámetro		Rango de flujo				Factor $k$		Frecuencia		$R_e$	
mm	pulg.	GPM		l/seg		(Pulsos/l)		Hz.			
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
12	1/2	0.13	25	0.008	1.575	2,500.000	2,600.000	16.00	4000	5,000	150,000
25	1	2.00	80	0.126	5.040	50.000	65.000	7.00	320	9,000	190,000
40	1-1/2	5.00	200	0.315	12.600	12.000	15.000	4.00	190	15,000	300,000
50	2	8.00	300	0.504	18.900	7.000	7.500	3.50	140	24,000	300,000
80	3	18.00	750	1.134	47.250	2.000	2.100	2.30	100	38,000	380,000
100	4	25.00	1,400	1.575	88.200	1.300	0.950	2.00	85	50,000	750,000
150	6	70.00	3,000	4.410	189.000	0.250	0.295	1.10	56	76,000	1,100,000
200	8	150.00	5,000	9.450	315.000	0.105	0.140	1.00	44	100,000	1,500,000
250	10	250.00	7,500	15.750	472.500	0.060	0.070	0.95	33	130,000	1,900,000
300	12	400.00	11,000	25.200	693.000	0.035	0.040	0.90	28	160,000	2,300,000

Tabla 1.2.10.a Capacidades de gasto de algunos medidores de vórtice en línea.

## ❖ Instalación

Los medidores de vórtice requieren de un tramo de tubería recta aguas arriba, esta la longitud depende del accesorio (**tabla 1.2.10.b**), aguas abajo se recomienda una tubería recta de al menos  $5D$ .

Accesorio	Reducción $2D$ a $D$	Expansión $0.5D$ a $D$	"Tee" o codo a $90^\circ$	Dos codos a $90^\circ$ (radio $D$ ) mismo plano	Dos codos a $90^\circ$ (radio $D$ ) diferente plano	Válvula de control	Enderezador de flujo
Símbolo							
Distancia aguas arriba	$15D$	$25D$	$20D$	$25D$	$40D$	$50D$	$8D$
Distancia aguas abajo	$5D$	$5D$	$5D$	$5D$	$5D$	$5D$	$5D$

Tabla 1.2.10.b Distancias recomendadas para la instalación de un medidor de Vórtice.

A pesar de que las aplicaciones del medidor son en su mayoría para tubo cerrado también se puede utilizar para flujo libre tapando el cuerpo que provoca el vórtice, esto con el fin de que corrientes de aire puedan afectar los resultados.

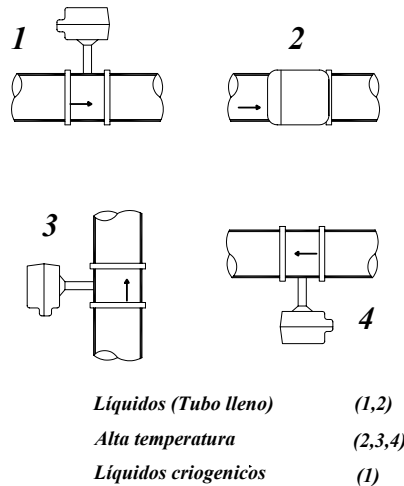


Figura 1.2.10.c Orientación de un medidor de vórtice.



La medición es ideal si el medidor se coloca en un tubo vertical con el líquido fluyendo hacia arriba, pero independientemente de la posición debe asegurarse que el tubo funcione lleno de líquido en todo momento (**Figura 1.2.10.c**).

#### ❖ *Operación*

Los medidores de vórtice en línea soportan temperaturas del fluido de -268 a 450°C (-450 a 850°F) y la presión máxima a la que puede operar es de 5,000 PSI (350 Bar).

Las velocidades de flujo soportadas están en el rango de 0.2 - 14 m/s y la viscosidad recomendada está por debajo de 300 cSt.

Los medidores de inserción por su parte admiten temperaturas para el fluido de -130 a 400°C y las presiones admisibles no sobrepasan 3,000 PSI (210 Bar). Las velocidades oscilan de 0.1 a 50 m/s y la viscosidad debe ser menor a 50 cSt.

Como estos medidores son dependientes del número de Reynolds no se recomiendan en fluidos muy lentos. Ambos tipos de medidores operan en  $3,000 < R_e < 7,000,000$ .

Para un óptimo funcionamiento del medidor el fluido debe ser relativamente limpio y no debe contener burbujas de aire.

#### ❖ *Mantenimiento y calibración*

Los estudios de calibración han mostrado que el aire y el agua tienen la misma constante de calibración, para este medidor en particular la constante es válida en un rango de  $10,000 < R_e < 5,000,000$ .

El transmisor se debe calibrar mensualmente y el medidor cada tres meses. En casos críticos la calibración puede ser determinada de la geometría del cuerpo generador pero con una exactitud limitada.

Generalmente estos medidores no requieren una rutina de mantenimiento y tampoco sufren descalibraciones siempre y cuando se usan en condiciones apropiadas.

### ❖ *Aplicaciones*

Los medidores de vórtice son recomendables para usos higiénicos y líquidos orgánicos de alta y baja viscosidad. También son usados como medida secundaria para calibrar otros medidores.

Vale la pena considerarlos para la medición de flujos de agua (ultra pura, potable, condensada, de enfriamiento, etc.), suspensiones, líquidos criogénicos, líquidos sanitarios, fluidos corrosivos (ácidos, solventes, etc.), combustibles, etc.

### *Ventajas:*

- *Maneja una amplísima variedad de fluidos.*
- *Buena velocidad en respuesta.*
- *Es muy pequeño y liviano.*
- *No tienen partes móviles.*

### *Desventajas:*

- *Son relativamente caros.*
- *No soportan grandes temperaturas.*
- *Provoca una pérdida de presión mediana.*
- *No recomendables para bajas velocidades.*

## 1.2.11

## MOLINETE

El molinete hidráulico es el medidor más usado para la determinación de la velocidad y la dirección del agua en las corrientes, ya sea en conductos abiertos (ríos o canales), pozos o estaciones de energía hidráulica. En este último caso se fijan varios contadores hidráulicos a una barra transversal situada en el conducto que lleva a la turbina.

El molinete *Price* es el más usado en los Estados Unidos (**figura 1.2.11.a**), consiste en un eje que gira llevando 6 copas cónicas, el agua al chocar sobre las copas ejerce una fuerza que le imprime un movimiento de rotación que aumenta proporcionalmente a la velocidad de la corriente.

Los contactos eléctricos accionados por las copas cierran un circuito a través de una batería produciéndose un "click" por cada vuelta (o cada cinco vueltas), este ruido es transmitido mediante un cable a los audífonos de un operador.

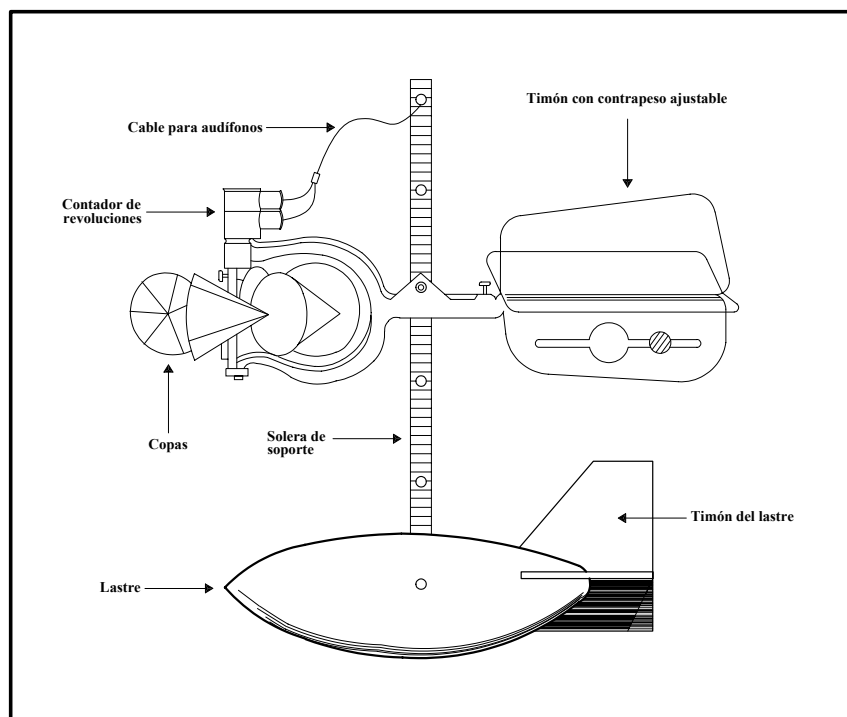


Figura 1.2.11.a Partes principales de un molinete.

Las copas adoptan la forma de cono invertido pues así impiden la entrada de agua cargada con sedimento y por lo tanto la abrasión. Además con este diseño las componentes de velocidad hacia arriba hacen girar las copas en la misma dirección que las corrientes aguas abajo.

Un molinete *Price* que se mueve verticalmente hacia arriba en agua estancada indicará una velocidad positiva, de aquí que éste tienda a sobreestimar la velocidad de la corriente. Si la sección de medición está bien seleccionada con las líneas de corriente casi paralelas al eje del canal y con un mínimo de turbulencia el error probablemente no será mayor del 2%.

La velocidad del agua está dada por una ecuación de la forma:

$$v = a + bN$$

$a$  = Velocidad necesaria para vencer la fricción mecánica

$b$  = Constante del medidor.

$N$  = Revoluciones por segundo del molinete

Se pueden esperar algunas diferencias en estas constantes como resultado de las posibles variaciones en la fabricación y el desgaste. Por consiguiente cada molinete debe ser calibrado individualmente montándolo en un vehículo que se mueva a velocidad constante a través de agua estancada.

El vehículo puede moverse en línea recta sobre unos rieles o puede rotar alrededor de un pivote central en un tanque circular.

La velocidad del vehículo se determina mediante el tiempo que se necesita para recorrer una distancia conocida. Con algunos recorridos del vehículo a diferentes velocidades es posible graficar una curva que muestre la relación entre los contactos del molinete por unidad de tiempo y la velocidad del agua.

### 1.2.11.1 PROCEDIMIENTO DE MEDICION

Una medición del caudal requiere la determinación de un número suficiente de velocidades puntuales para permitir calcular una velocidad promedio en la corriente. El área transversal multiplicada por la velocidad promedio dará el caudal total. El número de puntos en los cuales se debe medir la velocidad debe limitarse a aquellos que se puedan realizar dentro de un tiempo razonable, especialmente si el nivel está cambiando rápidamente, puesto que es deseable completar la medición con un cambio mínimo en el nivel.

