

## **TABLA DE CONTENIDO**

### **MEDICION DE CAUDALES EN FLUJO A PRESIÓN Y A SUPERFICIE LIBRE**

#### **1. AFORO DE CAUDAL EN SISTEMAS A PRESIÓN**

##### **1.1. Factores Para La Elección Del Tipo De Medidor De Fluido**

##### **1.2. TIPOS DE MEDIDORES DE CAUDAL**

###### **1.2.1. Medidores De Cabeza Variable**

*1.2.1.1. Tubo Ventura*

*1.2.1.2. Placa Orificio*

*1.2.1.3. Boquilla O Tobera De Flujo*

###### **1.2.2. Medidor De Turbina**

###### **1.2.3. Sondas De Velocidad**

*1.2.3.1. Tubo Pitot*

#### **1.3. MACRO–DEDIDORES Y MICRO– MEDIDORES**

*1.3.1 Contador Tipo Woltmann*

*1.3.2 Contador Chorro Multiple*

*1.3.3. Chorro Unico*

*1.3.4. Contador Hélice Tangencial*

*1.3.5. Válvula–Contadora*

*1.3.6. Contador Por Ultrasonidos. (Caudalimetro Ultrasónico)*

*1.3.7. Contador Electromagnético*

#### **2. AFORO DE CAUDAL EN SISTEMAS A SUPERFICIE LIBRE**

##### **2.1. Formas Hidráulicas Y Medición De La Descarga**

*2.1.2. Canaletas*

*2.1.3. Compuertas*

### **MEDICION DE CAUDALES EN FLUJO A PRESIÓN Y A SUPERFICIE LIBRE**

# 1. AFORO DE CAUDAL EN SISTEMAS A PRESIÓN

## 1.1. Factores Para La Elección Del Tipo De Medidor De Fluido

- *Rango*: los medidores disponibles en el mercado pueden medir flujos desde varios mililitros por segundo (ml/s) para experimentos precisos de laboratorio hasta varios miles de metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s) para sistemas de irrigación de agua o agua municipal o sistemas de drenaje. Para una instalación de medición en particular, debe conocerse el orden de magnitud general de la velocidad de flujo así como el rango de las variaciones esperadas.
- *Exactitud requerida*: cualquier dispositivo de medición de flujo instalado y operado adecuadamente puede proporcionar una exactitud dentro del 5 % del flujo real. La mayoría de los medidores en el mercado tienen una exactitud del 2% y algunos dicen tener una exactitud de más del 0.5%. El costo es con frecuencia uno de los factores importantes cuando se requiere de una gran exactitud.
- *Pérdida de presión*: debido a que los detalles de construcción de los distintos medidores son muy diferentes, éstos proporcionan diversas cantidades de pérdida de energía o pérdida de presión conforme el fluido corre a través de ellos. Excepto algunos tipos, los medidores de fluido llevan a cabo la medición estableciendo una restricción o un dispositivo mecánico en la corriente de flujo, causando así la pérdida de energía.
- *Tipo de fluido*: el funcionamiento de algunos medidores de fluido se encuentra afectado por las propiedades y condiciones del fluido. Una consideración básica es si el fluido es un líquido o un gas. Otros factores que pueden ser importantes son la viscosidad, la temperatura, la corrosión, la conductividad eléctrica, la claridad óptica, las propiedades de lubricación y homogeneidad.
- *Calibración*: se requiere de calibración en algunos tipos de medidores. Algunos fabricantes proporcionan una calibración en forma de una gráfica o esquema del flujo real versus indicación de la lectura. Algunos están equipados para hacer la lectura en forma directa con escalas calibradas en las unidades de flujo que se deseen. En el caso del tipo más básico de los medidores, tales como los de cabeza variable, se han determinado formas geométricas y dimensiones estándar para las que se encuentran datos empíricos disponibles. Estos datos relacionan el flujo con una variable fácil de medición, tal como una diferencia de presión o un nivel de fluido.

## 1.2. TIPOS DE MEDIDORES DE CAUDAL

### 1.2.1. Medidores De Cabeza Variable

El principio básico de estos medidores es que cuando una corriente de fluido se restringe, su presión disminuye por una cantidad que depende de la velocidad de flujo a través de la restricción, por lo tanto la diferencia de presión entre los puntos antes y después de la restricción puede utilizarse para indicar la velocidad del flujo. Los tipos más comunes de medidores de cabeza variable son el tubo venturi, la placa orificio y el tubo de flujo.

#### 1.2.1.1. Tubo Venturi

El flujo desde la sección principal en la sección 1 se hace acelerar a través de la sección angosta llamada garganta, donde disminuye la presión del fluido, después se expande el flujo a través de la porción divergente al mismo diámetro que la tubería principal. En las paredes de la tubería, secciones 1 y 2, se encuentran ubicados ramificadores de presión, unidos a un manómetro diferencial.

