

DESARROLLO DE UN CAUDALÍMETRO DIGITAL PARA LA MEDICIÓN DE CAUDAL EN RÍOS

DEVELOPMENT OF A DIGITAL FLOW METER FOR THE MEASUREMENT OF RIVERS FLOW

Flavio Humberto Fernández Morales¹
Julio Enrique Duarte²

Recibido: Agosto 17 de 2012
Aceptado: Diciembre 06 de 2012

RESUMEN

El ser humano siempre ha tenido la necesidad de conocer las cantidades de agua que fluyen en los ríos, con fines de aprovechamiento, de prevención o de mitigación de los daños causados por las inundaciones. Además, el calentamiento global está generando un cambio climático que influye, entre otros aspectos, en los patrones de lluvia y en la disponibilidad de los recursos hídricos. Por ello se hace necesario el monitoreo permanente de las cuencas hidrográficas para detectar alteraciones y tomar los correctivos adecuados.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un medidor de caudal para ríos que facilita la recolección de información. El proceso se basa en la detección de la velocidad de la corriente de agua a través de una sección transversal del río. Para medir la velocidad se utilizó una hélice con un Sensor de efecto Hall acoplado a ella. La profundidad del río se mide con un Sensor de presión debidamente patronado. Las señales son acopladas a un micro-controlador que procesa, almacena y visualiza localmente la información, a la vez que permite su transferencia a un computador para el análisis por parte del usuario final. En el texto se presenta la estructura del prototipo, al igual que los resultados más interesantes del proceso de calibración.

PALABRAS CLAVE: Medición de caudal, caudalímetro, hidrográma, aforo de ríos.

¹ Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital 'Francisco José de Caldas'

Doctor en Ingeniería Electrónica, Universidad de Barcelona. Profesor Titular, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama
E-Mail: flaviofm1@gmail.com

² Licenciado en Física, Universidad Industrial de Santander

Doctor en Física, Universidad de Barcelona. Profesor Titular, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama
E-Mail: julioenrique1@gmail.com

^{1,2} Grupo de Energía y Aplicación de Nuevas Tecnologías (GEANT). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama. Carrera 18 Calle 23, Duitama, Boyacá, Colombia.

ABSTRACT

Human beings have always required the knowledge of the amounts of water that flows through rivers in order to take advantage of it, as well as to prevent and reduce flood related problems. Furthermore, the global heating is originating climatic changes that influence the rain patterns as well as the availability of the hydric resources. In this way, it is necessary to monitorize permanently the hydrographic basins in order to detect and correct possible alterations.

This work deals with the design of a digital flow meter to measure the volume of water flowing in a river which allows collecting information. The process is based on the detection of the water's current velocity through a cross-section of a river. It was used a helix with an effect hall sensor coupled to it to measure the velocity. The river's depth is measured with a pressure sensor conveniently adjusted. Signals are coupled to a microcontroller which processes, storages and visualizes the information locally, transferring it to a computer in order to be analyzed by the final user. The text includes the prototype's structure as well as the most relevant results of the calibration procedure.

KEY WORDS: Wealth measurement, flow meter, hydrogram, gauge water.

Introducción

El ser humano siempre ha tenido la necesidad de conocer las cantidades de agua que fluyen en los ríos, con fines de aprovechamiento, de prevención o de mitigación de los daños causados por las inundaciones. Además, hoy en día nos encontramos frente a un cambio climático provocado por la actividad industrial, los automóviles, los grandes cultivos y la manutención de ganados, todo aquello que permite la supervivencia de los más de 7 mil millones de seres humanos que poblamos el planeta, provocando con ello grandes alteraciones. Una de ellas, quizás la más preocupante, es el calentamiento global de la Tierra generado por un aumento del efecto invernadero. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo, especialmente aquellos inducidos en los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc; esto debido a causas naturales y en los últimos siglos, también a la acción del hombre (Melillo et al., 1990; Melillo et al., 1993; Mozonbanky 2009).