El procedimiento en la práctica consiste en dividir la corriente en un número de secciones verticales (**figura 1.2.11.b**). Ninguna sección debe incluir más de aproximadamente el 10% de la descarga total; por lo tanto un número típico de secciones será de 20 a 30, dependiendo del ancho del río.

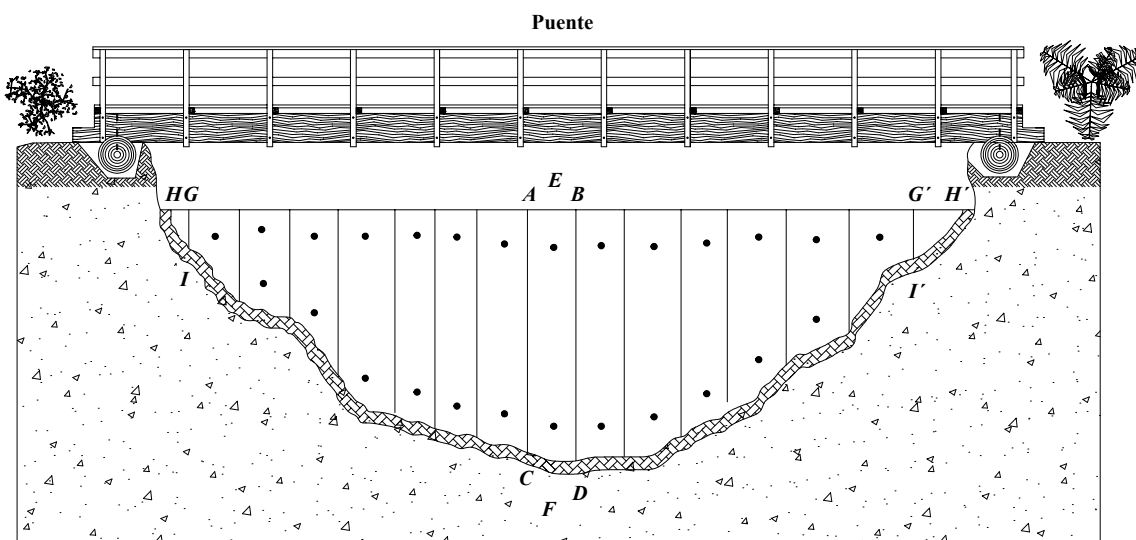


Figura 1.2.11.b Puntos de medición en un río con un molinete.

La determinación de la velocidad media en la vertical es como sigue:

- 1.- Se mide la profundidad total del agua mediante un sondeo con el cable.
- 2.- Se sumerge el molinete hasta 0.8 de la profundidad y se mide la velocidad accionando el cronómetro en un impulso del molinete y parándolo en otro impulso aproximadamente 45 segundos después. El número de impulsos contados (tomando el primero como cero) y el tiempo recorrido permite el cálculo de la velocidad a partir de la curva de calibración del molinete.
- 3.- Se sumerge el molinete a 0.2 de la profundidad y se repite el paso número 2.

En aguas poco profundas, cerca de la orilla, se puede utilizar la determinación de la velocidad en un punto único a 0.6 de la profundidad.

El cálculo del caudal total se hace de la siguiente manera:

- a.- Se calcula la velocidad promedio en cada vertical promediando las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad.
- b.- Se multiplica la velocidad promedio en la vertical por el área de la sección vertical que se extiende hasta la mitad del camino de los verticales adyacentes (*ABCD*, **figura 1.2.11.b**).  
Esta área se toma como la correspondiente a la profundidad medida en la vertical (*EF*) por el ancho de la sección (*AB*).
- c.- Se suman los incrementos de caudal de las diferentes verticales. La descarga incremental en las orillas (*GHI*, **figura 1.2.11.b**) se toma como cero.

### **1.2.11.2 TIPOS DE MEDICION**

*i*) En aguas poco profundas, el molinete se monta sobre una varilla y el observador orienta manualmente el molinete según la corriente. En ocasiones se utiliza un molinete *Price-pigmeo* para medir descargas en profundidades extremadamente pequeñas.

*ii*) Para mediciones en aguas profundas el molinete se suspende de un cable, el timón lo mantiene en dirección a la corriente y un lastre mantiene el cable en una posición casi vertical, el lastre pesa entre 7 y 200 Kg dependiendo las necesidades y las condiciones de medición.

- Cuando sea posible se utilizan puentes como sección de medición, siempre y cuando el puente esté localizado normalmente al eje de la corriente y ésta sea esencialmente paralela al eje del río. Se dispone de grúas especiales para sostener el molinete sobre el puente y así facilitar el manejo de los grandes lastres así como para medir la longitud del cable sumergido.
- Cuando no es posible el uso de un puente se puede utilizar una tarabita que es un tipo de teleférico primitivo de operación manual, a este dispositivo se le hace una perforación en el piso por el que el molinete baja a través de un cable especial.
- Cuando no se dispone de un puente o de una tarabita, las mediciones se pueden realizar a partir de un bote. Esto es mucho menos satisfactorio debido a la dificultad de mantener el bote en la misma posición durante la medición y debido a que el movimiento vertical u horizontal del bote produce una indicación de velocidad positiva en el molinete.

### 1.2.11.3

### CONSIDERACIONES

Si las velocidades son altas, el molinete y su peso no estarán suspendidos verticalmente por debajo del punto sino que serán arrastrados aguas abajo por la corriente (**figura 1.2.11.c**).

Bajo estas condiciones la longitud del cable desarrollada es mayor que la distancia vertical verdadera y el molinete estará más alto de lo indicado.

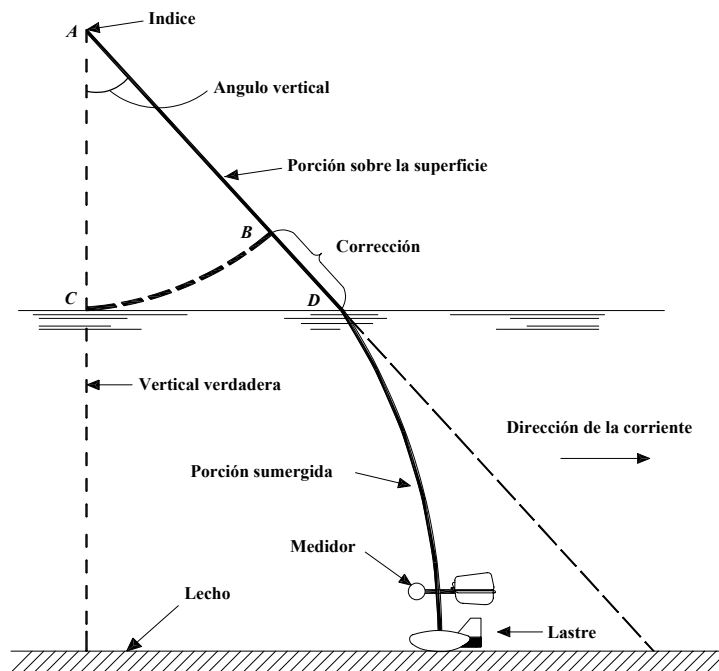


Figura 1.2.11.c Posición del cable de sondeo en agua a gran velocidad.

La corrección real depende de las longitudes relativas de la línea por encima y por debajo de la superficie del agua, por ejemplo un ángulo vertical de  $12^\circ$  producirá un error de aproximadamente un 2%. Habrá un error adicional si el molinete no está normal a la sección de medición.

La velocidad varía aproximadamente como una parábola (**figura 1.2.11.d**), desde cero en el fondo del canal hasta un máximo en la superficie del agua o cerca de ella. Con base en muchos ensayos de campo se ha encontrado que la variación en la mayoría de los canales es tal que la velocidad media a una distancia de 0.2 y 0.8 por debajo de la superficie del agua asemeja la velocidad media en la vertical.

Debe procurarse no hacer mediciones en corrientes con velocidades menores de 0.1 m/s, porque en estas condiciones disminuye considerablemente la precisión del aparato. Para medir velocidades mayores de 7.5 m/s resulta riesgoso emplear el molinete por el peligro de que algún cuerpo acarreado por la corriente pueda estropearlo.



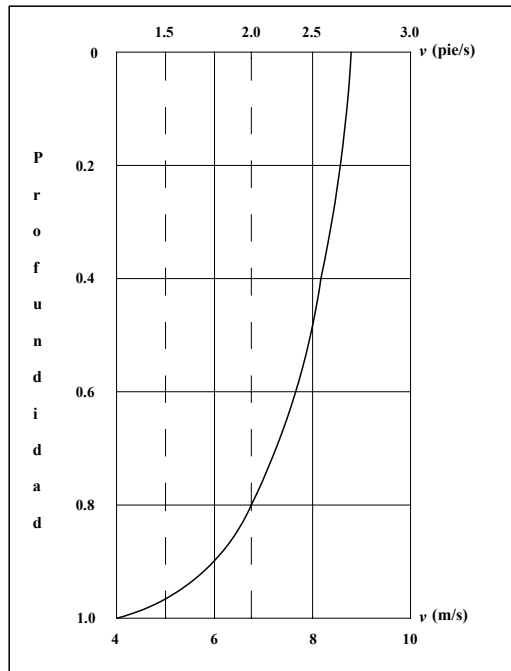


Figura 1.2.11.d Distribución de la velocidad en la vertical de una corriente.

El molinete tiene grandes ventajas en comparación con otros procedimientos entre las cuales pueden citarse: su relativo bajo costo; la posibilidad de utilizar un mismo aparato para medir varias corrientes; su tamaño, que lo hace fácilmente transportable y el hecho de no interferir de ninguna manera al escurrimiento libre del agua.

## 2

## SELECCION DEL MEDIDOR

Para calibrar el micromolinetete tenemos que satisfacer sus parámetros de operación los cuales se elegirán de los medidores descritos anteriormente.

Primeramente compararemos cualitativamente los parámetros de operación más importantes del instrumento a calibrar así como para los demás medidores. Estas características son condiciones necesarias pero no suficientes para inclinarse en definitiva por alguno de los medidores.

La temperatura y la presión son parámetros que no influyen en la elección pues el uso del micromolinetete es en agua a condiciones ambientales.

