



Métodos disponibles para la medida de la velocidad y el caudal en colectores de saneamiento, aguas residuales y vertidos

José Ramas Ayala gerente de Seba Hydrometrie Ibérica y CEO de Ramtor

La elección del método adecuado para la medida de caudal y velocidad en redes de saneamiento es esencial antes de instalar una red de control que, en un futuro, permita obtener series temporales de datos para la modelización y el diseño de nuevos alcantarillados. En la actualidad, son muchos los métodos disponibles para la medida de estos parámetros. Sin embargo, no todos son apropiados para este tipo de control. Las aguas residuales con alto contenido de sólidos suspendidos y, en algunos casos con compuestos agresivos, hacen descartar muchos de los métodos de medida. Se deberían elegir sistemas de sencilla instalación y con bajo mantenimiento debido al riesgo que conlleva su instalación en la seguridad y salud de los empleados destinados a este fin, por lo que es aconsejable montar, siempre y cuando la ubicación del punto de medida lo permita, sistemas que no estén en contacto con el fluido.

Palabras clave

Colector de saneamiento, medida de velocidad, medida de caudal, redes de control, tiempo de tránsito en baja frecuencia, Doppler, radar, monitorización.

Available methods to measure velocity and flow rate in sewers, waste waters and effluents

The selection of the methods for the measurement of the flow rate and speed in sewage system is essential prior to the installation of a network that, in the future, will allow to obtain series of periodical data for the design of new sewage networks, currently there are many available methods for the measurements of these parameters; however not all are suitable for this type of control. Waste waters with a high content of solids in suspension and, in some cases, with aggressive components forces to discard many methods of measurement. We should tend to select methods of easy installation and low maintenance costs, due to the inherent safety and health risk for the workers responsible of this task, and therefore it is recommendable to install systems that are not in contact with the fluid whenever the location of the measurement unit permits.

Keywords

Sewer flow monitoring network, velocity measure, flow rate, low frequency transit time, Doppler, radar, monitoring.



1. Introducción

La magnitud de caudal es siempre un valor calculado, de forma que para obtenerlo han de medirse directamente otros parámetros. El valor del caudal obtiene mediante la asociación del mismo a una medida simple del nivel de lámina de agua a una curva de gasto, o relación entre el nivel medido y caudal efectivo (**Figura 1**).

La alternativa a este tipo de medición es la obtención del valor del caudal mediante el control del parámetro de velocidad del fluido en la sección a medir. Conocida la geometría de la sección y conocido el nivel de lámina de agua, se obtiene el valor de caudal simplemente multiplicando el área de la sección por la velocidad media del fluido en la misma. Al ser la magnitud final (caudal) una magnitud siempre calculada, la precisión o indeterminación con la que se obtiene variará en cada caso (incluso en cada particular sección de medida), dependiendo de las imprecisiones que se cometan en cada una de las mediciones en las que se fundamenta su cálculo.

Pese a que muchos de los equipos basados en tecnologías actuales presentan generalmente buenas resoluciones y precisiones en la medida individual de cada uno de los parámetros que fundamentan el cálculo del caudal, es habitual la errónea asociación que suele hacerse entre precisión de magnitud medida y precisión de magnitud calculada.

A este respecto, es necesario hacer notar que, para obtener precisiones óptimas, realistas y demostrables en la medida final de caudal, no solo son necesarios buenos instrumentos de medida, sino que también es esencial comprender la adecuación de cada uno de ellos y de los principios en que se fundamentan a cada caso particular para, así, poder utili-

Figura 1. Ilustración de perfiles de velocidad en una sección de medida.



zarlos de la forma más conveniente al objetivo perseguido. Asimismo, es imprescindible comprender sus limitaciones, siempre presentes.

El diseño de una solución óptima de medida de caudal no consiste en la elección de uno u otro instrumento porque teóricamente sea más preciso, porque económicamente sea más rentable o porque en la práctica esté muy extendido su uso. La elección de una buena solución de medida debe basarse en la aplicación de toda una serie de conocimientos teóricos y prácticos, a veces complejos, que han de ser evaluados y justificados con total transparencia por técnicos experimentados ante el usuario y la administración del agua. No se trata de proporcionar un equipo al cliente, sino de diseñar y justificar para él una solución óptima de medida en cada caso particular, de principio a fin.

2. Métodos de medida

2.1. Asociación de nivel y caudal mediante una ley o curva de gasto

Para la obtención del valor del caudal mediante la asociación de una medida de nivel de lámina de agua a una curva de gasto, se pueden utilizar dos métodos:

- El primero y más simple sería la medición del nivel del agua delante de un dispositivo de aforo calibrado, comúnmente denominado vertede-

ro, ya sea libre o sumergido (Parshall, cuello rectangular, Venturi, Crump, vertedero en V o rectangulares, etc.). Si bien simples en su concepto, su utilización práctica en el entorno de la medida en colectores de saneamiento o de vertidos se complica considerablemente, debido tanto a la complejidad y costes de instalación (obra civil necesaria), como a la muy frecuente concurrencia de problemas graves, relacionados con la retención de sólidos decantados, suspendidos y flotantes. A este último respecto ha de tenerse en cuenta que las medidas obtenidas suelen ser erróneas por exceso en cuanto suponen una elevación de la cota de agua frente a una reducción del caudal real (se asocia una elevada lámina de agua a un caudal inexistente, por la reducción de la sección a medir).

- El segundo método, medida de nivel con aforos directos, consiste en asociar una medida de nivel de lámina de agua a un caudal, en una sección regular o natural mediante la aplicación de una curva de gasto o fórmula a la que se llega a través de la realización de aforos directos. Pese a ser considerado un método fiable y eficiente en medida de aguas superficiales, presenta problemas prácticos a la hora de aplicarse en el entorno de medición de aguas residuales (la realización de aforos por un operario en este ambiente no solo puede ser compleja, sino a veces realmente peligrosa).

2.2. Utilización de la medida directa de velocidad para obtener el caudal

Para la obtención del valor del caudal mediante la utilización de una medida de velocidad directa, los sistemas actuales también se pueden diferenciar en dos categorías:

- Los que permiten medir con sensores que no se encuentran en contacto con el fluido o no intrusivos. Dentro de la primera categoría, y denominados como no intrusivos, se encuentran los medidores de la velocidad superficial por principio radar.
- Los sensores que se encuentran dentro del fluido o intrusivos. En esta categoría se encuentran los sistemas de medida de velocidad por principio Doppler, los que utilizan ultrasonidos por tiempo de tránsito y los electromagnéticos.

A continuación se especifican estos sistemas de medida, tanto intrusivos como no intrusivos.