Al versen alterados los patrones de precipitación, se hace necesario un monitoreo hídrico que permita la evaluación de características de calidad, cantidad y continuidad del recurso. El monitoreo se puede realizar con equipos manuales y automáticos, cuya función es la de captar información que, al ser procesada por el usuario final, permitirá constituir mecanismos de prevención para establecer sistemas de alertas, pronósticos y detección de eventos meteorológicos y climáticos de carácter catastrófico (Peña, 2008; Natalichio, 2008).

Para la estimación de caudales se dispone de metodologías que requieren aparatos usualmente sofisticados y costosos, que las hacen de difícil acceso y limitan su incorporación en los procesos rutinarios de caracterización de corrientes hídricas (Rivera, 1999; Poveda, 2004). Por lo anterior, se hace necesario desarrollar instrumentos confiables para la medición de caudal en ríos, los

cuales deben contar con la suficiente tecnología para sustituir los equipos importados con una inversión económica menor.

En vista de lo anterior, se planteó el desarrollo de un medidor de caudal para ríos que permita la captura y el procesamiento de la información de una manera automática y confiable, tanto para el operador como para el usuario final. A continuación se describe la estructura del equipo propuesto, su funcionamiento y los principales resultados obtenidos en la caracterización del mismo.

2. Materiales y métodos

2.1. Caudal de un río y métodos de medición

El caudal de un río es la cantidad, o volumen, de agua que pasa por una sección determinada en un tiempo determinado. El caudal está dado en función de la sección transversal (m^2) y por la velocidad (m/s) a la que el agua atraviesa la sección y se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/s). El problema consiste en determinar la velocidad, ya que es variable para cada punto del cauce y aunque se pueden usar métodos de aproximación, lo normal es considerar los datos ofrecidos por las estaciones de aforo instaladas hidrográficamente. Los caudales en corrientes naturales se generan por la interacción que existe entre las precipitaciones que caen en su cuenca y las características propias de dicha cuenca. Las magnitudes de los caudales dependen de características como: intensidad de las lluvias, duración, patrones temporales y distribución sobre el área, además de las características morfológicas y fisiográficas de la cuenca (Compagnucci, 2007).

El diagrama que representa la variación del caudal con el tiempo en una sección particular de una corriente se denomina hidrográma. Los hidrográmas se utilizan para analizar el comportamiento histórico de un río en un sitio determinado (Díaz, 2001). Dentro del

procedimiento que se utiliza para elaborar los hidrográmas se encuentra la ejecución de aforos, o sea la medición puntual de los caudales en sitios estratégicos del río. Dentro de las técnicas más comunes de aforo se tienen: utilización de vertederos, aforo por vadeo, aforo con correntómetro o molinete, método de la velocidad superficial y la utilización de trazadores (IDEAM, 1999).

Aforo con vertedero: los vertederos son diques o paredes que se oponen al flujo, que poseen una escotadura con una forma geométrica regular, por la cual pasa la corriente a medir. En general hay dos tipos de vertederos: los de pared delgada, que se usan para determinar el caudal en una corriente pequeña, y los vertederos de pared gruesa que se usan para el control de excedencias del recurso, y su evacuación puede ser libre o controlada.

Aforo por vadeo: se puede emplear cuando la corriente es poco profunda, menos de 1 m, y con velocidades no mayores de 1 m/s. En este tipo de aforo el operador se debe parar de tal forma que no obstruya el flujo con su cuerpo. Cuando la profundidad es grande, el aforo se puede hacer desde un bote, puente hidrométrico o tarabita; además, si se está trabajando a una altura superior a 3 m, con respecto al punto más profundo de la sección, se usa un lastre o escandallo al final del cable del molinete para mantenerlo en posición vertical (Castro, 2008).

Para determinar el caudal en una corriente se usa el concepto:

$$Q = V_m A \quad (1)$$

Donde:

Q: caudal (m³/s)

V_m: velocidad media de la sección (m/s)

A: área de la sección (m²)

Aforo con molinete o correntómetro: para este tipo de aforo es fundamental establecer la sección transversal donde se va a realizar el aforo, la cual

debe ser de fácil acceso. Igualmente, se debe seleccionar el tramo de la corriente con una longitud apreciable y de sección constante, que permita considerar condiciones cercanas al flujo uniforme tanto longitudinal como transversalmente. Además se deben evitar estructuras que obstaculicen el paso del flujo.