Instrumento		Exactitud	Precisión	Velocidad
<i>Molinetete</i>		$\pm 2.00\%$	$\pm 1.00\%$	<b>0.100 - 7.5 (m/s)</b>
Vertedor		$\pm 2.00\%$	$\pm 5.00\%$	- 0.09 (m/s)
Parshall		$\pm 3.00\%$	$\pm 5.00\%$	- - 0.09 (m/s)
Venturi		$\pm 1.00\%$	$\pm 1.00\%$	0.100 - 15.0 (m/s)
Tobera		$\pm 1.00\%$	$\pm 1.00\%$	0.150 - 30.0 (m/s)
Tubo Pitot		$\pm 2.00\%$	$\pm 0.10\%$	1.000 - 20.0 (m/s)
Orificio		$\pm 1.00\%$	$\pm 0.60\%$	0.030 - 10.0 (m/s)
Rotámetro	Tubo de Vidrio	$\pm 0.50\%$	$\pm 0.25\%$	0.050 - 2.5 (m/s)
	Tubo de Metal	$\pm 2.00\%$	$\pm 0.50\%$	0.200 - 5.0 (m/s)
Impacto	Línea	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.15\%$	0.070 - 15.5 (m/s)
	Inserción	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.15\%$	0.010 - 20.0 (m/s)
Turbina	Línea	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.05\%$	0.150 - 10.5 (m/s)
	Inserción	$\pm 1.00\%$	$\pm 0.25\%$	0.030 - 30.0 (m/s)
Sónico	Línea	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.20\%$	0.035 - 18.0 (m/s)
	Abrazadera (Transmisivo)	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.20\%$	0.000 - 32.0 (m/s)
	Abrazadera (Reflectivo)	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.50\%$	0.030 - 15.0 (m/s)
Magnético	Línea	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.10\%$	0.012 - 18.0 (m/s)
	Inserción	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.20\%$	0.002 - 12.0 (m/s)
Vórtice	Línea	$\pm 0.50\%$	$\pm 0.15\%$	0.200 - 14.0 (m/s)
	Inserción	$\pm 1.00\%$	$\pm 0.25\%$	0.100 - 50.0 (m/s)

**Tabla 2.a Parámetros cuantitativos para el micromolinetete y los medidores anteriormente estudiados.**

De la **tabla 2.a** podemos observar que la exactitud y la precisión de la mayoría de los instrumentos se encuentran dentro de los valores que se requieren para la calibración.

En lo concerniente a las velocidades se dividen las opciones, especialmente en los valores mínimos donde los valores de un número considerable de instrumentos están fuera de rango del instrumento a calibrar. Para las velocidades en el rango máximo sólo el rotámetro no cumple las exigencias de medición

Los medidores en canal abierto no cumplen ninguno de los parámetros antes mencionados.

Ahora haremos una comparación cualitativa de los diferentes medidores (**tabla 2.b**), estos datos nos dan características prácticas que complementarán con la tabla anterior el criterio para hacer la mejor elección del medidor.

INSTRUMENTO	Perdida de presión	Costo inicial	Promedio de vida (Años)	Facilidad de instalación	Tamaño	Portátil	Facilidad de cambiar la capacidad de medición	Líquidos limpios
<b>MOLINETE</b>	<b>*</b>	<b>B</b>	<b>5</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>*</b>	<b>A</b>
Vertedor	A	B	20	C	E	E	E	A
Parshall	A	B	40	C	E	E	E	A
Venturi	B	D	30	C	E	E	D	A
Tobera	D	C	20	C	D	E	C	A
Pitot	A	A	15	A	E	A	E	A
Orificio	D	A	10	B	B	E	B	A
Rotámetro	B	B	15	A	A	E	B	A
Impacto	C	D	15	B	B	A	B	A
Turbina	D	D	5	C	E	E	A	A
Sónico	A	D	15	B	A	A	A	A
Magnético	A	D	20	C	A	A	A	A
Vórtice	B	D	15	C	D	A	B	A
A.- EXCELENTE B.- BUENO			C.- REGULAR D.- POBRE			E.- MUY POBRE *.- NO APLICA		

**Tabla 2.b** Parámetros cualitativos para el micromolinete y los medidores anteriormente analizados.

De la tabla anterior nos damos cuenta que en lo que se refiere a la pérdida de presión es posible elegir cualquiera de los medidores pues este fenómeno no afecta nuestra elección ya que el flujo de salida de los mismos no se utiliza para ningún proceso.

El siguiente parámetro en la tabla es el precio y este factor puede ser determinante pues decide en gran parte la elección del medidor.

En cuanto al promedio de vida no hay problema con ninguno de los medidores pues su longevidad en el peor de los casos es igual al del instrumento a calibrar.

La facilidad de instalación del medidor, su tamaño y el hecho de que sea portátil o no lo sea, influye en poca medida en la elección del medidor pues la instalación del sistema de calibración estará en un lugar fijo con todas las comodidades de maniobra.

INSTRUMENTO	Exactitud	Precisión	Velocidad	Pérdida de presión	Costo inicial	Promedio de vida (Años)	Facilidad de instalación	Tamaño	Portátil	Facilidad de cambiar la capacidad de medición	Líquidos limpios
Vertedor	x	x	x	√	X	√	X	X	X	X	√
Parshall	x	x	x	√	X	√	X	X	X	X	√
Venturi	√	x	x	√	X	√	X	X	X	X	√
Tobera	√	x	x	√	X	√	X	X	X	X	√
Pitot	x	√	x	√	√	√	√	X	√	X	√
Orificio	√	√	√	√	√	√	√	X	X	√	√
Rotámetro	x	√	x	√	√	√	√	√	X	√	√
Impacto	√	√	√	√	X	√	√	X	√	√	√
Turbina	√	√	√	√	X	√	X	X	X	√	√
Sónico	√	√	√	√	X	√	√	√	√	√	√
Magnético	√	√	√	√	X	√	X	√	√	√	√
Vórtice	√	√	x	√	X	√	X	X	√	√	√
√ Seleccionable					X No Seleccionable						

**Tabla 2.c Comparativo entre el micromolinetete y los medidores descritos anteriormente .**

La **tabla 2.c.** nos muestra el resultado final para cada uno de los medidores, de aquí se elegirá el más factible para nuestro objetivo.

- a) Los medidores en canal abierto no es posible elegirlos pues no cumplen primeramente con las características cuantitativas, de hecho las únicas ventajas que tienen es que su pérdida de presión es pequeña y son longevos.
- b) El medidor Venturi y la tobera tienen las bondades de los medidores en canal abierto y además son exactos, pero por lo demás no satisfacen los requerimientos mínimos de precisión y velocidad, estos inconvenientes los descartan definitivamente de optar por ellos.
- c) El tubo Pitot sólo es preciso cuantitativamente y por eso no es seleccionable aunque cumple con los parámetros restantes excepto su tamaño.
- d) La placa orificio ofrece desventajas mínimas pues su tamaño puede ser considerable y no es portátil, pero cumple con el resto de las condiciones por lo que lo hace mayormente elegible.
- e) El rotámetro en su versión tubo de vidrio no satisface el rango máximo de velocidad y la versión de tubo de metal no le alcanza para cubrir la exactitud ni la velocidad en ambos topes, máximo ni mínimo. Por lo anterior no se prefiere para este propósito.
- f) El medidor de impacto aunque es algo voluminoso sería idóneo si su costo fuera menor, pero su precio puede variar de 3 a 5 veces el precio del medidor a calibrar, esto lo hace impráctico para nuestro objetivo.
- g) El medidor de turbina tiene el inconveniente de que su precio puede ser de 3 a 10 veces superior al del micromolinetete, aunado a esto no es pequeño ni ligero lo que hace difícil su instalación, en consecuencia no cumple los requisitos para nuestra meta

- h) El medidor ultrasónico al igual que el instrumento anterior puede variar su precio en las mismas proporciones y dicho sea de paso su configuración es complicada, esto lo descarta también de nuestro fin.
- i) El medidor electromagnético puede multiplicar el precio del instrumento a calibrar entre 3 y 15 veces además su instalación puede ser laboriosa pero el primer punto es lo que impide inclinarse por el.
- j) El medidor de vórtice es algo voluminoso y difícil de instalar, pero el obstáculo reside en el límite inferior de velocidades, además su precio oscila entre 2 y 8 veces al precio del micromolinete, por consiguiente se decide abstenerse de el.

Por lo anteriormente analizado la placa orificio es el medidor elegido para nuestro objetivo pues cumple primeramente con los parámetros cuantitativos que se necesitan.

Además tiene características adicionales que le favorecen sobre los demás instrumentos. Por ejemplo es un medidor muy fácil de construir y durante mucho tiempo ha sido estudiado por lo que se tienen varias fórmulas para calcular todos sus parámetros.

Su precio máximo que pudiera alcanzar sería el equivalente al del micromolinete y a pesar de que este instrumento puede ser algo voluminoso y por tanto no puede ser fácilmente transportable no necesariamente es difícil instalarlo.

Adicionalmente si se requiere cambiar los límites de medición para efectos de calibración no es difícil ni laborioso cambiar la placa orificio por otra de diferente tamaño.