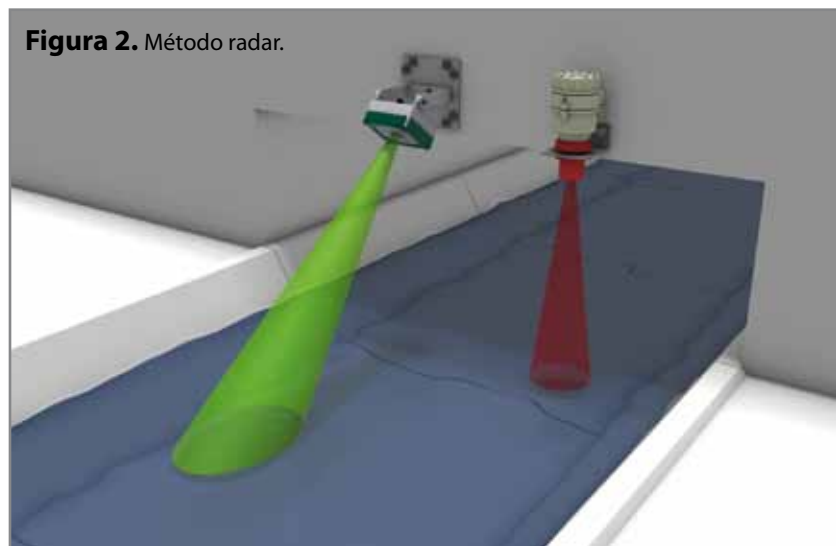
2.2.1. Método radar

La ventaja que ofrecen los sistemas radar (**Figura 2**) es simple: su bajo mantenimiento y el escaso deterioro del elemento de medida. Este sistema permite la medida de una huella de la velocidad superficial. A su vez, una unidad de control microprocesada utiliza un modelo matemático para realizar el cálculo del caudal, ofreciendo un cálculo preciso y eficaz de este parámetro (**Figura 3**):

$$Q = A(h) * v_{media}$$

$$Q = A(h) * v_{superficial} * k(h)$$

Generalmente, estos sistemas se utilizan en colectores de saneamiento o en pequeños canales con fluidos que contienen partículas de gran tamaño o en aguas con con-



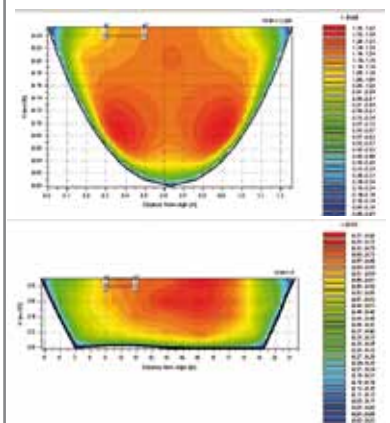
tenido de vertidos muy agresivos o muy abrasivos. De esta forma, se evita el deterioro del sensor y se minimizan las labores de mantenimiento que requieren los sensores intrusivos o que se encuentran en contacto con el fluido.

Este sistema no es el más preciso para la medida del caudal debido a la poca información de velocidad que ofrece. Sin embargo, es el más aconsejable en este entorno, ya que al no encontrarse en contacto con el fluido se pueden obtener medidas continuadas durante 24 horas y durante los 365 días del año sin apenas demandar mantenimiento. Otra ventaja es la escasa exposición de los operarios de mantenimiento, lo que minimiza el riesgo y garantiza su seguridad.

La medida de la velocidad se realiza en la superficie del fluido mediante

un radar, de una forma similar a como lo hacen los radares de la policía (**Figura 4**). El sensor se instala unos centímetros por encima del nivel máximo previsible de la lámina del agua y este transmite un tren de microondas que se reflejan al contacto con la superficie del fluido (nunca de

Figura 3. Representación de curvas de isovelocidades.

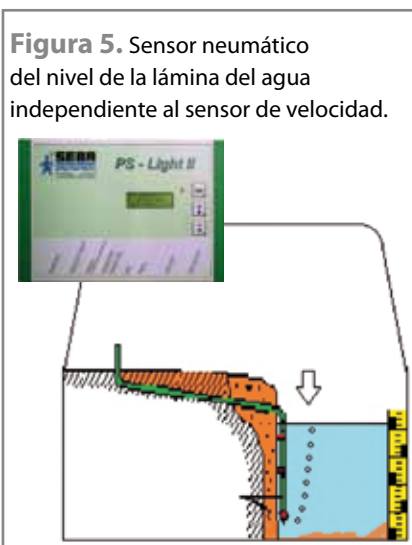




forma perpendicular), que a su vez recibe esta señal reflejada en el mismo sensor. Los pulsos se transmiten en una frecuencia determinada y se reciben con una frecuencia distinta a la enviada, resultando la diferencia de las frecuencias proporcional a la velocidad de la lámina del agua. La huella analizada es de unos 10 cm. La unidad de control se encarga de calcular la diferencia entre la frecuencia emitida y la recibida. Esta velocidad media superficial determina la velocidad de flujo mediante cálculos empíricos.

El sensor no mide velocidades cuando se encuentra sumergido, aunque adaptándole un sensor electromagnético asociado puede medir estos episodios, pese a que esto se puede evitar con una instalación adecuada.

El nivel de la lámina del fluido se mide con sensores no abrasivos, mediante métodos por ultrasonidos, por radar o bien con sensores neumáticos. Estos últimos sensores miden la presión hidrostática y son muy aconsejables por su elevada precisión y porque su elemento de medida no está en contacto con el fluido (**Figura 5**). Los más avanzados suelen incorporar un mecanismo de autolimpieza del tubo de presión por soplado, sistema muy eficaz y que minimiza las labores de mantenimiento. Otra ventaja del sistema neumático radica en su exposición dentro del colector de saneamiento, pues tan solo hace falta introducir una tubería de 1 cm de diámetro adosada al paramento y por la que se desplaza el aire. Su electrónica y elemento de medida quedan en el exterior, por lo que en caso de avería su exposición es nula. Si a esto se suma que el sensor de velocidad por radar mide tan solo 100 x 100 x 42 mm, hace que sea la opción más aconsejable para este tipo de instalaciones.



Es muy recomendable que los sensores de velocidad y nivel de la lámina del agua se encuentren separados entre ellos. De esta forma, se reduce el tamaño del instrumento que estará en el interior del colector de saneamiento, evitando deterioros del sistema si este entra en carga.

2.2.2. Métodos electromagnético

El sistema electromagnético de inserción utiliza el principio enunciado por la ley de Faraday para medir la velocidad del fluido. Esta ley, en su enunciación para sólidos y líquidos, establece que un cuerpo conductor (y el agua lo es) genera una fuerza electromotriz (diferencia de potencial medible en voltaje) al atravesar un campo magnético. Dicha fuerza es directamente proporcional a la velocidad del conductor al atravesarlo, en este caso del fluido (**Figura 6**).

El sensor genera el campo adecuado y mide el voltaje generado mediante tres electrodos que se sitúan en la zona superficial del cuerpo del captador. Este transmite una señal proporcional por cable a la unidad electrónica, que la interpretará con el fin de calcular la velocidad media del fluido en la sección a partir de la medición hecha en una zona determinada de la misma (unos 10 cm),



en el caso de los sensores de lámina libre, y en toda la sección circular en el caso de los sensores de carrete. El cálculo de la velocidad media se realiza aplicando los coeficientes adecuados que el propio equipo genera al tiempo de su calibración *in situ*. La medida de nivel está integrada en este sensor, utilizando una célula piezorresistiva. No obstante,

Este método de medida presenta algunos problemas a la hora de medir en colectores de saneamiento:

- Escasa información de la velocidad.
- Método intrusivo.
- Fallos en fluidos con baja conductividad eléctrica, por ejemplo aquellos que contengan aceites y grasas.
- Al ser una instalación intrusiva los operarios de mantenimiento se exponen a altos riesgos.
- Genera alrededor del sensor y las tuberías del cable mallas de materiales diversos, por lo que al entrar en carga el colector o en velocidades elevada se corre el riesgo de arrancarse toda la instalación.