El método para aforar una corriente es el método volumétrico, el cual determina en cuánto tiempo se llena un volumen conocido; esta técnica se usa para corrientes de caudal pequeño (Sánchez, 2004). La velocidad del caudal se determina a través de un molinete, conformado por una hélice que gira a la velocidad de la corriente, cuya ecuación general es:

$$V_m = an + b \quad (2)$$

Donde:

V_m: velocidad de la corriente (m/s)

n: número de revoluciones de la hélice (rad/s)

a: constante de paso hidráulico, obtenida experimentalmente en ensayos de arrastre en (m)

b: constante que considera la inercia y velocidad mínima para que la hélice se mueva (m/s).

Para determinar el área de la sección transversal del río hay que medir el ancho de la sección, junto con las profundidades, cada metro, a lo largo de la misma, de modo que, como mínimo, por cada subdivisión pase el 10% del caudal total; estas profundidades se miden con la ayuda de varillas o ecosondas. El caudal total que pasa por la sección transversal del río, se obtiene como la suma de los caudales parciales de cada subdivisión. El concepto anterior se ilustra en la figura 1, en donde H representa la profundidad de cada subárea, L representa la longitud y v la velocidad del flujo en cada subárea, en las cuales se divide la sección transversal del río.

El método seleccionado en este proyecto fue la técnica de aforo con molinete, el cual consiste en medir la velocidad a 0.2 y 0.8 de la profundidad total a partir de la superficie, siendo V_m el

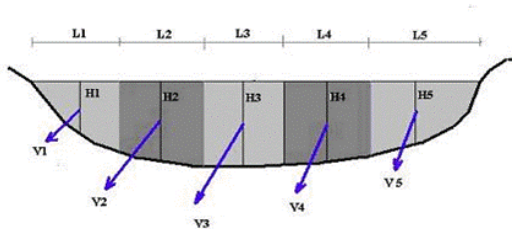


Figura 1. Sección transversal de una corriente de agua (Carvajal, 2000).

promedio de ambas velocidades. Para la toma de datos se debe escoger una sección del río, la cual se divide en 10 partes iguales, donde en cada subárea se toma el valor de la profundidad y a este dato se le debe calcular el 80% y 20%, para saber a que profundidad tomar los datos de las revoluciones.

Por cada subdivisión se toman dos datos de revoluciones, para un total de 18 datos; los dos datos restantes corresponden a los extremos y se toman a 2/3 de la profundidad total. Para hallar el área, por cada subdivisión se toma un dato de la profundidad obteniéndose un valor para cada subárea y la sumatoria de estas da como resultado el valor del área de la sección transversal del río.

2.2. Sistema propuesto

El medidor de caudal se presenta en un diagrama de bloques donde se incluyen las diversas funciones a realizar, ver figura 2. Existe una primera variable física, el Nivel, ubicada en la sección transversal del río, la cual es necesaria para calcular el área o sección hidráulica del río que se está aforando. Una segunda variable física, las Revoluciones, es necesaria para obtener la velocidad media del río, esta variable se determina a través de la velocidad angular de una hélice que gira impulsada por el movimiento del agua.

El nivel se mide por el método de la presión hidrostática, a través de un sensor electrónico de presión. La velocidad se determina con un sensor de efecto hall, el cual permite establecer la velocidad de giro de la hélice sumergida.

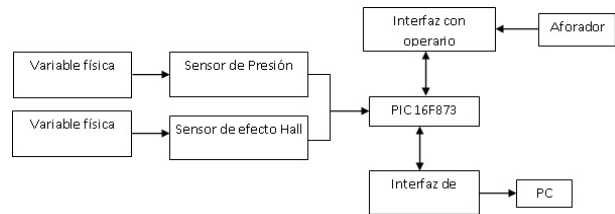


Figura 2. Diagrama de Bloques del Medidor de Caudal.