### 3 SISTEMA PROPUESTO PARA LA CALIBRACION DEL MICROMOLINETE

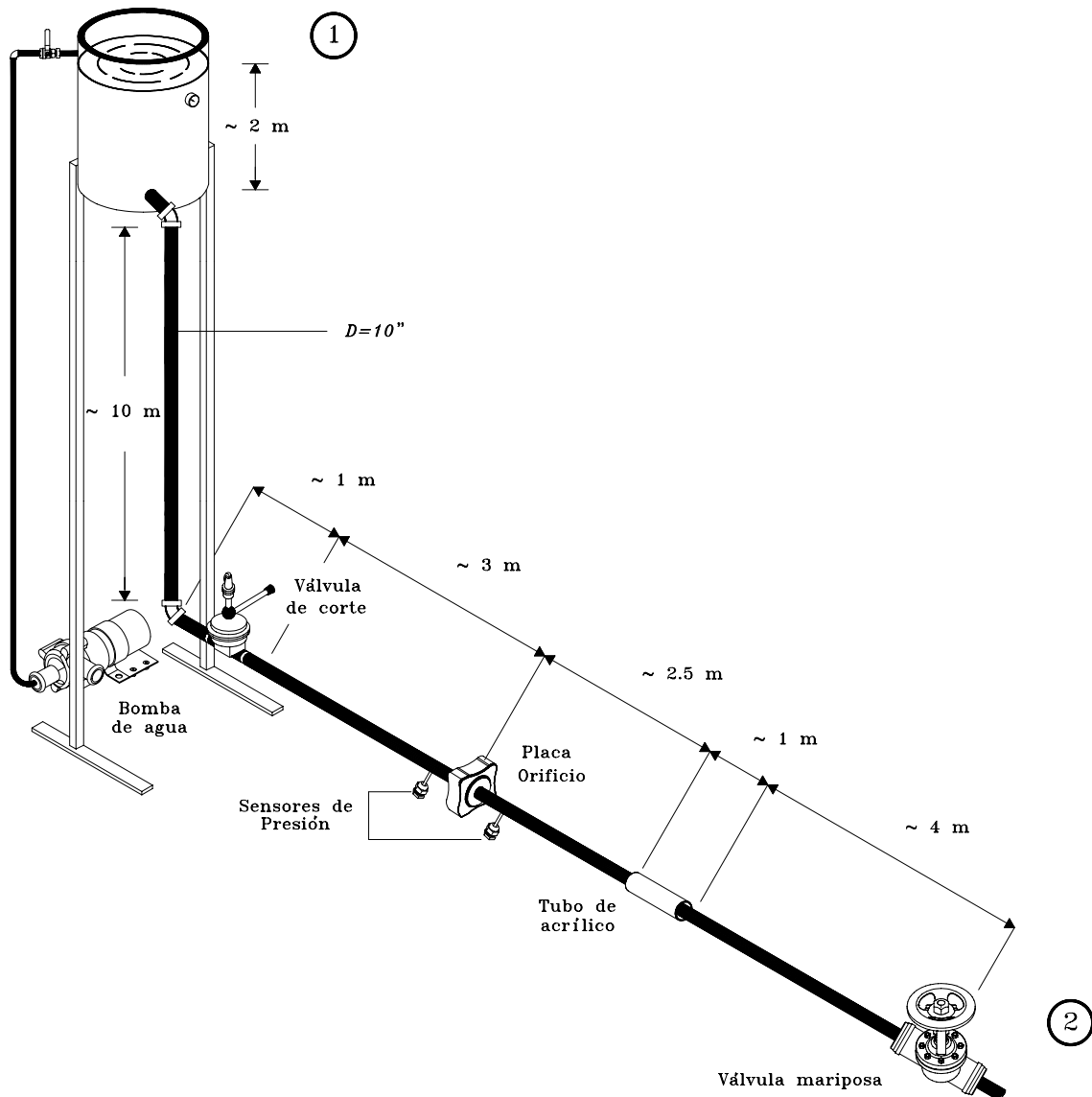


Figura 3.a Sistema propuesto para la medición de gasto.

Primeramente se sugiere un tanque de almacenamiento (figura 3.a) llenado por una bomba a nivel de piso. El tanque se encuentra a una altura de aproximadamente 10 m para provocar suficiente caída de presión en la placa orificio.

Enseguida se instala una válvula de corte a 1 m de la tubería con objeto de efectuar reparaciones aguas abajo en el resto de los accesorios o en su defecto efectuar alguna medición en este lugar.

Posteriormente a unos 3 m se observa la placa orificio y a sus lados los sensores de presión que nos indicarán la presión diferencial para efectuar los cálculos de gasto y velocidad.

Adelante a unos 2.5 m se inserta un tubo de acrílico, aquí se hace una instalación especial para colocar el micromolinete con sus aditamentos, el tubo es transparente con objeto de observar el comportamiento del instrumento y para visualizar el flujo de modo que el tubo permanezca lleno en todo momento. El diámetro de la tubería se elige de 10" porque el molinete ocupa esta área aproximadamente.

Finalmente a unos 4 m se observa una válvula mariposa que tiene como fin controlar la entrada del fluido al medidor, cada posición que gira el volante restringe un porcentaje de gasto de agua en la salida y por tanto variará la entrada de flujo al sistema, este porcentaje viene dado en las tablas del fabricante de la válvula.

A continuación se analizará teóricamente la operación del sistema.

De la ecuación de Bernoulli:  $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h$  ;  $h = h_l + h_f$

donde  $h$  representa las pérdidas por fricción.

$$h_l = k \cdot \frac{v^2}{2g \cdot D}$$

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g \cdot D}$$

$h_l$  = Pérdidas producidas por cada accesorio.

$h_f$  = Pérdidas producidas por la tubería.

$k$  = Coeficiente de fricción de cada accesorio.

$f$  = Factor de fricción de la tubería.

$L$  = Longitud de la tubería



En ambos casos:  $v$  = Velocidad del fluido en la tubería.  
 $g$  = Gravedad  
 $D$  = Diámetro de la tubería.

Un método práctico a efecto de estimar las pérdidas locales provocada por los accesorios consiste en expresarlas en forma de longitud equivalente ( $L_e$ ), es decir, valorar cuántos metros de tubería recta del mismo diámetro producen un pérdida de carga similar al que produce dicho accesorio.

Por tanto, igualando  $h_l$  y  $h_f$ :

$$k \cdot \frac{v^2}{2g \cdot D} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g \cdot D} \rightarrow L = L_e = \frac{k \cdot D}{f}$$

$$\therefore k = \frac{L_e \cdot f}{D}$$

Aplicando Bernoulli en los puntos 1 y 2:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h \rightarrow z_1 - z_2 = \frac{v_2^2}{2g} + \left( \sum k + f \frac{L}{D} \right) \frac{v_2^2}{2g}$$

En términos del gasto: 
$$z_1 - z_2 = \frac{Q^2}{A_2^2 2g} \left( 1 + \sum k + f \frac{L}{D} \right)$$

Por tanto:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2g(z_1 - z_2)}{\left( 1 + \sum (k + k_o) + f \frac{L}{D} \right)}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2g(z_1 - z_2)}{1 + \frac{f}{D}(L + L_e)}} \quad \text{-----} \quad (15.1)$$

Los valores de  $k$  para los accesorios de la figura 10.1 se muestran en el **Anexo 3** mientras que el coeficiente  $k$  para un orificio ( $k_o$ ) está dado por la siguiente expresión:

$$k_o = \frac{1 - \beta^2}{C_d \cdot \beta^4} \quad \beta = C_c = \text{relación de diámetros} = \frac{d}{D}$$

$$C_d = 0.61 \text{ para un orificio concéntrico}$$

El factor de fricción  $f$  se determina mediante la fórmula de *Chen* que es válida para toda la zona turbulenta:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) - \frac{5.0452}{R_e} \cdot \log \left[ \frac{1}{2.8257} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{R_e^{0.8981}} \right] \right\} \text{----- (15.2)}$$

Tubería o Revestimiento	Rugosidad Absoluta (mm)	Tubería o Revestimiento	Rugosidad Absoluta (mm)
Acero asfaltado	0.0050 - 0.0100	Fundición corriente Nueva	0.1500 - 0.2500
Acero laminado con incrustaciones	1.5000 - 3.0000	Fundición corriente Oxidada	1.0000 - 1.5000
Acero laminado nuevo	0.0250 - 0.0500	Latón, cobre, aluminio	0.0010 - 0.0020
Acero laminado oxidado	0.1500 - 0.2500	Cemento alisado	0.3000 - 0.8000
Acero soldado nuevo	0.0300 - 0.1000	Cemento bruto	0.5000 - 3.0000
Acero soldado oxidado	0.3000 - 0.4000	Hormigón	0.3000 - 3.0000
Acero comercial y soldado	0.0300 - 0.0900	PVC y plástico	0.0015 - 0.0070
Hierro galvanizado	0.0600 - 0.2400	Vidrio	0.0001 - 0.0005
Hierro forjado	0.0300 - 0.0900	Madera Lisa	0.1800 - 0.9000
Fundición asfaltada	0.0600 - 0.1800	Madera Natural	4.2000 - 5.0000

**Tabla 3.a** Rugosidad absoluta para diversos materiales.

Donde  $\varepsilon$  representa la rugosidad absoluta (**tabla 3.a**) de la tubería (m) y:

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$R_e$  = Número de Reynolds (adimensional)  
 $v$  = Velocidad del fluido en la tubería (m/s)  
 $D$  = Diámetro de la tubería (m)  
 $\nu$  = Viscosidad cinemática del líquido (m<sup>2</sup>/s)

Como se observa  $f$  depende del valor de  $R_e$  que a su vez depende del valor de  $v$  implícita en la ecuación 10.1 que se quiere resolver.

Se puede superar este problema haciendo iteraciones hasta converger en un valor de  $f$ .

Por lo tanto se parte del valor inicial de  $f$  de la **tabla 3.b** y se sustituye en la ecuación 15.1 para conseguir  $Q$ ; de aquí se obtiene la velocidad en la tubería y por consiguiente  $R_e$ , ahora sustituyendo este último valor de  $R_e$  en la ecuación 15.2 se logra una nueva estimación para  $f$ .

Repitiendo este procedimiento dos o tres veces se obtiene la convergencia de  $f$  de manera aceptable.

