

ESTADO DEL ARTE EN LA MEDICION DE MAGNITUDES HIDRAULICAS (I): Medición de caudales en conducciones cerradas, en diámetros pequeños y medianos

Andoni Larreategui Fadrique
Laboratorios LABEIN. Bilbao

*"Si te addiviene di trattare dell'acqua prima consulta la esperienza e poi la
raggione" (Leonardo da Vinci)*

RESUMEN: En este artículo y entregas sucesivas se pasa revista al estado actual de la tecnología y el conocimiento, en lo concerniente a mediciones hidráulicas. En este número la exposición se centra en los caudales, en tuberías de pequeño y mediano diámetro. Por su extensión este primer artículo se divide en dos partes:

En primer lugar se realiza una descripción básica de los principales equipos de medida disponibles en el mercado. Se incluye un listado de normas técnicas y legales y a continuación se analizan los criterios fundamentales de selección.

Por último, la exposición se centra en la calibración, el diseño de instalaciones de medida y aspectos relativos al mantenimiento.

INTRODUCCION

La medida de caudal en una sección de control dada, consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por dicha sección en la unidad de tiempo. Los equipos que realizan esta función se denominan genéricamente **caudalímetros**. Una modalidad particular utilizada para medir y documentar volúmenes, la constituyen los **contadores**.

El conocimiento de caudales y volúmenes circulantes es muy importante en toda transacción comercial (suministro de agua, gasolinas, productos químicos, gas...). No le van a la zaga aspectos como regulación en redes de abastecimiento, ensayos de rendimiento en turbinas hidráulicas, mediciones en laboratorio, documentación de caudales ecológicos, medición de cantidades de líquidos contaminantes, etc.

Desgraciadamente en la vida diaria nos encontramos con bastantes aplicaciones de caudalímetros incorrectamente implementados, mal elegidos o dimensionados y, aunque no siempre, a un precio injustificadamente elevado. La conclusión suele ser una incorrecta medición del caudal, que en los tiempos que corren es un lujo que no podemos permitirnos. El agua, líquido al que se ceñirá el artículo, es un fluido estratégico, con una importancia superior al petróleo. Sin agua no hay vida. Desde tiempos remotos ha sido origen de disputas y guerras. Como

anécdota se puede citar que en muchos "westerns" forma parte del guión de la película. Ahondando en a cuestión se deduce que para el agua existen dos precios: uno el correspondiente a la factura y otro el político y social. Incluso podríamos añadir el ecológico. Sin ningún baremo objetivo, pero analizando la actitud de la opinión pública se asume que estos dos últimos "precios" son muy superiores al que se abona en el recibo correspondiente.

Por simple filosofía deductiva se concluye que la correcta medición de algo valioso, raro u objeto de disputa es parte fundamental para evitar fraudes, derroches o nuevas disputas. Si se analiza el reciente caso del transvase de 55 Hm³ desde la Cuenca del Tajo a la Vega del Segura se observa que un error del 1% en esta medición supone 0,55 Hm³ (medición considerada como muy buena), un 2,5% equivale a 1,375 Hm³ (medición buena) y un 5% a 2,75 Hm³ (medición que puede ser la que suceda en la realidad). Esta última cifra cabe en un embalse como el de Linares (Huesca) que alimenta dos grupos Francis 18 MW cada uno y produce una energía anual de 140 GWh.

La Tecnología

En la medida del flujo se ha producido un avance importante en las últimas décadas. Algunas técnicas

antiguas han sobrevivido, otras se han mejorado, otras han caído en desuso y algunas todavía no han podido ser desarrolladas comercialmente. Fenómenos físicos descubiertos hace muchos años (el teorema de Coriolis, los vórtices de Von Karmann, la ley de Laplace), han sido utilizados como punto de partida para el diseño de nuevos caudalímetros. El desarrollo tecnológico en disciplinas como simulación numérica de flujos, óptica, acústica, electromagnetismo, electrónica y nuevos materiales ha mejorado sensiblemente la sensorica y electrónica de equipos que podemos considerar "clásicos", además de la aparición de los nuevos conceptos de instrumentos.

Los avances en la tecnología han supuesto una mejora en la exactitud, repetibilidad de las medidas y estabilidad a largo plazo. Sin embargo las cifras de precisión que se alcanzan son bastante modestas en comparación

con otras áreas de la metrología. Las dificultades inherentes a la medida de caudal pueden venir de:

- se trata de una magnitud derivada no fundamental.
- las mediciones se realizan en régimen dinámico.
- un gran número de factores influyen la calidad de las mediciones.

Factores de influencia

Son los siguientes:

- temperatura y presión.
- número de Reynolds.
- rugosidad en la tubería o paredes del canal, encastamientos.
- condiciones de instalación (tramos rectos y tipos singularidades).

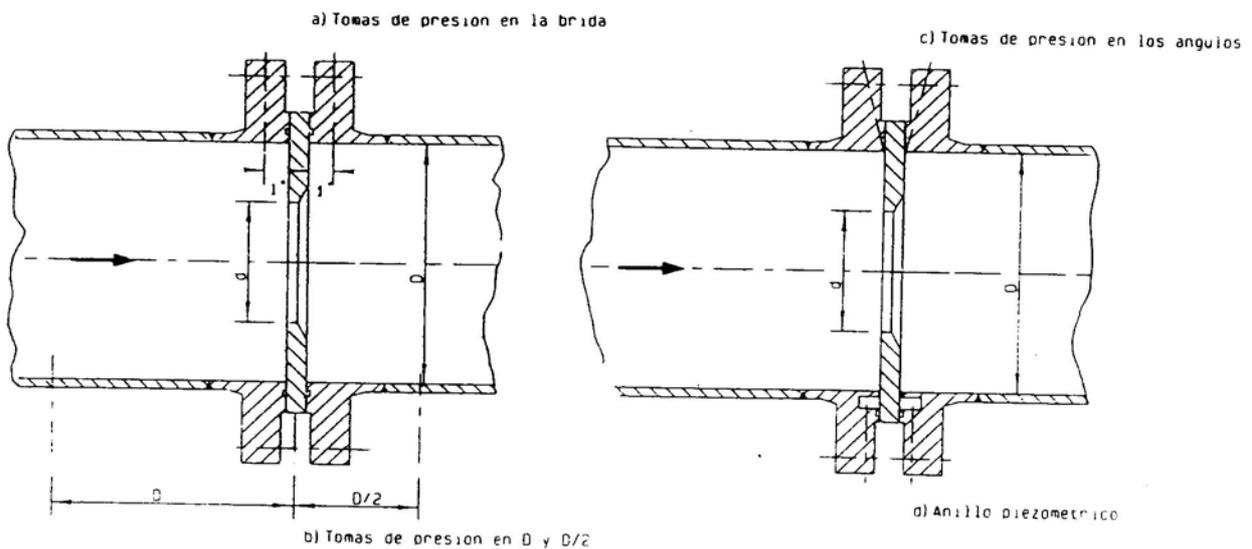


Figura 1. Diafragmas (placas de orificio)

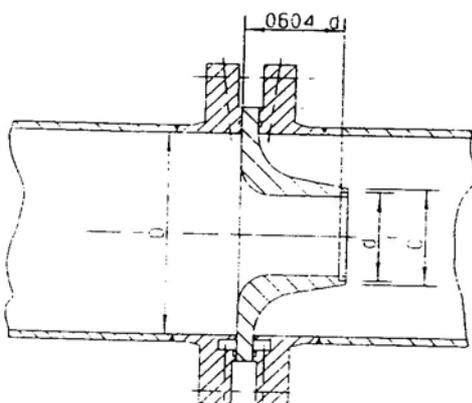


Figura 2. TOBERA ISA 1932

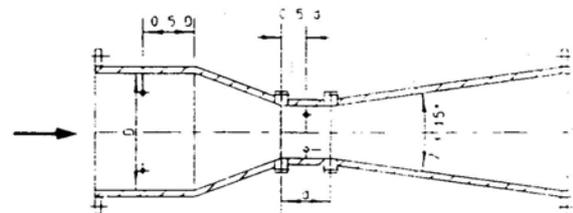


Figura 3. Tubo de venturi clásico

- presencia de burbujas de aire o de cavitación.
- envejecimiento de componentes mecánicos.
- presencia de pulsaciones y/o fluctuaciones de presión.
- presencia de vibraciones en la tubería.
- ausencia de calibración periódica.

Sobre estos factores se volverá más adelante.

El ciclo de la correcta medida de caudal

Garantizar la exactitud de las mediciones de un caudalímetro significa realizar bien las siguientes tareas:

- selección del principio de medida y tamaño adecuado.
- diseñar correctamente el tramo de conducción o canal en que va a ser alojado.
- calibrar el equipo en laboratorio. Para tamaños superiores a 1 m de diámetro (tuberías en carga) prever disposiciones especiales de ensayo previo de recepción.
- montar adecuadamente el caudalímetro y el equipamiento auxiliar.
- realizar un mantenimiento eficaz que incluya la recalibración periódica.

El desarrollo de estos puntos y algunos temas conexos focalizarán el contenido de este artículo.

CLASIFICACION Y PRINCIPIO DE MEDIDA

La clasificación que se realiza a continuación es un compromiso entre las propuestas por diversos autores (Spitzer 1991, Benard 1988, LABEIN 1993, Lefebvre 1986). Para cada grupo se adjunta una breve definición y algunos comentarios (ventajas, inconvenientes, incertidumbre,...). El lector que desee una profundización mayor puede consultar a Spitzer (1991), Benard (1988), LABEIN (1993), Lefebvre (1986) y Norma BS 7405/1991.

Deprimógenos clásicos

Nos referimos a los instrumentos que emplean en la medición de una presión diferencial: placas de orificio o diafragmas, toberas y venturis. Se basan en el respeto simultáneo de la ecuación de continuidad y del teorema de Bernoulli. Un estrechamiento más o menos brusco en la tubería y la medición de la presión diferencial en la entrada y la garganta (o una sección cercana a ella) permiten determinar el caudal a través de la bien conocida expresión:

$$Q = C_D E \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \left(\frac{2 \Delta P}{\rho w} \right)^{0.5} \quad [m^3 / s] \quad (II.1)$$

En esta expresión el coeficiente de caudal depende del número de Reynolds de la tubería, cuya expresión es:

$$R_{eD} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad [-] \quad (II.2)$$

Los tipos más comunes se refieren a tubería entre sección circular y garganta concéntrica sin orificio de purga o venteo. Existen variantes especiales, utilizadas en sectores como hidrocarburos o para medir vapor, de los siguientes tipos: placas de chaflán inverso, segmentales, con orificio de purga y venteo o excéntricas. Para estos casos se puede recurrir a la Norma BS 1042, Section 1.2 (1989).

Tipos más usuales y límites de aplicación: En la Tabla nº 1 se realiza un resumen de las variantes que se presentan, así como las limitaciones, en diámetros y números de Reynolds prescritas por la norma ISO 5167-1 (1991). También se incluye la precisión alcanzable sobre el coeficiente del caudal. Dicha norma describe en profundidad todos los detalles, constructivos, tolerancias, excentricidad, rugosidad, etc.

Ventajas:

- Gozan, quizás, del más extenso y detallado cuerpo normativo de todos los caudalímetros.
- Fáciles (relativamente) de diseñar, fabricar e instalar por medios propios.

Inconvenientes:

- Rango no muy elevado; típico 3 a 1. Puede aumentarse con el uso de dos transductores de presión y también por calibración (10 a 1).
- Se ven afectados por las singularidades aguas arriba, sobre todo a P grandes. A modo de ejemplo se incluyen las Tablas nº 2 y 3, procedentes de la Norma ISO 5167-1 (1991).
- Pérdida de carga permanente, apreciable.
- La erosión (en placas de orificio) y la variación de rugosidad modifican las prestaciones de estos caudalímetros.

Anotaciones:

- Es fundamental asociar al elemento primario un buen transductor de presión diferencial como instrumento secundario. Las conexiones se pueden realizar siguiendo la Norma ISO 2186 (1973).
- La utilización de rectificadores o enderezadores de flujo permite reducir a la mitad (generalmente) los tramos rectos citados en las Tablas nº 2 y 3 (de acuerdo con nuestra opinión). Este tema será tratado más en profundidad en capítulos siguientes.
- Conviene controlar la presión aguas abajo del caudalímetro para evitar la aparición de cavitación en la garganta u orificio.

Tamaños y rangos: Ver la Tabla nº 1 para tamaños normalizados. Diámetros mayores son tratados en el tercer artículo de la serie.

Precisión: Se consigna en la Tabla nº 1, la precisión típica, según la Norma ISO 5167-1 (1991), de los coeficientes de caudal. Esto supone respetar los tramos rectos aguas arriba/abajo citados en las Tablas nº 2 y 3. La precisión aumenta con la calibración.

- Variantes de los deprimógenos clásicos citados anteriormente: placas con orificio en media caña, con agujeros de purga y venteo, excéntricas, toberas y diámetros inferiores a 50 mm. Ver Norma BS 1042 (1989).
- Tubos de Dall ® (nota de marca registrada),

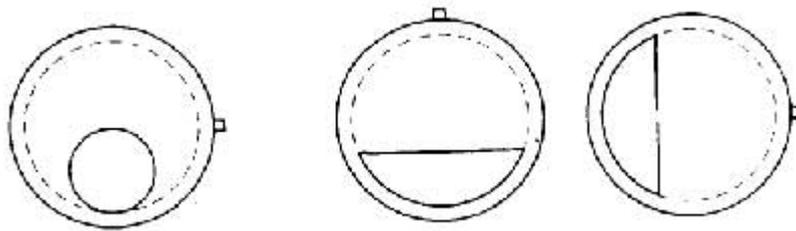


Figura 4. Placas de orificio, excéntricas y segmentales

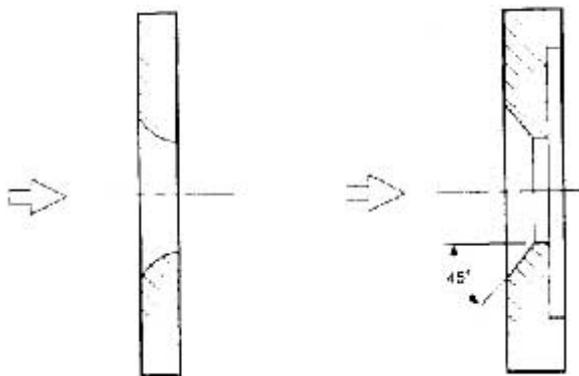


Figura 5. Placas de orificio para bajos números de Reynolds

El empleo de rectificadores de flujo para distancias más cortas que las citadas está muy recomendado (siempre que sea posible, desde el punto de vista pérdida de carga).

Para el cálculo global de la incertidumbre, se debe considerar la propia del transductor, etc. El cálculo de la incertidumbre para medida de caudal en un solo punto se puede realizar según la Norma ISO 5168 (1978). Los deprimógenos con β pequeño aumentan la sensibilidad, resolución y por tanto la precisión. En contrapartida también aumentan la pérdida de carga y el riesgo de cavitación.

Otros deprimógenos

Se trata, como en el caso anterior, de caudalímetros que se basan en la medida de una presión diferencial. Bajo este título tan genérico se engloba una enorme variedad de posibilidades. Los principales tipos son los siguientes:

- Gentile, tubos en V, Epiflo, Rotary Shunt ®.
- Diafragma con arena variable.
- Rotámetros ®.
- Tipos de inserción.
- Codos.
- Clapetas.

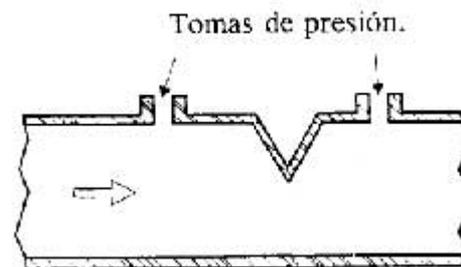


Figura 6. Caudalímetro en V

La mayoría de estos equipos están reducidos al empleo en diámetros pequeños o para fluidos diferentes al agua. El lector que desea profundizar puede recurrir a Spitzer (1991), Lefebvre (1986) y Norma BS 7405 (1991). El codo como equipo de medida se tratará en el tercer artículo de la serie. En este capítulo vamos a tratar los Rotámetros ® y los Tipos de Inserción.