Figura 1. Tubo venturi

Según la ecuación de energía y de continuidad, se puede calcular el caudal de la siguiente forma:

El término hL es la pérdida de energía del fluido conforme este corre de la sección 1 a la sección 2. El valor

de  $h_L$  debe determinarse de forma experimental, es conveniente reemplazarlo por un coeficiente de descarga  $C$ . El valor del coeficiente  $C$  depende del número de Reynolds del flujo en la tubería principal y de la geometría real del medidor:

$$C = f(D, \beta, NR),$$

Donde  $\beta = d/D$ , el cociente del diámetro de la garganta y el diámetro de la sección de la tubería principal.

Figura 2. Curva típica de  $C$  del tubo venturi versus el número de Reynolds

Es un medidor mucho más preciso que la placa orificio y el tubo de flujo, pues dada su geometría, las líneas de flujo que se juntan en la garganta lo hacen de tal manera que incluso otorga excelentes mediciones aún si se está trabajando con líquidos viscosos o con líquidos con material en suspensión pues en el cuello del venturi es muy difícil que queden sedimentos adheridos, dado que las velocidades son mucho más grandes.

El tubo se puede instalar en cualquier posición: horizontal, vertical o inclinada, debe introducirse en un tramo recto de la línea de tubería y tan lejano, hacia abajo como sea posible, de cualquier origen de trastorno en el flujo, tal como reductores, válvulas, y grupos de conexiones. Para los largos mínimos de tubería recta que deben preceder al tubo de medición, se debe consultar una hoja de instrucciones de "Tramos de tubería para medidores".

#### 1.2.1.2. Placa Orificio

Cuando dicha placa se coloca en forma concéntrica dentro de una tubería, esta provoca que el flujo se contraiga de repente conforme se aproxima al orificio y después se expande de repente al diámetro total de la tubería. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta y la rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio. El valor real del coeficiente de descarga  $C$  depende de la ubicación de las ramificaciones de presión, igualmente es afectado por las variaciones en la geometría de la orilla del orificio. El valor de  $C$  es mucho más bajo que el del tubo venturi o la boquilla de flujo puesto que el fluido se fuerza a realizar una contracción repentina seguida de una expansión repentina.

Figura 3. Placa orificio

Algunos tipos de placas orificios son los siguientes:

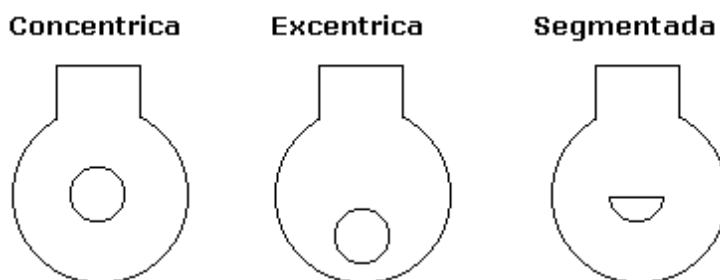


Figura 4. Tipos de placas orificios

La concéntrica sirve para líquidos, la excéntrica para los gases donde los cambios de presión implican condensación, cuando los fluidos contienen un alto porcentaje de gases disueltos.

La gran ventaja de la placa de orificio en comparación con los otros elementos primarios de medición, es que debido a la pequeña cantidad de material y al tiempo relativamente corto de maquinado que se requiere en su manufactura, su costo llega a ser comparativamente bajo, aparte de que es fácilmente reproducible, fácil de

instalar y desmontar y de que se consigue con ella un alto grado de exactitud. Además que no retiene muchas partículas suspendidas en el fluido dentro del orificio.

El uso de la placa de orificio es inadecuado en la medición de fluidos con sólidos en suspensión pues estas partículas se pueden acumular en la entrada de la placa., el comportamiento en su uso con fluidos viscosos es errático pues la placa se calcula para una temperatura y una viscosidad dada y produce las mayores pérdidas de presión en comparación con los otros elementos primarios. Las mayores desventajas de este medidor son su capacidad limitada y la pérdida de carga ocasionada tanto por los residuos del fluido como por las pérdidas de energía que se producen cuando se forman vórtices a la salida del orificio.

### 1.2.1.3. Boquilla O Tobera De Flujo

Es una contracción gradual de la corriente de flujo seguida de una sección cilíndrica recta y corta. Debido a la contracción pareja y gradual, existe una pérdida muy pequeña. A grandes valores de Reynolds (106)  $C$  es superior a 0.99.

La tobera de flujo, es un instrumento de medición que permite medir diferencial de presiones cuando la relación de  $\beta$ , es demasiado alta para la placa orificio, esto es, cuando la velocidad del flujo es mucho mayor y las pérdidas empiezan a hacerse notorias. Luego, al instalar un medidor de este tipo se logran mediciones mucho más exactas. Además este tipo de medidor es útil para fluidos con muchas partículas en suspensión o sedimentos, su forma hidrodinámica evita que sedimentos transportados por el fluido queden adheridos a la tobera.

