

DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE UN CORRENTÍMETRO DE PRECISIÓN DE BAJO COSTO PARA ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

**Gustavo J. González^{1,4}, Walter J. D. Cova^{4,5}, Jorge E. Jazni^{1,4}, Sergio D. Olmedo¹,
Sergio J. Farchetto¹, Sergio D. Carrara¹, Juan F. Weber², Javier E. Salomone³**

¹ *CUDAR - Centro Universitario de Desarrollo en Automación y Robótica
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba.
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria,
CP (X5016ZAA) – Córdoba – Argentina.*

² *Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba,
Universidad Tecnológica Nacional.*

³ *Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad Regional Córdoba,
Universidad Tecnológica Nacional.*

⁴ *Departamento Sistemas Electromecánicos, Centro de Investigaciones Aplicadas,
Instituto Universitario Aeronáutico.*

⁵ *Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad Regional La Rioja,
Universidad Tecnológica Nacional.*

Resumen: El presente trabajo expone los criterios adoptados para definir conceptualmente un correntímetro de precisión con indicación digital, atendiendo las necesidades planteadas por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. De acuerdo al estudio de antecedentes realizado y a la tecnología disponible, se propone construir un instrumento mecánico-electrónico para atender a los requerimientos estipulados, especialmente en lo que a costos y a minimización de cuplas de rozamiento se refiere. Además, se formula un modelo físico-matemático, del que se deducen relaciones constructivas y operativas que constituyen hipótesis que habrán de ser verificadas una vez construido un futuro modelo de laboratorio.

Palabras claves: hidrología, aforometría, correntímetro digital, rozamiento mínimo.

1. INTRODUCCIÓN

En función de necesidades de prestación planteadas en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la UTN Facultad Regional Córdoba, se detecta la carencia de instrumentación para medición de bajas velocidades de corrientes de agua y caudales en canales abiertos.

Si bien estos equipos se consiguen en el país, siendo de procedencia nacional o importados, su elevado costo hace que la adquisición se vea dificultada por

los bajos presupuestos disponibles en las instituciones públicas donde resultan necesarios. El alto costo de estos equipos está relacionado tanto con la utilización de dispositivos que manejan una tecnología sofisticada de adquisición y procesamiento de datos o el empleo de componentes mecánicos de con altos requerimientos de precisión para vincular partes móviles y fijas; especialmente cuando la minimización de rozamientos es un requerimiento insoslayable para sensar velocidades de flujo de rango reducido.

La medición de velocidades de corrientes de agua y caudales en canales abiertos (aforometría) constituye una rama altamente desarrollada de los ensayos hidrológicos. Para tal fin se emplean diferentes tipos de correntímetros, cuya procedencia puede ser tanto nacional como importada. Sin embargo, estos instrumentos y en especial aquellos destinados a la medición de bajas velocidades de corriente resultan onerosos, ya que emplean tecnologías especiales destinadas a minimizar los errores de medición y a maximizar su confiabilidad.

El objetivo final del presente trabajo es la definición de un dispositivo portátil que cumpla las funciones de sensor y dispositivo final de lectura digital, que asegure resultados precisos con rapidez y sencillez operativa y sea utilizable en la medición de velocidades de corrientes en aguas poco profundas (hasta 3 m) como lo son las de canales, lagos o esteros, que se encuentren en el rango comprendido entre 0,1 m/s a 3 m/s y que, asimismo, pueda ser utilizado en laboratorios de hidráulica tanto para aplicaciones académicas, como para la prestación de servicios.

En la Sección 2, se realizan consideraciones atinentes al diseño conceptual de los subsistemas mecánico y electrónico que integran el instrumento. Por su parte la Sección 3 se encuentra dedicada a la formulación de un modelo matemático del funcionamiento del dispositivo; mientras que, finalmente, la Sección 4 sintetiza las conclusiones y futuros desarrollos a realizar.