Rotámetro ®

Rotámetro es el nombre de una marca registrada por ROTA, aunque es la denominación más empleada para un tipo de caudalímetro denominado genéricamente "flotador de sección variable". El principio consiste en conocer la posición de un flotador (metálico, en PVC,

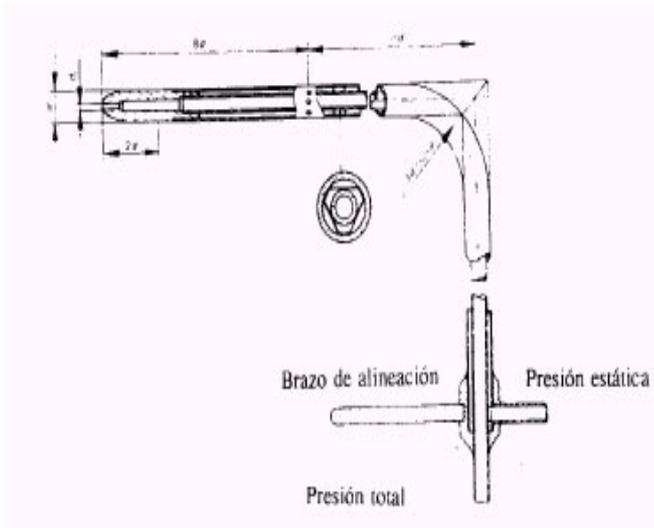


Figura 7. Tubo de Pitot

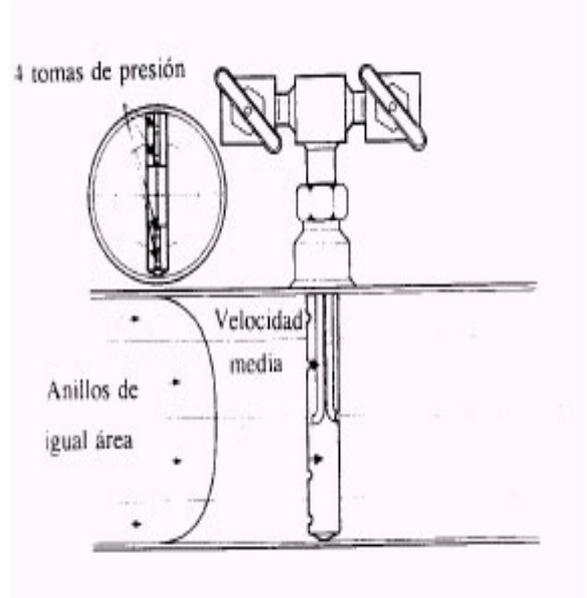


Figura 9. Principio de medida del Rotámetro®

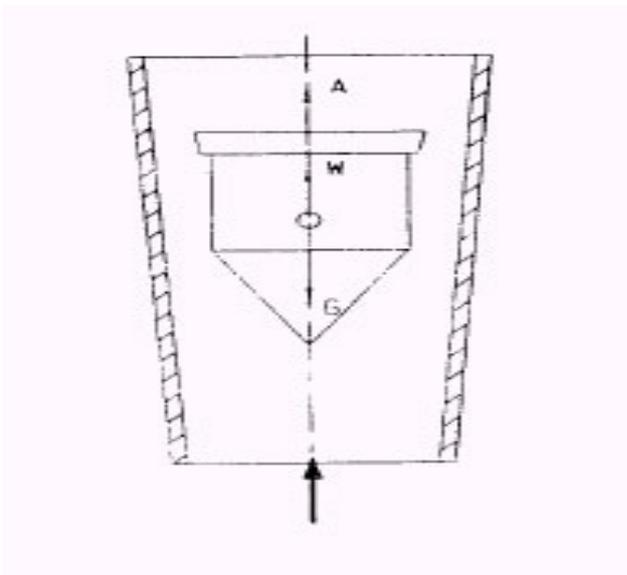


Figura 8. Sonda Annubar®

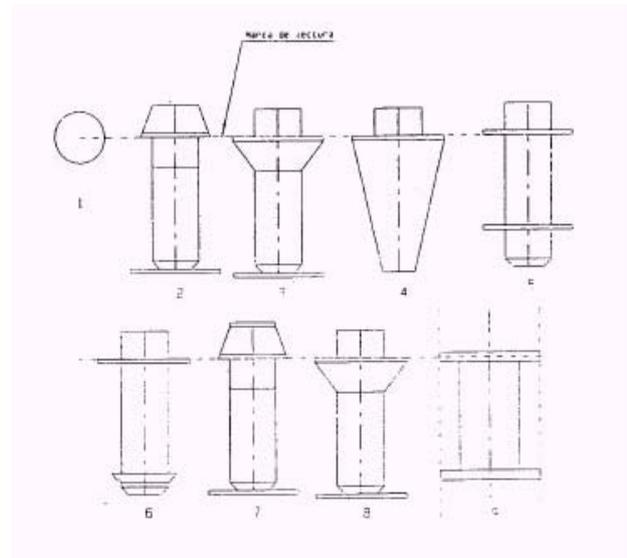


Figura 10. Tipos de flotador para Rotámetros®

teflón con lastre, etc) que busca el equilibrio de fuerzas debidas a su propia masa, el empuje de Arquímedes y el creado por la pérdida de carga originada. A cada caudal le corresponde una altura de flotador. Para más detalles consultar Spitzer (1991), LABEIN (1993) y Norma BS 7405 (1991).

Tipos más usuales y límites de aplicación: Existe una gran variedad de diseños y construcciones con tubos de vidrio o inoxidable, lectura directa o bien por detección magnética (en este caso puede haber salidas en 4-20 mA).

En general son instrumentos limitados a bajos caudales, montaje en posición vertical y en los casos en que no se requiere una gran precisión.

Ventajas:

- Teóricamente su principal atractivo radica en el precio que es bajo (en los modelos más sofisticados esto no es, en absoluto cierto).
- En general los tramos rectos necesarios son pequeños (2 a 3).
- Util (por su simplicidad) para el manejo por personal sin cualificación (salvo el mantenimiento).

Inconvenientes:

- Prestaciones pobres.
- Limitación en caudal.
- Montaje vertical.
- Limpieza y mantenimiento del flotador que requieren actuar delicadamente.

Tamaños y rangos:

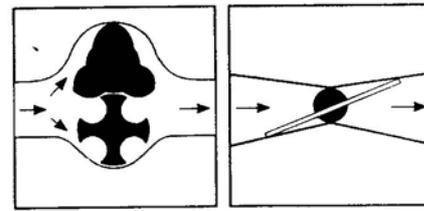
- Diámetros: desde 5 mm a 120 mm
- Caudales: desde ml/minuto hasta 40.000 l/h

Precisión:

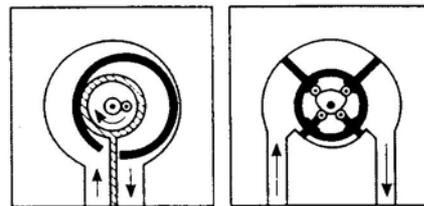
- Típica 2 a 3%
- Equipos especiales, y después de calibración: 0,5%

Tipos de inserción

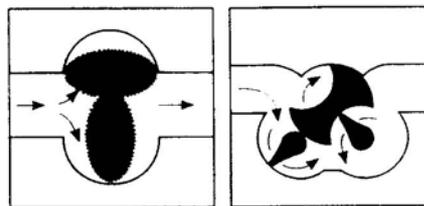
Nos referimos a los dos tipos por excelencia: el tubo de Pitot y los tubos de integración parcial (sondas tipo Annubar®, etc). En general se mide la velocidad de flujo en un punto (Pitot) o en un plano (Annubar®). El principio de medida se describe en Spitzer (1991), Lefebvre (1986) y Norma BS 7405 (1991). El tubo de Pitot está amparado por la norma ISO 3966 (1977). En general son equipos que se adaptan mejor para mediciones puntuales tipo ensayo, etc. Son también útiles para evaluar la forma de los perfiles de velocidades en una sección dada. No son recomendables para instalación en permanencia.



Birrotor Disco nutante



Pistón Paletas



Oval Trirrotor

Figura 11. Diversos tipos de caudalímetros de desplazamiento positivo

Tipos más usuales y límites de aplicación:

- Tubo de Pitot, tipos AMCA y CETIAT.
- Tubo de Pitot doble (sonda de 5 agujeros: velocidad tridimensional).
- Tubo de Darag, Beri, etc.
- Sondas Annubar®.
- Microventuris, sondas Preso.

Los límites de aplicación vienen dados por la aparición de vibraciones en el tubo o sonda, que a su vez es función del diámetro, longitud de inserción y velocidad del flujo.

Ventajas:

- Utilidad para conocer el perfil de velocidades.
- Bajos coste (con excepción de las sondas Annubar®).

TIPO DE DEPRIMOGENO	d min [mm]	D min [mm]	D max [mm]	β min [-]	β max [-]	$R_c D_{min}$ [-]	$R_c D_{max}$ [-]	Precisión [%]
<u>DIAFRAGMA</u>								
* Tomas en los ángulos								
+ 0,20 ≤ β ≤ 0,45	12,5	50	1000	0,20	0,45	5.10 ³	1.10 ⁸	0,6
+ 0,45 ≤ β ≤ 0,6	12,5	50	1000	0,45	0,60	1.10 ⁴	1.10 ⁸	0,6
+ 0,6 ≤ β ≤ 0,75	12,5	50	1000	0,60	0,75	1.10 ⁴	1.10 ⁸	β
* Tomas en la brida	12,5	50	1000	0,20	0,6	1260. β^2 .D	1.10 ⁸	0,6
* Tomas a D y D/2	12,5	50	1000	0,60	0,75	1260. β^2 .D	1.10 ⁸	β
	12,5	50	1000	0,20	0,6	1260. β^2 .D	1.10 ⁸	0,6
TOBERA	12,5	50	1000	0,60	0,75	1260. β^2 .D	1.10 ⁸	β
* ISA 1932								
+ 0,30 ≤ β ≤ 0,44	—	50	500	0,30	0,44	7.10 ⁴	1.10 ⁷	0,8
+ 0,44 ≤ β ≤ 0,60	—	50	500	0,44	0,60	2.10 ⁴	1.10 ⁷	0,8
+ 0,60 ≤ β ≤ 0,80	—	50	500	0,60	0,80	2.10 ⁴	1.10 ⁷	2. β -0,4
* Radio grande	—	50	630	0,2	0,80	1.10 ⁴	1.10 ⁷	2
VENTURI								
* Clásico								
+ fundición	—	100	800	0,3	0,75	2.10 ⁵	2.10 ⁶	0,7
+ mecanizado	—	50	250	0,4	0,75	2.10 ⁵	1.10 ⁶	1,0
+ chapa soldada	—	200	1200	0,4	0,70	2.10 ⁵	2.10 ⁶	1,5
* Venturi tobera	—	65	500	0,316	0,775	1.5.10 ⁵	2.10 ⁶	1,2+1,5. β^4

Tabla N²1.

SINGULARIDAD	LONGITUDES EN D PARA LOS CORRESPONDIENTES β DE DIAFRAGMAS, TOBERAS Y VENTURI-TOBERAS												
	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
<u>AGUAS ARRIBA</u>													
* Codo 90 a TE, flujo por una rama.	10	10	10	12	14	14	14	16	18	22	28	36	46
* Dos codos o más a 90° en el mismo plano.	14	14	16	16	18	18	20	22	26	32	36	42	50
* Dos codos o más a 90° en planos diferentes.	34	34	34	36	36	38	40	44	48	54	62	70	80
* Reducción 2D/1D en longitud 1,5D a 3D.	5	5	5	5	5	5	6	8	9	11	14	22	30
* Expansión 0,5D/1D en longitud D a 2D.	16	16	16	16	16	17	18	20	22	25	30	38	54
* Válvula globo abierta 100%.	18	18	18	20	20	20	22	24	26	28	32	36	44
* Válvula esférica paso total o compuerta abierta 100%.	12	12	12	12	12	12	12	14	14	16	20	24	30
* Reducción brusca simétrica D a 0,5D.	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
* Capilla de termómetro a $\leq 0,03D$.	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<u>AGUAS ABAJO</u>													
* Todas las singularidades anteriores.	4	4	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	8

Tabla Nº 2.

SINGULARIDAD	LONGITUDES EN D PARA LOS CORRESPONDIENTES β DE VENTURIS CLASICOS									
	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
<u>AGUAS ARRIBA</u>										
* Codo simple 90° .	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5
* Dos codos o más a 90° en el mismo plano.	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	4,5	4,5	4,5
* Dos codos o más a 90° en planos diferentes.	Aplicar	longitudes	de la	tabla	n°	2				
* Reducción 3D/1D en una longitud de 3,5D.	0,5	1,5	2,5	4,5	5,5	6,5	8,5	9,5	10,5	11,5
* Expansión 0.75D/1D en una longitud ID.	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	5,5	6,5
* Válvula esférica paso total o compuerta abierta 100%.	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5
<u>AGUAS ABAJO</u>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
* Todos los obstáculos a contar desde la sección de tomas en la garganta distancia en "d".										

Tabla N° 3.

- Pequeña pérdida de carga.
- Posibilidad de inserción sin detener el funcionamiento en la tubería.

Inconvenientes:

- Limitado a bajos caudales/cortas longitudes de inserción. El Annubar® no se recomienda para diámetros superiores a 600 mm.
- Salvo la Annubar® no son recomendables para medida precisa de caudal. Si este es el caso, se impone calibrar la sonda o tubo correspondiente.

de un reloj interno/externo determinar el caudal cuasi-instantáneo. En muchos aspectos esta familia de instrumentos recuerda el funcionamiento de las bombas volumétricas. El movimiento del rotor se produce por la diferencia de presiones que se origina entre las secciones aguas arriba y aguas abajo. Una pequeña parte del flujo cortocircuita el rotor por el entrehierro.

Tipos más usuales y límites de aplicación: Son los siguientes: pistón oscilante, paletas retráctiles, oval, tirrotor, birrotor, disco nutante. Los límites de aplica-

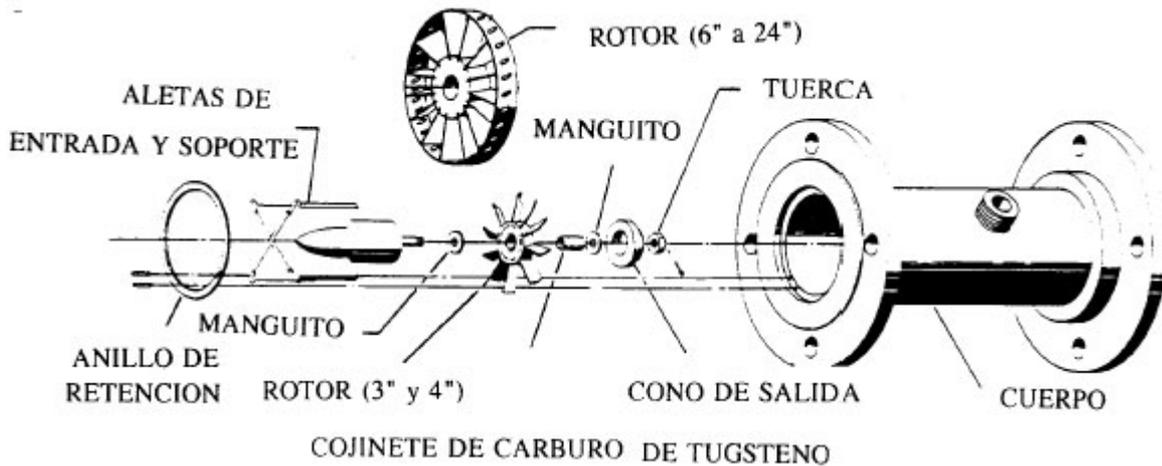


Figura 12. Caudalímetro de turbina

- La sonda Annubar® precisa mantenimiento frecuente por el riesgo de obturación de las tomas.
- El personal que utiliza estos equipos debe tener la adecuada formación para medir e interpretar los resultados.

Tamaños y rangos: En la práctica se impone una limitación en diámetro y caudal. No se recomienda para diámetros superiores a 1 m y velocidades superiores a 3 m/s. Un límite aconsejable a no superar es la aparición de vibraciones. Las sondas Annubar® admiten velocidades mayores.