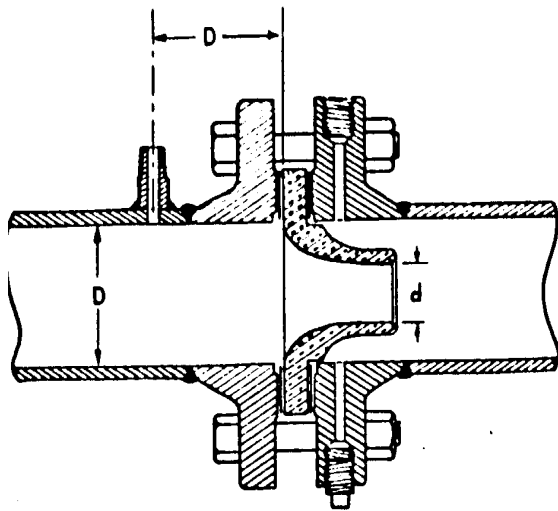


Fig. B1699

Figura 5. Boquilla o tobera de flujo

La instalación de este medidor requiere que la tubería donde se vaya a medir caudal, este en línea recta sin importar la orientación que esta tenga.

- **Recuperación de la presión.** La caída de presión es proporcional a la pérdida de energía. La cuidadosa alineación del tubo venturi y a expansión gradual larga después de la garganta provoca un muy pequeño exceso de turbulencia en la corriente de flujo. Por lo tanto, la pérdida de energía es baja y la recuperación de presión es alta. La falta de una expansión gradual provoca que la boquilla tenga una recuperación de presión más baja, mientras que la correspondiente al orificio es aún más baja. La mejor recuperación de presión se obtiene en el tubo de flujo.

## 1.2.2. Medidor De Turbina

El fluido provoca que el rotor de la turbina gire a una velocidad que depende de la velocidad de flujo. Conforme cada una de las aspas de rotor pasa a través de una bobina magnética, se genera un pulso de voltaje que puede alimentarse de un medidor de frecuencia, un contador electrónico u otro dispositivo similar cuyas lecturas puedan convertirse en velocidad de flujo. Velocidades de flujo desde 0.02 l/min hasta algunos miles de l/min se pueden medir con fluxómetros de turbina de varios tamaños.

### • Sondas De Velocidad

Algunos dispositivos disponibles comercialmente miden la velocidad de un fluido en un lugar específico más que una velocidad promedio.

#### 1.2.3.1. Tubo Pitot

Cuando un fluido en movimiento es obligado a pararse debido a que se encuentra un objeto estacionario, se genera una presión mayor que la presión de la corriente del fluido. La magnitud de esta presión incrementada se relaciona con la velocidad del fluido en movimiento. El tubo pitot es un tubo hueco puesto de tal forma que los extremos abiertos apuntan directamente a la corriente del fluido. La presión en la punta provoca que se soporte una columna del fluido. El fluido en o dentro de la punta es estacionario o estancado llamado punto de estancamiento.

Utilizando la ecuación de la energía para relacionar la presión en el punto de estancamiento con la velocidad de fluido: si el punto 1 está en la corriente quieta delante del tubo y el punto s está en el punto de estancamiento, entonces,

$p_1$  = presión estática en la corriente de fluido principal

$p_1/$  = cabeza de presión estática

$p_1$  = presión de estancamiento o presión total

$p_s/$  = cabeza de presión total

$v^2 / 2g$  = cabeza de presión de velocidad

Solo se requiere la diferencia entre la presión estática y la presión de estancamiento para calcular la velocidad, que en forma simultánea se mide con el tubo pitot estático.

Figura 6. Tubo pitot (izquierda), tubo pitot estático (derecha).

## 1.3. MACRO-DEDIDORES Y MICRO- MEDIDORES

Atendiendo a la tipología y características de funcionamiento, se pueden clasificar en:

- Contadores para aguas brutas (aguas con sólidos en suspensión), ó redes de distribución de aguas sin filtrados. Su dispositivo de funcionamiento se basa en mecanismos electrónicos, y los modelos más utilizados son: los contadores por ultrasonidos, y los contadores electromagnéticos. Estos modelos suelen instalarse en la toma principal de abastecimiento ó suministro de aguas (Red en Alta), tienen un costo elevado, necesitan alimentación eléctrica, pero no necesitan filtros y tienen una precisión muy buena

- Contadores para aguas filtradas (aguas de pozos, de riegos con filtrados colectivos automáticos, ó decantadas), admiten limos y partículas pequeñas. Funcionan por mecanismos de turbina ó hélice. En esta gama se pueden utilizar los contadores:
  - ◆ Contador Tipo Woltmann.
  - ◆ Contador Chorro Múltiple.
  - ◆ Contador de Hélice Tangencial.
  - ◆ Válvula –Contadora ó Válvula Volumétrica
  - ◆ Contador Tipo Proporcional.

### *1.3.1 Contador Tipo Woltmann*

Este contador dispone de una turbina en eje horizontal, que al paso del agua acciona unos engranajes que hacen reflejar el caudal de paso en una relojería dispuesta en una esfera seca, totalizadora, por medio de una transmisión magnética. Se comercializa en calibres desde 2" / DN–50 mm hasta DN–500 mm./ 20". Existe otra versión de Contador tipo Woltmann con turbina en EJE VERTICAL, disponible por varias marcas, en calibres desde DN–50 mm. a DN–100 mm. (aprox.).