2.2.3. Método Doppler

Existen dos tipos fundamentales de sistemas Doppler (**Figura 7**) de me-

medida de caudal en el entorno tecnológico actual: los sistemas de onda continua y los sistemas de pulsos. Se diferencian esencialmente en el diseño de sus transductores, en sus características de operación, en el método de procesamiento de la señal y en el tipo de información que proporcionan.

2.2.3.1. Doppler de onda continua

El sistema Doppler de onda continua (en inglés *continuous wave -CW-Doppler*) es el más antiguo de los dos tipos, y el que se basa en una electrónica más simple. Como su nombre indica, el Doppler de onda continua implica la generación en continuo de ondas ultrasónicas asociadas a su recepción, también continua. Un transductor basado en dos elementos de estructura cristalina cumple esta doble función (**Figura 8**).

La desventaja principal del Doppler de onda continua es su incapacidad para determinar la ubicación exacta de los vectores de velocidad medidos. El sistema mide puntualmente la velocidad del fluido, pero no es capaz de determinar a qué nivel se posiciona realmente esa velocidad medida. Debido a esto, es técnicamente imposible representar una sección o perfil de velocidades y, por tanto, de caudales mediante el uso de esta tecnología. Para corregir esta carencia es necesario utilizar un coeficiente de calibración que permita obtener, mediante su aplicación por la electrónica de proceso de un cálculo en tiempo real, la velocidad media en la sección considerada. Este factor de calibración, o coeficiente de cálculo, es dependiente y distinto para cada sección de medida, por lo que debe ser determinado y comprobado con anterioridad a la puesta en marcha, generalmente mediante la realización de aforos directos en todos los regímenes de

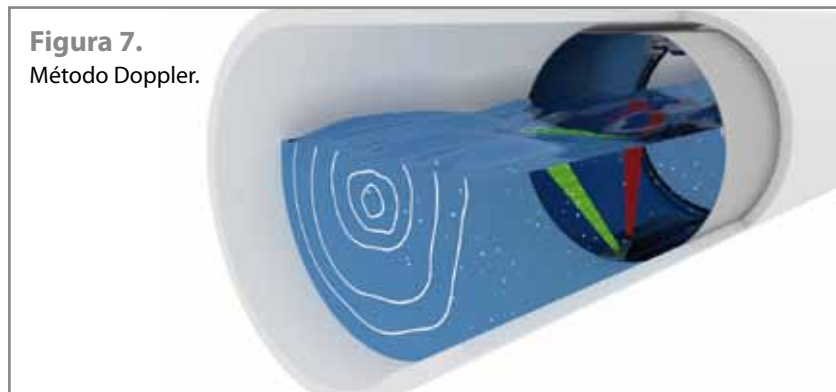


Figura 8. Funcionamiento del Doppler de onda continua.

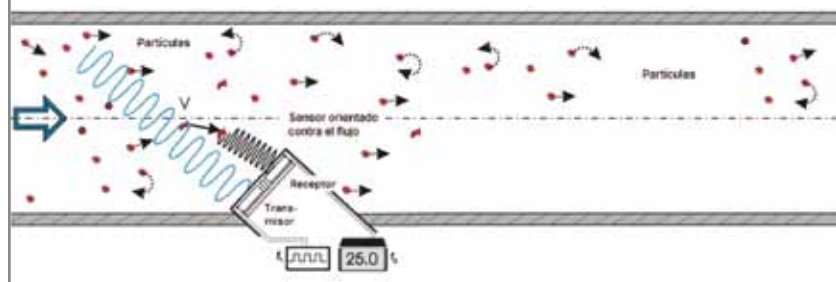
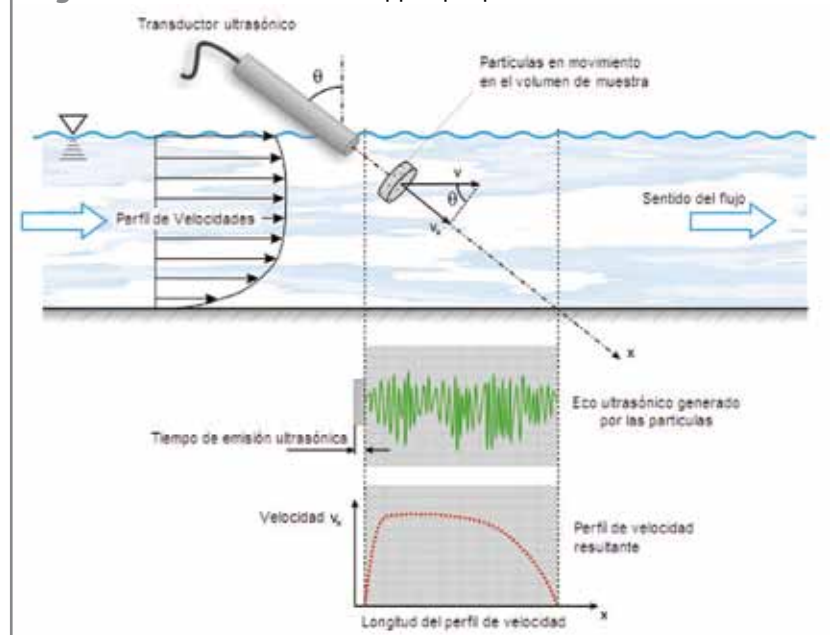


Figura 9. Funcionamiento del Doppler por pulsos.



operación, actuación que, de ser correctamente realizada, es casi siempre larga y relativamente costosa en términos económicos.

2.2.3.2. Doppler por pulsos

El sistema Doppler por pulsos (en inglés *pulsed wave -PW- Doppler*)

utiliza un transductor que alterna transmisión y recepción de ultrasónicos. La gran ventaja, muy significativa, de este sistema es su capacidad para poder desplazar selectivamente la medición a lo largo de un vector que sigue el eje de emisión del pulso ultrasónico. Esta zona de medida

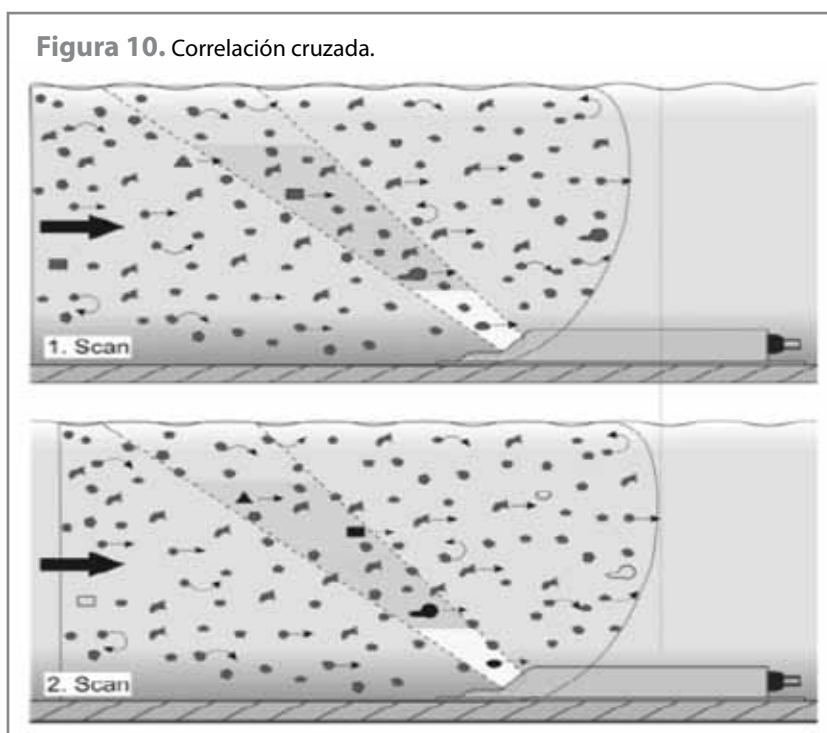


se denomina volumen de muestra (*sample volume*) y es posicionable a voluntad del operador mediante la programación del sistema.