Precisión:

- Tubos de Pilot y sus variantes: 1,5% - 5%
- Sondas Annubar® : 1,5% - 3,5%

Desplazamiento positivo

En este tipo de equipos, el caudal volumétrico es fraccionado mecánicamente, en segmentos de volumen conocidos y momentáneamente aislados. Por conteo del número de veces que se repite el ciclo, se puede conocer el volumen total trasegado, o bien por medio

ción vienen dictados por las necesidades de lubricación del caudalímetro. No todos los tipos admiten el agua como fluido. El riesgo de abrasión es otro límite a tener en cuenta.

Ventajas:

- Precisión mejor que el 1%.
- Posibilidad de documentar las mediciones y de ser utilizados como instrumentos
- Tramos rectos necesarios no muy largos.
- Robustos, soportan altas presiones.

Inconvenientes:

- El problema de la lubricación requiere consulta especial con el suministrador.
- El agua debe estar exenta de sólidos en suspensión
- El precio es elevado.
- Mantenimiento por personal especializado.

Tamaños y rangos: Existen aplicaciones con diámetros comprendidos entre 25 y 400 mm. Los caudales pueden variar entre 10.000 l/h y 1500 m³/h.

Precisión: Hay una gran variedad de valores depen-

diendo del fabricante. La reproductibilidad puede llegar a 0,05% y la precisión ser mejor que 1%, después de calibración.

Turbina

El primer tipo de caudalímetro de turbina fue debido a Woltmann que lo utilizó como contador el siglo

pasado. Con la salvedad de algunas novedades recientes, las versiones más utilizadas corresponden a diseños de los años 40. Se componen, generalmente, de un cuerpo o chasis, una hélice o rotor (de flujo axial), dispositivos de rectificación y enderezado de la vena fluida y un sistema de detección del paso de álabes por un punto fijo. El principio de medida es el siguiente: un fluido en movimiento provoca una rotación en la

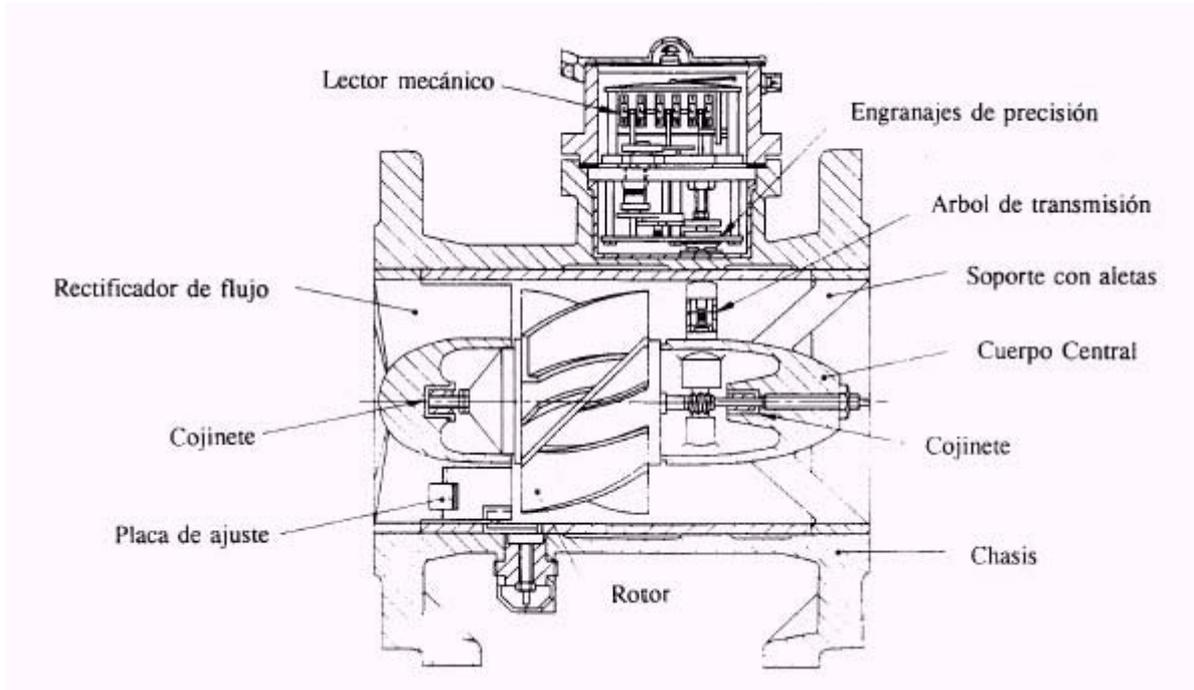


Figura 13. Caudalímetro de turbina, tipo Woltmann

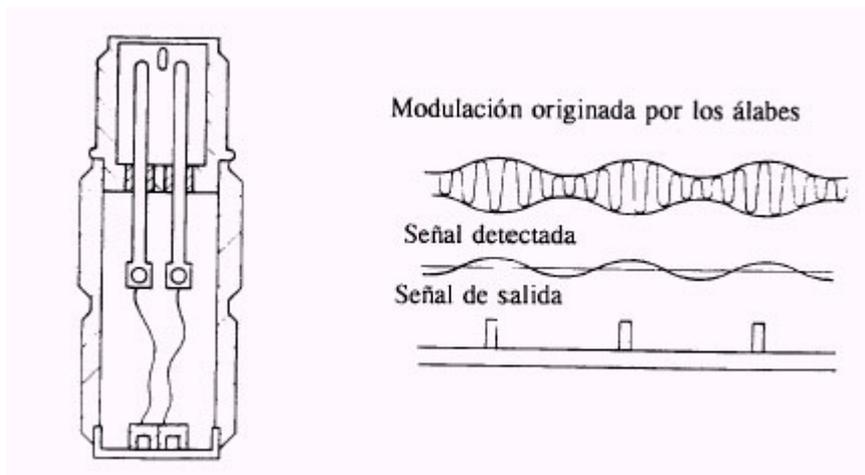


Figura 14. Diseño y operación de un pick-off RF

hélice o rotor, con una velocidad teórica que es proporcional a la velocidad de flujo. Como la hélice abarca, prácticamente, toda la sección (salvo el entrehierro), la proporcionalidad se extiende al caudal circulante.

$$W_t \cdot R = U_t = V \cdot \tan \alpha \quad [m/s] \quad (II.3)$$

La expresión (II.3) se puede modificar teniendo en cuenta el número de álabes, obteniendo la frecuencia teórica de rotación de cada álabe:

$$f_{ta} = W_{ta} = \frac{n \cdot V \cdot \tan \alpha}{2\pi R} [Hz] \quad (II.4)$$

Esta frecuencia teórica no se alcanza debido a la existencia de una serie de pares parásitos.

En su lugar hay que considerar la frecuencia real de rotación y a partir de ahí se define el factor del caudalímetro (meter factor) K_t :

$$K_t = \frac{f_{ra}}{Q} \quad [1/m^3] \quad (II.5)$$

Este factor se determina por calibración del instrumento.

Los pares parásitos son debidos a las causas siguientes, y que son tenidos en cuenta durante la calibración:

- fricciones entre componentes mecánicos.
- fricciones hidrodinámicas alabes-moyu y flujo.
- fricciones magnéticas.

Además si la turbina está mal implementada se pueden originar otras nuevas fricciones (Shafer 1961):

- *hidrodinámicas*: presencia de torbellinos o vórtices en el flujo.
- *cavitación*: se modifican los empujes en los alabes, etc.
- *mecánicas*: por ejemplo, turbina no montada en la posición aconsejada por el fabricante.

Tipos más usuales y límites de aplicación: Sobre el *modelo clásico* y bien conocido por los especialistas existe un buen número de calidades, con prestaciones radicalmente distintas. Así la mejor reproductibilidad ronda el +/-0,05% y la peor +/-0,85, de acuerdo con nuestras experiencias.

Los precios en ambos casos alcanzan proporciones de 6 a 1, dependiendo de la calidad de ejecución.

Así pues, una primera familia de tipos tienen que ver con detalles constructivos y materiales:

- *cojinetes*: desde bronce autolubricado hasta teflón, metales duros.
- *alabes*: inoxidable, plástico, ...
- *carcasa*: fundición, tubo extrusionado o tipo ducal, construcción mecano soldada.

- *pick-off*: diversas calidades de imán/célula.

Si se logra miniaturizar adecuadamente, la tecnología basada en *cojinetes magnéticos activos*, desarrollada, por ejemplo, por SKF podría tener gran aplicación.

Un tipo novedoso de turbina lo constituye el *birrotor* constituido por *dos hélices*, la primera se denomina *principal* y la segunda *hélice-sensor*. La idea de tal disposición es independizar en un mayor grado las condiciones hidrodinámicas en la entrada de la hélice-sensor, lo que se logra en gran medida gracias a la hélice principal. Con este dispositivo se aumenta bastante la linealidad del equipo, logrando un incremento del rango útil de medida. Una variante del anterior es la turbina Hoverflo® con los rotores sin cojinete (Spitzer 1991).

Otra variante la constituye las turbinas con disco incorporado (shrouded rotors). Se consigue aumentar la resolución diez veces respecto a los modelos clásicos. Varios detectores permiten controlar la integridad de los pulsos. Se emplean en diámetros grandes.

Otra forma de clasificación es el método de detección del paso de alabes. Se pueden considerar los siguientes:

- *contadores tipo Woltman*, con hélice en vertical y conexión mecánica con el lector, a través de una serie de engranajes.
- *detectores magnéticos*, con imanes más o menos fuertes. Si la atracción es excesiva ello va en detrimento de la precisión y del rango. Existen varios tipos: reluctantes, inductivos, ...
- *pick offs del tipo RF*: Se elimina la resistencia magnética. En este caso, la bobina del pick-off es parte de un circuito oscilante a 50 kHz. El paso de alabes a través del campo de la bobina, cambia la amplitud de la señal del oscilador. Este tipo de sensor es más caro que el clásico y se recomienda para medir bajos caudales, donde éste tiene dificultades.
- *sensores ópticos*: la luz generada por un fotodiodo es interrumpida periódicamente por el paso de los alabes. El pick-off es ahora un "contactor" óptico. Precisa de una pequeña ventana en material transparente. A pesar de sus inconvenientes, tiene la enorme ventaja de eliminar la influencia de los campos magnéticos, cosa que se produce en los clásicos. Este dispositivo tiene un enorme futuro.

La electrónica asociada suele tener múltiples variantes, con sistemas de documentación permanente y señales de salida 0-10 V; 4-20 mA o pulsos.

El último tipo a considerar es el caudalímetro de turbina de inserción. Una primera variante tiene una relación apreciable del diámetro del rotor frente al de

la tubería. Los álabes o paletas están dispuestos frente al flujo, en lugar del método tradicional. Nuestra experiencia con estos equipos no ha sido buena.

El segundo tipo de inserción, consiste en turbinas con hélice pequeña (desde 10 a 30 mm), con una filosofía y problemática similares al tubo de Pitot.

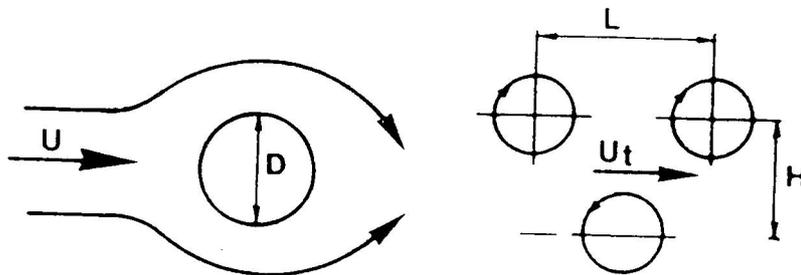


Figura 15. Principio de medida de un caudalímetro vortex

El método de medida de caudal por molinetes, será tratado en el tercer artículo de la serie.

En cuanto a los límites de uso se circunscriben a evitar medir flujos en líquidos cargados o abrasivos, con riesgo de cavitación, pérdida de lubricación de cojinetes y desprotección frente a objetos transportados en la tubería.

Ventajas:

- Elevada frecuencia de salida: alta resolución, buena precisión y reproductibilidad.
- Calibración lineal en un rango amplio.
- Variedad de salidas incluyendo la digital.
- Coste variable proporcional a las prestaciones (hay donde elegir).

Inconvenientes:

- Los cambios en la fricción de cojinetes descorrigen el equipo.
- Influencias de cavitación y condiciones aguas arriba.
- Soportan mal los transitorios y flujos pulsantes.
- Elevado coste de mantenimiento.
- Pérdida de carga media.

Tamaños y rangos: Existen fabricaciones con diámetros desde 5 hasta 600 mm. El rango de caudales puede ser elevado con proporciones desde 25 a 1. Lo más normal suele ser 10 a 1, e incluso 5 a 1. Las velocidades de flujo pueden ser desde 0,1 a 0,05 m/s hasta 10 m/s.

Precisión: Las mejores turbinas pueden tener una precisión del orden de 0,2%. Los peores casos se sitúan en +/- 2,5%. En el caso de contadores Woltman para facturación de agua, la ley de metrología correspondiente (MOPU 1988), basada en una Directiva Comunitaria (Directiva CEE 75/33 1974), fija un 2%.

Vortex

En la familia genérica de caudalímetros basados en flujos oscilatorios (estacionarios), hemos seleccionado el vortex por ser el que más aplicación tiene para el mundo del agua.

El principio de medida se basa en los trabajos realizados por Von Karmann y Strouhal en la primera mitad de este siglo. Se trata de detectar la frecuencia de paso de torbellinos o vórtices desprendidos desde un obstáculo con formas diversas situado verticalmente, en general, en una tubería. Para una gran variedad de regímenes, la frecuencia de desprendimiento de los vórtices es proporcional a la velocidad del flujo (y por tanto al caudal volumétrico).

$$V = K \cdot f \quad [m / s] \tag{II.6}$$

$$Q_v = A \cdot k \cdot f \quad [m^3 / s] \tag{II.7}$$

Estas expresiones provienen de la de la frecuencia de desprendimiento de vórtices tiene por expresión:

$$f = S \cdot \frac{V'}{d} \quad [H_z] \tag{II.8}$$

Para una geometría en condiciones dadas, existe una evidente relación entre V y V'. En el caso ideal S es constante para un gran rango de caudales. De modo práctico el número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre 1000 y 100.000. El coeficiente K se determinará por calibración.

Tipos más usuales y límites de aplicación: Existe una

gran variedad de obstáculos y de dispositivos de detección del paso de vórtices: termistores, diafragmas, electrodos, sensores piezoeléctricos, discos oscilantes y sondas ultrasónicas (Spitzer 1991, Benard 1988, LABEIN 1993, Lefebvre 1986, Norma BS 7405/1991).

Por el momento, existen límites en cuanto a tamaño, velocidad del flujo, presencia de pulsaciones, cavitación, etc.

Ventajas:

- Buena estabilidad a largo plazo y buena precisión.
- Coste medio.
- Fácil instalación.
- Independiente de presión y temperatura.
- Variedad de salidas.

Inconvenientes:

- Muy sensible a las vibraciones (está mejorándose este aspecto).
- Soportan mal los transitorios de arranque y parada.
- Limitada resolución.
- Muy influenciado por vórtices, cavitación, etc.
- Pérdida de carga media.
- Sensible a la abrasión o encastramiento.

Tamaños y rangos: Se comercializan en diámetros desde 12 a 200 mm (modernamente 300 mm) velocidades de flujo oscilan entre 1 y 20 m/s. El rango puede variar de 10 a 1 hasta 50 a 1 en casos especiales.

Precisión: La reproducibilidad varía según modelos entre 0,15 y 1,00% y la precisión entre 0,75 y 1,5%.

Electromagnético

Se basan en la aplicación de la Ley de Laplace a un líquido conductor. Este líquido cuando está en movimiento con una velocidad "V" y es aplicado en el un campo magnético "B", genera a su vez una fuerza electromotriz "e" tal que:

$$e = V \times B \quad (\text{producto vectorial}) \quad (11.9)$$

Expresándolo de otra forma:

$$E = K \cdot B \cdot L_b \cdot V \quad [V] \quad (11.10)$$

El campo magnético se genera por medio de dos bobinas dispuestas a lo largo de un tramo de tubería convenientemente aislado y la fuerza electromotriz se detecta por medio de dos electrodos, en contacto con el fluido. Este tipo de caudalímetro requiere una conductividad mínima del agua o líquido que varía entre 1 y 5 uS/cm².