2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

2.1. Sensor primario.

Por lo que hace al sensor primario empleado, el estado del arte indica que se utilizan de diferentes tipos tales como: sensores acústicos o Doppler, tubos de Pitot, el sensor basado en la inclinación de un elemento de arrastre, el molinete con rotor a eje vertical respecto del campo de flujo (o rotor Savonius) y el molinete con rotor a hélice axial (paralelo al campo del flujo), entre otros. Cada uno de ellos con sus relativas ventajas y desventajas en los distintos casos de posible utilización. Es así que el sensor basado en señales acústicas es usado preferentemente en la medición de las corrientes marítimas. El de tubos de Pitot, requiere el cambio de estos tubos en función de la profundidad y de la velocidad de las corrientes de agua a medir (Gallego-Huidobro, 1984). El sensor basado en la inclinación de un elemento de arrastre, si bien es bastante económico, en la medición influyen aspectos tales como la determinación del coeficiente de resistencia del elemento sensor, donde se debe considerar el número de Reynolds como función de la velocidad del flujo, el tamaño y la forma del objeto

(Hernández-Walls et al., 2004). El rotor de Savonius mide el valor de la velocidad con alguna imprecisión al no poderse establecer con precisión la dirección del flujo de agua. Por su parte, el sensor con rotor axial puede tener inconvenientes en la medición cuando se encuentre influido por oleajes importantes.

En el presente trabajo se considera que el sensor de rotor a hélice axial es el más apropiado para el uso a que se encuentra destinado ya que, en los lugares anteriormente mencionados, las olas que se pueden encontrar son ínfimas y no inducirán errores. Al mismo tiempo es uno de los sensores primarios que requieren menor atención previa a su utilización operativa. Además se cuenta con la posibilidad de realizar la construcción de un modelo de laboratorio con tecnologías y elementos disponibles, lo que facilitará el futuro desarrollo de este producto.

De acuerdo a las características de este tipo de correntímetro, se considerarán por separado las partes esenciales del mismo, abordándose en primer término la mecánica del sensor y el transductor a señal eléctrica-electrónica y, posteriormente, el dispositivo electrónico final de visualización y almacenamiento de datos.

2.2. Partes mecánicas.

Desde el punto de vista mecánico posee una parte fija y una móvil que sustenta la hélice o molinete. Al ser su eje paralelo al flujo de agua, debe soportar una fuerza axial debida a su enfrentamiento con la corriente del fluido y otra fuerza perpendicular a la anterior, debida al peso de la hélice, la cual da origen a la aparición de una cupla resistente al movimiento debida al rozamiento.

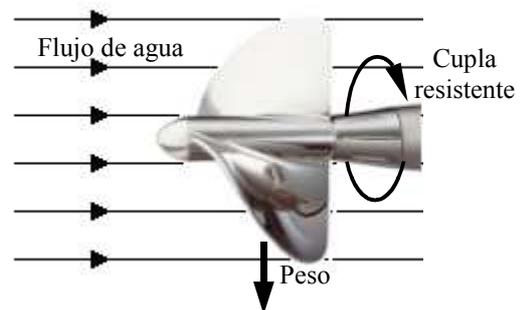


Figura 1. Esquema de trabajo del molinete

Aparece aquí el primer desafío para el diseño del instrumento, ya que han de disminuirse los rozamientos que se producen tanto en forma axial como radial sobre el eje de giro del molinete. En segundo lugar, siendo el molinete un elemento mecánico de elaboración compleja, se aspira al abaratamiento de los costos de fabricación. En este sentido se debe considerar que el maquinado

helicoidal de las palas de la hélice es uno de los aspectos de fundamental incidencia en el costo. Además, normalmente se encuentra que las palas forman parte del cuerpo principal, que hace de vínculo con el soporte fijo, de manera tal que palas y cuerpo principal suelen ser conformados a partir de una única masa de material en bruto. Si bien esta pieza puede ser metálica y maquinada mediante una fresa por CNC, o bien de plástico inyectado en matrices previamente conformadas, los costos de fabricación son de alta incidencia en el valor final del instrumento.

Atendiendo a los inconvenientes planteados, se plantea concretar el diseño mecánico empleando piezas que sean, en su mayoría, metálicas y de revolución; lo que colaboraría a la disminución de los costos de maquinado. La utilización de metales en lugar de plásticos obedece a una cuestión de mayor durabilidad del molinete, ya que las corrientes de agua a medir arrastran diversos tipos de impurezas tales como arena, piedras pequeñas y otros elementos que, tarde o temprano, han de dañar la superficie del rotor si éste fuera fabricado con materiales más blandos. En cuanto a las palas del molinete también se plantea realizarlas en metal, como piezas planas y postizas, lo cual redundará en el abaratamiento global del dispositivo. Se presupone que la simplificación propuesta de palas planas, no se invalidará la relación lineal entre velocidades del flujo y de giro.