D (pulg)	1/2	3/4	1	1-1/4	1-1/2	2	2-1/2	3	4	6
$f$	0.0270	0.0255	0.0235	0.0220	0.0215	0.0190	0.0175	0.0180	0.0170	0.0150
D (pulg)	8	10	12	16	20	24	30	36	42	48
$f$	0.0140	0.0135	0.0130	0.0125	0.0120	0.0115	0.0105	0.0080	0.0065	0.0050

**Tabla 3.b** Factor de fricción para conductos de acero comercial nuevo y limpio.

Primeramente se tienen los siguientes datos:

$D = 0.254$ m	$\varepsilon = 0.06$ mm ( <b>Tabla 3.a</b> )	$\nu = 1 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s
$z = 10.000$ m	$f = 0.0135$ ( <b>Tabla 3.b</b> )	$L = 23.5$ m
$k = 2.521$ Entrada a tubería (0.315) + 2 Codos 90° Radio Corto (1.220)+ Válv. de compuerta (0.103) + Válv. de mariposa (0.590)+ Salida de tubería (0.293)		

Por ejemplo, para  $\beta = 0.30$  y cuando la válvula mariposa está totalmente abierta se obtienen los siguientes resultados:

Iteración	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$v$ (m/s)	$R_e$	$f$
1	0.06096	1.20312	3.06E+05	0.0168263
2	0.06092	1.20235	3.06E+05	0.0168273
3	0.06092	1.20235	3.05E+05	0.0168273

La tabla completa de gastos cuando la válvula mariposa está totalmente abierta queda de la siguiente forma:

$\beta$	$d$		$Q$ ( $m^3/s$ )	$v$ ( $m/s$ )	$R_e$	$f$
	pulg	m				
<b>0.30</b>	3.00	0.076	0.06090	1.20187	3.05E+05	0.0165444
<b>0.35</b>	3.50	0.089	0.08303	1.63856	4.16E+05	0.0160486
<b>0.40</b>	4.00	0.102	0.10802	2.13182	5.41E+05	0.0156981
<b>0.45</b>	4.50	0.114	0.13512	2.66657	6.77E+05	0.0154456
<b>0.50</b>	5.00	0.127	0.16323	3.22145	8.18E+05	0.0152616
<b>0.55</b>	5.50	0.140	0.19107	3.77087	9.58E+05	0.0151269
<b>0.60</b>	6.00	0.152	0.21734	4.28923	1.09E+06	0.0150283
<b>0.65</b>	6.50	0.165	0.24097	4.75558	1.21E+06	0.0149561
<b>0.70</b>	7.00	0.178	0.26131	5.15704	1.31E+06	0.0149035
<b>0.75</b>	7.50	0.191	0.27816	5.48950	1.39E+06	0.0148652
<b>0.80</b>	8.00	0.203	0.29166	5.75603	1.46E+06	0.0148374

**Tabla 3.c Gastos y velocidades para diferentes coeficientes de contracción ( $\beta$ ).**

Y se puede observar que la velocidad está dentro del rango de velocidades del micromolinete.

## CONCLUSIONES

De los análisis hechos a cada uno de los medidores podemos decir que la placa orificio fue la más favorable para lograr la calibración del micromolinete.

Son varias las razones, y una de ellas es por los parámetros de operación que encajan de manera muy aproximada a los del instrumento a calibrar. Además es un instrumento que ha sido ampliamente estudiado por lo que se tienen muchas fórmulas para su diseño e incluso variados programas de cómputo que agilizan sus cálculos.

El factor económico es también determinante a inclinarse por este medidor pues es muy económico y confiable dentro de las proporciones del objetivo.

El sistema propuesto es congruente con el objetivo planteado pues es sencillo de instalar y las dimensiones están de acuerdo al espacio permitido en las instalaciones donde se requiere hacer el trabajo. Además posee elementos que permiten la limpieza y reparación de los accesorios así como facilidad para interrumpir el proceso en cualquier momento

Del análisis hidráulico realizado se puede observar que los rangos de velocidad que arroja el sistema son muy cercanos a los rangos manejados por el micromolinte.

Por todo esto podemos decir que si es factible realizar la calibración del micromolinete con la placa orificio y por eso se ha elegido a tal medidor.

## ANEXO 1

La fórmula general del caudal que pasa a través de la placa-orificio, tobera o tubo Venturi es:

$$q_v = C \cdot E \cdot A \cdot \varepsilon \cdot D^2 \sqrt{2g(P_1 - P_2)\rho_o}$$

en la que:

$q_v$  = caudal volumétrico en m<sup>3</sup>/s

$C$  = coeficiente del medidor

$E$  = coeficiente de velocidad de acercamiento =  $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$$\beta = C_c = \text{relación de diámetros} = \frac{d}{D}$$

$d$  =  $\phi$  mínimo del orificio del elemento (mm).

$D$  =  $\phi$  interior de la tubería (mm).

$A$  = Area interior de la tubería

$P_1$  = presión estática absoluta en el ángulo muerto antes del elemento (Bares).

$P_2$  = presión estática absoluta en el ángulo muerto después del elemento (Bares).

$\rho_o$  = densidad del fluido en las condiciones  $P_o, T_o$  (kg/m<sup>3</sup>).

1.- El diámetro  $D$  de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_o \cdot [1 + H \cdot 10^{-5}(t - t_o)]$$

siendo:

$\rho_o$  = densidad del fluido en las condiciones  $P_o, T_o$  (kg/m<sup>3</sup>).

$D$  = diámetro a la temperatura de paso del fluido (mm).

$D_o$  = diámetro medido a temperatura ambiente (mm).

$H$  = coeficiente de dilatación de la tubería (**Tabla A1**) (mm/m).

$t-t_o$  = diferencia de temperaturas entre la que tiene el fluido y la ambiental en (°C).

Material de la tubería	0 y 100 °C	0 y 200 °C	0 y 300 °C	0 y 400 °C	0 y 500 °C	0 y 600 °C
Acero	1.17	1.22	1.28	1.33	1.38	1.43
Fundición	1.04	1.09	1.15	1.20	1.26	1.32
Bronce	1.75	1.79	1.83	1.88	1.92	-----
Acero inox. 18/8	1.60	1.65	1.71	1.76	1.80	1.84
Acero con 13% Cr.	1.05	1.10	1.13	1.17	1.2	1.22

### Dilatación media en mm/m.

2.- Se calcula un valor aproximado de  $\beta$  de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[ \frac{Q_m^2}{4.6 \cdot 10^{-10} \cdot D^4 \cdot (P_1 - P_2) \cdot \rho + Q_m^2} \right]^{1/4}$$

y se promedia con el valor  $\beta$  obtenida de la razón de diámetros.

3.- Número de Reynolds,  $R_e = \frac{1.2732 \cdot 10^6 \cdot Q_m}{\eta \cdot D}$

con  $Q_m$  = caudal de diseño en kg/s

$\eta$  = viscosidad cinemática o dinámica en centipoise.

4.- El valor de expansión  $\varepsilon$  se considera unitaria para los líquidos.

5.- Se calcula el coeficiente de descarga  $C$  según la fórmula dada en la norma ISO 5167:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left[ \frac{10^6}{Re} \right]^{0.75} + \left( \frac{2.286}{D} \right) \cdot \frac{\beta^4}{1-\beta^4} \left( \frac{0.85598}{D} \right) \cdot \beta^3$$

Si a la temperatura del fluido se tiene que  $D \leq 58.615$  mm, entonces el coeficiente 2.286 que afecta a  $\frac{\beta^4}{1-\beta^4}$  cambia a 0.039.

6.- El diámetro  $\phi$  del orificio a la temperatura de servicio es  $d = \beta \cdot D$

7.- El diámetro  $\phi$  del orificio a mecanizar es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H(t - t_0)}$$



## ANEXO 2

LIQUIDO	REVESTIMIENTO						ELECTRODOS							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Aceite	C	A	X	X	A	B	B	B	A	X	A	B	B	<p style="text-align: center;">RECUBRIMIENTO</p> <p>1.- Plástico rígido 2.- PTFE ( Politetrafluoroetileno) 3.- Poliuretano 4.- Neopreno 5.- Vidrio liso</p> <p style="text-align: center;">ELECTRODOS</p> <p>6.- Acero inoxidable 457 7.- Aleación C 8.- Aleación de moneda 9.- Tantalio 10.-Titanio 11.- Platino 12.- Aleación B 13.- Níquel</p>
Aceite De Limón	B	A	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	
Acetaldehído (10%)	C	A	X	X	A	A	A	---	---	---	---	X	A	
Acetato De Bario	C	A	X	X	A	X	X	X	A	---	A	X	C	
Acetato De Potasio	B	A	X	B	B	A	A	B	B	C	A	---	C	
Acetato De Sodio	B	A	X	C	A	B	B	B	A	A	A	B	B	
Acetato Plúmbico	B	A	---	C	A	B	B	B	A	B	X	C	B	
Acetona (5%H2o)	B	A	X	B	X	A	A	A	A	A	A	X	X	
Acido Acético (50%)	B	A	C	X	A	C	A	B	A	A	A	B	X	
Acido Acético (90%)	C	A	C	X	A	C	A	B	A	A	A	B	X	
Acido Amino salicílico	---	A	X	X	X	X	---	---	A	---	A	---	---	
Acido Bórico (50%)	A	A	A	A	B	A	A	---	A	A	A	A	B	
Acido Carbónico (60%)	C	A	B	B	X	A	A	A	A	A	A	A	A	
Acido Cítrico (20%)	A	A	C	A	A	A	A	B	A	A	A	A	B	
Acido Clorhídrico	A	A	---	C	B	X	B	A	C	C	A	X	X	
Acido Cloroacético	---	A	X	---	A	B	B	B	A	A	A	B	B	
Acido Crómico (50%)	X	A	X	C	A	X	B	---	A	A	A	---	---	
Acido Fluorhídrico	C	A	X	B	C	B	A	A	C	---	A	B	A	
Acido Fluoro silícico (25%)	X	A	X	C	X	X	B	B	X	X	A	C	C	
Acido Fórmico (80%)	X	A	X	B	A	C	---	X	A	X	A	X	X	
Acido Fosfórico	C	A	X	B	A	X	B	X	A	X	A	X	B	
Acido Fosfórico (85%)	C	A	X	B	A	---	---	A	A	X	A	B	X	
Acido Hidrobromico	C	A	X	---	A	X	X	---	A	A	X	---	---	
Acido Hidrocianidrico (10%)	C	A	X	B	C	B	A	A	---	---	A	A	A	
Acido Hidroclórico (38%)	X	A	X	X	X	X	X	X	A	X	A	X	X	
Acido Hidrofluorico (70%)	X	A	X	C	X	X	B	C	X	X	A	B	X	
Acido Hidrofluosilico	A	A	---	C	B	X	B	X	X	X	A	X	X	
Acido Hipocloroso	---	A	---	---	A	X	X	C	A	A	X	C	---	
Acido Nítrico (60%)	X	A	X	X	A	A	X	X	A	A	A	B	X	
Acido Perclórico	A	A	---	A	A	X	B	---	A	X	A	---	---	

A : Preferido, pequeño o no afecta. B : Bueno, generalmente satisfactorio para algunos usos. C : Regular. X : No recomendado. --- : Dato no disponible.