La densidad de campo magnético, tiene normalmente, un valor fijado para un tamaño dado de caudalímetro. La longitud del conductor es en realidad la distancia entre electrodos, que también queda fijada para un tamaño dado. Por tanto en la ecuación (11.10) la única

variable independiente es la velocidad de flujo, de la cual depende la salida del instrumento en Voltios. Es decir, se trata de un tipo de caudalímetro que mide velocidad de flujo. Ahora bien, la velocidad en cuestión, abarca todo el área de la conducción por lo que ésta es una velocidad media, directamente proporcional al caudal, sin dependencias de perfil, número de Reynolds, etc. Más adelante se comentan aplicaciones tipo inserción, útiles para mediciones de velocidad puntual.

Un caudalímetro electromagnético consta de dos elementos: uno primario y otro secundario. El primario está compuesto de una bobina y un núcleo de material ferromagnético, el tubo de medida, los electrodos y una derivación para la señal de referencia. La señal que se detecta en los electrodos es extremadamente baja (del orden de 7,5 milivoltios para la plena escala, generalmente 10 mV). El elemento secundario o electrónica realiza las siguientes funciones: amplificar y procesar las señales de electrodos y referencia, eliminar señales espúreas, compensar las variaciones de tensión y frecuencia, minimizar las variaciones de amplitud del campo magnético en el elemento primario. La señal de salida en el secundario suele ser en 4 - 20 mA ó 0 - 1000 Hz, proporcional al caudal.

Respecto al elemento primario las evoluciones constructivas han sido una constante desde los años 60, reduciendo peso y tamaño casi en el 100%. Estos detalles se analizan a continuación.

Tipos más usuales y límites de utilización: Podemos realizar tres clasificaciones, siguiendo en cada caso baremos diferentes:

- a) modalidades de construcción del elemento primario.
- b) tipo de alimentación a la bobina.
- c) tipo de campo magnético.
- d) por su aplicación concreta.

Modalidades de construcción: En la primera modalidad, el tubo es de un material no magnético (plástico, aluminio o inox amagnético). Si el tubo es magnetizable se precisa un recubrimiento especial aislante (vidrio, elastómero, plástico, cerámica, teflon, poliuretano, tefzel, etc), para evitar cortocircuito en la señal de los electrodos. El recubrimiento debe ser compatible con el líquido de proceso. La bobina se sitúa sobre la tubería, incluyéndose los núcleos ferromagnéticos necesarios. El electrodo puede estar recubierto o no. Si la bobina se encapsula directamente sobre la tubería, esta, convenientemente aislada hace las veces de núcleo, y por tanto debe ser de material magnético.

Otros diseños posibles incluyen tuberías en fundición con las bobinas aisladas y montadas directamente en el interior. El tubo debe seguir recubierto. Para consultar ver Spitzer (1991) y Norma BS 7405 (1991).

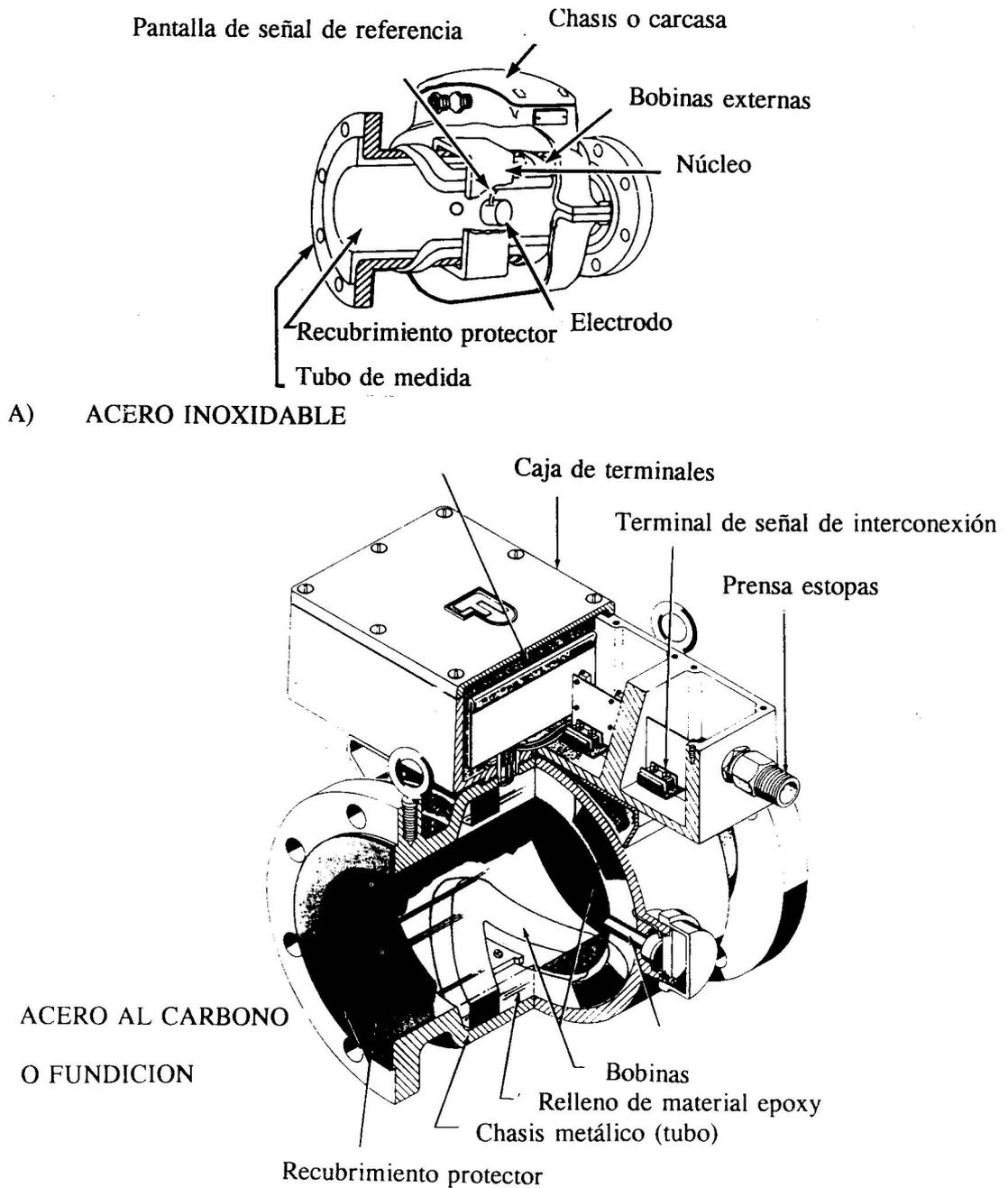


Figura 16. Tipos de caudalímetro electromagnético

Alimentación de la bobina (campo magnético):

Como se ha comentado, la intensidad de campo magnético viene fijada por la dimensión del caudalímetro. Es decir, cuando el tamaño aumenta la intensidad de campo disminuye proporcionalmente, con el fin

de generar la misma tensión de salida para la misma velocidad de flujo, sea cual sea el diámetro. De esta forma es posible unificar diversas electrónicas (secundario) en un solo tipo.

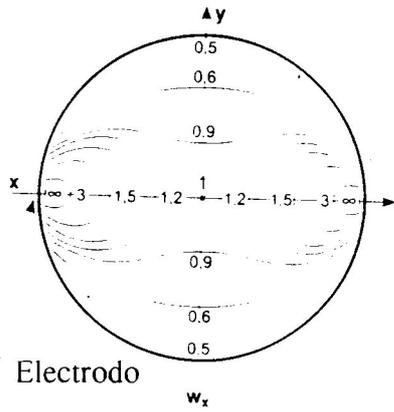


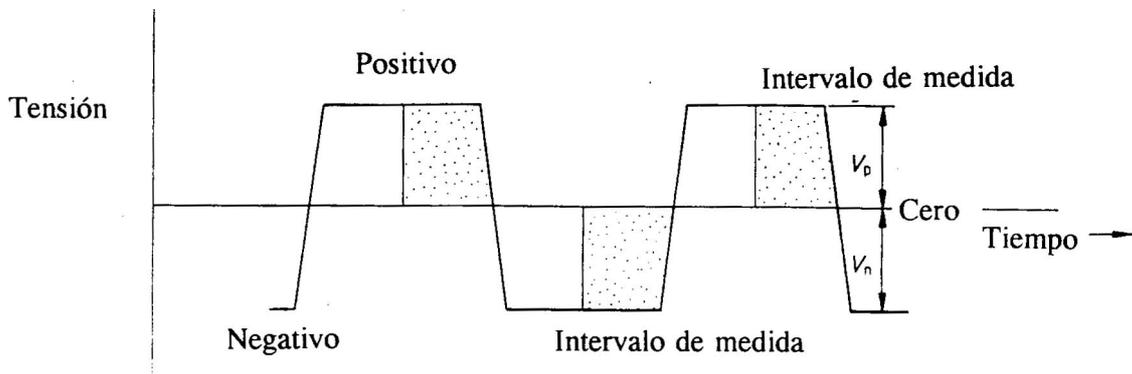
Figura 17. Esquema de flujo magnético de densidad variable

Los dos tipos básicos de excitación de la bobina son por corriente alterna o corriente continua.

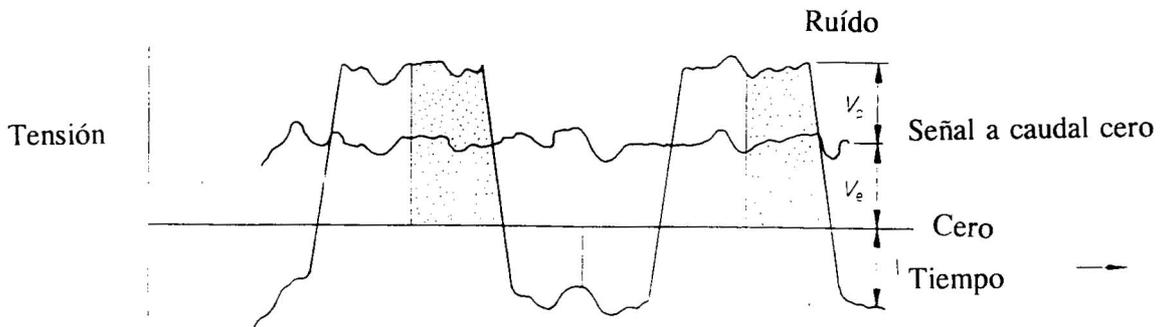
Para el caso de corriente alterna, la tensión de la red se aplica directamente a la bobina. Esto origina un campo magnético que varía con la frecuencia de la tensión aplicada (onda senoidal). La amplitud de la

señal es proporcional a la velocidad de flujo. El método es simple y proporciona resultados satisfactorios, salvo en algunas aplicaciones en las que se plantean problemas: éste es el caso del ruido. Se recuerda que bajo este epígrafe se incluye toda señal parásita que no provenga directamente del fenómeno de transducción objeto de la medición. En los caudalímetros magnéticos de este tipo, el ruido se genera en los contactos de los electrodos, por el flujo magnético variable que circula en el "circuito" que se crea entre electrodos, contactos y el fluido objeto de medición (efecto transformador). La tensión parásita (ruido) estará en cuadratura (90°) con la señal principal o bien en fase con ésta. El ruido en cuadratura puede ser fácilmente eliminado en la electrónica del instrumento (secundario). El ruido en fase es más complicado de eliminar y se debe realizar por ajustes a caudal cero con desplazamiento de fase o variación del propio cero. En todo caso la operación es delicada.

Otro problema que plantean estos diseños, es la variación en el cero, tema que se trata más adelante.



a) Condiciones ideales



b) Condiciones reales

Figura 18. Señal de caudalímetros con pulso de corriente continua

Los equipos de corriente alterna son de dos tipos según que la corriente de la bobina sea regulada o no. En el segundo caso, la amplitud de onda de la intensidad de campo magnético varía por lo que es necesario implementar una señal de referencia para compensar esta variación. La señal de referencia puede ser la propia tensión de la red, la intensidad (corriente), la densidad de flujo magnético en el hierro o en el entrehierro. En el caso de corriente regulada esta señal de referencia no es necesaria.

El origen de los equipos de excitación con pulsos de corriente continua es el intento (ya conseguido) de eliminar el problema de la variación de cero. En los equipos de alterna la intensidad de campo varía durante un ciclo, existiendo una parte constante (sin inyección de ruido en el electrodo) y otra variable (en la que si se introduce ruido). Sin embargo la parte constante, durante un ciclo, no lo es durante el tiempo que dura una medición. Los ajustes eran siempre necesarios, cosa que no ocurre en los equipos de continua. La frecuencia de los pulsos en los equipos de continúa, varía según los fabricante: 3,75 hasta 30 Hz.

En realidad, el secundario o electrónica toma sistemáticamente el cero y el pico de cada ciclo para "calcular" y suministrar la señal de salida. De aquí que se elimine el problema del cero y se garantice una mejor estabilidad a largo plazo.

Tipos de campo magnético: En modelos antiguos la densidad del campo magnético aplicado era constante en toda la sección de la tubería. Esto planteaba problemas vis a vis el perfil de velocidades, ya que eran más sensibles a singularidades. En los modelos actuales la densidad es variable en la sección.

Tipos de aplicación: Existen cuatro tipos fundamentales :

- *tubería en carga y sección completa:* es el más usual y a él nos referimos de modo genérico. Puede haber variantes para aguas limpias (o moderadamente cargadas) y para aguas residuales.
- *tubería parcialmente llena:* útil para medidas en colectores.
- *de inserción:* permite medir la velocidad en una área que puede ser la sección completa de la tubería o bien una parte de ésta.
- *medida puntual de velocidad:* sustituyen en cierto modo a los molinetes clásicos.
- *canal abierto:* existen dispositivos utilizables en grandes canales. Estos dos últimos tipos serán tratados en la tercera entrega de la serie.

Ventajas:

- Pérdida de carga nula y ausencia de piezas en movimiento.

- Independencia de las propiedades físicas del fluido con la excepción de la conductividad.
- Insensible a fenómenos transitorios o flujos pulsantes (si la electrónica es de montaje en panel).
- Buenas prestaciones.
- Precio asequible en diámetros pequeños.
- Posibilidad de medir flujos inversos.

Inconvenientes:

- El encastramiento o deposición de sólidos en los electrodos puede modificar las prestaciones e introducir errores.
- Se ve afectado por las vibraciones.
- En procesos con muy baja presión absoluta se puede desprender el recubrimiento de la tubería.
- Sensible a la presencia de campos eléctricos.
- Mantenimiento por especialistas del fabricante.
- Precio elevado en grandes diámetros que además plantean problemas de calibración.

Tamaños y rangos:

- Los diámetros varían desde 3 a 2400 mm. Los tipos de inserción pueden admitir diámetros más elevados.
- Las velocidades de flujo oscilan entre 1 y 10 m/s para una zona de alta precisión y otra zona desde 0,1 - 0,3 hasta 1 m/s con peor reproductibilidad y precisión, además del cambio de ganancia.

Precisión:

- Para rangos entre 1 y 10 m/s oscilan entre 0,5% a 3%.
- Para rangos inferiores la incertidumbre aumenta del 1 al 2,5%.
- En aplicaciones especiales (a doble precio que el normal) la precisión llega a 0,25%.
- La reproductibilidad varía desde 0,3% hasta 0,05%.

Ultrasónico

El caudalímetro de ultrasonidos ha adquirido una tremenda popularidad, junto con el magnético para todos los procesos realizados con agua, en tuberías en carga, en canal abierto, etc. En grandes diámetros su precio resulta competitivo respecto a los restantes tipos. Como sucede en otros casos y en otras técnicas, no todo lo que se ofrece al usuario es de la calidad debida, por lo que algunas precauciones se imponen para garantizar una buena medición.

El principio general se basa en la modificación de la velocidad de un pulso o tren de pulsos ultrasónicos al propagarse en un fluido en movimiento. Las emisiones de las ondas, cuya frecuencia para líquidos varía entre 1 y 5 MHz, se realizan desde sondas cerámicas que son excitadas por señales de tipo diverso. La misma sonda puede actuar alternativamente como emisor y receptor.