El Doppler ultrasónico por pulsos es un desarrollo relativamente nuevo que supera a todos los anteriores. Frente a los sistemas que utilizan onda continua, el sistema de pulsos ajusta selectiva y continuamente la frecuencia de emisión de cada pulso, de forma que se puedan asignar ventanas de medida o celdas, los denominados volúmenes de muestra, discretizados a lo largo del eje de emisión que cruza el flujo en su totalidad. Esta técnica se define como Perfilador Doppler. Así, se puede obtener una medida de velocidad para cada desplazamiento efectuado, corrigiendo el problema que presentaban los sistemas de onda continua, ya que el Doppler por pulsos sí es capaz de saber dónde se producen las diferentes velocidades a lo largo del eje de medida, lo que a su vez capacita para entregar como salida directa un perfil de velocidades completo, sin aplicación de coeficientes teóricos. Además, la reflexión generada por las partículas situadas fuera de los límites de los volúmenes de medida es ignorada, por lo que no tiene influencia en el cálculo de la velocidad (**Figura 9**).

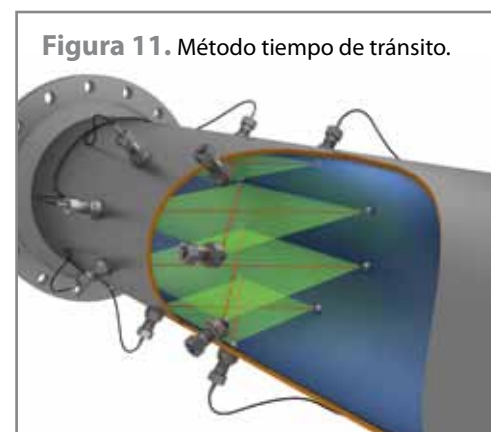
2.2.3.3. Correlación cruzada

Los caudalímetros que emplean técnicas de correlación cruzada utilizan dos señales acústicas separadas una cierta distancia. Si no existe movimiento en el flujo o se dan condiciones de flujo laminar, las dos señales recibidas por el sistema son idénticas a las transmitidas. Cuando el flujo presenta un régimen turbulento, el movimiento de cualquier remolino o vórtice a través del haz ultrasónico genera un cambio en la



primera señal acústica. El remolino causará un cambio idéntico en la segunda señal utilizada, de forma que puede ser detectado según va desplazándose en el sentido del flujo. Se utiliza entonces un procesador electrónico para comparar las dos señales recibidas. Cuando se encuentran dos señales idénticas se computa el tiempo transcurrido entre la recepción de las mismas y, siendo conocida la distancia que las separa, puede determinarse la velocidad de desplazamiento del vórtice.

Los sistemas de este tipo determinan la velocidad media de desplazamiento de todos los vórtices que cruzan el haz de medida. Si no se encuentran suficientes vórtices, el sistema puede seguir y determinar la velocidad de sedimentos gruesos, grandes partículas o burbujas en suspensión. Pero, y he aquí su gran desventaja para cierto tipo de regímenes y fluidos, si el régimen es homogéneo, sin remolinos ni vórtices, el sistema no será capaz de funcionar correctamente (**Figura 10**).



2.2.4. Método tiempo de tránsito

2.2.4.1. Fundamentos del sistema de medición

Los caudalímetros de ultrasonidos (**Figura 11**) determinan el caudal circulante mediante un método indirecto. El caudal se calcula a partir de la aplicación de la ecuación de continuidad a la medida de velocidad y a una área cuya sección transversal es función del nivel de agua:

$$Q = S V$$

siendo:

- Q = caudal (m³/s).
- S = sección transversal del flujo (m²).
- V = velocidad media (m/s).

El principio de medición de la velocidad del fluido en una sección dada empleado por estos sistemas se basa en la medida directa y muy precisa del tiempo de tránsito o vuelo de una señal acústica que viaja entre dos o más transductores hidroacústicos. Así, una onda acústica a contracorriente en el agua utilizará un tiempo de tránsito o vuelo mayor que el que necesitaría si fuera a favor de la corriente para recorrer una misma distancia. Esta diferencia de tiempo es directamente proporcional a la velocidad del fluido en el trayecto de medida para una sección dada y (aplicando la ecuación de continuidad), por tanto, determinante del caudal circulante por la misma.

En secciones, trabajando principal u ocasionalmente en lámina libre, aunque la geometría de la sección permanezca invariable, el área de la sección transversal del flujo cambiará con la cota del fluido, por lo que es necesario conocer con mucha precisión el nivel de la lámina de agua circulante en cada momento. Por ello se integra en el sistema, junto a los sensores de medida de velocidad, un sensor de cota de lámina con la máxima precisión posible para el rango de escala aplicable.

Para determinar el tiempo de tránsito de la señal acústica, cada transductor hidroacústico es capaz de recibir impulsos eléctricos en forma de señales rectangulares o sinusoidales y convertirlos en un conjunto de ondas acústicas cuando trabaja como emisor, y funcionar a la inversa como receptor.

Para cada transductor, los tiempos de tránsito, que aquí se denominan t_{1-2} (s) y t_{2-1} (s), se contrastan con

una serie de medidas directas, mientras que el primer cruce de la señal receptora se determina mediante circuitería analógica o, (en aplicación de las últimas tecnologías), por medio de sistemas de reconocimiento digital de la señal.

El tiempo de tránsito a favor de la corriente t_{1-2} se calcula de la siguiente forma:

$$t_{1-2} = L/C + V_{1-2} \cos \alpha$$

Y el tiempo de tránsito t_{2-1} a contracorriente:

$$t_{2-1} = L/C - V_{1-2} \cos \alpha$$

donde:

- L = distancia entre transductores (m).
- C = velocidad del sonido en el fluido (m/s).
- V_{1-2} = velocidad media en la línea entre transductores (m/s).
- α = ángulo entre el vector velocidad de flujo y la línea entre transductores (°).

Así, se resuelven las anteriores ecuaciones para V_{1-2} independientemente del valor de C como:

$$V_{1-2} = (t_{2-1} - t_{1-2} / t_{2-1} t_{1-2}) (L/2 \cos \alpha)$$

siendo la diferencia de tiempo de tránsito Δt (s), en función de C (utilizable para contraste de medida):

$$\Delta t = (2 L V_{1-2})/C^2$$

De esta manera, se comprueba que, midiendo el tiempo de tránsito del pulso sónico entre transductores en contra y a favor de la corriente, y conociendo tanto la distancia entre transductores como el ángulo que forma la línea que los une con el

vector velocidad del flujo, es posible calcular con precisión la velocidad media del fluido en esa línea.