Para disminuir el rozamiento que producen las fuerzas axiales sobre el eje, se plantea la posibilidad de utilizar un cojinete del tipo pivote-rubí y, para reducir las cargas radiales originadas por el peso, una vez definidas las piezas necesarias se las dispondrá de tal manera que permitan lograr lo mejor posible el equilibrio hidrostático del rotor sumergido. Esto además de contribuir a minimizar la generación de fuerzas capaces de producir rozamientos que inciden en el error de la medición, se traduce en un menor desgaste de las superficies en contacto relativas al movimiento entre rotor y el eje fijo. Este vínculo se realizará mediante bujes de algún material apropiado.

En cuanto a la conversión del giro de la pieza móvil en señal, entre los distintos transductores analizados, el más simple y el que mejor se adapta a la aplicación es el interruptor eléctrico activado a través de un campo magnético (reed switch). Para su utilización se considera fijar un imán a la parte móvil y el interruptor a la parte fija (soporte) del molinete.

2.3. Subsistema electrónico

Se tratará el estado del arte en este tópico, restringiendo el análisis a dispositivos comerciales existentes que emplean molinetes de palas como sensores primarios de flujo.

Una de las propuestas del mercado es el *Correntímetro Digital Modelo TS-1001* de la firma argentina TECMES, cuyo sistema electrónico es básicamente un contador electrónico con display de cristal líquido de 4 dígitos y señal auditiva para cada giro de la hélice. Visualiza la velocidad de rotación después de 10, 50, 100, 150 o 200 segundos. En la Fig. 2, se puede apreciar la sencillez del dispositivo descrito.



Figura 2. Gabinete de electrónica, correntímetro digital modelo TS 1001

Otra opción analizada es el *Model 2031H Series Real-Time Electronic Flowmeter* (EIJ, 2009) de la firma EIJKELKAMP cuya característica peculiar es poder realizar cuentas de pulso tanto para sensores de efecto de campo como también actuadores magnéticos tipo Reed Switch. Cuenta con una programación de parámetros que permite seleccionar distintas unidades de medición cm/sec., ft/sec., etc. e incluye un software para PC basado en sistema operativo DOS que visualiza en el monitor un *data logging* en tiempo real. Con este software se pueden analizar los datos directamente tanto en velocidad de flujo, como en caudal volumétrico. La conexión del dispositivo remoto con la PC es a través del puerto serial. La alimentación del dispositivo remoto se realiza con una batería de 9 Volt. La longitud del cable provisto es de 30 pies.

La empresa nacional INSTRUMENTOS DEL SUR comercializa un sistema con contador mecánico de reducida precisión.

Una última alternativa analizada y tal vez la más sofisticada, es el producto de la firma IG INSTRUMENTOS cuya electrónica posee las características siguientes:

Basado en Microprocesador, RTC, Display, Batería e EEPROM. Entrada de Pulsos del Molinete y del Medidor de Profundidad. Display 4x20 Líneas. Métodos de recolección de datos estandarizados. Hasta 4048 registros con fecha, hora y datos de medición. Protocolo de comunicación MODBUS. Transportable en barco con autonomía de 72 Horas encendido. Memoria EEPROM extraíble permitiendo ser analizada en laboratorio. Ingreso de datos como

sección transversal y distancia vertical. Batería recargable desde red domiciliaria 220VCA; muy bajo consumo de energía: 35 mA con display. Teclas para el seteo del tipo de medición (por Tiempo, por Pulsos). Frecuencia de Pulsos Molinete 1KHz, contador Up/Dw +/-32767 cuentas.