Estos equipos se emplean tanto para tubería en carga como un canal abierto.

Caudalímetro de ultrasonidos y perfil de velocidades: Es fundamental comprender como actúa y que mide en realidad un caudalímetro de ultrasonidos. Un equipo con un par de sondas efectúa la medición de la velocidad únicamente en el plano que contiene a las sondas, y no la velocidad media en el conjunto de planos, que podría ser asimilada como aquella que multiplicada por el área permita obtener el caudal. De aquí se deduce una importante limitación ya que si el perfil o sólido de velocidades está deformado (p.e. por la existencia de singularidades aguas arriba), resultará que la velocidad medida por el equipo no es la representativa de la sección. A su vez si el perfil de velocidades está deformado en el plano en que se efectúa la medición se plantea el mismo problema.

El objetivo de lograr medir una velocidad que sea representativa del caudal (a través de la multiplicación por el área) se ve comprometido no sólo por la existencia de singularidades, sino también por la forma inherente al perfil de velocidades en función de sus condiciones hidrodinámicas (número de Reynolds). De un modo simplificado, el perfil de velocidades sufre un achatamiento a medida que aumenta el número de Reynolds. Esto implica que a números de Reynolds altos la velocidad media, representativa del caudal, es más cercana a la velocidad máxima. Las variaciones en el perfil de velocidades son aún mayores a números de Reynolds bajos. Se concluye que los ajustes realizados en la electrónica del equipo no son igualmente válidos a todos los números de Reynolds, cosa que se comenta en un artículo posterior de la serie. Para solventar este problema los fabricantes emplean varias metodologías:

- Reducir el campo de aplicación para una precisión garantizada, por ejemplo se limitaría entre 2.500.000 y 600.000.
- Realizar compensaciones automáticas de velocidad, en función del número de Reynolds. No siempre son "transparentes" y se producen confusiones. Además no tienen en cuenta la variación de la viscosidad cinemática con la temperatura que origina errores importantes en la zona cercana a la transición (comparar por ejemplo agua a 5°C con agua a 25°C).

Perfil desarrollado: Otra situación es que el perfil de velocidades cambia continuamente es durante la puesta en carga de un flujo, por ejemplo en el tramo de tubería o galería inmediato a una toma en un embalse. Aunque el régimen establecido sea permanente (velocidad constante) el perfil de velocidades varía según se considere una sección próxima a la toma (perfil excesivamente chato) o bien más alejada. Se recuerda que esto se debe al desarrollo de las capas límites en la tubería (Comolet 1982, Sedille 1967, Idel'cik 1969).

De un modo práctico, se producen las siguientes situaciones:

- desarrollo de capa límite laminar para:

$$L = \left(\frac{10^5}{Re} \right) \cdot D \quad [m] \quad (II.11)$$

- desarrollo de la capa límite turbulenta:

$$L = (0.03 \cdot Re) \cdot D \quad [m] \quad (II.12)$$

Cuando se ha superado la última longitud citada se dice que el flujo está **completamente desarrollado o establecido**. En todas las aplicaciones de caudal, cuando nos referimos a condiciones ideales o cuasi ideales se busca el flujo completamente desarrollado.

Tipos más comunes y limitaciones: Se consideran básicamente dos familias según su principio de operación:

- Doppler
- tiempo de tránsito (transient time)

A su vez el último tipo abarca otros diferenciados por el tratamiento de la señal:

- tiempo de tránsito propiamente dicho (leading edge o time domain).
- diferencia de frecuencias (sing around o frequency domain).

En todos los casos se plantean tres formas de ejecución para la instalación de las sondas:

- sondas en contacto con el líquido.
- sondas de inserción en contacto con el líquido.
- sondas de contacto externo (clamp-on).

Doppler: Este tipo de caudalímetros se basa en la variación de la frecuencia del sonido, transmitida desde una fuente móvil al ser detectada por un observador fijo. El empleo del equipo implica que el fluido objeto de medición, contenga partículas en suspensión o burbujas de aire que reflejen parcialmente el tren de ondas transmitido desde una sonda emisor receptor o bien desde dos sondas situadas en oposición. Existen ejecuciones con los tres tipos de instalación de sondas.

La ecuación de principio es:

$$\Delta f_d = 2 \cdot f_o \cdot \frac{V}{C} \quad [Hz] \quad (II.13)$$

A pesar de su comodidad, las prestaciones (al menos en los tipos clamp-on) son muy mediocres según nuestra experiencia directa.

Tiempo de tránsito: Se disponen dos sondas enfrenta-

das, formando un ángulo Θ con el eje de la tubería. En la versión más común las sondas son a la vez emisor y receptor. Cada sonda envía un pulso que es recibido por la opuesta con adelanto o retraso en función de que vaya a favor o contracorriente. Sobre esta idea básica, se plantean variantes según la electrónica resu-

elva la relación tiempo-velocidad de flujo. En un primer caso, a partir de que la diferencia de tiempos de "vuelo" es proporcional a la velocidad del flujo:

- sentido A-B

$$t_{AB} = L_p / [C + V \cdot \cos\theta] \quad [s] \quad (II.14)$$

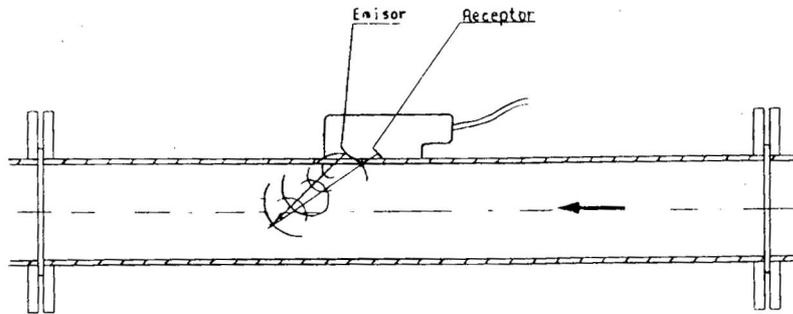


Figura 19. Esquema del caudalímetro de ultrasonidos tipo Doppler

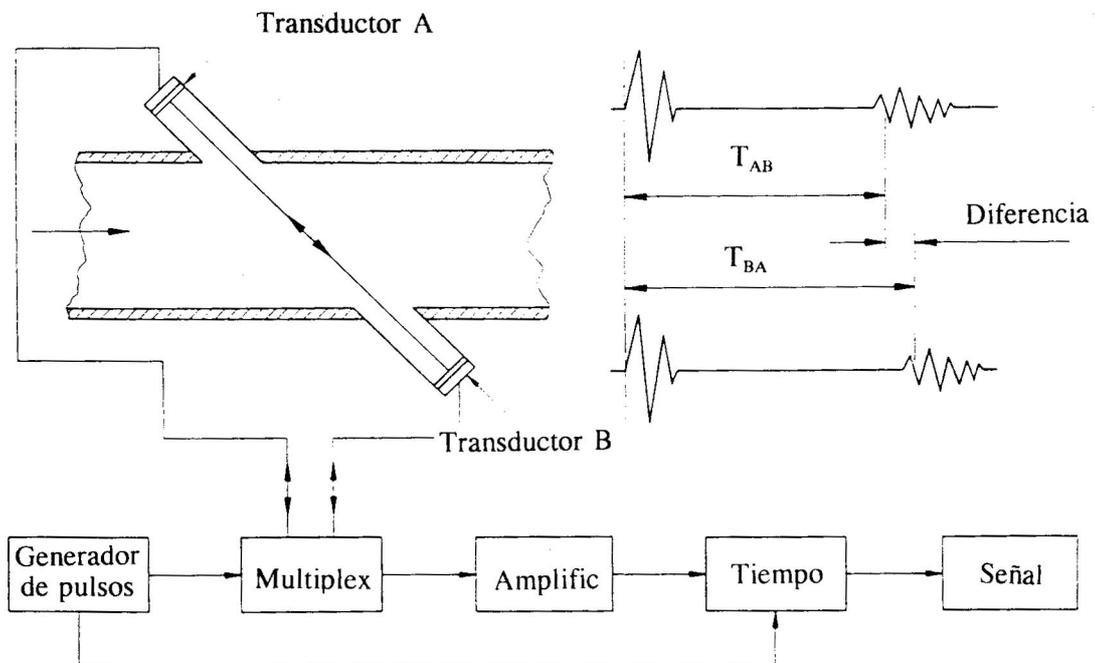


Figura 20. Principio de medida del caudalímetro tipo tiempo de tránsito (leading edge)

- sentido B-A

$$t_{BA} = L_p / [C - V \cdot \cos \theta] \quad [s] \quad (II.15)$$

- diferencia

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB} \quad [s] \quad (II.16)$$

Resultando (ya que $V^2 \cdot \cos^2 \theta \ll C^2$):

$$V = (\Delta t \cdot C^2) / (2 \cdot D) \quad [m/s] \quad (II.17)$$

Otros autores proponen esta variante (Spitzer 1991):

$$V = (\Delta T \cdot C^2 \cdot \tan \theta) / (2 \cdot D) \quad [m/s] \quad (II.18)$$

En este caso se mide la velocidad del sonido, lo cual puede ser una ventaja adicional para chequear la precisión del conjunto.

inmediatamente después de la recepción del pulso proveniente de la otra sonda.

Diferencia de frecuencias: Utiliza básicamente el mismo tipo de sondas, pero difiere en el tratamiento de la señal. En este caso se convierte el tiempo en frecuencia por lo que es necesario un tren de pulsos. La diferencia de frecuencias es proporcional a la velocidad. Además se logra la independencia respecto a la velocidad del sonido:

$$f_{AB} = (C + V \cdot \cos \theta) / [D / \sin \theta] \quad [H_z] \quad (II.20)$$

$$f_{BA} = (C - V \cdot \cos \theta) / [D / \sin \theta] \quad [H_z] \quad (II.21)$$

$$\Delta f = V \cdot \sin 2\theta / D \quad [H_z] \quad (II.22)$$

El punto débil de estos equipos es su lentitud de respuesta. Además cualquier bloqueo de pulsos, cosa relativamente frecuente, detiene la adquisición comprometiendo la calidad de las mediciones. Una variante que intenta remediar este problema utiliza la técnica de comparación de la fase entre dos pulsos, por medio de osciladores de tensión controlada que se ajustan automáticamente a las frecuencias f_{AB} y f_{BA} . De esta forma el equipo continúa midiendo incluso con pérdida del 98% de los pulsos.

En diámetros inferiores a un metro existe competencia entre el método de tiempo de tránsito y el de diferencia de frecuencias, con la salvedad de variaciones rápidas y pulsaciones. El mismo autor (Spitzer 1991) citado antes prefiere

para estos diámetros, el método de diferencia de frecuencias.

Equipos multicuerda (multiparth): Para ambos métodos (sing around y transient time) un problema capital suele ser la distribución de velocidades a lo largo de la sección. Es obvio que si se posee información de más de un plano de medida se determinará mejor la velocidad media para toda la sección. Los equipos multicuerda permiten además reducir los tramos rectos necesarios respecto a singularidades aguas arriba. Existen varias disposiciones:

- planos paralelos al diametral (3 ó 5) incluyendo el diametral. Las trayectorias serán diferentes y la

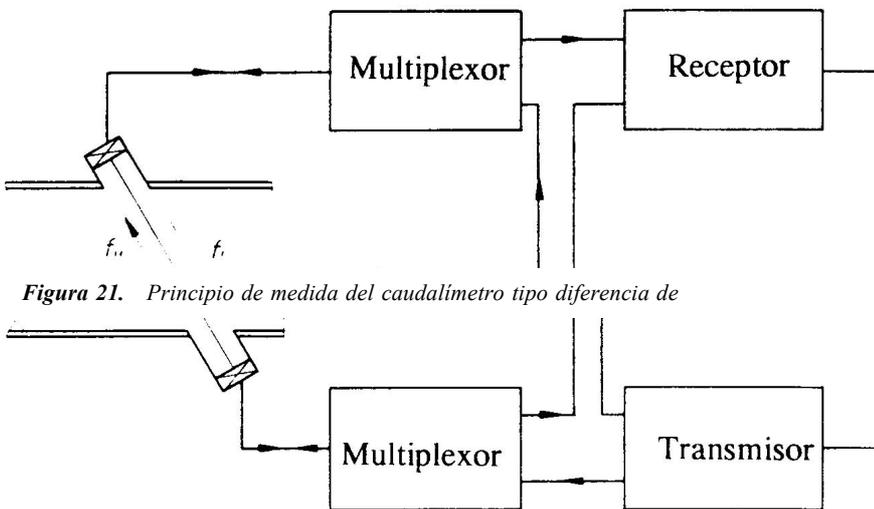


Figura 21. Principio de medida del caudalímetro tipo diferencia de

Figura 21. Principio de medida del caudalímetro tipo diferencia de frecuencias

Aún se proponen otras expresiones (Norma BS 7405/1991), que implican medir el tiempo de vuelo cada pulso por separado:

$$V = [D / (\sin 2\theta)] \cdot [\Delta t / (t_{BA} - t_{AB})] \quad [m/s] \quad (II.19)$$

Estos equipos se adaptan bien a variaciones bruscas de caudal o a flujos pulsantes, ya que la determinación de a velocidad puede realizarse en cada ciclo. Algún autor (Spitzer 1991) propone que es la mejor tecnología para tubería con diámetro superior a 1 m.

En relación a la generación de pulsos existen dos variantes, la primera con emisión simultánea de estos en las dos sondas. En la segunda el pulso se emite,

integración se realiza siguiendo diversos métodos Gauss-Jacobi, Tchebycheff, log-lineal.... (Lowell y Hirschfeld 1979, CEI Code nº 41/1991).

- planos cuya charnela se sitúa en el eje de la tubería. La velocidad será la media de las diversas trayectorias.

requiere equipos multicuerda.

Ventajas:

- La pérdida de carga nula y ausencia de piezas en movimiento.
- Independencia relativa de las propiedades físicas del fluido (salvo la celeridad).

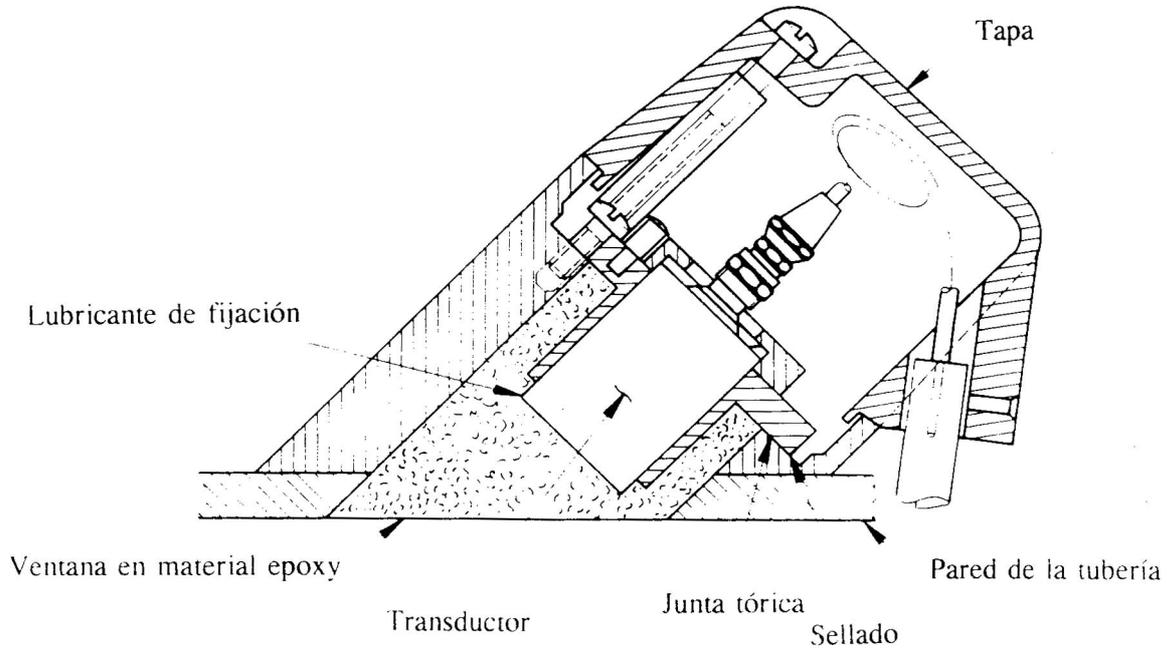


Figura 22. Detalle de sonda ultrasónica

Además existe la posibilidad de situar dos pares de sondas en el mismo plano (trayectorias cruzadas), que definen con más precisión la componente axial de la velocidad. Es preferible utilizar menos planos con trayectorias cruzadas. Existen realizaciones hasta con ocho planos y doble trayectoria. En estos casos la precisión es excelente.