**TABLA A2.a- SELECCION DE REVESTIMIENTOS Y ELECTRODOS**

LIQUIDO	REVESTIMIENTO						ELECTRODOS							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Acido Salicilico	A	A	B	A	X	A	A	A	A	A	A	A	A	
Acido Sulfúrico (41 al 70%)	X	A	X	C	A	X	X	X	---	---	A	X	X	
Acido Sulfúrico (71 al 100%)	X	A	X	X	A	X	C	X	A	X	A	A	X	
Acido Sulfúrico (21 al 40%)	C	A	X	B	A	X	C	B	---	X	A	B	X	
Acido Sulfúrico ( 1 al 20%)	B	A	X	A	A	X	B	B	A	X	A	A	X	
Acido Tánico	C	A	A	B	C	A	---	A	A	A	A	---	A	
Acido Tartárico	A	A	A	A	C	A	A	A	A	B	A	A	X	
Acidos Grasos	X	A	X	C	B	A	A	B	---	A	A	A	B	RECUBRIMIENTO
Acrlonitrilo (40%)	X	A	X	X	X	A	A	A	A	A	A	B	B	
Agua Ácida De Manantial	C	A	X	B	X	X	A	---	---	A	---	---	---	1.- Plástico rígido
Agua De Mar	C	A	X	A	A	X	A	C	A	A	A	A	B	2.- PTFE ( Politetrafluoroetileno)
Agua Fresca	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	3.- Poliuretano
Agua Potable	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	4.- Neopreno
Agua Salada	C	A	X	A	X	A	A	A	---	A	A	A	A	5.- Vidrio liso
Aguas Residuales	X	A	X	X	C	B	---	A	A	---	A	---	A	
Alcohol Y Glicerina	C	A	X	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	ELECTRODOS
Almidón	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Alúmina	C	A	X	X	A	C	A	B	A	A	A	C	B	6.- Acero inoxidable 457
Anhidrido Acético	---	A	X	C	X	B	A	B	A	B	---	B	B	7.- Aleación C
Bicarbonato De Amonio	---	A	---	---	A	B	B	B	A	A	A	A	B	8.- Aleación de moneda
Bicarbonato De Potasio	---	A	---	---	A	B	B	A	A	---	A	A	B	9.- Tantalio
Bisulfato De Amonio	A	A	---	A	A	X	X	C	A	A	A	C	B	10.-Titanio
Bisulfato De Sodio (40%)	A	A	X	A	X	X	C	B	A	---	A	C	B	11.- Platino
Bisulfito De Calcio	B	A	A	B	A	B	B	A	A	A	A	A	A	12.- Aleación B
Bisulfito De Sodio	A	A	---	A	A	B	B	C	A	A	A	---	B	13.- Níquel
Bisulfuro De Carbón	X	A	X	X	A	---	---	---	A	A	A	---	---	
Borato De Sodio	C	A	---	B	A	B	A	B	A	A	A	B	B	
Bórax	A	A	A	B	A	B	A	B	A	A	A	A	B	
Bromuro De Sodio	---	A	---	---	A	X	B	X	A	A	A	X	X	
Café	A	A	C	B	X	A	A	A	A	A	A	A	A	
Carbonato De Amonio	B	A	---	A	A	B	B	B	A	A	A	B	B	
Carbonato De Bario	---	A	---	---	A	B	A	A	A	A	A	A	A	

A : Preferido, pequeño o no afecta. B : Bueno, generalmente satisfactorio para algunos usos. C : Regular. X : No recomendado. --- : Dato no disponible.

TABLA A2.a.- (CONTINUACION I)

LIQUIDO	REVESTIMIENTO						ELECTRODOS						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Carbonato De Calcio	---	A	---	---	A	B	B	A	A	A	A	A	A
Carbonato De Magnesio	---	A	---	---	A	B	B	B	A	A	A	B	B
Carbonato De Sodio (10%)	C	A	X	A	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Carbonato De Sodio (50%)	B	A	X	A	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Cerveza	X	A	C	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A
Cianuro De Cobre	A	A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	B	B
Cianuro De Sodio	X	A	---	B	A	X	A	B	A	A	A	B	B
Clorato De Sodio (20%)	A	A	X	A	X	B	B	A	A	A	---	B	A
Clorato De Calcio (60%)	---	A	C	A	A	B	B	---	B	B	A	---	A
Clorhidrato De Aluminio	---	A	---	---	A	X	B	X	A	X	A	X	---
Clorito De Sodio	C	A	---	---	A	X	B	X	A	---	B	C	---
Cloruro De Aluminio (20%)	A	A	X	B	X	X	A	A	A	X	A	B	X
Cloruro De Amonio (25%)	A	A	B	A	X	B	A	X	A	A	A	A	B
Cloruro De Bario	A	A	A	A	A	X	B	X	A	A	A	X	X
Cloruro De Calcio (50%)	A	A	B	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
Cloruro De Cobre (25%)	A	A	A	A	C	---	A	---	A	A	---	A	---
Cloruro De Litio	C	A	---	---	A	X	A	C	A	A	A	C	A
Cloruro De Magnesio	C	A	B	B	A	X	A	X	A	A	A	---	X
Cloruro De Manganeso	B	A	B	A	C	B	B	C	A	X	A	X	B
Cloruro De Mercurio	C	A	---	B	A	X	X	X	A	A	A	X	---
Cloruro De Níquel	B	A	---	B	A	X	B	A	A	A	A	C	A
Cloruro De Potasio (30%)	A	A	X	A	X	B	B	B	A	A	---	B	B
Cloruro De Sodio	B	A	B	B	A	X	A	---	A	A	A	---	---
Cloruro De Zinc	A	A	A	A	A	X	---	---	---	A	A	B	B
Cloruro Férrico (50%)	B	A	X	B	X	X	C	X	A	A	A	---	X
Cloruro Ferroso (10%)	A	A	X	A	C	X	B	X	---	A	---	B	X
Colorantes	X	A	X	X	B	A	A	A	A	A	A	A	A
Dextrosa	X	A	X	X	A	A	A	A	---	A	---	A	A
Dicromato De Potasio	B	A	B	A	A	B	B	B	A	A	A	X	B
Dióxido De Cloro (15%)	C	A	X	C	B	X	---	---	A	A	---	A	---
Dióxido De Titanio	X	A	A	X	B	A	A	A	A	A	A	A	A
Emulsión Fotográfica	B	A	X	B	A	A	C	A	C	B	A	X	X

RECUBRIMIENTO  
 1.- Plástico rígido  
 2.- PTFE ( Politetrafluoroetileno)  
 3.- Poliuretano  
 4.- Neopreno  
 5.- Vidrio liso  
 ELECTRODOS  
 6.- Acero inoxidable 457  
 7.- Aleación C  
 8.- Aleación de moneda  
 9.- Tantalio  
 10.-Titanio  
 11.- Platino  
 12.- Aleación B  
 13.- Níquel

A : Preferido, pequeño o no afecta. B : Bueno, generalmente satisfactorio para algunos usos. C : Regular. X : No recomendado. --- : Dato no disponible.

**TABLA A2.a.- (CONTINUACION II)**

LIQUIDO	REVESTIMIENTO						ELECTRODOS							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Fenol (80%)	X	A	X	X	X	B	A	---	---	---	A	---	B	<p>RECUBRIMIENTO</p> <p>1.- Plástico rígido 2.- PTFE ( Politetrafluoroetileno) 3.- Poliuretano 4.- Neopreno 5.- Vidrio liso</p> <p>ELECTRODOS</p> <p>6.- Acero inoxidable 457 7.- Aleación C 8.- Aleación de moneda 9.- Tantalio 10.-Titanio 11.- Platino 12.- Aleación B 13.- Níquel</p>
Ferrocianuro De Sodio	---	A	---	---	A	B	B	B	A	---	X	B	A	
Ferrocianuro De Sodio	---	A	---	---	A	B	B	B	A	---	X	A	B	
Fluoruro De Aluminio	C	A	---	B	B	X	X	X	A	A	A	---	X	
Fluoruro De Amonio	C	A	---	---	B	X	B	X	X	X	A	---	X	
Fluoruro De Cobre	---	A	---	---	B	X	X	X	X	---	A	X	---	
Fluoruro De Sodio	---	A	---	---	B	X	X	X	X	A	A	X	C	
Formaldehído	B	A	X	B	A	A	B	B	---	A	A	B	A	
Fosfato De Amonio	C	A	---	B	A	B	B	A	A	A	A	A	A	
Fosfato De Sodio	A	A	X	A	X	B	A	A	A	A	A	A	A	
Fosfato De Sodio (30%)	A	A	C	A	X	B	B	B	A	B	A	B	B	
Glicerina	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	
Hidróxido De Aluminio	---	A	---	---	A	B	B	A	B	A	A	A	B	
Hidróxido De Amonio	A	A	A	A	A	B	B	A	X	A	A	A	B	
Hidróxido De Bario (50%)	B	A	A	A	X	A	B	B	---	---	A	B	A	
Hidróxido De Calcio (50%)	A	A	A	A	X	B	A	---	A	A	---	---	---	
Hidróxido De Litio	C	A	C	X	C	X	B	---	A	A	---	B	B	
Hidróxido De Magnesio	C	A	B	A	A	A	B	C	X	A	A	C	B	
Hidróxido De Potasio (50%)	B	A	A	B	B	B	B	A	A	X	A	B	A	
Hidróxido De Sodio (50%)	X	A	C	X	X	B	---	A	X	B	A	---	A	
Hipoclorito De Calcio (20%)	B	A	X	B	A	B	B	X	A	A	A	X	B	
Hipoclorito De Potasio (40%)	X	A	X	X	C	X	B	---	---	A	---	B	---	
Hipoclorito De Sodio (20%)	X	A	X	X	X	X	A	---	A	A	A	A	X	
Impurezas De Carbón	X	B	A	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Jarabe De Glucosa	---	A	---	---	A	A	A	X	A	A	A	X	X	
Jarabe De Naranja	B	A	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Jugo De Azúcar	B	A	X	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Jugo De Caña De Azúcar	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Jugos De Frutas	A	A	C	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	
Látex	X	A	X	X	B	A	---	---	---	---	A	---	---	
Leche	B	A	B	B	A	A	A	A	---	---	A	A	---	
Licor Oscuro (Fuerte)	X	A	X	X	X	A	A	---	---	---	---	---	---	

A : Preferido, pequeño o no afecta. B : Bueno, generalmente satisfactorio para algunos usos. C : Regular. X : No recomendado. --- : Dato no disponible.