Es ampliamente comercializado en el mercado con varios proveedores, aunque dominan el mercado, filiales de multinacionales.

#### Características

- El medidor incluye un elemento de medida desmontable e intercambiable.
- Registro indicador de volumen de cámara seca y sellado herméticamente. El registro se puede orientar a cualquier posición (360o) para su fácil lectura.

Puede disponer de hasta un total de 3 accesorios para la transmisión de pulsos eléctricos:

Un sensor opto–electrónico y dos sensores tipo Reed–Switch.

Convertidores de pulsos y contadores digitales están disponibles bajo pedido.

La transmisión magnética mantiene el registro completamente separado del agua.

Únicamente la turbina y el eje de transmisión están en contacto directo con el agua.

Cumple o sobrepasa todas las normas de medición y especificaciones exigidas por los organismos internacionales incluyendo la ISO 4064 clase B, EEC, etc.

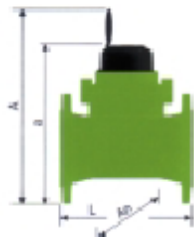
Registro en galones americanos disponible bajo pedido.

Baja pérdida de carga.

Presión de trabajo: 16 Bar.

Máxima temperatura de trabajo: 50 oC.

## DIMENSIONES Y PESOS



Díametro Nominal	DN	pulgadas mm	2" 50	2 1/2" 65	3" 80	4" 100	5" 125	6" 150	8" 200
Longitud	L	mm	200	200	225	250	250	300	350
Altura (Tapa abierta)	A	mm	352	362	367	382	392	443	474
Altura (Tapa cerrada)	a	mm	275	285	290	305	315	366	397
Ancho	An	mm	170	190	190	230	290	280	340
Peso		kg	12,0	13,5	16,0	19,0	20,3	38,0	52,0

### 1.3.2 Contador Chorro Multiple

Este Contador dispone una turbina en eje vertical, con un difusor previo en la entrada, que al paso del agua impacta de forma múltiple sobre la turbina, permitiendo a los engranajes actuar sobre una transmisión magnética, para reflejar la medida del volumen totalizado (acumulado), en su esfera correspondiente. Se comercializa desde 20 mm/ 3/4" hasta DN-50 mm/2".

Los contadores de agua de chorro múltiple y los de grandes caudales son concebidos para trabajos de mayor envergadura. Los contadores de agua caliente para viviendas son de turbina y chorro múltiple, muy reconocidos, sólidos y de larga vida útil, y los de grandes caudales son de tipo Woltman, lo que les proporciona una destacada exactitud de medición incluso bajo condiciones extremas.

#### Características

Los contadores de agua de chorro múltiple son concebidos como contadores de tipo seco con acoplamiento magnético para el registro del consumo de agua fría y caliente. Estos contadores se caracterizan por una pérdida de presión extremadamente baja. Los contadores para grandes caudales son de tipo seco con acoplamiento magnético. Gracias a la suspensión de baja fricción y a prueba de desgaste de la turbina (metal duro/zafiro), se garantiza un alto grado de exactitud en todo el rango de mediciones incluso bajo condiciones extremas.

#### Ventajas

- Alto grado de exactitud en todo el campo de medición en condiciones extremas;
- Aparatos técnicamente avanzados, precisos y de larga vida útil;
- Fácil montaje
- Sistema de medición completo, experimentado y reconocido para agua fría y caliente en viviendas;
- Sustitución fácil gracias a la separación del contador de los elementos de montaje;
- Amplio espectro de aplicaciones gracias a la versatilidad de las variantes;
- Integración sin problemas en sistemas de telegestión, gracias a la variante con salida de contacto, así como una variante apta para radio y M-Bus;
- Medición exacta y alta fiabilidad.

### 1.3.3. Chorro Unico

Es un contador de turbina de chorro único con acoplamiento magnético y totalizador de rodillos. El acoplamiento magnético transmite el giro de la turbina de forma fiable al totalizador.

#### Ventajas:

- Alto grado de fiabilidad y larga vida gracias a una tecnología madura y fiable;
- Un contador de agua versátil a bajo coste.

- Fiabilidad y larga vida útil, gracias a una tecnología madura y sólida;
- Tiene incorporado un dispositivo contra manipulaciones, para mayor seguridad;
- Integración sin problemas en sistemas automáticos de lectura gracias a la disponibilidad de una versión con salida de contacto.

#### *1.3.4. Contador Hélice Tangencial*

Este contador es confundido a menudo con el contador tipo Woltmann, ya que su apariencia externa es semejante. Sin embargo su diseño es diferente, se basa en la disposición de una turbina ó hélice de paletas, colocada en eje transversal al sentido de avance del agua, y de pequeño tamaño, colocada en la parte superior del tubo medidor.

Se comercializa en calibres desde 2" / DN–50 mm hasta DN–250 mm./ 10".

Figura 9. Corte longitudinal de contador Hélice Tangencial (izquierda), Vista exterior (centro), y Vista Frontal (derecha).