Límites de empleo: En realidad se han comentado algunos de estos límites, que incluso pueden hacer imposible la medición:

- presencia de burbujas de aire o materias sólidas en exceso (salvo en el tipo Doppler).
- flujos pulsantes (salvo en el tipo tiempo de tránsito).
- materiales porosos o discontinuidades en la implementación de sondas para tipos de contacto externo (clamp on) o bien de inserción sin contacto directo de la sonda.
- flujos con el perfil muy deformado, en los que se

- Ciertos equipos son particularmente aptos para mediciones en transitorios y flujos pulsantes.
- Precio competitivo para grandes diámetros.
- Buenas prestaciones. Las mejores con equipos multicuerda.
- Posibilidad de medir flujos inversos.

Inconvenientes:

- Muy sensibles (algunos tipos) a la presencia de burbujas o sólidos en suspensión.
- Variación excesiva del coeficiente de caudal para bajos números de Reynolds.
- Muy sensibles a la presencia de singularidades aguas arriba.
- El posicionamiento de sondas en diámetros grandes es delicado y requiere personal especializado.
- Opacidad de algunos fabricantes a transmitir detalles de como funcionan realmente sus equipos, con el fin de prever problemas que surgen en operaciones especiales o simplemente realizar controles de cero adecuados.
- Dependencia (en algunos tipos) de la celeridad que varía con la presión y la temperatura.

- El ruido y vibraciones puede afectar al buen funcionamiento.

Tamaños y rangos: Se pueden utilizar equipos en diámetros desde 1" hasta 8 m de diámetro. Sin embargo se recomienda restringir el empleo del tipo sing around a 1 m y el tipo Doppler a 500 mm.

En diámetros superiores a 1 m es recomendable utilizar equipos multicuerda.

ños máximos alcanzables.

La expresión de un caudal másico es la siguiente:

$$Q_m = \rho \cdot A \cdot U \quad [Kg/s] \quad (II.23)$$

Observando la ecuación se intuyen dos posibilidades de medición:

- Utilizar un transductor que mida directamente la masa, sin influencia alguna de presión, temperatura, etc.

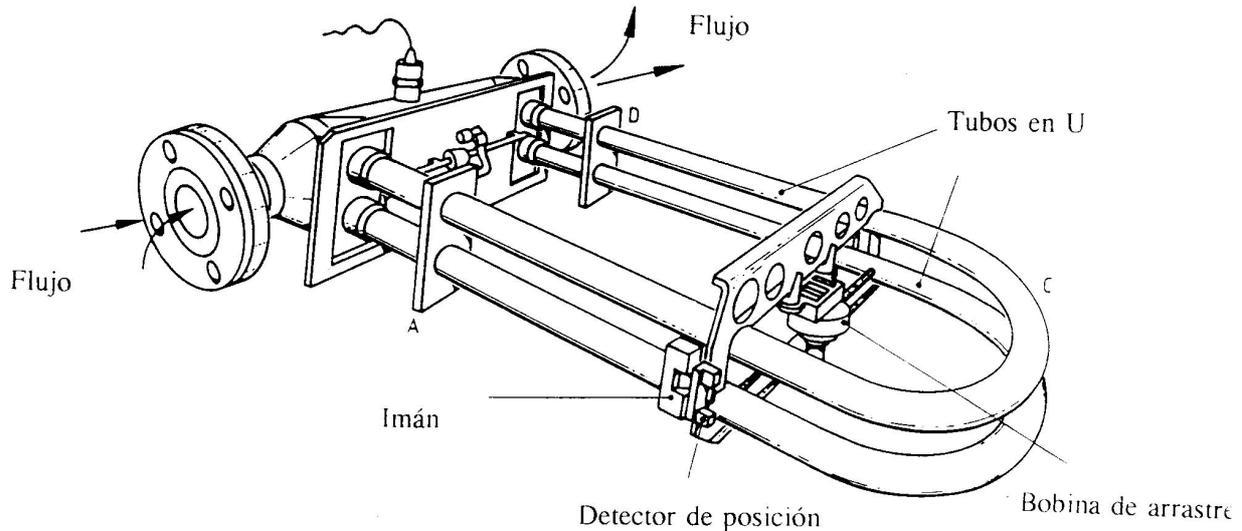


Figura 23. Caudalímetro másico de tipo Coriolis

Las velocidades se sitúan, según los fabricantes entre 0,3 y 15 m/s. Sin embargo y con precisiones inferiores se miden velocidades inferiores a 0,01 m/s.

Precisión:

- Tipo Doppler : 3 a 10% o más.
- Tipo diferencia de frecuencias : 2-4%
- Tipo tiempo de transito: 1-3%

La reproductibilidad en los mejores casos oscila entre 0,05% a 0,1%. Otros fabricantes anuncian 0,3%.

Másico

Se trata de caudalímetros de reciente aparición, cuya principal ventaja es la medición de la masa circulante. Son especialmente atractivos en la industria del petróleo, pero no tanto para el agua, ya que sus precios son hoy por hoy prohibitivos en comparación a los tama-

- Medir simultáneamente el volumen circulante y la densidad del fluido. Esta última es la más utilizada.

Tipos más comunes y límite de empleo: Existen varios métodos disponibles en la actualidad:

- **Método del momentum:** un caudal másico provoca la variación del momentum en un elemento de paletas rotativas.
- **Métodos basados en la aceleración y vibraciones:** Son los más prometedores, también se denominan caudalímetros másicos de Coriolis. Se comentan más adelante.
- **Métodos basados en la presión diferencial:** se montan en paralelo en puente de Wheatstone varios instrumentos de presión diferencial. Se requiere una bomba auxiliar que extraiga un caudal de una rama y la lleve a otra. La diferencia de presiones diferenciales medida en los deprimógenos es proporcional al caudal másico.

- *Métodos híbridos:* consiste en mezclar métodos clásicos para medida de caudal volumétrico incorporando densitómetros en continuo.
- *Métodos térmicos:* Existen dos variantes. En una se mide la pérdida de carga y conociendo calor específico conductividad térmica y viscosidad se obtiene el caudal másico. La segunda posibilidad es una variante industrial de los equipos de laboratorio de hilo o película caliente: se mide una temperatura de referencia del fluido y el enfriamiento provocado por convección en otra sonda.

Caudalímetro de Coriolis: Las fuerzas de Coriolis se originan por una combinación de movimientos radiales y rotativos en tubos con formas diversas según los fabricantes, los diámetros o los fluidos de proceso. La medición del caudal másico se remite a medir el par requerido por las fuerzas de Coriolis.

Dentro del tipo de Coriolis existen dos:

- Una partícula de fluido experimenta una fuerza de Coriolis en un rotor movido a velocidad constante w . La fuerza originada provoca un par que actúa en el plano de rotación y puede ser medido por medio de galgas de extensometría.

$$Q_m = K \cdot T/w \quad [Kg/s] \quad (II.24)$$

Este método tiene una gran rapidez de respuesta pero plantea problemas de mantenimiento.

- En el segundo tipo se produce un movimiento de precesión (giróscopo) cuando se aplica un par perpendicularmente al eje de rotación. Como la rotación del tubo no tiene sentido se logra crear la fuerza de Coriolis correspondiente, aplicando una vibración al tubo. Observando la Figura, la amplitud de vibración crece de A a B y decrece de C a D. En A y D esta es cero. El fluido ejerce una fuerza opositora al movimiento perpendicular. Como ambas fuerzas están en oposición se tiende a producir un giro en el tubo con ángulo proporcional al caudal másico. Este giro se detecta por detectores magnéticos de posición controlando el tiempo de paso de la posición con máximo giro a la marca de referencia. Este intervalo de tiempo es función directa del caudal másico:

$$Q_m = K_S \cdot \frac{\Delta T}{8 \cdot r^2} \quad [Kg/s] \quad (II.25)$$

Para más detalles consultar a Plache (1979).

Existen una gran variedad de formas, al margen de la descrita en la Figura. Los límites del sistema tienen que ver fundamentalmente con el tamaño del caudalímetro (máximo diámetro 100 mm). Además la tecnología no está igualmente madura en todos los fabricantes. En un caso reciente un fabricante concreto alcanzaba unas prestaciones excelentes en diámetro de 50 mm, y a la hora de realizar la misma ejecución de

75 mm los resultados fueron desastrosos.

Otro problema importante es la ausencia de datos representativos sobre factores de influencia, salvo algún trabajo parcial (Cascetta et al.). Para solventar este problema se ha diseñado un proyecto europeo de investigación en el que participa LABEIN (NEL 1994), con el fin de desarrollar un cuerpo de datos suficiente sobre la influencia de factores tales como temperatura de fluido, temperatura radiante sobre la carcasa, vibraciones, cavitación, etc.

Conviene añadir que, en realidad, un gran número de caudalímetros adolecen de cuerpo normativo suficiente para establecer claramente las influencias de las diversas situaciones que se pueden presentar en las aplicaciones prácticas.

En el caso concreto de los másicos, el impulso de estas investigaciones internacionales viene dictado por el deseo de incorporarlo a la Metrología Legal. La OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) está realizando trabajos a este respecto (OIML 1993).

Ventajas:

- Medición directa de caudales másicos.
- Excelentes prestaciones.
- Se puede utilizar para medir la densidad, en diámetros pequeños lo que es muy útil para usarlo como auxiliar de un caudalímetro principal.

Inconvenientes:

- Precio.
- Sensible a vibraciones, cavitación, encastramiento, etc.

Tamaños y Rangos: Desde 10 a 150 mm de diámetro, con caudales desde algunos 1/min hasta 5000 1/min.

Precisión: Se sitúa entre 0,2% y 0,8%.

NORMATIVA

En las últimas décadas los trabajos de la Organización Internacional de Normalización (ISO) han adquirido tal relevancia que, con pocas excepciones, los Organismos nacionales se dedican simplemente a adoptar como normas propias (con su código correspondiente) las normas emitidas por ISO.

Incluso el Comité Europeo de Normalización (CEN) aprueba como Norma Europea (con obligación a su vez de ser aceptada por los Países Miembros de las Comunidades) cada nueva norma emitida por ISO, previa consulta al Subcomité afectado. De esta forma se logra un importante ahorro de esfuerzos.

El otro gran polo normalizador, ha sido tradicionalmente U.S.A. En lo relativo a caudal se sigue, aproximadamente, la estrategia CEN pero son sus más y sus menos. A veces ISO se sitúa por delante y a veces es a la inversa.

La CEI

El capítulo electrotécnico queda cubierto por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). Este organismo, de mayor antigüedad, está también afiliado a ISO, con plena competencia en sus áreas de trabajo. En mediciones de caudal existen capítulos de normas, relacionados con mediciones de rendimientos en máquinas hidráulicas tanto en modelo (CEI, Publicación *n*^o 193, 1965, y *n*^o 193A, 1972), como en prototipo (CEI Code *n*^o 41/1991). En ambos casos *se tratan de las normas más restrictivas y exigentes que existen en la actualidad*. El WG23 del TC4 de la CEI está trabajando en la revisión y puesta al día de las normas (CEI, Publicaciones *n*^o 193, 1965, *n*^o 193A, 1972, y *n*^o 497, 1976) refundiéndolas en una nueva edición de la norma CEI *n*^o 193. En otra ocasión habrá la oportunidad de tratar en detalle las normas para ensayos en modelo. Sin embargo, aportaremos algunos datos que pueden ser comparados con los citados en capítulos anteriores :

- el caudalímetro puede ser de los tipos siguientes: electromagnético, ultrasonidos, turbina, vortex o deprimógenos
- el laboratorio debe poseer un patrón primario de calibración (gravimétrico, volumétrico o pantalla hidrométrica de Anderson) de forma que ésta pueda realizarse sin modificación de las condiciones de funcionamiento ni desmontajes del caudalímetro respecto al ensayo posterior.
- la reproductibilidad debe situarse entre 0,05% y 0,15%.
- la precisión de la calibración debe ser del orden de 0,05% a 0,10%.
- la precisión del caudalímetro, después de calibración, y considerando todos los conceptos, debe ser del orden de 0,2% a 0,35%.

Normas ISO en vigor

Como se ha comentado estas normas tiene equivalencia prácticamente total con el resto de normas nacionales europeas, e incluso normas CEN.

En la lista que se facilita a continuación se enumeran las normas específicas de caudal. Como es lógico existen un gran número de otras normas que tratan

parcialmente la medida de caudal. Están referidas a ensayos muy diversos: turbinas de vapor, intercambiadores y torres de refrigeración, ventiladores, válvulas, bombas, etc. En general estas normas son menos exigentes que las que se citan a continuación.

En caso de duda se recomienda que prevalezcan las que se citan sobre las más generales. Si la norma general es más restrictiva (caso de las CEI) prevalecerán éstas.

De esta lista se han excluido las normas relativas exclusivamente a grandes diámetros y a gases.

ISO 2186 (1973): Fluid flow in closed conduits – Connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements.

ISO/TR 3313 (1992): Measurement of pulsating fluid flow in a pipe by means of orifice plates, nozzles or Venturi tubes.

ISO 3354 (1988): Measurement of clean water flow in closed conduits-Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions.

ISO 3966 (1977): Measurement of fluid flow in closed conduits-Velocity area method using Pilot static tubes.

ISO 4006 (1991): Measurement of fluid flow in closed conduits-Vocabulary and symbols. Bilingual edition.

ISO 4064-1 (1977): Measurement of water flow in closed conduits-Meters cold potable water. Part 1: Specification.

ISO 4064-2 (1978): Measurement of water flow in closed conduits-Meters cold potable water. Part 2: Installation requirements.

ISO 4064-3 (1983): Measurement of water flow in closed conduits-Meters for cold potable water. Part 3: Test methods and equipment.

ISO 4185 (1980): Measurement of liquid flow in closed conduits-Weighing method.

ISO 5167-1 (1991): Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full.

ISO 5168 (1978): Measurement of fluid flow- Estimation of uncertainty of a flow-rate measurement.

ISO 6817 (1992): Measurement of conductive liquid flow in closed conduits-Method using electromagnetic flowmeters.

ISO 7066-1 (1989): Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices. Part 1: Linear calibration relationships.

ISO 7066-2 (1988): Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices. Part 2: Non-linear calibration relationships.

ISO 7145 (1982): Determination of flowrate of fluids in closed conduits of circular cross-section-Method of velocity measurement at one point of the cross-section.

ISO 7194 (1983): Measurement of fluid flow in closed conduits-Velocity-area methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pilot static tubes.

ISO 7858-1 (1985): Measurement of water flow in closed conduits-Meters for cold potable water-Combination meters. Part 1 : Specifications.

ISO 7858-2 (1987): Measurement of water flow in closed conduits-Meters for cold potable water-Combination meters. Part 2: Installation requirements.

ISO 7858-3 (1992): Measurement of water flow in closed conduits-Meters for cold potable water-Combination meters. Part 3 : Test methods.

ISO 8316 (1987): Measurement of liquid flow in closed conduits-Method by collection of the liquid in a volumetric tank.

ISO 9104 (1991): Measurement of liquid flow in closed conduits-Method by collection of the liquid in a volumetric tank.

ISO 9104 (1991): Measurement of fluid flow in closed conduits-Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids.

ISO 9368-1 (1990): Measurement of liquid flow in closed conduits by the weighing method- Procedures for checking installations. Part 1: Static weighing systems.

Normas americanas en vigor

La lista que se adjunta se refiere a normas ANSI, ASME, ISA, ASHRAE y AWWA.

ANSI/ASME MFC-1M 1986R: Glossary of Terms Used in the Measurement of Fluid Flow in Pipes (being revised).

ANSI/ASME MFC-2M 1988R: Measurement Uncertainty for Fluid Flow in Closed Conduits.