Figura 3. Gabinete de electrónica, correntímetro de IG INSTRUMENTOS

2.4. Formulación de requerimientos.

Tras analizar las distintas alternativas comerciales, y luego de considerar las necesidades planteadas por el Laboratorio de Hidráulica (UTN-FRC), se considera desarrollar un dispositivo electrónico de prestaciones intermedias, ya que resultará mucho más económico además de cumplir exactamente con las prestaciones necesarias para la aplicación requerida. Así surge la factibilidad de realizar un dispositivo electrónico que contemple las siguientes características y elementos:

- Sensor de velocidad de flujo acoplado magnéticamente a reed switch.
- Estandarización del conexionado eléctrico (se debe poder sumergir en el agua) empleando conector según norma IEC529 estándar IP67, resistente al agua (JISC0920).
- Almacenamiento de la información en una memoria no volátil (EEPROM).
- Capacidad para contar entre 0 y 9999 giros del molinete.
- Capacidad para almacenar un los resultados de 1000 ensayos como mínimo.
- Compatibilidad con los sistemas operativos Linux o Windows del software empleado para la descarga de información a PC.
- Alimentación mediante batería recargable de 9 Volts y capacidad de funcionamiento autónomo durante al menos 12 Hs.

El dispositivo electrónico estará basado en un microcontrolador que permitirá al usuario acceder a las siguientes funcionalidades:

- Selección de ventana de tiempo de ensayo, comprendida entre 1s y 99 segundos.
- Tecla de inicio de la medición de las revoluciones del molinete.
- Tecla de borrado de toda la información almacenada (reset de memoria).
- Visualización en un display de los resultados del ensayo y tecla especial para almacenar o descartar la información.
- Descarga de la información almacenada a una PC mediante la utilización del puerto serial.

2.5. Aspectos de calibración

Una vez que se construya un modelo de laboratorio del dispositivo, habrá de ser calibrado, para lo cual se deberá proceder a medir un número suficiente de pares de valores (velocidad de giro ω , velocidad de la corriente V) que permita determinar una relación funcional de la forma $V = f(\omega)$ que sea estadísticamente consistente. Para ello, se diferencian dos posibles métodos experimentales:

- Aguas quietas y aparato en movimiento. Es el método más confiable. Sin embargo, requiere una infraestructura experimental consistente en un canal de aguas quietas y un carro sobre el que se monta el molinete y que se desplaza a velocidad conocida, pudiéndose variar dicha velocidad. La longitud de canal necesaria es de varias decenas de metros.
- Aparato quieto y aguas en movimiento. Es el método más común, requiere contar con un canal experimental equipado de un sistema de bombeo y de una longitud suficiente para atenuar olas y turbulencias.

3. MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

3.1. Cupla Motriz.

Para calcular la cupla que ejerce el fluido circulante sobre el rotor, se parte de las expresiones integrales de las leyes de conservación de masa y de variación de la cantidad de movimiento (Baker, 2000), obteniéndose:

$$T = \int_{r=a}^{r=R} \delta V_{\text{sal}}^2 \tan(\beta) r \cdot dA_{\text{sal}} - \int_{r=a}^{r=R} \delta V_{\text{ent}} \omega r^2 \cdot dA_{\text{ent}} \quad (1)$$

donde

- T Cupla motriz;
- r Radio de un punto genérico de las palas;
- δ Densidad másica del fluido;
- V Velocidad del fluido;
- β Ángulo entre los planos de las palas y el eje

- del rotor;
 R Radio de punta de las palas;
 a Radio de raíz de las palas;
 ω Velocidad angular del rotor;
 A Área de pasaje.

Para resolver la (1) se adoptan las siguientes hipótesis:

- a) el fluido es incompresible, con lo cual
 $V_{ent} = V_{sal} = V$;
 b) el área de pasaje es constante
 $A_{ent} = A_{sal} = A = 2\pi(R^2 - a^2)$; $dA = 2\pi r \cdot dr$;
 c) el guiado del flujo es perfecto, con lo cual
 $V \tan(\beta) = \omega_i r$, siendo ω_i la velocidad de rotación ideal que mantiene al vector velocidad del fluido paralelo a la dirección de las superficies de las palas;
 d) el perfil de velocidad es uniforme en dirección radial, es decir $V(r) = cte$.