#### *1.3.5. Válvula–Contadora*

Este contador también se confunde con el contador tipo Woltmann, y nuevamente se trata de un diseño diferente. En este caso se parte posiblemente de un contador tipo Woltmann con turbina en eje vertical, diseño al que se le ha incluido un mecanismo de cierre y regulación hidráulica accionado por membrana ó pistón, con circuitos de microtubos y pilotos hidráulicos automáticos. Es decir, que a la función y diseño de un contador, se le ha dado una ó más funciones como válvula hidráulica, en un único elemento compacto.

Se comercializa en calibres desde 1"1/2 / DN–40 mm. hasta DN–200 mm./8".

Figura 11. Válvula Contadora ó Volumétrica.

#### *1.3.6. Contador Por Ultrasonidos. (Caudalímetro Ultrasonico)*

Consta de unas Sondas, que trabajan por pares, como emisor y receptor. La placa piezo–cerámica de una de las sondas es excitada por un impulso de tensión, generándose un impulso ultrasónico que se propaga a través del medio líquido a medir, esta señal es recibida en el lado opuesto de la conducción por la segunda sonda que lo transforma en una señal eléctrica. El convertidor de medida determina los tiempos de propagación del sonido en sentido y contrasentido del flujo en un medio líquido y calcula su velocidad de circulación a partir de ambos tiempos. Y a partir de la velocidad se determina el caudal.

Además necesita alimentación eléctrica.

Hay dos tipos de medidores de flujo por ultrasonidos:

- Doppler: Miden los cambios de frecuencia causados por el flujo del líquido. Se colocan dos sensores cada uno a un lado del flujo a medir y se envía una señal de frecuencia conocida a través del líquido. Sólidos, burbujas y discontinuidades en el líquido harán que el pulso enviado se refleje, pero como el líquido que causa la reflexión se está moviendo la frecuencia del pulso que retorna también cambia y ese cambio de frecuencia será proporcional a la velocidad del líquido.
- Tránsito: Tienen transductores colocados a ambos lados del flujo. Su configuración es tal que las ondas de sonido viajan entre los dispositivos con una inclinación de 45 grados respecto a la dirección



de flujo del líquido. La velocidad de la señal que viaja entre los transductores aumenta o disminuye con la dirección de transmisión y con la velocidad del líquido que está siendo medido. Tendremos dos señales que viajan por el mismo elemento, una a favor de la corriente y otra en contra de manera que las señales no llegan al mismo tiempo a los dos receptores. Se puede hallar una relación diferencial del flujo con el tiempo transmitiendo la señal alternativamente en ambas direcciones. La medida del flujo se realiza determinando el tiempo que tardan las señales en viajar por el flujo.

### Características

- Temperatura ambiente 0° 55°
- Temperatura de almacenamiento -20° 150°
- Humedad <80%
- Temperatura del líquido 20° 150°
- Max presión de conexión 25 bar
- Las medidas no se ven afectadas por la presencia de sustancias químicas, partículas contaminantes..
- Tienen un alto rango dinámico
- Diseño compacto y pequeño tamaño
- Costes de instalación y mantenimiento pequeños
- Las medidas son independientes de la presión y del líquido a medir
- No se producen pérdidas de presión debido al medidor
- No hay riesgos de corrosión en un medio agresivo
- Aunque el precio no es bajo, sale rentable para aplicaciones en las que se necesite gran sensibilidad (flujos corporales) o en sistemas de alta presión.
- Operan en un gran rango de temperaturas (-10° a 70°) (-30° 180°)[3] dependiendo del sensor y se ofrece la posibilidad de comprar sensores con características especiales para aplicaciones concretas.
- Las medidas son no invasivas (especialmente importantes cuando hablamos del cuerpo humano)
- Ofrecen una alta fiabilidad y eficiencia

#### 1.3.7. Contador Electromagnético

Su principio de medida esta basado en la Ley de Faraday, la cual expresa que al pasar un fluido conductor a través de un campo magnético, se produce una fuerza electromagnética (F.E.M.), directamente proporcional a la velocidad del mismo, de donde se puede deducir también el caudal.

Está formado por un tubo, revestido interiormente con material aislante. Sobre dos puntos diametralmente opuestos de la superficie interna se colocan dos electrodos metálicos, entre los cuales se genera la señal eléctrica de medida. En la parte externa se colocan los dispositivos para generar el campo magnético, y todo se recubre de una protección externa, con diversos grados de seguridad.

El flujo completamente sin obstrucciones es una de las ventajas de este medidor. El fluido debe ser ligeramente conductor debido a que el medidor opera bajo el principio de que cuando un conductor en movimiento corta un campo magnético, se induce un voltaje. Los componentes principales incluyen un tubo con un material no conductor, dos bobinas electromagnéticas y dos electrodos, alejados uno del otro, montados a 180° en la pared del tubo. Los electrodos detectan el voltaje generado en el fluido. Puesto que le voltaje generado es directamente proporcional a la velocidad del fluido, una mayor velocidad de flujo genera un voltaje mayor. Su salida es completamente independiente de la temperatura, viscosidad, gravedad específica o turbulencia. Los tamaños existentes en el mercado van desde 5 mm hasta varios metros de diámetro.