ANSI/ASME MFC-5M-1989R: Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits Using Transit-Time Ultrasonic Flowmeters.

ANSI/ASME MFC-6M-1987R: Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Vortex Flowmeters.

ANSI/ASME MFC-8M-1988: Fluid Flow in Closed Conduits-Connections for Pressure Signal Transmissions between Primary and Secondary Devices.

ANSI/ASME MFC-9M-1988: Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits by Weighing Method.

ANSI/ASME PTC-19.5-1972: Orifice Meters for Power Test Code Testing.

ANSI/AWWA-C701-1988: Cold Water, Turbine Type.

ANSI/ISA-RP31.1-1977: Specification, Installation, and Calibration of Turbine Flowmeters.

ASHTAE-41.8-1978R: Standard Methods of Measurement of Flow of Fluid in Pipes Flowmeters.

ASME MFC-3M-R1989: Measurement of Fluid in Closed Conduits using Orifice, Venturi, Nozzle.

ASME MFC-10M-1988: Method for Establishing Installation Effects on Flowmeters.

ASME MFC-11M-1990: Measurement of Fluid Flow by Means of Coriolis Flowmeters.

ISA-RP16.5-1961: Glass Tube Variable Area Meters (Rotameters).

ISA-RP16.6-1961: Calibration of Variable Area Meters (Rotameters).

Trabajos en curso: normas ISO

Las siguientes normas son objeto de revisión:

ISO 4064/1 (1977)

ISO 4006 (1988)

ISO 5168 (1978)

ISO R6817 (1980)

ISO 7066/1.2 (1989 y 1988)

En distintas fases de estudio se encuentran las siguientes:

ISO DP 5167-2: Measurement of fluid flow by means of differential pressure devices - Part 2 - Orifice plate or nozzle at the inlet of a pipe.

ISO DP 9464: Code of practice for ISO 5167.

- Conditions differing from specified in 5167.
- Straighteners, conditioners (WG16).
- Vortex (WG19).
- Ultrasonic (WG20).
- Dynamic mass flow measurement (SC12).
- Combination of meters, cold potable water. Part 3.
- Hot water meter specifications.
- Variable area. Gravity type.

Trabajos en curso: normas ASME

Están en fases diversas, las normas siguientes:

ASME MFC-12M: Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits Running Full Using Multiport Averaging Pilot-Primary Meters.

ASME MFC-14M: Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits-Velocity Area Method Using Insertion Meters.

ASME MFC?: Flow Conditioners.

Normalización en España

Dentro de AENOR, la medida de caudal queda enmarcada en el subcomité 3 (SC3) del Comité Técnico 60 (CT 60) : Metrología.

Se está desarrollando una activa labor de traducción de normas ISO y CEN que en la actualidad desborda las actividades del Subcomité.

METROLOGIA LEGAL

Cuando un caudalímetro, o mejor, contador de volúmenes de agua circulante por una tubería, es utilizado como base para extender una factura de un suministrador hacia un cliente, usuario final, tanto el equipo como los controles aplicables se salen de la normativa científica y técnica para entrar en lo que comúnmente se denomina *Metrología Legal*.

La Metrología Legal en España regula los diseños y calidades mínimas de los equipos y los controles a efectuar mediante leyes u ordenes que son publicadas en el B.O.E. Con la entrada de España en las Comunidades Europeas se ha producido una adaptación a las Directivas Comunitarias que son normativas de rango superior. Cuando se publica una nueva Directiva, al poco tiempo se refleja en la correspondiente Orden o Ley del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Con relación al agua existe una Directiva Comunitaria (Directiva CEE 75/33 1974) y una Orden Española (MOPU 1988), sobre contadores de agua fría.

El control metrológico de cada tipo de equipo se efectúa en dos fases:

- **aprobación de modelo:** se presenta una documentación en forma de memoria descriptiva del equipo que estará perfectamente referenciado (modelo, diámetro y caudal). Dependiendo de los diámetros se someten a uno o varios ejemplares a unas pruebas metrológicas consistentes en varias calibraciones, unos ensayos de fatiga (funcionamiento continuo y a ciclos) y nuevas calibraciones. Además se debe superar una prueba de presión.

La precisión que deben poseer los equipos, expresada en porcentaje del caudal circulante, es del +/- 5% para caudales comprendidos entre el mínimo (Q_{\min}) y el de transición (Q_t) y del +/- 2% para caudales comprendidos entre el máximo (Q_{\max}) y Q_t . De acuerdo con los valores obtenidos de Q_{\min} y Q_t los equipos se ajustarán a tres clases metrológicas (ver Tabla nº 4).

Una vez superada la Aprobación de Modelo, viene la Verificación Primitiva, que es una especie de

CLASE	Q _n [m ³ /h]	
	< 15	≥ 15
* "A" Q _{min} Q _t	0,04 Q _n 0,20 Q _n	0,08 Q _n 0,30 Q _n
* "B" Q _{min} Q _t	0,02 Q _n 0,08 Q _n	0,03 Q _n 0,20 Q _n
* "C" Q _{min} Q _t	0,01 Q _n 0,015 Q _n	0,006 Q _n 0,015 Q _n

Tabla Nº 4

calibración a que debe ser sometido cada equipo antes de ser puesto a la venta.

Puntos débiles y fuertes

Asumiendo la obligatoriedad de utilizar equipos legalmente aprobados y verificados en toda transacción comercial de agua, conviene analizar los pros y contras de esta orden ministerial.

Puntos a favor:

- No fija límites de diámetro superior, aunque los propios fabricantes limitan este a 600 mm aproximadamente.
- Se somete a los equipos a unos ensayos de fatiga.
- Se clasifican los equipos según sus prestaciones.
- Existe un control para cada contador.

Puntos en contra:

- El número de contadores a someter a ensayos de aprobación de modelo debería ser independiente del diámetro de estos. No hay ninguna justificación técnica para reducir el número en diámetro mayores.
- Se debería aumentar la precisión drásticamente, al menos a valores dobles (+/- 2,5% hasta la transición y +/- 1% desde ésta). Debería producirse esto, con más razón en el caso de grandes diámetros.
- No se contempla el tiempo útil de vida que tiene cada equipo, y por tanto, cuando debe procederse a su sustitución por uno nuevo.
- La precisión requerida a las instalaciones de calibración es mediocre.
- Todavía no se contempla la utilización de electrónica que permita reducir los costes de explotación a las Empresas Gestoras de Servicios de Aguas.
- Se debe ampliar a otros tipos de equipos.

Avances en Metrología Legal

Es tradicional el retraso que las Ordenes y Leyes que regulan los equipos utilizados en metrología legal sufren respecto a las normas correspondientes en el campo de la metrología técnica y científica. Este retraso no es solo debido a una elemental pendencia para observar como se comportan nuevos equipos o aplicaciones. Se debe añadir una lentitud propiciada por las inercias burocráticas de los Organismos involucrados. En la CEE, las nuevas Directivas suelen ser precedidas de estudios, informes y decisiones de la Organización Internacional de Metrología Legal.

En la actualidad se observa un cambio importante de actitud que va a permitir por ejemplo, introducir los caudalímetros máxicos para transacciones comerciales. Ver, por ejemplo OIML (1993).

En función de la flexibilidad y facultad de algunos Organismos Nacionales de Metrología Legal, se logran aprobaciones de modelo en equipos con nuevas tecnologías, que no suelen ser admitidas por Organismos de otros países.

La situación, como se puede apreciar, dista mucho de ser la de óptimo funcionamiento. Entre tanto, en algunos países y sectores, la cuestión de las transacciones comerciales se resuelve de un modo expeditivo y riguroso, cosa que debería hacer reflexionar a las Entidades con actitudes burocráticas. En este tipo de transacciones se ponen de acuerdo tres ó cuatro partes:

- el suministrador del producto.
- el cliente.
- el fabricante del caudalímetro/contador.
- el laboratorio de calibración realizando funciones de inspección y control.

Los requisitos y capacidades tecnológicas de los laboratorios serán tratados en un artículo posterior.

SELECCION DE CAUDALIMETROS

Existen sofisticadas metodologías para proceder a la correcta elección de caudalímetros, algunos incluso recurren a Sistemas Expertos (Bailey 1980, Higham 1985, Hall 1993, Kopp 1979, Baker-Counsell 1985). En nuestra opinión se corre el riesgo de complicar tremendamente el problema. No obstante, una simplificación excesiva puede conducir a una mala selección con los costes de tiempo y dinero correspondientes.

Quizás la aparición de tan complejos sistemas de decisión se deba a algo subyacente y tremendamente preocupante, como es la pérdida de conocimiento de los principios básicos de medida y de los avances tecnológicos, cosa que hemos detectado tanto a nivel nacional como internacional en el campo de la medida de caudal.

En este trabajo se pretende aportar criterios fundamentales sobre los siguientes aspectos:

- criterios de prestaciones.
- criterios sobre el fluido de medida.
- criterios de instalación y mantenimiento.
- criterios ambientales.
- criterios económicos.

Asentados los conceptos básicos en cada caso, el técnico responsable de la compra podrá optar por la solución que considere idónea, teniendo en cuenta que es prácticamente segura la situación en la cual habrá dos o más métodos o equipos clasificados en las mismas condiciones.

Por último y antes de continuar todos estos consejos o incluso los sistemas decisorios más complejos no valen de nada si el técnico responsable carece de la principal herramienta de trabajo: el sentido común. Otra importante herramienta es la experiencia; se recomienda al novato beber en las fuentes de los mayores que en cualquier Empresa o Entidad estarán siempre en disposición de dar buenos consejos.

La primera aproximación

Según Spitzer (1991), se plantean tres posibilidades de aproximación inicial:

A Elegir el más familiar: Aquel que se haya utilizado en aplicaciones previas en la Empresa y en todo caso numerosas veces.

B Elegir el mismo que en una aplicación previa similar a la actual: Es simple y no necesariamente mala. Sin embargo, puede ser que la selección anterior no fuese forzosamente la mejor. Las virtudes y los problemas se perpetúan sin posibilidad de progreso.

C Revisar y considerar exhaustivamente todos los factores que influyen en la selección. Esta táctica extrema implica una inversión en horas de los técnicos involucrados que debe ser justificada solo en las aplicaciones más críticas.

En función de lo complicado de la operación la metodología de la selección será un compromiso entre los tres citadas.

Siete consideraciones para la correcta selección

Se reproduce a continuación, un conjunto de siete consideraciones que permiten ir eliminando los tipos que no se ajusten a ellas. Este conjunto de "recetas" es debido a Mein Hold (1984):

1^a **Capacidad de los instrumentos para soportar las condiciones de trabajo:** presión, temperatura, radiación solar, sólidos en suspensión, riesgo de abrasión, aguas fecales y residuales, productos químicos disueltos, humedad externa, campos eléctricos y magnéticos, vibraciones y pulsaciones, transitorios de arranque y parada, riesgo de cavitación.

2^a **Capacidad del instrumento para medir con la exactitud (precisión) requerida en las especificaciones:** esto puede cubrir un punto nominal de funcionamiento o bien gama. Conviene estar bien seguros de que los extremos considerados también cumplen. Estos extremos no deben cubrir situaciones exóticas, o ser fijados caprichosamente. Estar, también, seguros de que la precisión se refiere al caudal medido o bien al fondo de escala.

Otras especificaciones sobre reproductibilidad, estabilidad y linealidad pueden ser útiles.

3^a **Comparación de los costes del equipo y de su instalación con el presupuesto disponible.** Esto implica una cosa obvia y que, muchas veces por excesivo optimismo, provoca no pocos disgustos: previamente hay que hacer bien el presupuesto. En grandes obras hidráulicas los equipos se compran al final, cuando los presupuestos están agotados, y

se asiste a la ejecución de auténticas chapuzas. Lo anormalmente barato, resulta casi siempre caro, y no es de recibo presionar mucho más a los suministradores de equipos que a los de hormigón.

4^a ***Incidencias del servicio, duración de vida, requisitos de mantenimiento, intervalos y coste.*** Se debe erradicar la filosofía pasada, según la cual un caudalímetro era eterno, lo cual, dicho sea de paso es una auténtica aberración. El mejor mantenimiento empieza durante la ejecución de la obra; prever la posibilidad de desmontar los equipos sin interrumpir el servicio es la primera acción a realizar.

Volviendo a esta consideración, se debe desconfiar de los equipos con pocas instrucciones de mantenimiento. Escuchar al suministrador sobre experiencias similares es importante. La necesidad de técnicos del suministrador (muchas veces extranjeros) para acudir al emplazamiento de medida puede costar más de la mitad del precio del equipo. Además la disponibilidad casi nunca es inmediata. Es preferible que las operaciones las realice el propio personal de la Empresa, lo que puede requerir formación adicional. Por último se debe tener en cuenta la necesidad de equipos de repuesto, completos o componentes.

5^a ***Estabilidad a largo plazo, y necesidad de recalibración periódica.*** Esta consideración está directamente conectada con la cuarta. El caso precedente se enfocaba de modo general. Este se centra en la conservación de las prestaciones y exactitud en las mediciones. En este sentido conviene ser claro: **TODOS LOS EQUIPOS TIENEN DERIVAS A LARGO PLAZO Y TODOS PRECISAN RECALIBRACION.** La cuestión clave es fijar unos intervalos razonables y estar seguros de que estos se corresponden con las variaciones en la estabilidad (deriva) que se producen en la realidad. Una cadencia de intervalos como la que sigue es la que recomendamos a nuestros clientes:

- Período de 1 año : 3 veces.
- Período de 2 años : 2 veces.
- Período de 3 años : resto.

6^a ***Pérdida de carga generada y modificaciones en el flujo aguas abajo.*** La pérdida de carga generada en exceso implica un mayor coste de la factura eléctrica en el caso de bombeos. Esto es particularmente cierto en las modernas instalaciones con variadores de frecuencia para los motores de las

bombas. La repercusión es menos crítica en el caso de transporte de agua por gravedad.

En este aspecto de la pérdida de carga, debe considerarse la producida por la utilización de RECTIFICADORES O ENDEREZADORES DE FLUJO que RECOMENDAMOS UTILIZAR SISTEMÁTICAMENTE.

De todas formas, con la pérdida de carga hay que aplicar los mismos criterios en el caudalímetro y en la tubería y resto de equipamiento. De nada sirve ser rigurosos con el caudalímetro y luego "racañar" en el diámetro de las conducciones.

En cuanto a modificaciones aguas abajo tales como vórtices, pulsaciones y deformaciones de flujo, esto reviste interés en instalaciones de depuración y sistemas auxiliares, donde la aparición de tales fenómenos puede ser indeseable. Por lo general se refieren a aplicaciones de pequeño diámetro.

7^a ***Adaptación a necesidades futuras, fácil conexión con equipos existentes, posibilidades de telemetría y telecontrol.*** Es claro que hay que "ver grande" y prever a priori futuras ampliaciones de tal forma que el servicio quede asegurado en toda circunstancia. A la inversa, la implementación en instalaciones actualmente en funcionamiento, limita bastantes veces la selección a un solo tipo de equipos. Por ejemplo, existen sistemas de taladro en tuberías en carga sin interrupción del servicio, lo cual es útil para cierto tipo de ultrasonidos, sondas Annubar ® o Pitot y, posiblemente, magnéticos de inserción. Por razones prácticas las sondas de ultrasonidos solo podrán ser emplazadas de esta forma, en diámetros inferiores a 1m.

Respecto a la posibilidad de enviar señales remotas directamente a un dispatching, o bien con control más distribuido a un PLC local, esto no es problema para, prácticamente, ningún equipo. Casi todos tiene uno o varios tipos de salida (4-20 mA, pulsos 0-10 V). Para estos casos es preferible utilizar los 4-20 mA por su mejor inmunidad al ruido. Las salidas en voltios tienen limitaciones en la longitud de los cables y las salidas en pulsos son siempre problemáticas en zonas con contactores y relés como es el caso de válvulas, automatismos, etc.

Pliego de especificaciones

Evidentemente cuando se va a comprar algo hay que saber lo que se quiere o en su defecto, cuales son las necesidades que se deben satisfacer.