En las condiciones citadas, la (1) se reduce a

$$T = \delta VA \frac{R^2 + a^2}{2} (\omega_i - \omega) \quad (2)$$

e introduciendo el concepto de valor medio cuadrático del radio:

$$r_{rms} = \left[\frac{(R^2 + a^2)}{2} \right]^{1/2}$$

se determina

$$T = \delta VA r_{rms}^2 (\omega_i - \omega). \quad (3)$$

3.2. Cuplas Resistentes

La cupla motriz (3) proporcionada por el fluido es equilibrada por un conjunto de cuplas resistentes, las principales de las cuales para el caso de un correntímetro son: a) la cupla provocada por el rozamiento del fluido sobre la superficie de las palas; y b) la cupla de fricción en los cojinetes. La diferencia entre la velocidad angular ideal del rotor y su velocidad angular real ($\omega_i - \omega$) es la velocidad de deslizamiento (slip) debida al efecto combinado de las cuplas resistentes mencionadas. El efecto predominante corresponde a la cupla debida a la resistencia por fricción del fluido sobre las superficies de las palas. La fuerza de fricción F_d es paralela a la superficie de la pala y su magnitud está dada por la expresión:

$$F_d = \frac{1}{2} \delta V^2 C_d S \quad (4)$$

donde:

- C_d Coeficiente de forma
 S Área de las palas.

El coeficiente de forma para palas planas y flujo turbulento¹, únicamente depende del número de Reynolds (Dubbel, 1950) y se calcula como

$$C_d = 0.074 R_e^{-0.2} \quad (5)$$

$$R_e = V \frac{a_p}{\nu} \quad (6)$$

siendo

- R_e Número de Reynolds basado en la cuerda de las palas,
 a_p Cuerda media de las palas,
 ν Viscosidad cinemática del fluido.

Resulta entonces:

$$F_d = \frac{1}{2} \delta V^2 0.074 R_e^{-0.2} S. \quad (7)$$

Esta fuerza de fricción se descompone en una componente tangencial y una axial. La primera de ellas (denominada F_{dt}) produce una cupla que se opone a la cupla motriz, mientras que la componente axial (F_{da}) deberá ser equilibrada por la reacción del pivot ubicado en el extremo delantero del dispositivo. Si N representa el número total de palas del rotor, dichas fuerzas se calculan como:

$$F_{dt} = \frac{0.074}{2} \delta V^2 R_e^{-0.2} SN \sin(\beta) \quad (8)$$

$$F_{da} = \frac{0.074}{2} \delta V^2 R_e^{-0.2} SN \cos(\beta). \quad (9)$$

La cupla resistente se calcula asumiendo que los puntos de aplicación de las fuerzas tangenciales se encuentran en los puntos medios de las palas. Así, definiendo $r_m = (R+a)/2$ como radio medio, se tiene

$$T_{dt} = F_{dt} r_m \quad (10)$$

$$T_{dt} = 0.037 \delta V^2 R_e^{-0.2} SN r_m \sin(\beta)$$

Se desprecia la cupla T_{da} (originada por la fuerza F_{da}), puesto que esa reacción se produce sobre un radio muy pequeño (casi puntual) con coeficiente de rozamiento bajo. Igualando (3) con (10) se deduce que, en condiciones de régimen:

¹ Para el rango de velocidades a medir (0.1 a 3 m/s) y una cuerda media de pala del orden de 50 mm, resultan valores del número de Reynolds mayores que 3000, por lo que el flujo resulta turbulento en todo el rango de medición.

$$\omega = \omega_i - \frac{0.037 V R_e^{-0.2} S N r_m \sin(\beta)}{A r_{rms}^2} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{V}{r_{rms}} \tan(\beta) \left[1 - 0.037 R_e^{-0.2} \frac{S N r_m}{A r_{rms}^2} \cos(\beta) \right]$$

Se observa que el factor entre paréntesis cuadrados en la última de las (11) define la linealidad del instrumento. Resulta inmediato que para el extremo inferior del rango de velocidades a medir se deberá cumplir

$$0.037 R_{e,\min}^{-0.2} \frac{S N r_m}{A r_{rms}^2} \cos(\beta) \ll 1 \quad (12)$$

relación que se deberá verificar, una vez definidos los parámetros constructivos del correntímetro.