<b>Comparativa de los distintos sensores de flujo</b>						
<b>Sensor de flujo</b>	<b>Líquidos recomendados</b>	<b>Pérdida de presión</b>	<b>Exactitud típica en %</b>	<b>Medidas y diámetros</b>	<b>Efecto viscoso</b>	<b>Coste Relativo</b>

Orificio	Líquidos sucios y limpios; algunos líquidos viscosos	Medio	$\pm 2$ a $\pm 4$ of full scale	10 a 30	Alto	Bajo
Wedge	Líquidos viscosos	Bajo a medio	$\pm 0.5$ a $\pm 2$	10 a 30	Bajo	Alto
Tubo Venturi	Líquidos viscosos, sucios y limpios	Bajo	$\pm 1$	5 a 20	Alto	Medio
Tubo Pitot	Líquidos limpios	Muy bajo	$\pm 3$ a $\pm 5$	20 a 30	Bajo	Bajo
Turbina	Líquidos limpios y viscosos	Alto	$\pm 0.25$	5 a 10	Alto	Alto
Electromagnetic	Líquidos sucios y limpios; líquidos viscosos y conductores	No	$\pm 0.5$	5	No	Alto
Ultrasonic (Doppler)	Líquidos sucios y líquidos viscosos	No	$\pm 5$	5 a 30	No	Alto
Ultrasonic (Time-of-travel)	Líquidos limpios y líquidos viscosos	No	$\pm 1$ a $\pm 5$	5 a 30	No	Alto
Flume (Parshall)	Líquidos sucios y limpios	Muy bajo	$\pm 2$ a $\pm 5$	No	Muy Bajo	Medio

## 2. AFORO DE CAUDAL EN SISTEMAS A SUPERFICIE LIBRE

### 2.1. Formas Hidráulicas Y Medición De La Descarga

#### 2.1.1. Vertederos

Pueden ser definidos como simples aberturas sobre las cuales un líquido fluye.

Para tener mediciones precisas el ancho del canal de acceso debe equivaler a ocho veces al ancho del vertedero y debe extenderse aguas arriba 15 veces la profundidad de la corriente sobre el vertedero. El vertedero debe tener el extremo agudo del lado aguas arriba para que la corriente fluya libremente. A esto se denomina contracción final, necesaria para aplicar la calibración normalizada.

Para caudales mayores el vertedero rectangular es más adecuado porque el ancho se puede elegir para que pase el caudal previsto a una profundidad adecuada. En cuadros se indican los caudales por metro de longitud de la cresta, por lo que se puede aplicar a los vertederos rectangulares de cualquier tamaño.

Figura 14. Estructura de un vertedero

- Vertedero rectangular con contracciones:
- Vertedero rectangular sin contracciones:

El coeficiente de descarga  $C$  se determina:

$$C = 0.615 \left( 1 + \frac{1}{H + 1.6} \right) \left( 1 + 0.5 \frac{H}{H + D} \right)^2$$

donde:

**D** = distancia desde la coronación al fondo del canal de acceso, en milímetros (mm).

**H** = altura de lamina en milímetros (mm).

*El Bureau of reclamation of USA recomienda que D sea por lo menos 2 veces H ( $D > 2H$ ), y además:*

**D mínimo** = 305mm.

**H mínimo** = 60mm.

- Vertedero trapezoidal.

Cipolletti procuro determinar un vertedero trapezoidal que compensase el decrecimiento del caudal debido a las contracciones.

**Influencia de la forma de la vena.** En los vertederos en que el aire no penetra normalmente en el espacio debajo de la lámina vertiente (figura de arriba), puede ocurrir una depresión modificándose la posición de la vena y alterándose el caudal. La lámina líquida puede tomar las siguientes formas que deben evitarse:

- Lamina deprimida. El aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial en el espacio, que modifica la posición de la vena (figura izquierda).
- Lamina adherente. Ocurre cuando el aire sale totalmente (figura central)

En cualquiera de estos casos el caudal es superior al previsto o dado por las formulas indicadas.

- Lamina ahogada. Cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta, el caudal disminuye a medida que aumenta la sumersión (figura derecha).

Figura 15. Efectos en la lámina por influencia del aire

### 2.1.2. Canaletas

En estas estructuras, el caudal es función de las características geométricas de la canaleta, de las características del flujo libre o sumergido y de la altura que alcanza la lamina de agua medida en sitios específicos de la canaleta.

- Canaleta tipo Balloffet:

Esta canaleta pertenece a los aforadores de flujo crítico. Este aforador se caracteriza por tener paredes paralelas y fondo plano, por lo cual se hace extremadamente fácil su construcción, a la vez posee características de solidez y resistencia a las condiciones de campo. Además, si se presenta escurrimiento crítico en la garganta, no se ve afectada por problemas de sedimentación.

Su estructura es sencilla, y en el caso de instalarla en un canal rectangular ya construido resulta económica.