TABLA A2.a.- (CONTINUACION III)

LIQUIDO	REVESTIMIENTO						ELECTRODOS							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Licor Oscuro (Suave)	A	X	X	X	A	A	---	---	---	---	---	---	---	RECUBRIMIENTO 1.- Plástico rígido 2.- PTFE ( Politetrafluoroetileno) 3.- Poliuretano 4.- Neopreno 5.- Vidrio liso
Lodo Activo	A	A	B	B	C	A	A	A	A	A	A	A	A	
Lodo De Perforación	A	X	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Lodos De Desperdicio	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Lodos Rebajados	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Melasa	C	A	C	C	A	A	A	A	---	---	A	A	---	
Nitrato De Aluminio	B	A	---	A	A	B	B	A	A	A	A	A	A	
Nitrato De Amonio (50%)	A	A	B	A	X	A	B	X	A	X	A	B	---	
Nitrato De Bario	B	A	B	C	A	X	A	C	A	--	A	A	C	
Nitrato De Cadmio	C	B	A	C	A	C	A	C	A	A	A	C	A	
Nitrato De Calcio	A	A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	C	A	
Nitrato De Cobre	B	A	B	A	--	C	A	C	A	A	C	A	C	
Nitrato De Níquel	---	A	---	---	A	X	B	A	A	A	A	A	C	
Nitrato De Plata	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Nitrato De Plomo	C	A	---	B	A	X	B	C	A	A	C	A	C	
Nitrato Férrico	C	A	---	B	A	X	B	X	A	A	A	---	X	
Nitrato Ferroso	---	A	---	---	A	---	B	---	A	A	A	---	---	
Nitrito De Sodio	C	A	---	---	A	X	B	C	A	A	A	A	C	
Oxalato De Potasio	A	A	A	B	A	B	C	B	A	B	A	A	B	
Pasta De Arcilla	B	A	B	A	A	C	A	C	A	A	A	A	C	
Pasta De Bauxita	C	B	A	B	A	C	A	C	A	A	A	C	A	
Pasta De Cal	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	
Pasta De Carbón	C	B	A	A	A	C	A	C	A	A	A	C	C	
Pasta De Fosfato	---	A	---	---	A	C	A	C	A	A	A	C	C	
Permanganato De Potasio	---	A	---	---	A	B	B	B	A	A	A	B	A	
Peróxido De Hidrógeno (50%)	A	A	X	A	C	B	A	X	A	A	A	X	X	
Persulfato De Amonio	A	A	X	B	A	B	B	B	A	---	A	A	B	
Persulfato De Potasio	---	A	---	---	A	A	A	A	---	---	A	A	A	
Productos Lácteos	C	A	X	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Pulpa De Papel	X	A	---	X	A	A	A	A	A	A	A	---	C	
Queso Derretido	C	A	X	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Solución De Jabón	A	A	B	A	A	A	A	X	---	---	A	A	A	

A : Preferido, pequeño o no afecta. B : Bueno, generalmente satisfactorio para algunos usos. C : Regular. X : No recomendado. --- : Dato no disponible.

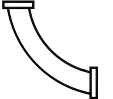
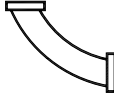





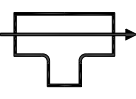
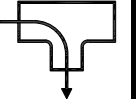
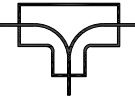
**TABLA A2.a.- (CONTINUACION IV)**

LIQUIDO	REVESTIMIENTO						ELECTRODOS							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Sosa Cáustica (50%)	X	A	C	X	X	B	---	A	X	B	A	---	---	RECUBRIMIENTO 1.- Plástico rígido 2.- PTFE (Politetrafluoroetileno) 3.- Poliuretano 4.- Neopreno 5.- Vidrio liso  ELECTRODOS 6.- Acero inoxidable 457 7.- Aleación C 8.- Aleación de moneda 10.-Titanio 13.- Níquel
Sulfato De Aluminio (10%)	A	A	B	A	X	A	A	X	A	A	A	B	X	
Sulfato De Aluminio (Solución)	C	A	B	A	X	A	A	X	A	A	A	B	X	
Sulfato De Aluminio Potásico	A	A	X	A	X	X	B	---	A	---	A	B	X	
Sulfato De Amonio (Solución)	C	A	C	A	X	B	B	B	A	---	A	B	B	
Sulfato De Bario	B	A	A	B	A	X	B	B	A	B	A	C	B	
Sulfato De Calcio (20%)	A	A	X	A	B	A	---	---	A	A	A	---	---	
Sulfato De Cobre (25%)	---	A	A	A	---	B	A	X	A	B	A	---	X	
Sulfato De Cromo	X	A	X	X	A	B	B	X	A	---	A	X	---	
Sulfato De Litio	A	A	X	A	X	B	A	B	A	C	A	B	X	
Sulfato De Magnesio	B	A	---	A	A	B	A	B	A	B	A	A	B	
Sulfato De Níquel	B	A	A	A	A	B	B	B	A	B	A	B	B	
Sulfato De Potasio (10%)	A	A	X	A	X	A	A	A	A	A	A	A	B	
Sulfato De Zinc (30%)	A	A	X	A	A	B	B	A	A	A	A	B	C	
Sulfato Férrico	B	A	---	A	A	---	B	X	A	A	A	X	B	
Sulfato Ferroso (10%)	A	A	X	A	X	B	B	B	A	A	A	B	X	
Sulfito De Sodio	C	A	---	X	A	B	B	A	A	A	A	C	B	
Sulfuro De Bario	C	A	A	B	A	X	---	X	A	A	A	X	X	
Sulfuro De Potasio	C	A	B	A	X	A	A	X	A	A	C	B	X	
Sulfuro De Sodio	X	A	---	X	A	X	B	X	A	A	A	X	X	
Tetracloruro De Titanio	X	A	X	X	X	X	X	X	A	X	A	X	A	
Tiosulfato De Sodio	---	A	X	X	A	A	A	C	A	A	---	C	C	
Yoduro De Amonio	A	A	X	A	B	A	---	---	A	A	A	A	---	
Yoduro De Cadmio	---	A	A	A	---	B	A	X	A	B	A	---	X	
Yoduro De Litio	X	B	C	X	A	B	B	A	A	---	A	X	---	
Yoduro De Potasio	A	A	X	A	X	B	C	B	A	C	A	B	X	
Yoduro De Sodio	B	A	---	A	A	B	A	B	A	B	C	A	B	

A : Preferido, pequeño o no afecta. B : Bueno, generalmente satisfactorio para algunos usos. C : Regular. X : No recomendado. --- : Dato no disponible.

**TABLA A2.a.- (CONTINUACION V)**

### ANEXO 3

$\emptyset$		Codo 90° Radio Largo		Codo 90° Radio Medio		Codo 90° Radio Corto		Codo 45°		Curva Larga 90°		Curva Corta 90°		Curva 45°		Paso Directo		Salida Lateral		Salida Bilateral	
Pulg.	cm.																				
1/2	<b>1.27</b>	0.31	0.430	0.39	0.810	0.47	1.240	0.25	0.312	0.25	0.259	0.31	0.337	0.21	0.147	0.32	0.543	0.95	1.618	1.00	1.699
3/4	<b>1.91</b>	0.31	0.400	0.39	0.750	0.63	1.150	0.34	0.290	0.31	0.241	0.38	0.313	0.23	0.137	0.42	0.505	1.26	1.505	1.32	1.580
<b>1</b>	<b>2.54</b>	0.45	0.370	0.54	0.690	0.80	1.060	0.43	0.269	0.34	0.223	0.41	0.29	0.27	0.127	0.53	0.467	1.60	1.392	1.68	1.462
1 1/4	<b>3.18</b>	0.51	0.350	0.66	0.660	1.05	1.010	0.56	0.254	0.42	0.211	0.51	0.274	0.31	0.120	0.70	0.442	2.10	1.317	2.21	1.383
1 1/2	<b>3.81</b>	0.77	0.340	0.91	0.630	1.23	0.970	0.66	0.247	0.55	0.205	0.67	0.267	0.36	0.117	0.82	0.429	2.45	1.278	2.57	1.342
<b>2</b>	<b>5.08</b>	0.95	0.300	1.09	0.570	1.58	0.870	0.84	0.218	0.61	0.181	0.74	0.235	0.44	0.103	1.05	0.379	3.14	1.129	3.30	1.185
2 1/2	<b>6.35</b>	1.12	0.290	1.35	0.540	1.88	0.830	1.00	0.211	0.85	0.175	1.04	0.228	0.49	0.100	1.26	0.366	3.75	1.091	3.94	1.146
<b>3</b>	<b>7.62</b>	1.32	0.280	1.60	0.520	2.34	0.800	1.25	0.203	1.02	0.168	1.24	0.219	0.58	0.096	1.56	0.354	4.66	1.055	4.89	1.108
<b>4</b>	<b>10.16</b>	1.65	0.270	2.00	0.510	3.08	0.780	1.64	0.196	1.36	0.163	1.66	0.211	0.78	0.092	2.05	0.341	6.13	1.016	6.44	1.067
<b>5</b>	<b>12.70</b>	2.15	0.250	2.62	0.475	3.84	0.725	2.05	0.182	1.67	0.151	2.04	0.196	0.96	0.086	2.56	0.316	7.68	0.942	8.06	0.989
<b>6</b>	<b>15.24</b>	2.75	0.240	3.30	0.450	4.63	0.690	2.47	0.174	1.95	0.144	2.38	0.188	1.12	0.082	3.08	0.303	9.24	0.903	9.70	0.948
<b>8</b>	<b>20.32</b>	3.45	0.220	4.04	0.420	6.10	0.640	3.23	0.160	2.42	0.133	2.95	0.173	1.39	0.075	4.05	0.278	12.16	0.828	12.77	0.869
<b>10</b>	<b>25.40</b>	4.38	0.210	5.24	0.400	7.65	0.610	4.08	0.152	3.09	0.126	3.77	0.164	1.77	0.072	5.09	0.265	15.27	0.790	16.03	0.830
<b>12</b>	<b>30.48</b>	5.56	0.206	6.61	0.390	9.08	0.596	4.85	0.150	3.68	0.125	4.49	0.162	2.11	0.071	6.07	0.260	18.20	0.775	19.11	0.814
<b>14</b>	<b>35.56</b>	6.17	0.201	7.63	0.380	10.00	0.581	5.33	0.146	4.47	0.121	5.45	0.158	2.56	0.069	6.64	0.254	19.99	0.757	20.99	0.795
<b>16</b>	<b>40.64</b>	7.39	0.197	8.70	0.370	11.43	0.567	6.10	0.143	5.45	0.119	6.65	0.154	3.13	0.067	7.62	0.249	22.86	0.742	24.00	0.779
<b>18</b>	<b>45.72</b>	8.34	0.190	9.89	0.360	12.86	0.550	6.86	0.138	6.55	0.115	7.99	0.149	3.76	0.065	8.56	0.240	25.73	0.715	27.02	0.751
<b>20</b>	<b>50.80</b>	9.39	0.184	11.12	0.350	14.33	0.534	7.65	0.134	7.75	0.111	9.46	0.145	4.44	0.063	9.57	0.232	28.68	0.691	30.11	0.726
<b>24</b>	<b>60.96</b>	10.46	0.171	12.40	0.325	17.25	0.496	9.20	0.124	9.04	0.103	11.03	0.134	5.18	0.058	11.49	0.216	34.44	0.644	36.16	0.676
<b>30</b>	<b>76.20</b>	12.59	0.156	14.92	0.295	21.34	0.451	11.37	0.113	10.47	0.094	12.77	0.122	6.00	0.053	14.23	0.197	42.67	0.587	44.80	0.616
<b>36</b>	<b>91.44</b>	15.58	0.139	18.46	0.264	25.91	0.403	13.81	0.101	12.12	0.084	14.79	0.109	6.95	0.048	17.28	0.176	51.82	0.524	54.41	0.550
<b>42</b>	<b>106.68</b>	18.91	0.112	22.41	0.212	30.48	0.324	16.25	0.081	13.72	0.067	16.74	0.087	7.87	0.038	20.33	0.141	60.96	0.420	64.01	0.441
<b>48</b>	<b>121.92</b>	22.25	0.091	26.37	0.173	35.05	0.264	18.68	0.066	15.44	0.055	18.84	0.071	8.85	0.031	23.38	0.115	70.10	0.343	73.61	0.360