3.3. Comportamiento Dinámico

Centrando ahora el análisis en el comportamiento transitorio del correntímetro en respuesta a variaciones de la velocidad del fluido, se deberá adicionar el efecto de la inercia del rotor a la ecuación de balance de cuplas:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + T_{dt} + T_p \quad (13)$$

donde:

- T cupla motriz, Ec. (3);
- J momento de inercia axial del rotor;
- T_{dt} cupla de fricción, Ec. (10);
- T_p cuplas resistentes parásitas.

Bajo la denominación *cuplas resistentes parásitas* se engloba el efecto de la cupla de cojinetes y las debidas a otros efectos no directamente atribuibles a la fricción del líquido sobre las palas del dispositivo.

La ecuación diferencial a resolver es entonces:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [T - T_{dt} - T_p] \quad (14)$$

y, reemplazando valores, se obtiene el modelo matemático completo que describe la dinámica del correntímetro:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \delta V A r_{rms}^2 \omega = \delta V A r_{rms}^2 \omega_i - F_{dt} r_m - T_p \quad (15)$$

$$\omega_i = V \tan(\beta) / r_{rms} \quad (16)$$

$$F_{dt} = \frac{0.074}{2} \delta V^2 R_e^{-0.2} S N \sin(\beta) \quad (17)$$

$$R_e = V \frac{a_p}{\nu} \quad (18)$$

$$T_p \in [0, T_{p,\max}] \quad (19)$$

Se observa en las (15) que la respuesta dinámica de la velocidad de rotación ante variaciones temporales de la velocidad de flujo V es marcadamente no lineal. Sin embargo, para variaciones en escalón de la velocidad, todos los coeficientes de la ecuación diferencial (15) asumen valores constantes, por lo que en este caso la respuesta temporal $\omega(t)$ será de tipo exponencial, con una constante de tiempo dada por:

$$\tilde{\tau} = \frac{J}{\delta V A r_{rms}^2} \quad (20)$$

Resulta entonces que para cada velocidad de régimen permanente, es invariante el producto

$$\tilde{\tau} V = \frac{J}{\delta A r_{rms}^2} \quad (21)$$

para un correntímetro y un fluido dados. Este resultado coincide con las observaciones experimentales de Higson (1964), referidas al funcionamiento en agua de un caudalímetro de turbina, lo que contribuye a validar el modelo formulado.

De la Ec.(17) se deduce que, para un mismo instrumento y un mismo fluido circulante, la medición de bajas velocidades de corriente implica la existencia de una constante de tiempo elevada. Este hecho deberá ser tenido particularmente en cuenta al momento de realizar la lectura de la velocidad de régimen del líquido en las condiciones apuntadas.

4. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Se formularon especificaciones conceptuales de carácter mecánico, eléctrico y electrónico del instrumento propuesto. Del modelo matemático formulado surgen relaciones constructivas que afectan la linealidad de operación.

Todo lo precedente brinda las bases para la realización constructiva del dispositivo, destacándose la necesidad de realizar ensayos de funcionamiento que permitan verificar y validar las hipótesis adoptadas.

REFERENCIAS

- Baker R., 2000: *Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge University Press.
- Dubbel H. (editor) 1950: *Manual del Constructor de Máquinas*. Segunda edición española. Tomo I.

Cap. IV. Págs. 329-358. Editorial Labor SA,
Barcelona – Madrid – Buenos Aires.

EIJ, 2009: *Digital Flowmeter Mechanical and Electronic Operators Manual*. Eijkelkamp.
<http://www.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/Manuals/M2-1314e%20Mechanical%20flowmeter.pdf>

Gallego–Huidobro J., 1984: *Correntímetro simple y barato para ecología práctica en variedades de agua*. Universidad Laboral de Córdoba. Asociación Española de Limnología. Limnética I, 360-365, España, Madrid

Hernández-Walls R., Luna-Hernández J. R., Rojas-Mayoral E., 2004: *Dispositivo electrónico, de fácil construcción, para medir la velocidad de un fluido*. Ingeniería hidráulica en México , vol.XIX, núm.4, pp.121-128.

Higson D. J., 1964: The transient performance of a turbine flowmeter in water. *J. Sci. Instrum.* **41**, 317-320. (1964).