Calculo de descarga en condiciones de flujo libre:

La ecuación establecida por Balloffet para  $r = 2/3$  (relación de contracción) es la siguiente:

$$Q = c M b h \sqrt{2gh} =$$

$$Q = 1.23 B h^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

c = coeficiente de calibración = 0.96

M = factor que depende de la relación de contracción = 0.434

$$M = 2 \frac{1}{\sqrt{3r}} \cos 3 \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos(r)^{\frac{1}{2}}$$

$$b = (2/3)B$$

h = nivel del agua a una distancia (B) aguas arriba de los abultamientos. La cota 0 de la mira coincide con la placa del fondo.

B en metros (m), h en metros, Q en m<sup>3</sup>/s.

Para r = 1/3

$$Q = c M r B \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} =$$

$$Q = 0.557 B h^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

$$c = 0.95$$

$$M = 0.397$$

$$R = 1/3$$

H = nivel del agua

B en metros (m), n en metros (m) y Q = en m<sup>3</sup>/s.

- Canaleta de garganta cortada:

Esta estructura aforada esta conformada por la sección de entrada, la sección de salida, la garganta y la placa de fondo. La sección de entrada esta constituida por dos muros verticales convergentes en relación 3:1 y la sección de salida la conforman dos muros verticales divergentes en relación 6:1.

La unión de estas dos secciones forma una contracción en la canaleta denominada garganta. El ancho de esta garganta, usualmente se designa con la letra W. La placa del fondo es totalmente horizontal.

El tamaño de este aforador se especifica por la amplitud de la garganta y por la longitud total (L) del mismo.

Flujo Libre:

$$Q = C(ha)^n$$

donde :

Q = caudal en m<sup>3</sup>/s.

C = coeficiente de flujo libre.

$$C = KW^{1.025}$$

ha= profundidad de la corriente aguas arriba.

El valor n depende únicamente de la longitud L de la canaleta y es constante para todos los aforadores de una misma longitud sin tener en cuenta W.

El parámetro K se denomina coeficiente de longitud del aforador para flujo libre.

Flujo sumergido:

$$Q = C_s (ha - hb)^n / (C \log s)^{ns}$$

donde:

Q = descarga en m<sup>3</sup>/s.

ha = profundidad del flujo aguas arriba en metros (m).

hb = profundidad del flujo aguas abajo en metros (m).

N = exponente de flujo libre.

Ns = exponente de flujo sumergido.

S = sumergencia.

Cs = coeficiente de flujo sumergido (ha/hb)

El valor de Ns depende de la longitud de la canaleta.

- Canaleta Parshall:

Reemplaza al vertedero si el agua contiene partículas en suspensión, se depositan y causan un cambio gradual en el coeficiente de descarga. Es una de las canaletas Venturi, donde tiene la profundidad crítica en la sección contraída y un resalto hidráulico en la sección de salida.

Sus principales ventajas son que sólo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador, no necesita condiciones especiales de acceso o una poza de amortiguación. Debido a la contracción en la garganta, la velocidad del agua que fluye a través de la canaleta es mayor que la del flujo en el canal. Por esta razón cualquier partícula de arena o limo puede ser arrastrada dejando la canaleta libre de depósitos. En consecuencia, es adecuado para la medición del caudal en los canales de riego o en las corrientes naturales

con una pendiente suave.

Sin embargo, cuando existe una carga pesada de materiales de erosión en la corriente, la canaleta se volverá inútil al igual que el vertedero, para tales circunstancias se utiliza una canaleta Parshall conocida como canaleta San Dimas. Las relaciones de profundidad-caudal para canaletas Parshall de diferentes tamaños:

Ancho de la garganta Ecuación

$$3' Q = 0.992Ha^{1.547}$$

$$6' Q = 2.06Ha^{1.58}$$

$$9' Q = 3.07Ha^{1.53}$$

$$12a' 8' Q = 4WH_a^{1.522W^{0.026}}$$

$$10'a50' Q = (3.6875W + 2.5)Ha^{1.6}$$

Q = caudal libre en pies<sup>3</sup>/s

W = ancho de la garganta en pies

Ha = lectura de mira de aforo en pies

### 2.1.3. Compuertas

- Compuertas de flujo por debajo.

Pueden llamarse así debido al hecho de que el agua pasa por debajo de la estructura. Ejemplos comunes son la compuerta deslizante o rectangular, la compuerta Tainter o radial, y la compuerta de rodillo o circular. En el diseño de estas compuertas el ingeniero está interesado en dos aspectos: la relación altura-caudal y la distribución de presiones sobre la compuerta en diferentes posiciones de ésta y diferentes formas de labio de la compuerta, esta afecta distribuciones de velocidades y de presiones, la pérdida de energía en el flujo a través de la abertura de la compuerta, y desarrolla vibraciones que deben evitarse durante la operación de la compuerta. El caudal a través de una compuerta de flujo por debajo puede expresarse como:

$$Q = CLh \sqrt{2g y_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g}}$$

C = coeficiente de descarga

L = longitud de la compuerta

h = altura de la abertura de la compuerta

y<sub>1</sub> = profundidad de flujo aguas arriba

V<sub>1</sub><sup>2</sup>/2g = altura de velocidad del flujo de aproximación.