Asimismo, se puede utilizar de forma sistemática las medidas de tiempo de tránsito y de velocidad del sonido en el fluido a una densidad determinada, como contrastes de indeterminación tanto de la medida de velocidad media como de la medida de tiempo de tránsito.

2.2.4.2. Cálculo del caudal medio circulante

Una vez determinadas con corrección las velocidades medias del fluido sobre las líneas (niveles) de transductores, es necesario calcular el caudal medio circulante por la sección de medida. La metodología aplicable, aunque compartiendo la misma base, será totalmente distinta bien se aplique a secciones llenas o trabajando en carga, bien a secciones parcialmente llenas que trabajen en lámina libre.

Téngase en cuenta al respecto del cálculo de caudal para secciones sometidas a carga adicional que, como por una parte se limita el valor de cota que puede captar el sensor de presión con el valor de máxima presión de columna de fluido posible en su geometría y, por otra, se aplica directamente la ecuación de continuidad (1), el valor de presión adicional no se toma en cuenta, aplicándose correctamente el mismo método de cálculo que el que ha de utilizarse para secciones llenas sin carga adicional.

Para secciones circulares llenas, en el entorno de uso descrito y para un número i de líneas de transceptores, se puede expresar el caudal medio circulante en función de la velocidad como:

$$Q = \pi r^2 \sum_{i=1}^n w_i v_i$$

donde:



Figura 12. Sistema de recorrido en disposición simple.



Figura 13. Sistema de recorrido en disposición cruzada

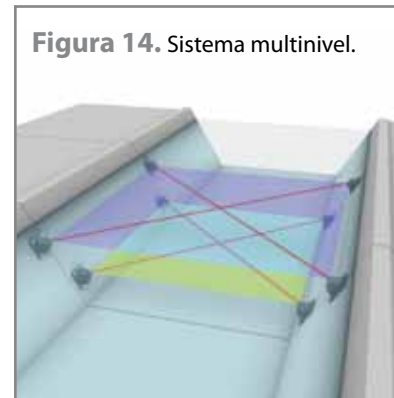


Figura 14. Sistema multinivel.

- Q = caudal medio circulante (m^3/s).
- r = radio de la conducción (m).
- w_i = constante de ponderación de la medida de la línea i ésima (adimensional).
- v_i = velocidad media del fluido medida en la línea i ésima (m/s).

La constante w_i de ponderación de la medida de cada línea de transceptores, determinada por su posición en la sección, se obtendrá por interpolación según ISO 6416 y ASTM D 5389-93.

Para cualquier sección en lámina libre, incluyendo conducciones parcialmente llenas, se puede expresar el caudal medio circulante en función de la velocidad medida por las líneas de transceptores como:

$$Q = [S_{\text{fondo}} V_{\text{ifondo}} (1 + n_{\text{fondo}})/2] + [\sum_{i=1}^n S_{i+1} (V_i + V_{i+1})/2] + [S_{\text{sup}} (V_n + w_{\text{sup}} V_{\text{sup}})/(1 + w_{\text{sup}})]$$

donde:

- Q = caudal medio circulante (m^3/s).
- S = sección transversal del flujo entre las líneas i e $i+1$ (m^2).
- V_{ifondo} = Velocidad media medida en la línea de transceptores más baja (m/s).
- n_{fondo} = coeficiente de rugosidad del fondo de la conducción (adimensional).

- V_i = velocidad media del fluido medida en la línea i ésima (m/s).
- w_{sup} = coeficiente corrector de la velocidad superficial (adimensional).
- V_{sup} = Velocidad media superficial extrapolada a partir de las medidas de velocidad sobre las dos líneas superiores de transceptores (m/s).

El coeficiente corrector w_{sup} se interpolará a partir de las relaciones establecidas por la ISO 6416, teniendo en cuenta que en este caso se deben considerar las medidas de las dos líneas superiores de transceptores y su posición relativa.

Para el mismo caso, y cuando solo una línea de transceptores está sumergida, se produce una situación especial, en la que el caudal medio circulante ha de ser calculado como:

$$Q = K S V$$

donde:

- Q = caudal medio circulante (m^3/s).
- V = velocidad media (m/s).
- K = factor de corrección de la velocidad medida en la línea de transceptores en función de su altura con respecto de la profundidad. Ha de basarse en la relación velocidad media/profundidad elaborada según ISO 6416 (adimensional).
- S = sección transversal del flujo (m^2).

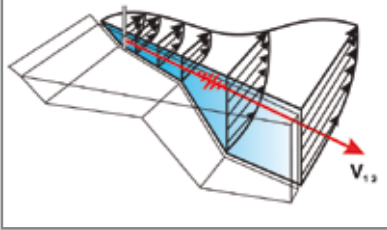
2.2.4.3. Ubicación y disposición del sistema en la sección de medida

La disposición de los transductores dependerá principalmente de las condiciones hidráulicas, la situación espacial, las condiciones del lugar de medida y la precisión deseada. A continuación se cita brevemente las particularidades esenciales de las distintas disposiciones aplicables, razonando por comparación la idoneidad de la que se propone: multinivel en disposición simple.

- Sistema de recorrido en disposición simple (**Figura 12**). Es la disposición más simple de un sistema de ultrasonidos, ya que se compone únicamente de dos transductores hidroacústicos situados uno frente al otro en ángulo conocido. Para que trabaje con precisión se necesita que el flujo sea paralelo a los márgenes. Estas condiciones suelen cumplirse en conducciones regulares, canales o incluso en cursos fluviales parcialmente canalizados.

- Sistema de recorridos en disposición cruzada (**Figura 13**). Solo en cursos artificiales el flujo principal se mueve siempre de forma paralela a los márgenes. Tanto las curvas que puede presentar un cauce como las variaciones en su sección transversal influyen enormemente en la dirección principal por la que discurre el flujo. Cuando existen variaciones en la sección transversal del curso es

Figura 15. Ejemplo de un perfil de velocidad típico en una sección transversal con la trayectoria del eco.



conveniente realizar una segunda medida que se cruce con la anterior.

- Sistema multinivel (**Figura 14**). Ha de recomendarse su uso siempre que el flujo pueda verse afectado por significativas fluctuaciones de nivel o cuando se prevean importantes rangos relativos de variabilidad de caudal. Se instalará cada línea de transductores a un nivel distinto. Cada nivel puede configurarse como un sistema en disposición simple o cruzada, de acuerdo a los criterios anteriormente reseñados para la elección de la disposición.

La ubicación y número de niveles a emplear dependerá de la sección particular y de la precisión deseada.

Respecto de la ubicación, en el caso de conducciones de sección circular trabajando en carga se recomienda posicionar las líneas de transductores de acuerdo al método de integración de Gauss-Chebyshev, en cuatro niveles colocados simétricamente en ángulo con respecto del centro geométrico de la sección de 18° y 54°, por encima y por debajo del eje longitudinal central. No obstante, tal disposición no se considera una norma, pudiéndose utilizar otras de conveniencia a criterio del diseñador.