**TABLA A3.a Longitudes Equivalentes (*L*) (expresadas en metros de tubería rectilínea) y Factor “*K*” (adimensional).**

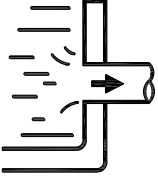

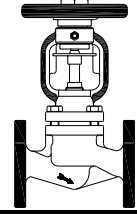
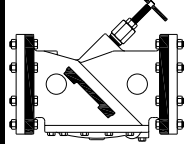
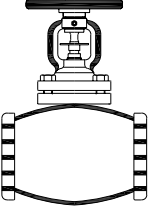
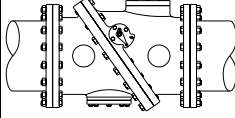
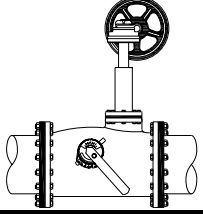
Ø		Entrada a Tubería		Salida a Tubería		Válvula de Compuerta		Válvula de Angulo		Válvula de Globo		Válvula de Retención		Válvula de Mariposa	
Pulg.	cm.														
1/2	1.27	0.42	0.647	0.39	0.602	0.12	0.220	5.36	9.20	2.37	4.05	1.58	2.70	1.47	0.991
3/4	1.91	0.52	0.602	0.48	0.560	0.17	0.196	7.10	8.50	3.14	3.75	2.09	2.50	1.55	0.975
1	2.54	0.66	0.558	0.61	0.519	0.21	0.176	9.05	7.80	3.99	3.45	2.66	2.30	1.79	0.968
1 1/4	3.18	0.95	0.527	0.88	0.490	0.28	0.176	11.92	7.50	5.27	3.30	3.51	2.20	2.00	0.940
1 1/2	3.81	1.12	0.513	1.04	0.477	0.33	0.147	13.90	7.10	6.13	3.15	4.08	2.10	2.12	0.913
2	5.08	1.57	0.452	1.46	0.420	0.42	0.147	17.86	6.50	7.86	2.85	5.24	1.90	2.36	0.860
2 1/2	6.35	1.94	0.438	1.80	0.407	0.50	0.137	21.34	6.10	9.42	2.70	6.28	1.82	2.82	0.812
3	7.62	2.23	0.421	2.07	0.392	0.62	0.137	26.49	6.00	11.70	2.60	7.77	1.77	3.51	0.790
4	10.16	3.19	0.407	2.97	0.379	0.82	0.137	34.75	5.80	15.33	2.55	10.24	1.70	4.60	0.770
5	12.70	4.22	0.378	3.92	0.352	1.02	0.127	43.59	5.40	19.23	2.34	12.83	1.60	5.76	0.704
6	15.24	5.30	0.361	4.93	0.336	1.23	0.118	52.43	5.10	23.10	2.25	15.39	1.50	6.92	0.682
8	20.32	6.39	0.332	5.94	0.309	1.62	0.108	68.88	4.80	30.42	2.10	10.15	1.40	9.11	0.630
10	25.40	7.58	0.315	7.05	0.293	2.04	0.103	86.56	4.60	38.10	2.02	12.74	1.36	8.90	0.590
12	30.48	9.22	0.311	8.57	0.289	2.43	0.098	103.02	4.35	45.42	1.95	15.15	1.30	10.61	0.550
14	35.56	11.15	0.303	10.37	0.282	2.67	0.096	113.39	4.28	49.99	1.90	16.67	1.27	11.67	0.521
16	40.64	13.21	0.297	12.29	0.276	3.05	0.094	129.54	4.15	57.30	1.86	19.05	1.23	9.54	0.412
18	45.72	15.46	0.286	14.38	0.266	5.15	0.092	145.69	4.10	64.01	1.80	21.43	1.20	10.73	0.315
20	50.80	17.77	0.278	16.53	0.259	3.81	0.090	162.46	4.04	71.63	1.74	23.90	1.17	11.95	0.240
24	60.96	20.31	0.257	18.89	0.239	4.60	0.089	195.38	3.97	86.26	1.68	28.74	1.13	14.36	0.184
30	76.20	23.07	0.234	21.46	0.218	5.70	0.087	204.83	3.74	87.78	1.55	78.55	1.04	19.21	0.145
36	91.44	26.04	0.210	24.22	0.195	6.92	0.085	256.03	3.52	109.73	1.43	127.50	0.96	27.44	0.115
42	106.68	29.79	0.168	27.70	0.156	8.14	0.083	307.24	3.31	131.67	1.32	189.73	0.88	38.51	0.091
48	121.92	33.92	0.137	31.55	0.127	9.36	0.082	358.44	3.12	153.62	1.22	265.45	0.82	52.47	0.072

TABLA A3.a (CONTINUACION I)



## BIBLIOGRAFIA

- **COLLET, C.V., HOPE, A.D.** Pág. 252-253.  
*Mediciones en Ingeniería*  
Gustavo Gili. S.A., México, 1976.
- **DOEBELIN, E.O.** Pág. 469-490.  
*Diseño y Aplicación de Sistemas de Medición*  
1a.Ed., New York  
Mc.Graw Hill, 1990
- **DOEBELLIN, E.O.** Pág. 527-596.  
*Measurement Systems- Application and Design*  
4th ed., New York  
Mc.Graw Hill, 1990.
- **GOLDSTEIN, R.J.** Pág. 260, 261.  
*Fluid Mechanics Measurement*  
New York  
Hemisphere Publishing Corporation, 1983
- **MORRIS, A.S.** Pág. 527-596.  
*Principles of Measurement and Instrumentation*  
United Kingdom  
Prentice Hall, 1988
- **CARROL, B.C.** Pág. 424-429.  
*Industrial Process Measuring Instruments*  
*International Student Ed.*, New York  
Mc.Graw Hill, 1962
- **FRIBANCE, A.E.** Pág. 311-317  
*Industrial Instrumentaion Fundamentals*  
New York  
Mc.Graw Hill, 1962
- **CONSIDINE, D.M** Pág. 264-265  
*Manual de Instrumentación Aplicada*  
3a.Ed., México  
Mc.Graw Hill, 1979

- **HOLMAN, J.P.,**  
*Experimental Methods for Engineers*  
New York  
Mc.Graw-Hill, 1988
- **CREUS, A.S.**  
*Instrumentación Industrial*  
5a.Ed. México  
Alfa Omega, 1995
- **CONSIDINE, D.M. and ROSS S.D.**  
*Handbook of Applied Instrumentation*  
New York  
Mc.Graw Hill, 1962
- **CONSIDINE, D.M.**  
*Encyclopedia of Instrumentation and Control*  
New York  
Mc.Graw Hill, 1991
- **TRUEBA, S.C.**  
*Hidráulica*  
21a.Ed., México  
CECSA, 1979
- **AZEVEDO, J.M. y ACOSTA, G.A**  
*Manual de Hidráulica*  
México  
Harla, 1976
- **DAVIS, C.A and SURENSEN, K.E**  
*Handbook of Applied Hidraulics*  
3rd.Ed., New York  
Mc.Graw Hill, 1969.
- **SKRENTNER, R.G.,**  
*Instrumentation- Handbook for Water and Wastewater Treatment Plants*  
New York  
Lewis Publishers, 1989

- **MILLER, R.W.**  
*Flow Measurement Engineering*  
 2nd Ed., New York  
 Mc.graw-Hill Publishing Company, 1989.
- **BENARD, C.J.,**  
*Handbook of Fluid Flowmetering*  
 1st Ed. New York  
 The Trade and Technical Press Limited, 1988
- **CONSIDINE, D.M.**  
*Process, Industrial Instruments and Controls Handbook*  
 4th Ed., New York  
 Mc.Graw Hill, 1993

### **Bibliografía Electrónica:**

<a href="http://www.danfoss.com/">www.danfoss.com/</a>	Medidores de flujo
<a href="http://www.endress.com">www.endress.com</a>	Medidores de flujo
<a href="http://www.rosemount.com">www.rosemount.com</a>	Medidores de flujo
<a href="http://www.solartron.com">www.solartron.com</a>	Medidores de flujo
<a href="http://www.eesiflo.com/index.html">www.eesiflo.com/index.html</a>	Medidores de canal abierto
<a href="http://www.emersonprocess.com/daniel">www.emersonprocess.com/daniel</a>	Medidores de presión diferencial
<a href="http://www.solartron.com">www.solartron.com</a>	Rotámetro
<a href="http://www.aaliant.com">www.aaliant.com</a>	Medidores de impacto
<a href="http://www.emcoflow.com">www.emcoflow.com</a>	Medidores de turbina
<a href="http://www.yokogawa.com">www.yokogawa.com</a>	Medidores ultrasónicos
<a href="http://www.krohne.com">www.krohne.com</a>	Medidores electromagnéticos
<a href="http://www.kobold.com">www.kobold.com</a>	Medidores de vórtice
<a href="http://www.rickly.com/cgi/current_meters.htm">www.rickly.com/cgi/current_meters.htm</a>	Molinete