Para propósito de estudios experimentales, el término de altura de velocidad puede omitirse y su efecto puede incluirse en el coeficiente C que depende de la geometría de la estructura y de las profundidades aguas arriba

y aguas abajo.

$$Q = CLh\sqrt{2gy_1}$$

Figura 17. Compuerta

Sección de la garganta

2

h

Sección principal de la tubería

1

d

Flujo

D

D

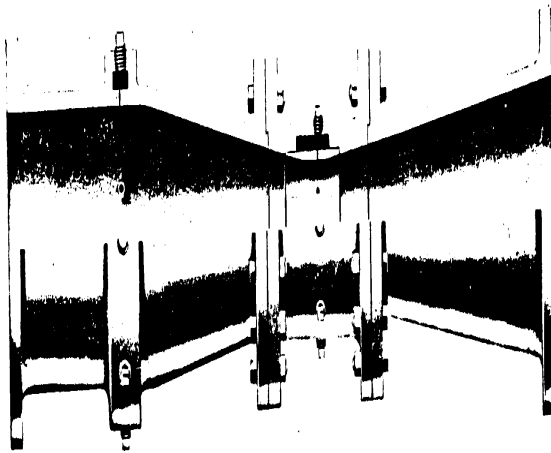


Fig. 9767. Tubo Venturi

2

3

6

6

104

105

106

1.5

2

8

5

4

1.5

3

4

5

8

Número de Reynolds,  $Re$

Coefficiente

de descarga,  $C$

1.00

0.99

0.98

0.97

0.96

0.95

0.94

$d$

$D$

Sección 1

Sección 2

$D/2$



$p_1$

$P_2$

Ramificador de presión estática

Ramificador de presión real

Agujeros de presión estática

Flujo

Columna de fluido estacionario

Cabeza de presión total =  $P_s/$

Fluido en movimiento

Punto de estancamiento s

1

$v_1$

Figura 7.b. Modelos de contadores tipo Woltmann con turbina Vertical.

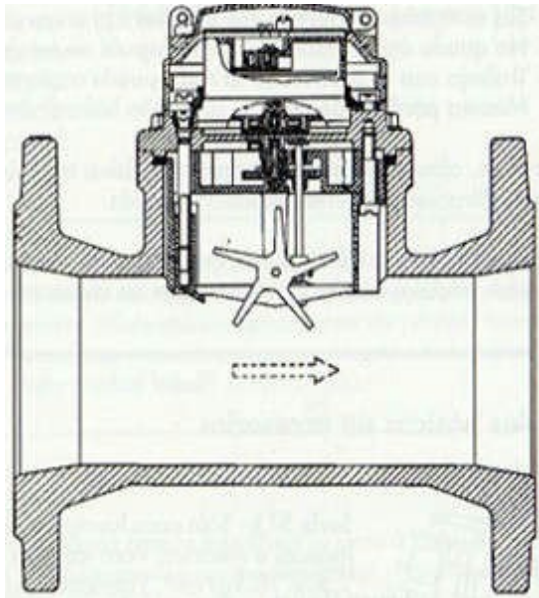
Figura 7.a. Modelos de contadores tipo Woltmann de turbina Horizontal.





Figura 8. Contador Chorro Múltiple.





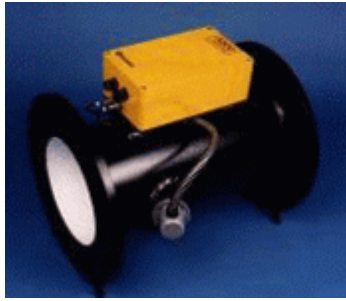


Figura 12. Contador Ultrasónico



Figura 13. Contador Electromagnetico

H

B

L

Cresta o umbral

e

### Clasificación

- Forma

Simple: rectangulares, trapezoidales, triangulares etc.

Compuestos: secciones combinadas

- Altura relativa del umbral

Vertederos completos o libres

Vertedores incompletos o ahogados

- Espesor de la pared

Vertedores de pared delgada

Vertedores de pared gruesa  $e > 1.5L$

- Longitud de cresta

Vertederos sin contracciones laterales ( $L=B$ )

Vertederos con contracciones ( $L < B$ )

Formula de Francis:

$$Q = 1.84 (L - 0.2H) H^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

**Q** = descarga en m<sup>3</sup>/s

**L** = longitud de la coronación en metros (m).

**H** = altura o diferencia vertical entre la cota de la coronación del vertedero y la cota de la superficie del agua, en metros (m).

Formulas de Rehbock y Francis:

$$Q = \frac{2}{3} C L H \sqrt{2gH}$$

Donde:

**Q** = descarga en m<sup>3</sup>/s.

**C** = coeficiente de descarga.

**L** = longitud de la coronación del vertedero en metros (m).

**H** = altura de lamina en metros (m).

Formula Francis, Cipolletti

:

$$Q = 1.86 L H^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

**Q** = descarga en m<sup>3</sup>/s.

**L** = longitud de la coronación en metros (m).

**H** = altura en metros (m).

Figura 16. Estructura de la canaleta Parshall