Para la ubicación de las líneas en secciones que puedan trabajar parcialmente llenas, en lámina libre, los niveles de colocación suelen ajustarse bien a criterios prácticos, bien a

Tabla 1. Coeficientes de velocidad k_1 del canal al aire libre. Nota: z/h = altura de transductores/profundidad de agua según ISO 6416.

z/h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$k/1$	0,846	0,863	0,882	0,908	0,937	0,979	1,039	1,154	1,424

las recomendaciones de la ISO en su norma 6416, en orden a poder aprovechar valores directos de la distribución (a veces denominada ley de distribución logarítmica de la velocidad) típica de la sección longitudinal de velocidades.

En cuanto al número de niveles a emplear, en los dos casos se ha constatado tanto teórica como empíricamente que, si bien es cierto que la precisión de medida crece con el incremento del número de niveles utilizados, la mejora en precisión no es rentable a partir del cuarto nivel de transectores, tanto para perfiles de velocidad simétricos como irregulares. La instalación de una quinta y sucesivas líneas de medida no justificaría razonablemente, mediante un decremento proporcional de las indeterminaciones globales, ni sus costes materiales ni los de instalación. No se entra aquí en detalles sobre este particular.

2.2.4.4. Calibración específica de la sección

Según establece el DIN 1319, el calibrado debe tener en cuenta la desviación entre la medida de un valor y su valor de referencia. Debido a que suele desconocerse la velocidad del fluido, cualquier calibrado hidrométrico de sistema de ultrasonidos debe establecer una referencia entre la velocidad del fluido v_g y su valor medio v_m (**Figura 15**).

Esta referencia puede reproducirse de forma aproximada por medio de planteamientos teóricos, modelos matemáticos o medidas en el campo. Para distinguir entre un coeficiente de velocidad teórico y un

factor de calibrado específico de un lugar de toma de medidas, se aconseja dividir en dos el factor k , según la siguiente ecuación:

$$k = k_1 \cdot k_2$$

donde:

- k_1 = coeficiente de velocidad teórico.
- k_2 = factor de calibrado específico de un lugar de toma de medidas.

Entonces, el caudal se calcula de la siguiente manera:

$$Q = k_1 \cdot k_2 \cdot A \cdot v_g$$

Esto significa que no solo las medidas v y A son esenciales para el cálculo del caudal Q , sino que también es necesario conocer los factores de calibrado k_1 y k_2 .

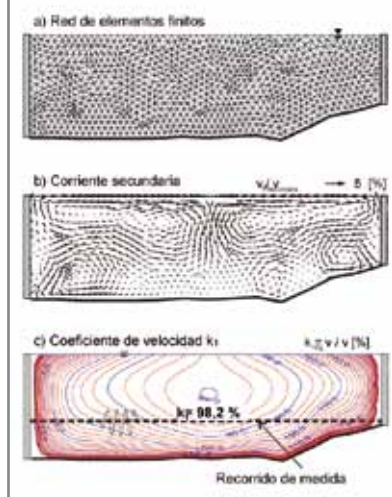
Para el coeficiente de velocidad k_1 pueden darse tres casos:

- Empírico. Para canales al aire libre, la velocidad es casi solo función de la profundidad del agua. Según establece la norma ISO 6416 de 1992, los valores de la **Tabla 1** son válidos para coeficientes de velocidad k_1 del canal al aire libre, dependiendo de la altura del medidor de nivel. Estos valores se han determinado de forma experimental mediante 15 medidas *in situ* en siete lugares diferentes ($1,94 \text{ m} < h_m < 2,20 \text{ m}$).

- Distribución logarítmica de velocidad. En el cálculo de la velocidad media del fluido en canales al aire libre también se puede utilizar la dis-

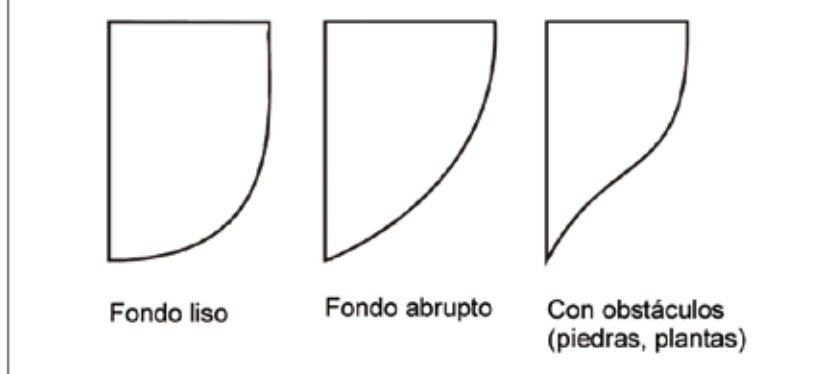


Figura 16. Determinación del valor k_1 en el recorrido de medida sobre un modelo hidronumérico SIMK (Koelling, 1994).



tribución logarítmica de la velocidad, sobre todo en cursos de aguas de profundidad mayor de 10 m. La base de este procedimiento es que a una altura situada al 40% de la profundidad total, la velocidad medida se corresponde con la velocidad media del fluido de la sección transversal. De esta manera, la proporción entre la velocidad del fluido v_g y la velocidad media del fluido v_m es 1. Esto significa que en un recorrido acústico instalado a la altura del 40% de la profundidad total, la velocidad media del fluido v_m se medirá directamente. Cuanto más abrupto es el fondo del cauce y menor es la anchura del agua con respecto a su profundidad, mayor es la influencia de las corrientes secundarias de las paredes u orillas sobre la distribución de la velocidad. Dichas corrientes secundarias, que interfieren en la corriente principal, son las causantes de que las zonas lentas del conducto cercanas a las orillas se sitúen más tarde en la superficie. Esto conlleva una reducción de la velocidad cerca de la superficie del curso y un aumento de pérdidas por fricción, por las cuales la distribución logarítmica

Figura 17. Diferentes comportamientos del perfil de velocidad en función del rozamiento en el fondo del lecho.



de velocidad no asegura una validez para todos los casos.

- Modelo hidronumérico. En secciones transversales simples (rectángulos, trapecios de anchura menor a 10 m, etc.) no deberá desestimarse la influencia de los bordes laterales sobre el perfil de la velocidad. La distribución de la velocidad en una sección transversal dada puede calcularse por medio de unos modelos hidronuméricos, por ejemplo el modelo SIMK (Koelling, 1994). Si se asume un flujo estacionario uniforme, resultará un coeficiente de velocidad k_1 para cualquier altitud del plano de medida. Asimismo, un análisis detallado del perfil de velocidades mostrará el valor de rozamiento. Todo rozamiento producido sobre las superficies del conducto situadas en la parte exterior de la red de elementos finitos deberá considerarse siguiendo una distribución logarítmica en el modelo de flujo. Una vez se realicen los cálculos y análisis a diferentes alturas de la superficie mojada en el interior del conducto, determinaremos en función del plano utilizado el calibrado completo de un lugar de toma de medidas en particular $k_1(h)$ (Figura 16).