Un cuestionario básico a rellenar puede ser el siguiente (si se desea algo más exhaustivo consultar Spitzer 1991, Norma BS 7405/1991):

1. Caudal objeto de medición: másico o volumétrico.
2. Fluido (en nuestro caso agua); Condiciones de proceso: presión y temperatura.
3. Tipo de agua: potable, bruta, residual.
4. Propiedades físico-químicas: contenido en materias sólidas, dureza, iones, compuestos disueltos y no disueltos.
5. El fluido es corrosivo o no.
6. Existe riesgo de burbujas o aire en suspensión (presencia de vórtices o, inyección de aire aguas arriba).
7. Medición en tubería en carga, parcialmente llena, intermitente o en canal abierto.
8. Disponibilidad de espacio para su instalación.
9. Rango de caudales: máximo, mínimo y nominal. Tener en cuenta la posible variación de condiciones de servicio.
10. Pérdida de carga admisible.
11. Contrapresión disponible aguas abajo.
12. Arranques/paradas frecuentes. Cuantificación de transitorios.
13. Exactitud (precisión) requerida.
14. Medición de caudal instantáneo y/o totalización.
15. Señal de salida.
16. Necesidades de visualización y transmisión de datos.
17. Coste del caudalímetro.
18. Coste de su instalación.
19. Coste de la calibración.
20. Coste y factibilidad del mantenimiento y recalibración.

Hojas de especificaciones: Cuando el propietario no posea un procedimiento propio se puede recurrir a las hojas de especificaciones desarrolladas por ISA que son lo suficientemente exhaustivas para ayudar en esta tarea (Documento ISA S20). ISA ha desarrollado especificaciones para diafragmas, rotámetros, magnéticos, turbinas y desplazamiento positivo. Spitzer (1991) propone a su vez hojas suplementarias para caudalímetros másicos y de tipo canal abierto. Se echa en falta una especificación similar para los ultrasonidos.

Criterios de selección

Se ha procurado aportar, hasta ahora, información que sirva para fijar ideas a la hora de comprar. En la parte final de este capítulo desarrollamos los criterios citados al inicio, en base a tablas y gráficas comparativas para los

distintos tipos definidos en el segundo apartado (*Clasificación y Principio de Medida*).

BIBLIOGRAFÍA

- Bailey, S.J. (1980) *"Trade-offs complicate decisions in selecting flowmeter"*. Control Engineering, April.
- Baker-Counsell, J. (1985) *"Flowmeter selection: Expert help is on its way"*. Process Engineering, October.
- Benard C.J. (1988) *"Handbook of fluid flowmetering"*. Trade and Technical Press. Surrey, UK.
- Cascetta, F., Cignolo, G., Goria, R., Martini, G., Rivetti, A. y Vigo, P. *"Experimental intercomparison of Coriolis mass Flowmeters"*.
- CEI Code nº 41/1991 *"Code international concernant les essais de réception sur place des turbines hydraulique, pompes d'accumulation et pompes - turbines, en vue de la détermination de leurs performances hydrauliques"*.
- CEI, Publicación nº 193 (1965) *"Code International concernant les essais de réception sur modèle des turbines hydrauliques"*. Publicación base y Modificación nº 1.
- CEI, Primer complemento nº 193A (1972) a la Publicación nº 193 *"Code International concernant les essais de réception sur modèle des turbines hydrauliques"*.
- CEI, Publicación nº 497 (1976) -Norma- *"Code International concernant les essais de réception sur modèle réduit des pompes d'accumulation"*
- " CEI, Technical Committee nº 4 (Turbines ydrauliques) WG23 *"Revision of IEC publications nº 193 and 497"*
- Comolet R. (1982) *"Mécanique expérimentale des fluides"* Editorial Masson.
- Directiva CEE 75/33 de 17 de Diciembre de 1974 *"Council Directive on the approximation of the laws of the Member States relating to cold water meters"*.
- Documento ISA S20 *"Specification forms for process measurement and control instruments, primary elements and control valves"*.
- Hall, J.T. *"Guide to flow measurement"*. Instruments and Control Systems. February 1993.
- Higham, E.H. Foxboro Great Britain Ltd, (1985) *Internal Communication, April*.
- Idel'Cik (1969) *"Mémento des pertes de charge"*. Eyrolles. Paris.
- ISO 3966-1977 *"Mesure du débit des fluides dans des conduites fermées. Méthode d'exploration du champ de vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles"*.
- Kopp, J.G. (1979) *ISA flow measurement course*. University of Delaware. April.

FAMILIA CAUDALIMETRO	TIPO CAUDALIMETRO	SUSCEPTIBILIDAD AL LIQUIDO					PRESION [bar]	TEMPERATURA [°C]
		AGUA FRIA	AGUA CALIENTE	AGUAS CARGADAS	AGUAS RESIDUALES	AGUA + AIRE		
1.- DEPRIMOGENOS	Placa de orificio	S	S	R	R	R	400	+650
	Venturi	S	S	R	R	R	400	+650
	Tobera	S	S	R	R	R	400	+650
2.- OTROS DEP.	Rotámetro	S	L,D	N	N	R	700	-80 a +400
	Pitot	S	S	N	N	N	400	+540
3.- D. POSITIVO	Paletas	S	N	N	N	N	100	-30 a +200
	Oval	S	L,D	N	N	N	100	-15 a +290
	Pistón rotativo	S	L,D	N	N	N	170	-40 a +170
4.- TURBINA	Normal	S	S	N	N	N	3500	-268 a +530
	Inserción	S	S	N	N	N	250	-50 a 430
5.- VORTEX		S	S	N	N	N	260	-200 a +430
6.- ELECTROMAG.	Normal	S	R	S	S	L,D	300	-60 a +220
	Inserción	S	R	R	R	L,D	20	5 a +25
7.- ULTRASONIDOS	Doppler	S	L,D	S	S	L,D	1000	-20 a +80
	Tiempo tránsito	S	L,D	R	N	N	200	-200 a +250
	Diferencia frec.	S	L,D	N	N	N	200	-200 a +250
	Clamp-On	S	L,D	R	N	N	1000	-200 a +300
8.- MASICOS		S	L,D	R	N	R	390	-240 a 400

CODIGO : S : Siempre N : Nunca L : Limitaciones R : Con reparos D : Depende de fabricantes.

Tabla N^o 5. Fluido (líquido) de medida.

FAMILIA	TIPO	PRESTACIONES METROLOGICAS DE LOS EQUIPOS							
		REFER.	LINEARIDAD [%]	REPRODUCT. [%]	PRECISION [%]	RANGO	MAGNITUD MEDIDA	PERDIDA DE CARGA [1-5]	TIEMPO DE RESPUESTA [S]
1.- DEPRIMOGENOS	Placa Orificio	–	*	*	1 a 10,0	3:1 a 10:1	Q _v	3 - 4	*
	Venturi	–	*	*	1 a 10,0	3:1 a 10:1	Q _v	2	*
	Tobera	–	*	*	1 a 10,0	3:1 a 10:1	Q _v	2 - 3	*
2.- OTROS DEP.	Rotametro	FE	1 a 5	0,5 a 1	1,6 a 30,0	10:1	Q _v	3	–
	Pitot	–	*	*	2,5 a 10,0	*	V _p ,V _m	1	*
3.- D. POSITIVO	Paletas	M	0,1 a 0,3	0,01 a 0,05	0,3 a 3,0	10:1 a 20:1	Vol	5	0,5
	Oval	M	0,25	0,05 a 0,1	0,3 a 3,0	10:1 a 20:1	Vol	4	0,5
	Pistón	M	0,5 a 1,0	0,2	1 a 4,0	10:1 a 250:1	Vol	5	0,5
4.- TURBINA	Normal	M	0,15 a 1,0	0,02 a 0,5	0,4 a 4,0	5:1 a 10:1	Q _v	3	0,0015
	Inserción	M	0,25 a 5,0	0,1 a 2,0	2,5 a 10,0	10:1 a 40:1	V _p	1	0,0015
5.- VORTEX		M	1,0	0,1 a 1,0	0,6 a 3,0	4:1 a 40:1	Q _v	2 - 3	0,5
6.- ELECTROMAG.	Normal	M	0,5 a 1,0	0,05 a 0,2	0,6 a 3,0	10:1 a 100:1	V _m →Q _v	1	0,2
	Inserción	M	2,5 a 4,0	0,1 a 1,0	2,5 a 10,0	10:1	V _p	1	–
7.- ULTRASONIDOS	Doppler	M	–	0,2 a 1,0	3,0 a 30,0	5:1 a 25:1	V _m -Q _v	1	–
	Tiempo tránsito	M	0,1 a 0,5	0,2 a 1,0	0,6 a	10:1 a 300:1	V _m -Q _v	1	0,02 a 2
	Diferencia free.	M	0,5 a 1,0	0,2 a 1,0	1,5 a 5,0	15:1	V _m -Q _v	1	10 a 120
	Clamp-On	M	0,5 a 1,0	0,2 a 1,0	1,0 a 4,0	15:1	V _m -Q _v	1	0,2 a 10
8.- MASICOS		M	–	0,1 a 0,25	0,3 a 3,0	10:1 a 100:1	Q _m	2 - 5	0,1 a 3600

* Depende del transductor de presión utilizado | Pérdida de carga : 1 (baja); 5 (alta)

CODIGO : FE : Fondo de escala M : Caudal medido Q_v : Caudal Volumétrico Q_m : Caudal Másico
V_m : Velocidad promedio V_p : Velocidad puntual Vol : Volumen

Tabla nº 6. Prestaciones del caudalímetro.

FAMILIA CAUDALIMETRO	TIPO CAUDALIMETRO	CONDICIONES DE INSTALACION						
		(*) Direc.	(*) Filtro	(*) Orientación	TRAMO RECTO A. MINIMO	ARRIBA [D](*) MAXIMO	TRAMO RECTO A ABAJO [D]	(**) DIAMETRO [mm]
1.- DEPRIMOGENOS	Placa Orificio	(B)		Todas	5	80	2/8	más de 6
	Venturi			Todas	1	30	4	más de 6
	Tobera			Todas	5	80	2/8	más de 6
2.- OTROS DEP.	Rotametro	(B)		VAB	1	1	1	2 a 150
	Pitot			Todas	2	25	3	más de 25
3.- D. POSITIVO	Paletas		R	Todas	1	1	1	25 a 250
	Oval		R	H	1	1	1	4 a 400
	Pistón		R	Todas	1	1	1	6 a 800
4.- TURBINA	Normal	(B)	R	Todas	5	30	3/10	5 a 600
	Inserción	(B)		Todas	10	80	5/10	más de 75
5.- VORTEX				Todas	1	40	5	12 a 300
6.- ELECTROMAG.	Normal	(B)		Todas	1	10	1/5	más de 2
	Inserción	(B)		Todas	25	25	5	más de 100
7.- ULTRASONIDOS	Doppler	(B)		Todas	10	30	5	más de 25
	Tiempo tránsito	(B)		Todas	10	50	5	más de 4
	Diferencia frec.	(B)		Todas	10	50	5	más de 4
	Clamp-On	(B)		Todas	10	50	5	más de 25
8.- MASICOS				Todas	1	1	1	6 a 150

(*) Consultar con el fabricante (**) Son datos orientativos que dependen del fabricante y rectificador . (***) Son diámetros posibles. Los normalizados pueden ser inferiores.

CODIGOS : B : Bidireccional R : Recomendable VAB : Vertical hacia arriba H : Horizontal

Tabla n^o 7. Condiciones de instalación.

FAMILIA CAUDALIMETRO	TIPO CAUDALIMETRO							
		EFEECTO TEMPERATURA	EFEECTO PRESION	SEGURIDAD INTRINSECA (*)	PROOF EX+ AGUA (*)	INTERFERENC. E.M.	VIBRACIONES	PULSACIONES
1.- DEPRIMOGENOS	Placa Orificio	4	3	D	D	1	1	4
	Venturi	3	3	D	D	1	1	4
	Tobera	3	3	D	D	1	1	4
2.- OTROS DEP.	Rotametro	3	3	D	D	1	3	5
	Pitot	3	1	D	D	1	5	5
3.- D. POSITIVO	Paletas	4	2	D	D	1 - 3	3	1
	Oval	4	2	D	D	1 - 3	3	1
	Pistón	4	2	D	D	1 - 3	3	1
4.- TURBINA	Normal	3	2	D	D	4	5	5
	Inserción	3	2	D	D	4	5	5
5.- VORTEX		2	2	D	D	4	5	5
6.- ELECTROMAG.	Normal	1	1	D	D	4	3 - 5	1
	Inserción	1	1	D	D	4	3 - 5	1
7.- ULTRASONIDOS	Doppler	3	2	D	D	4	3 - 5	1
	Tiempo tránsito	3	2	N	D	4	3 - 5	1
	Diferencia frec.	3	2	N	D	4	3 - 5	1
	Clamp-On	3	2	D	D	4	3 - 5	1
8.- MASICOS		1	1	D	D	4	5	4

(*) Consultar con el fabricante | Código de Influencia 1 : Bajo 5 : Alto
 Código : D : Disponible N : No disponible

Tabla n° 8. Condiciones ambientales.

FAMILIA CAUDALIMETRO	TIPO CAUDALIMETRO	CONDICIONANTES ECONÓMICOS			
		COSTES INSTALACION	COSTES OPERACION	COSTES MANTENIMIENTO	COSTES RESTANTES
1.- DEPRIMOGENOS	Placa Orificio	2 - 4	3	2 - 3	1
	Venturi	4	3	3	2
	Tobera	2 - 4	3	3	2
2.- OTROS DEP.	Rotametro	1 - 2	2	2	2
	Pitot	2	3	3	2
3.- D. POSITIVO	Paletas	1 - 4	4	4	5
	Oval	1 - 4	4	4	5
	Pistón	1 - 4	3	4	3
4.- TURBINA	Normal	1 - 3	3	4	4
	Inserción	2	3	3	2
5.- VORTEX		3	3	3	3
6.- ELECTROMAG.	Normal	3	3	3	3
	Inserción	2	3	3	2
7.- ULTRASONIDOS	Doppler	1	1	3	2
	Tiempo tránsito	1 - 3	2	2	2
	Diferencia frec.	1 - 3	2	2	2
	Clamp-On	1	2	3	2
8.- MASICOS		3	4	4	3
Código : 1 es bajo 5 es alto					

Table n² 9. Factores económicos.

- LABEIN (1993) "*Selección, calibración, instalación y utilización de caudalímetros y contadores*". Curso de medida de caudal. Bilbao, Noviembre.
- Lefevre J. (1986) "*Mesure des débits et des vitesses des fluids*" Ed. Masson. Paris.
- Lowell, F.C. y Hirschfeld, F. (1979) "*Acoustic flowmeters for pipelines*". Mechanical Engineering. October.
- Mein Hold, T.F. (1984) "*Liquid flowmeters. An overview of types and capabilities plus guidelines on selection, installation and maintenance*". Plant Engineering. November.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1988) "*5084. Orden de 28 de Diciembre de 1988 por la que se regulan los contadores de agua fría*".
- NEL (1994) "*Calibration techniques on Coriolis Mass Flowmeters*". Proposal of project. BCR. Brussels, April.
- Norma BS 1042.Section 1.2/1989 "*Measurement of fluid flow in closed conduits. Specification for squareedged orifice plates and nozzles (with drain holes, in pipes below 50 mm diameter, as inlet and outlet devices) and other orifice plates*".
- Norma BS 7405/1991 "*Guide to Selection and application of flowmeters for measurement of fluid flow in closed conduits*".
- Norma ISO 2186/1973 "*Débit des fluides dans les conduites fermées. Liaisons pour la transmission du signal de pression entre les elements primaires et secondaires*".
- Norma ISO 5167-1/1991 "*Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full*".
- Norma ISO 5168/1978 "*Measurement of fluid flow. Estimation of uncertainty of a flow-rate measurement*".
- OIML R 105 (1993) "*Direct mass flow measuring systems for quantities of liquids*".
- Plache, K.O. (1979) "*Coriolis gyroscopic flowmeter*". Mechanical Engineering. Vol 101. No. 3.
- Sedille, M. (1967) "*Turbomachines hydrauliques et thermiques*". Editorial Masson. Paris.
- Shafer M.R. (1961) "*Performance characteristics of turbine flowmeters*". ASME Winter Annual Meeting.
- Spitzer D.W. -ed- (1991) "*Flow measurement*". ISA. North Carolina, USA.