Estas variables se llevan a una tarjeta de control, gobernada por un microcontrolador, la cual se encarga de recibir las señales generadas por los sensores, cuyo valor puede ser observado localmente en una pantalla de cristal líquido. Igualmente, la tarjeta almacena los datos y se encarga de enviar la información a un computador personal (PC), a través de la interfaz que permite la comunicación entre la tarjeta de control y el PC.

3. Resultados y discusión

3.1. Componentes del medidor de caudal.

Hélice: Se seleccionó una hélice plástica marca M.E.S., la cual cumple con los requisitos de bajo costo, trabaja a altas revoluciones, posee un alto torque de arranque y no sufre deterioro al contacto con el agua. La hélice tiene las siguientes características mecánicas: diámetro exterior 100 mm, diámetro interior 25 mm, cuerda varía de 1.6 a 6.5 mm y posee un ángulo de paso de 32 (Andrew, 1994).

Esta hélice es la encargada de detectar la velocidad de la corriente del río, va montada en un soporte de acero inoxidable que, a su vez, va ajustado en un aro del mismo material; el cual tiene la función de encaminar el flujo de agua hacia la hélice, además de soportar el sensor que registra las revoluciones. A este aro se le enrosca un tubo con un espesor de 3/8 de pulgada, el cual sirve para alojar la manguera que va al sensor de presión para medir la profundidad.

Sensores: Se utilizó un sensor de efecto Hall,

OH090U, el cual se escogió teniendo en cuenta su economía, rapidez de respuesta y fidelidad en la señal de salida, junto con su reducido tamaño. Este sensor permite convertir las revoluciones de la hélice en pulsos eléctricos que son procesados por el sistema electrónico. El sensor se encapsuló en una resina para minimizar los efectos del agua, ver figura 3.

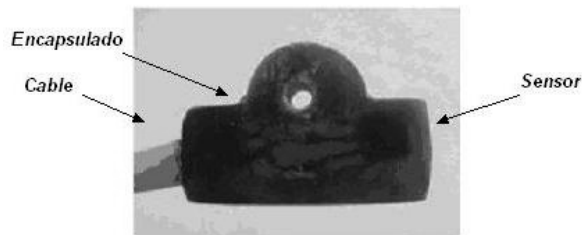


Figura 3. Encapsulado del sensor de efecto hall.

Para establecer la profundidad a la cual se ubica la hélice, se utilizó un sensor inteligente de presión MPX5050DP. Este sensor opera en un rango de 15 a 115 kPa (2.2 a 16.7 PSI), proporcionando un voltaje de salida que oscila entre 0.2 a 4.8 v. En este caso la profundidad máxima esperada es de 1.5 m.

El sensor de presión va montado en la caja de control, donde se incluyen pulsadores encargados de activar la función de toma de datos, elementos de señalización y pantalla de visualización, junto con el conector de comunicación con el computador. A su vez, el sensor de presión está conectado a la manguera que va en el interior de un tubo de acero inoxidable, el cual soporta el conjunto campana - hélice. Por la manguera entra el agua comprimiendo el aire que hay en su interior, y esto se traduce en el dato de profundidad que permite describir la posición del dispositivo, ver figura 4.

Prototipado final: el medidor de caudal se complementa con la tarjeta de control, la cual permite la adaptación de las señales provenientes de los sensores, una etapa de pulsadores encargados de generar las diferentes señales para la toma y transmisión de datos, elementos de señalización que indican el estado del proceso

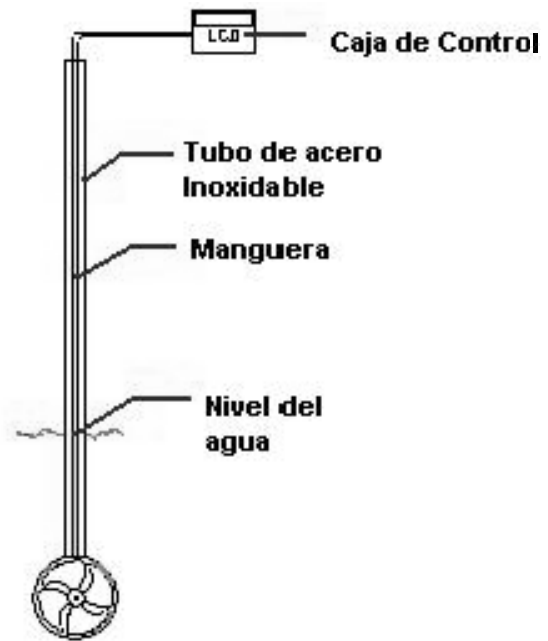


Figura 4. Esquema de la estructura del prototipo propuesto.