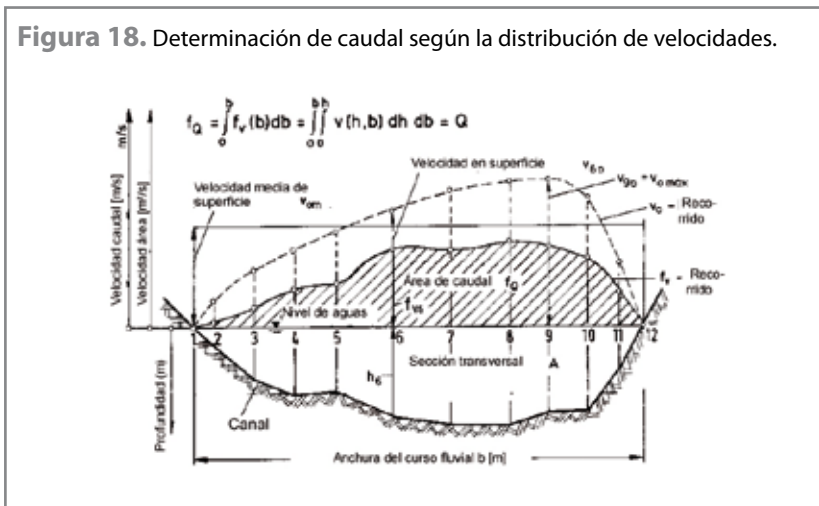
En cuanto al factor de calibrado k_2 , los cambios en la dirección longitudinal y transversal de flujo pro-

ducidos en colectores con aportes, compuertas, influenciados por retenciones o con elevada cantidad de sedimentos en el fondo del lecho, deben valorarse a partir de una desviación con respecto al perfil de velocidades teórico.

Existen otros aspectos que modifican el perfil de velocidades, como por ejemplo, recodos, curvas, corrientes de aire, aportes o flujos superficiales. La Figura 17 muestra un ejemplo de los diversos perfiles de velocidades según el rozamiento en el fondo del lecho. Estas desviaciones específicas del lugar de toma de medidas en las estimaciones del coeficiente de velocidad teórico k_1 se corregirán por medio del cálculo de caudal con un segundo coeficiente de velocidad, el factor de calibrado k_2 .

Según establece la Guía Alemana (Pegelvorschrift, Anexo D, 1992) y la norma ISO-6416 (1992), un calibrado hidrométrico de sistemas de ultrasonidos es absolutamente necesario para el usuario como consecuencia del cálculo de baja exactitud de las proporciones teóricas de flujo en el rango del lugar de toma de las medidas. Los factores de calibrado varían según sea el nivel y caudal del curso hídrico. Así, puede aceptarse la siguiente función para el factor de calibrado k_2 :

Figura 18. Determinación de caudal según la distribución de velocidades.



$k_2 = f(\text{nivel } w, \text{ ángulo de corriente } \Phi)$

donde:

- $A = f(w)$.
- $Q = f(\Phi)$.
- $k_2 = f(\text{sección transversal } A, \text{ caudal } Q)$.

Esta función del factor de calibrado k_2 , hallada a partir de las medidas experimentales, se utiliza en el calibrado de la matriz.

En la mayoría de los casos se realizan medidas de flujo en múltiples puntos, las cuales registran las velocidades de flujo en puntos a lo largo de la sección transversal, resultando así el caudal total por integración vertical y horizontal (**Figura 18**).

2.2.4.5. Condicionantes del resultado. Indeterminaciones

En cuanto a las afecciones del resultado, tanto por perturbaciones físicas que afecten a la medida como por las incertidumbres que condicionan el cálculo de la indeterminación final, y por tanto la precisión demostrable del sistema de medida de caudal, se citan brevemente las que pueden resultar de interés en la justificación de la decisión del tipo de sistema e instalación:

- Sólidos suspendidos. Al emitir una señal ultrasónica a través de un medio como el agua se perderá una parte de su energía, reduciéndose su amplitud. La intensidad de la señal recibida a una distancia del emisor se

verá siempre atenuada con respecto a la señal de salida. Sin embargo, esta atenuación es únicamente de amplitud de onda, quedando invariables otros parámetros característicos, como su frecuencia. La atenuación de las ondas acústicas emitidas a través del agua se atribuye a dos fenómenos: la fricción, es decir, la transformación de energía acústica en calor de fricción por acción de la viscosidad del agua; y el difuminado (*scattering*), en la que una parte de la energía acústica de la señal se dispersa al colisionar con una partícula sólida o carga en suspensión (**Figura 19**). Según el tamaño de las partículas se producirá mayor o menor fricción y difuminado (*scattering*). Las pequeñas generarán más pérdida de energía por la fricción, por diferencias de viscosidad, y las de mayor tamaño (desde 0,1 hasta 1 mm de diámetro) dispersarán la energía acústica en mayor proporción. Además, el difuminado depende considerablemente de la frecuencia de la onda acústica a concentración de sólidos suspendidos y tamaños de partícula constantes. De esta forma, una señal de baja frecuencia, por ejemplo 30 kHz, se atenuará mucho menos que una de 200 kHz. Puesto que el alcance de transmisión puede aumentar (por razones tecnológicas)

Figura 19. Difuminado (*scattering*) de una señal de ultrasonidos al colisionar con sólidos en suspensión.

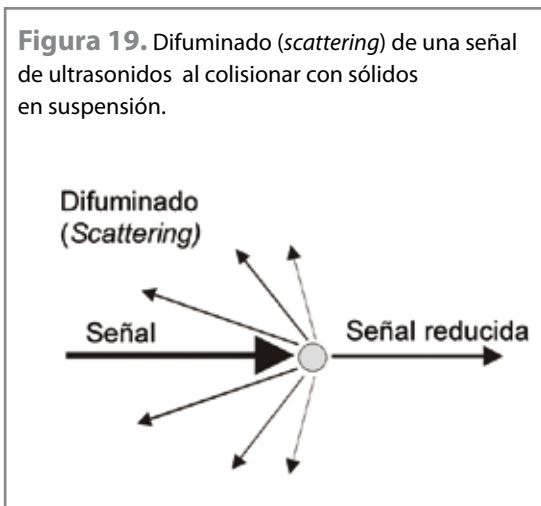


Figura 20. Difuminado de la señal acústica dependiendo del diámetro de la partícula y la frecuencia del eco (Laenen y Smith, 1982).

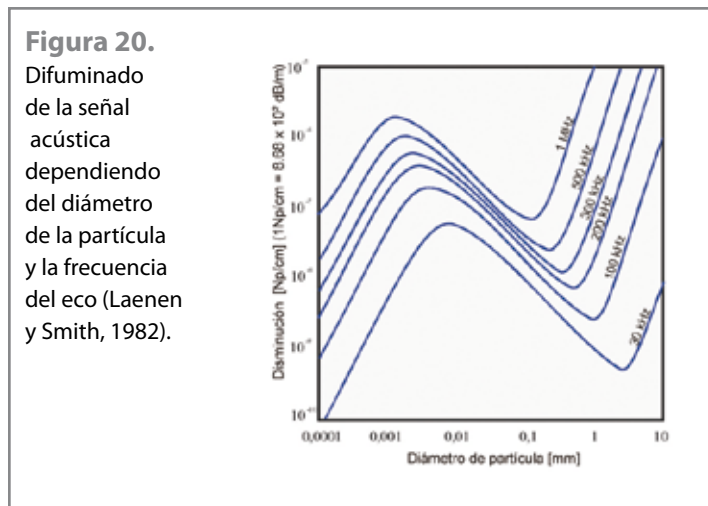




Figura 21. Distintas unidades de control.



solo hasta un límite, el mayor recorrido utilizable para la medición será función (constantes los demás factores) de la frecuencia de la señal. Así pues, para una misma longitud de recorrido y concentración de sólidos, la fiabilidad de las medidas se verá incrementada utilizando bajas frecuencias en la señal. La **Figura 20** muestra que el difuminado depende considerablemente de la frecuencia de la onda acústica a una concentración de sólidos suspendidos dada (1 mg/l) y un tamaño de partícula determinado.