llevado a cabo, dos memorias seriales encargadas de almacenar los datos de profundidad y revoluciones, y una etapa de comunicación con el computador a través de un conector DB9. En la figura 5 se observa el prototipo final (Gross, 2003).

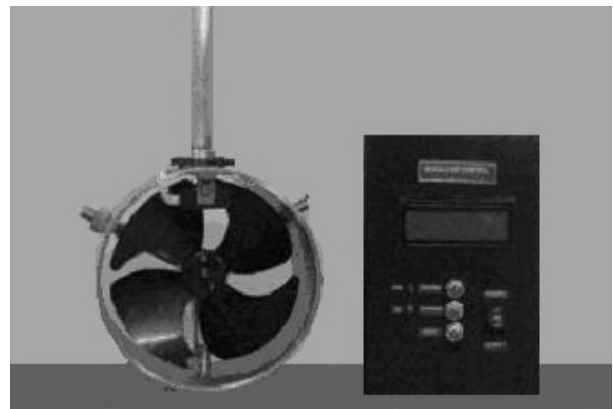


Figura 5. Fotografía prototipo final.

Con el fin de completar el proceso de medición del caudal, es necesario descargar los datos de profundidad y velocidad a un PC, el cual se encarga de realizar las operaciones matemáticas y la presentación de la información en forma gráfica al usuario final.

3.2. Calibración y patronamiento

El objetivo de la calibración y patronamiento es determinar la linealidad, sensibilidad y exactitud del medidor de caudal, con el fin de tener un margen alto de confianza y conocer las características reales de cada uno de los sensores empleados.

Medida de velocidad: Las pruebas finales necesarias para patronar el prototipo propuesto se llevaron a cabo en un canal con fluido estático, disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, ver figura 6.



Figura 6. Canal empleado para el patronamiento del medidor de caudal.

El prototipo va montado en un carro que se mueve sobre rieles a lo largo del canal. Este carro se puede desplazar a diferentes velocidades accionado por un motor eléctrico. En el proceso de caracterización del prototipo se utilizó un recorrido en el canal de 30 m, el cual se mantuvo constante para todas las pruebas. El procedimiento para la toma de datos consistió en medir las revoluciones de la hélice, y el tiempo que tarda el carro en desplazarse los 30 m a diferentes velocidades. Como resultado de este procedimiento se obtuvo una velocidad máxima del caudal de 120 m/s, para un número máximo de revoluciones en la hélice de 170 rpm. La figura 7 muestra la curva característica de la hélice, obtenida a partir de los datos experimentales, la

cual corresponde a la ecuación (Motorola, 2002):

$$V = 0.8182e^{0.0296N} \quad (3)$$

Donde:

V: velocidad de la corriente

N: número de revoluciones de la hélice

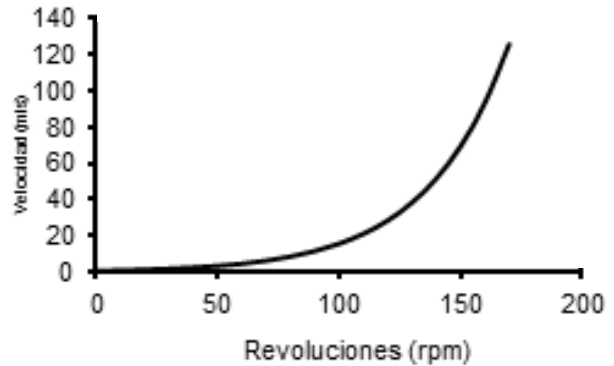


Figura 7. Curva característica de la hélice

La ecuación 3 se obtuvo a partir de la regresión matemática de los resultados experimentales recogidos en el laboratorio. En este caso el número de observaciones fue de 16, obteniéndose un coeficiente de correlación múltiple de 0.948 y un coeficiente de determinación de 0.9. A partir de la curva de calibración mostrada en la figura 7, se obtuvo una exactitud de 90.6% para la velocidad. El proceso de calibración se repitió varias veces, con excelentes resultados dando una reproducibilidad del 98%.

Medida de profundidad: Para calibrar el sensor de profundidad se utilizó una columna estática de agua, la cual se ubicó en una pipeta graduada milimétricamente. El sensor de presión se conectó a una manguera que se sumerge en el agua, y cuya profundidad se puede variar a voluntad.

La señal de salida del sensor se conectó a un microcontrolador, el cual permitió la visualización en una pantalla de cristal líquido. Se realizaron lecturas del valor convertido cada 5 mm. Con esta prueba se pudo verificar la linealidad del sensor en un líquido estático, tal y como lo establecen las

características del fabricante (Motorola, 2002). Esta linealidad no se altera cuando el medidor se ubica en agua corriente. La máxima profundidad permitida en este caso es de 150 cm, y el valor se visualiza en la pantalla con una precisión de 1 cm.

4. Conclusiones

Como resultado de este proyecto se desarrolló un medidor de caudal para ríos, el cual puede ser utilizado con la técnica de aforo por molinete en corrientes de hasta 1.5 m de profundidad.

El instrumento permite la ejecución de catorce aforos, incluye 254 datos de revoluciones y 126 datos de profundidad. En caso de requerirse un mayor número de datos en las lecturas, bastará con efectuar una modificación en el microcontrolador y utilizar memorias de mayor capacidad.

El medidor de caudal desarrollado puede ser transportado fácilmente, debido a su diseño modular y garantiza la seguridad del operario a cargo.

El prototipo aquí descrito presenta un bajo costo frente a los molinetes que normalmente se emplean en este tipo de aforo, al igual que una gran flexibilidad en su aplicación. Es de enorme utilidad para el operario, ya que no necesita llevar el registro manual de los datos que se están recopilando; lo anterior gracias a que el instrumento almacena los datos en una memoria de estado sólido.

Referencias

Andrew, S. Hidráulica Practica, 1994.

Carvajal, L. F. Grupo MF e hidráulica –facultad de minas. Universidad Nacional sede Medellín. In:

<http://poseidon.unalmed.edu.co/MIRH/materias/fluidos/carvajal/docs/tecnicas%20de%20Aforo.pdf> . 2000.

Castro, L., Carvajal, Y. Ingeniería Hidráulica en México. 2008, v 23, n 4, 119-131.

Compagnucci, R., Araneo, D. Ingeniería Hidráulica en México. 2007, v 22, n 3, 23-35.

Díaz, C., Rodríguez, V. Ingeniería Hidráulica en México, 2001.

Gross, A., Roa, R. Tesis de grado. Ingeniería electromecánica. Universidad pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2003).

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales – IDEAM. Subdirección de hidrología. 1999.

Melillo, J. M., McGuire, A., Kicklighter, D.W., Charles, B.M., Vorosmarty, J. & Schloss, A.L. Art and Science Nature 1993, 363, 234-240.

Melillo, J.M., Callaghan, T.V., Woodward, F.I., Salati, E. & Sinha, S.K. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. 1990, 283–310.

Motorola. Sensor Device Data by MPX5050DP. Inc, 2002.

Mozonbanky, S. Eco portal.net. 2009. En: <http://www.ecoport.net/content/view/full/83939/>

Rivera, B., Tangarife, D. Y Rojas, H. Desarrollo metodológico para la caracterización de caudales y niveles de sedimentación. 1999.

Natalichio, R. Ambiente y Sociedad. 2008. año 8, No. 321. In: <http://clima.ecoport.net/>

Peña, C. Terra Ciencia. 2008. En: <http://actualidad.terra.es/ciencia/articulo/cambio-climatico-energias-renovables-tendran-2939442.htm>.

Poveda, G. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2004, 107, 201-222.

Sánchez, F. J. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca, (2004) 11 pp. (En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>)