- Burbujas de gas. La presencia de burbujas de gas en el fluido atenúa enormemente las señales acústicas que se mueven en su seno. Aparecen como resultado de múltiples factores, como pueden ser: Presencia de restricciones cercanas aguas arriba en el cauce o conducción, procesos aeróbicos de determinadas especies algarias, introducción de aire en el fluido por aportaciones líquidas o sólidas en caída libre aguas arriba, generación de burbujas de gas por elementos móviles en cavitación, etc. Podría pensarse que sus efectos sobre la señal se asemejarían a aquellos generados por las partículas sólidas en suspensión, lo que significaría afección por fricción viscosa y difuminado (*scattering*). Pero, a diferencia de los sólidos suspendidos, las burbujas de gas son

compresibles, compresibilidad que (desafortunadamente para los sistemas de ultrasonidos) tiene un efecto añadido sobre la velocidad de sonido en el medio, por el brusco, asistemático y devastador (desde el punto de vista del aprovechamiento de la señal) cambio de densidad del medio que produce. Así, las medidas tomadas en instalaciones que padecen este problema pueden llegar a completamente ser inservibles, por lo que se evitará siempre su uso en tales circunstancias.

2.2.4.6. Incertidumbres de medida

La incertidumbre en el cálculo de caudal mediante medidas de velocidad utilizando el método de ultrasonidos por tiempo de tránsito viene definida por las diversas indeterminaciones que se generan en la apreciación de las siguientes componentes:

- Errores cometidos en la determinación de las dimensiones geométricas del cauce o conducto y los generados por la variabilidad de las mismas en el tiempo. A este respecto, los decantados, concreciones y depósitos que pudieran aparecer o acumularse con el tiempo, sobre todo en el lecho de la sección, son de gran importancia.

- Errores cometidos en la medida de la longitud de las líneas entre

transductores y en la determinación del ángulo que forman las líneas con el vector velocidad del flujo.

- Errores introducidos por la medida de nivel de cota de fluido, incluso aquel que pudiera generar un posible efecto venturi en un transductor de presión sumergido.

- Errores cometidos al determinar la velocidad media sobre cada línea sumergida de transepectores, esto es, los introducidos por la integración de los perfiles de velocidad según ISO 6416.

- Errores cometidos en el temporizado de la señal, es decir, en la medida del tiempo de tránsito del pulso ultrasónico.

3. Conclusiones: unidades de control e instalación

En términos de control (**Figura 21**), todas las señales eléctricas que generan los sensores se convierten a unidades físicas en la unidad de control, recomendándose que esté microprocesada y sea capaz de interpretar las señales eléctricas proporcionales al parámetro medido que emiten los sensores. También deberá procesar los valores para proporcionar el caudal circulante. Los datos recogidos deberán almacenarse en una memoria de estado sólido tipo *datalogger*.

Los sistemas actuales incorporan un módem GSM/GPRS capaz de

Los sistemas actuales para medir la velocidad del fluido se pueden diferenciar en dos categorías: los que permiten medir con sensores que no se encuentran en contacto con el fluido; y los que se encuentran dentro del fluido. Antes de su instalación, conviene visitar y estudiar los puntos a controlar para diseñar un sistema eficiente de medida y decidir el método más adecuado

Figura 22. Instalación de métodos de medida en un colector.



transmitir los datos almacenados a un servidor de Internet por tecnología FTP Push Operation, siendo un método muy eficaz que minimiza los costes generados por el operador de la telefonía. Los datos se pueden almacenar en un servidor dedicado, pudiéndose consultar desde un dispositivo de consulta en web, por ejemplo PC, tablet, smartphone, etc. El servidor deberá ser capaz de enviar alarmas vía SMS, correo electrónico, etc.

La electrónica de control deberá de instalarse en una garita antivandálica, capaz de repeler los actos vandálicos habituales en el campo y zonas de escasa vigilancia. Al encontrarse en zonas inhóspitas, será necesario recurrir a la energía fotovoltaica para alimentar los instrumentos y los elementos de transmisión de los datos.

En cuanto a su instalación (**Figura 22**), es aconsejable que previamente a la instalación de los sistemas de medida, se visiten y estudien los puntos a controlar, para diseñar un sistema eficiente de medida y decidir el método más adecuado a la instalación. No existe un método universal capaz de medir en cualquier punto, por lo que será recomendable contactar con empresas que dispongan de métodos de medida variados, de esta forma podremos asegurar una medida eficiente.

La instalación deberá realizarse por personal especializado y preparado para cumplir la normativa existente de seguridad y salud.

Los técnicos de instalaciones deberán estar cualificados para trabajar en ambientes confinados (colectores de saneamiento con gases tóxicos

y riesgo de explosión), cumpliendo con las reglamentaciones existentes en materias de prevención y riesgos laborales. Todos estos trabajos se realizan con los EPIs requeridos, detectores de gases, botellas para respiración asistida, botellas de evacuación, tripodes, etc.

Bibliografía

- [1] VDI/VDE 2640 (1993). Netzmessungen in Strömungsquerschnitten, Allgemeine Richtlinien und mathematische Verfahren. Blatt Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- [2] VDI/VDE 2642 (1996). Ultraschall-Durchflußmessung von Fluiden in voll durchströmten Rohrleitungen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- [3] ISO 6416 (1992). Measurement of liquid flow in open channels – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method. International Organization for Standardization, Switzerland, 2. Auflage.
- [4] Cole, J.A. (1979). The deflection of an acoustic beam by temperature and salinity gradients. WDU/WRC Ultrasonics River Gauging Seminar Reading.
- [5] Del Grosso (1974). Journal of the Acoustical Society of America, núm. 56, pág. 1.084.
- [6] Fiedler, O. (1992). Strömungs- und Durchflußmeßtechnik. R. Oldenbourg Verlag München Wien.
- [7] Erb, H.G. (1997). Durchflussmeßtechnik für die Wasser- und Abwasserwirtschaft. Vulkan-Verlag, Essen.
- [8] Bonfig, K.W. (1993). Sensoren und mikroelektronik. Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen.
- [9] Pandtl, L.; Oswatitsch, K.; Wieghardt, K. (1984). Führer durch die Strömungslehre. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 8. Auflage.
- [10] Laenen, A.; Smith, W. (1983). Acoustic systems for the measurement of streamflow. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2213.
- [11] Koelling, C. (1994). Finite - Element - Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen. Heft 60 Hydraulik und Gewässerkunde, TU München.
- [12] Rack, C. (1982). Unsicherheiten bei der Abflußmessung mit Ultraschall und mit Meßflügeln in offenen Gerinnen. In: Mitteilung, Nr. 100, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin.
- [13] Pegelvorschrift, Anlage, D. (1992). Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. Verlag Paul Parey, Hamburg Berlin.
- [14] Erb, H.G. (2000). Was fließt im Kanal? Durchflussmessung in der Praxis. KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Heft Nr.11. 